

ELEKTRANE

PREDAVANJA



Dr. sc. Kemal Hot, redoviti profesor
Elektrotehnički odjel
Tehničko veleučilište u Zagrebu
2002.

Sadržaj:

0. Uvod
1. Termoelektrane
2. Hidroelektrane
3. Generatori u elektrani
4. Uzbuda i regulacija generatora
5. Transformatori u elektrani
6. Vlastita potrošnja elektrane

Literatura:

- [1] Hrvoje Požar, Osnove energetike, II dio, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [2] Tehnička enciklopedija, 3. svezak, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1969.
- [3] Tehnička enciklopedija, 4. svezak, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1973.
- [4] Tehnička enciklopedija, 6. svezak, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1979.
- [5] Joachim Raabe, Hydro Power, VDI-Verlag, 1985
- [6] G.T. Heydt, Electric Power Quality, SCP, West Lafayette, 1994.
- [7] L. Drbal, K. Westra, P. Boston, Power plant engineering, Springer, 1996.
- [8] T.C. Elliott, K. Chen, R.C. Swanekamp, Standard handbook of powerplant engineering, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [9] M.R. Patel, Wind and solar power systems, CRC Press, 1999.

1.

Uvod

0.1 *Općenito o elektranama*

Elektrane su postrojenja u kojima se oblici unutrašnje energije (nuklearna, kemijska, unutrašnja kalorička, kinetička i potencijalna) ili energija Sunčeva zračenja kontinuirano pretvaraju u električnu energiju. Pretvorba (konverzija) primarnih oblika energije se može predložiti kroz izvore koji su:

- Klasični i konvencionalni:
 - Unutarnja energija: nafta, ugljen, plin
 - Potencijalna energija: vodne snage
 - Nuklearna energija: fisija teških elemenata (uran, torij)
- Alternativni i nekonvencionalni:
 - Unutarnja energija: uljni škriljevci, bitumenozni pijesak, biomasa, bioplin
 - Potencijalna energija: plima i oseka, valovi
 - Kinetička energija: vjetar
 - Toplinska energija: suhe stijene u Zemljinoj kori, more, vrući izvori
 - Nuklearna energija: fuzija lakih atoma
 - Zračenje: Sunce

Prema primarnoj energiji, koja se u elektrani pretvara u električnu energiju, razlikuju se sljedeće vrste elektrana:

- 1) termoelektrane,
- 2) nuklearne elektrane,
- 3) geotermalne elektrane
- 4) hidroelektrane,
- 5) vjetroelektrane i
- 6) solarne elektrane.

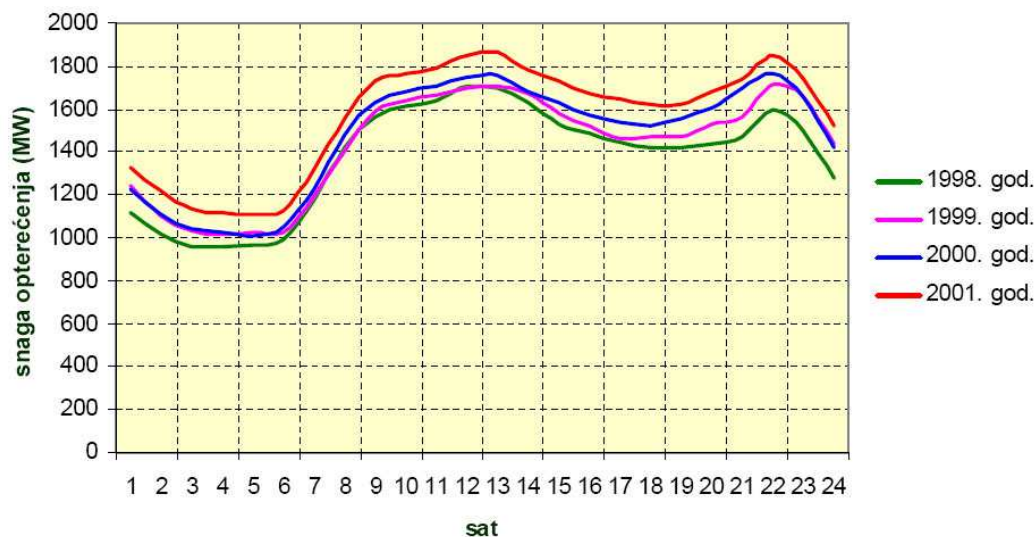
Ako klasifikaciju provodimo prema pogonskom stroju, prve tri vrste gore spadaju zajedno (općenito termoelektrane).



Sl. 0-1 - Pretvorba primarnih oblika energije u električnu energiju

Električna energija se iz mehaničke u električnu pretvara pomoću generatora. Za pogon generatora kao izvora električne energije predviđeni su u svakoj elektrani pogonski strojevi (vodne turbine, parne turbine, plinske turbine, motori s unutarnjim izgaranjem, elisa za pogon vjetrom). Osim pogonskih strojeva postoje i svi ostali uređaji i naprave neophodni za pogon tih strojeva; za regulaciju, kontrolu, upravljanje i druge namjene.

Temeljni je zadatak elektrana proizvesti potrebnu količinu električne energije (djelatne i jalove) u trenutku kada je potrošač traži. Električna energija (u iznosima o kojima ovdje govorimo) ne može se akumulirati (pohraniti), te proizvodnja električne energije mora u svakom trenutku biti jednaka potražnji (potrošnji) koja se karakteristično mijenja (sl. 0.2)



Sl. 0-2 - Dnevni dijagram opterećenja: karakteristična srijeda u srpnju

Elektrane se rijetko grade kao izolirana postrojenja za napajanje samo određenih potrošača, primjerice neke industrije locirane daleko od postojećih električnih mreža. One su redovito dio elektroenergetskog sustava (EES) koji, osim većeg broja elektrana za proizvodnju električne energije, obuhvaća još cjelokupnu elektroenergetsku mrežu, sklopna postrojenja za razvod i transformaciju električne energije, te postrojenja, uređaje i aparate u kojima se električna energija kod potrošača pretvara u onaj oblik energije (korisni oblici energije) koji mu je potreban (mehaničku energiju, kemijsku energiju, svjetlo, toplinu i dr.).

Rad pojedine elektrane u EES-u ovisi i o radu drugih elektrana i potrošnji u sustavu. Stoga se elektrana ne može promatrati neovisno od sustava, nego je način njezine izgradnje kao i dimenzioniranje njezinih uređaja i izbor njihovih pogonskih karakteristika ovisan o utjecaju EES-a.

0.2 **Temeljne energetske značajke elektrana**

Osnovna značajka svake elektrane je njena nazivna (**instalirana**) snaga S_{Ei} , koja se dobije kao aritmetički zbroj naznačenih prividnih snaga s natpisnih pločica generatora S_{gn} u [MVA], ili nazivnih snaga primarnih pogonskih strojeva P_{gn} u [MW].

Maksimalna snaga elektrane je ona najveća snaga ($P_{Em} < P_{Ei}$) koju elektrana kao cjelina može dati, uz pretpostavku da su svi dijelovi elektrane sposobni za pogon. Pri tom se u slučaju hidroelektrane pretpostavlja da su protok i pad optimalni. U slučaju parne termoelektrane pretpostavlja se da je na raspolaganju dovoljna količina goriva propisane kvalitete te da je osigurana dovoljna količina tehnološke vode normalne temperature i čistoće za napajanje generatora pare kao i za hlađenje kondenzata.

Prilikom određivanja maksimalne snage elektrane ne zahtijeva se postizanje optimalnog stupnja korisnosti cijelog postrojenja elektrane, ali se u obzir uzimaju utjecaji svih njegovih dijelova. Primjerice, u slučaju hidroelektrana razmatraju se i dimenzije dovodnih i odvodnih uređaja, a u slučaju termoelektrana na paru, kapacitet dopreme ugljena, stanje kotlova, kapacitet sustava za otpremu šljake i pepela, dovod vode itd. U slučaju plinskih termoelektrana u obzir se uzimaju vrsta i kvaliteta goriva.

Raspoloživa snaga je najveća snaga koju elektrana može proizvesti u nekom trenutku, uvažavajući stvarno stanje pomoćnih pogona u elektrani i vanjske (vremenske i dr.) uvjete, uz pretpostavku da nema ograničenja usljed zahtijevane proizvodnje jalove snage.

Prilikom određivanja raspoložive snage hidroelektrana, potrebno je uzeti u obzir raspoloživi trenutni pad i dotok vode. U slučaju termoelektrana na paru, u obzir je potrebno uzeti kvalitetu goriva, kao i količina i temperaturu tehnološke vode, odnosno vrstu i kvalitetu goriva, nadmorsku visina i temperaturu okolnog zraka u slučaju plinskih termoelektrana.

Vlastita potrošnja je snaga koja je potrebna za rad pomoćnih pogona elektrane: raznih crpki, ventilatora, mlinova, sustava za dopremu ugljena, otpremu šljake i pepela u slučaju termoelektrana na paru, kompresora i ventilatora u slučaju plinskih termoelektrana, a crpki i ventilatora u slučaju hidroelektrana.

Udjel vlastite potrošnje znatno je veći u slučaju termoelektrana na paru ($6 \div 12\%$ nazivne snage), nego u slučaju hidroelektrana i plinskih termoelektrana ($0,5 \div 2\%$ nazivne snage).

Hidroelektrane imaju još jednu karakterističnu veličinu koja na neki način dopunjuje pojam instalirane snage. To je **veličina izgradnje**, odnosno maksimalni protok u $[m^3/s]$ koji elektrana može iskoristiti (bez obzira na stupanj korisnog djelovanja), uzimajući u obzir stanje svih dijelova postrojenja.

Hidroelektrane u Hrvatskoj

AKUMULACIJSKA HIDROELEKTRANA	Raspoloživa snaga na pragu (MW)	PROTOČNA HIDROELEKTRANA	Raspoloživa snaga na pragu (MW)
HE Zakučac	486	HE Varaždin	86.5
RHE Velebit	276/-240	HE Čakovec	82
HE Orlovac	237	HE Dubrava	82.4
HE Senj	216	HE Gojak	48
HE Dubrovnik	216	HE Rijeka	36
HE Vinodol	90	HE Miljacka	24
HE Kraljevac	46.4	HE Golubić	6.5
HE Peruća	41.6	HE Jaruga	7.2
HE Đale	40.8	HE Ozaļ	5.2
HE Sklope	22.5	HE Krčić	0.3
CS Buško Blato	11.4/-10.3	Oznake: CS: crpna stanica CHE: crpna HE RHE: reverzibilna HE	
CHE Fužine	4/-4.8		
HE Zavrelje	2		
CHE Lepenica	1.4		
HE Zeleni Vir	1.4		

Moguća godišnja proizvodnja elektrane više je karakterističan pokazatelj za hidroelektrane (jer se one dimenzioniraju s obzirom na energiju), nego za termoelektrane (koje se dimenzioniraju s obzirom na snagu) i određuje se različito za svaku od karakterističnih grupa elektrana.

Ukupna instalirana snaga u svim elektranama u Hrvatskoj je 3826,5 MW. U TE je instalirano 1761,6 MW (bez NE Krško, gdje je hrvatski udjel 350 MW odnosno 50%).

U HE je instalirano 2064,9 MW. Najjači izvor je HE Zakučac snage 500 MW, a najveća termoelektrana je TE Sisak snage 420 MW.

Trenutno je u izgradnji HE Lešće čija će instalirana snaga biti 43,2 MW. Puštanje u pogon očekuje se koncem 2009. godine.

Povećanje potrošnje električne energije u 2003. godini u Hrvatskoj je iznosilo 4.7%. Vršno opterećenje sustava iznosilo je cca 1,9 TWh/h u srpnju i cca 2,7 TWh/h u prosincu, što je povoljnije nego dvije godine ranije (cca 1,75 odnosno cca 2,8 TWh/h). Ukupna proizvodnja je dosegla 13,22 TWh (s NE Krško), ali je za potrebe sustava moralo biti uvezeno još 2,3 TWh električne energije.

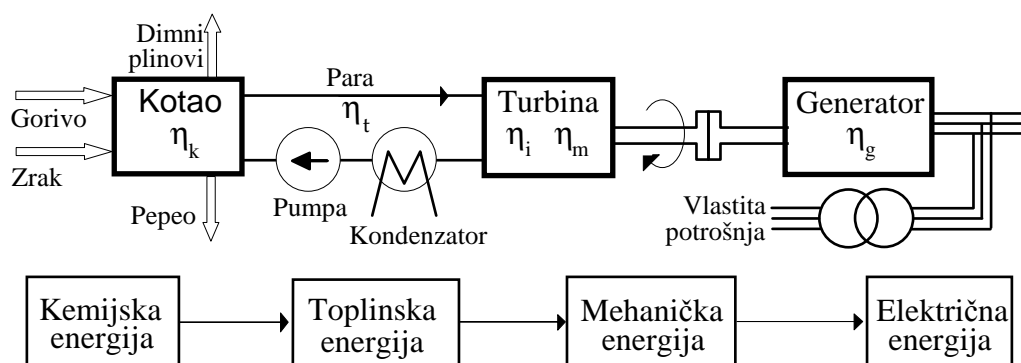
Termoelektrane u Hrvatskoj

TERMoeLEKTRANA	Raspoloživa snaga na pragu (MW)	Gorivo
TE Sisak	396	loživo ulje / prirodni plin
TE-TO Zagreb	337/400	loživo ulje / prirodni plin
TE Rijeka	303	loživo ulje
TE Plomin I	102	ugljen
EL-TO Zagreb	87/300	loživo ulje / prirodni plin
KTE Jertovec	83	prirodni plin / ekstralako ulje
PTE Osijek	48	prirodni plin / ekstralako ulje
TE-TO Osijek	42/90	loživo ulje / prirodni plin
Interventne DIESEL (4)	29	D2 ulje
TE Plomin II ¹⁾	192	ugljen
NE Krško ²⁾ (50%)	350	UO ₂
¹⁾ U vlasništvu TE Plomin d.o.o. (suvlasnici HEP 50%, RWE Power 50%) ²⁾ Polovina ukupne snage kojom raspolaže HEP d.d. (HEP 50%, ELESGEN 50%)		

1. Termoelektrane

1.1 Namjena postrojenja i izbor procesa

Električna energija se u značajnim količinama proizvodi u termoelektranama i u hidroelektranama. Elektrane na vjetar, plimu i osjeku ili sunce su od drugorazrednog značaja obzirom na mali doprinos u ukupno proizvedenoj energiji. U termoelektranama se kao gorivo koriste ugljen (kameni, mrki ili lignit), nafta, plin i u nuklearnim elektranama fisiona goriva. Udio termoelektrana u proizvodnji električne energije varira od zemlje do zemlje obzirom na raspoložive vodene snage. Primjerice u Njemačkoj proizvodnja u termoelektranama ima udio preko 90%, dok je u Švedskoj i Švicarskoj manja od one u hidroelektranama.



Sl. 1.1- Pretvorba energije u termoelektrani

Na sl.1.1 je shematski prikazana posredna pretvorba kemijske energije goriva u električnu energiju u jednoj termoelektrani. Voda odnosno vodena para cirkuliraju kao radni medij između kotla i turbine. Pumpom u kotao dopremljena voda tamo isparava kod visokog tlaka, a proizvedena para se pregrijava. Pregrijava para se privodi turbini i u njoj ekspandira proizvodeći mehaničku energiju za pogon generatora. Ekspandirana para se zgušnjava u kondenzatoru kod visokog podtlaka, te se kao kondenzat tjeran pumpom vraća nazad u kotao. Ovakav grubi opis kružnog tijeka procesa odgovara kondenzacionoj termoelektrani.

Spojevi pojedinih dijelova termoelektrane su u određenoj mjeri prilagodljivi, a s obzirom na ulogu termoelektrane u elektroenergetskom sustavu razlikuju se izvedbe za temeljno, srednje i vršno opterećenje. Kombinacija ovakvih postrojenja u jednoj mreži omogućava gospodarski optimalno napajanje konzuma. U planovima izgradnje elektrana može se sa sigurnošću utvrditi, s obzirom na određeno stanje u sistemu, kakva će slijedeća jedinica biti ekonomski najopravdanija.

Kod postrojenja za temeljno opterećenje tehničko rješenje i vođenje procesa postavljeni su tako da se postigne čim manja potrošnja goriva po proizvedenoj električnoj energiji. Definiramo specifičnu potrošnju topline q u kJ/kWh kao rezultat vrijednosti donje ogrjevne moći goriva H_i u kJ/kg, potrebne količine goriva u jedinici vremena B u kg/h i proizvedene električne energije P u kWh:

Donja ogrjevnja moć iznosi za kameni ugljen 27 do 33 MJ/kg, za mrki ugljen 7 do 12 MJ/kg, za naftu 38 do 44 MJ/kg i za zemni plin 34 do 42 MJ/nm³. Ukoliko nije poznata donja ogrjevnja moć, moramo imati podatke o gornjoj ogrjevnoj moći H_s u kJ/kg i relativnim težinskim udjelima vode (vlage w) i plinova (vodika h), pa računati donju ogrjevnju moć prema relaciji:

Kod postrojenja za temeljno opterećenje postiže se specifična potrošnja topline danas od solidnih 12 do izvrsnih 8 MJ/kWh. Kao značajke specifične potrošnje topline uzimaju se stupnjevi iskorištenja pojedinih dijelova postrojenja, pa prema sl. 1.1 ukupni stupanj iskorištenja cijele termoelektrane (izuzimajući vlastitu potrošnju) iznosi:

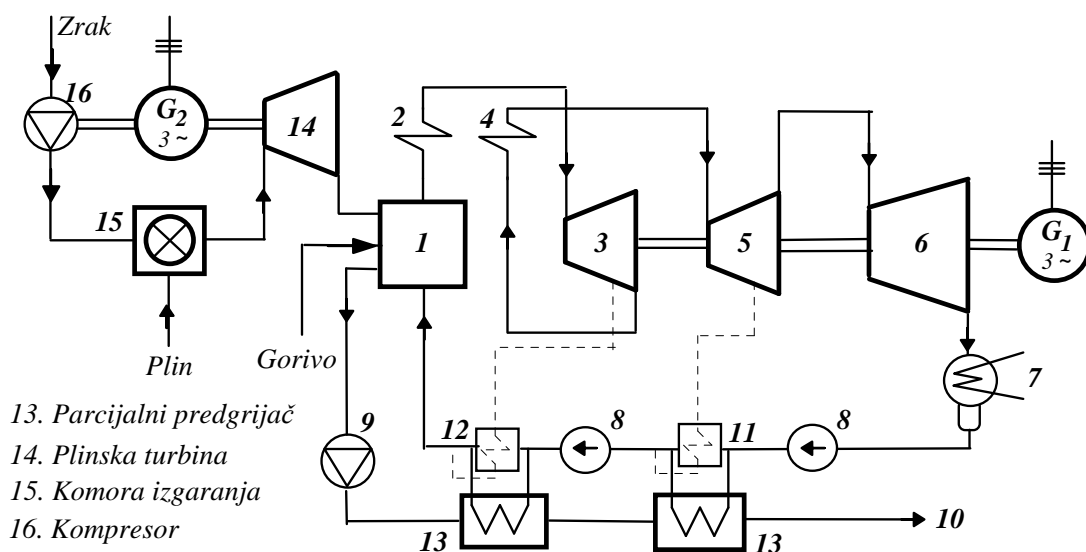
1. Parni kotao
2. Pregrijač
3. VT dio turbine
4. Međupregrijač
5. ST dio turbine
6. NT dio turbine
7. Kondenzator
8. Pumpa
9. Ventilator
10. Dimni plinovi
11. NT predgrijač
12. VT predgrijač

To znači da se stupanj iskorištenja nalazi između 0,30 i 0,45 , a vlastitu potrošnju treba dodatno uračunati. U praksi se tu računa i sa gubicima u cjevovodima (η_c), potrošnji pare za vlastite pogone (η_{vp}) te potrošnji električne energije za potrebe elektrane (η_{pe}). Utjecaj vlastite

potrošnje električne energije za potrebe elektrane može se računati i preko omjera snage na pragu elektrane P_n i snage na stezaljkama generatora P_g : $\eta_{pe} = P_n / P_g$.

Na sl.1.2 je shematski prikaz kondenzacione elektrane s međupregrijavanjem pare pomoću dimnih plinova, te oduzimanjem pare za predgrijavanje kondenzata kod niskog odnosno visokog tlaka. Međupregrijavanje kod visokog tlaka pred ulazom u turbinu (srednjetlačni dio) primjenjuje se radi izbjegavanja pojave prevelikog udjela mokre pare (preko 10%) na izlazu iz niskotlačnog dijela turbine. Stupnjevano predgrijavanje kondenzata (do 10 predgrijača u seriji) omogućava energetska uštedu od par procenata uz konstruktivnu prednost za turbinu, manje dimenzije kondenzatora i smanjenu količinu rashladne vode (vidi odjeljak 1.3). Povoljni tlakovi svježeg pare ispred turbine nalaze se između 180 i 250 bara, a temperature između 530 i 550°C. Kod većih tlakova pretežito se predviđa dvostruko međupregrijavanje.

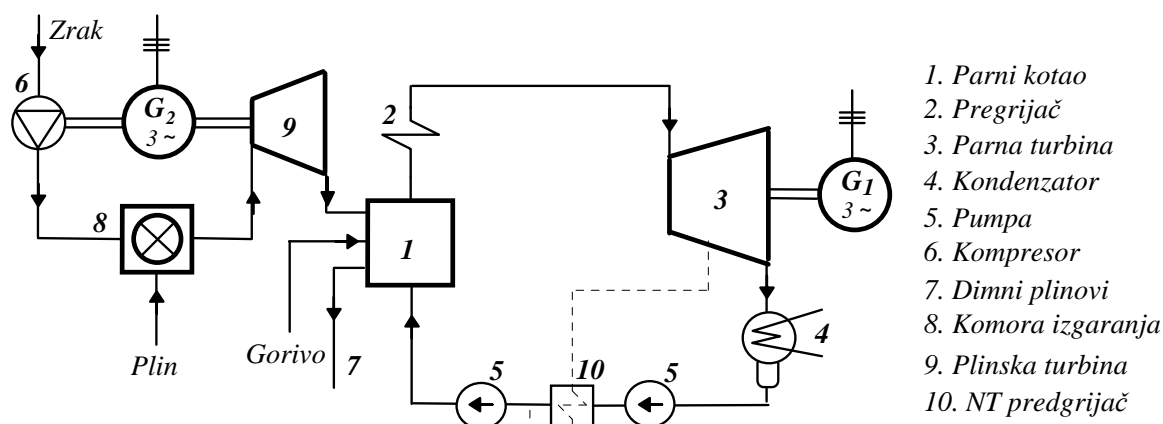
Na sl. 1.3 je shematski prikazana kombinacija parnog i plinskog pogona turbine za temeljno opterećenje (oznake 1 do 12 su prema sl. 1.2). Ispred parnog postrojenja (sa visokim tlakom svježeg pare i visokom temperaturom) priključena je plinska turbina, čiji se vrući izlazni plin koristi kod izgaranja u ložištu parnog kotla. Da se moguće smanje potrebne temperature u kotlu, povoljno je ovdje dio kondenzata u paralelnom protoku grijati u parcijalnim predgrijačima s pomoću dimnih plinova. Preostali dio kondenzata predgrijava se tada u predgrijačima pomoću oduzete pare iz turbine (kao na sl. 1.2) . Kod ovako kombiniranih postrojenja postiže se termičko poboljšanje oko 4% u poređenju sa odgovarajućim kvalitetnim parnim postrojenjem. Usto su moguće i neke promjene u kombiniranom parno-plinskom procesu. Primjerice se može u ložište kotla dovoditi komprimirani zrak za izgaranje, a dimni plinovi odvoditi da ekspandiraju na lopaticama plinske turbine te zatim da predaju toplinu kondenzatu u parcijalnim predgrijačima.



Sl. 1.3 - Shema parnog procesa kombiniranog s plinskom turbinom

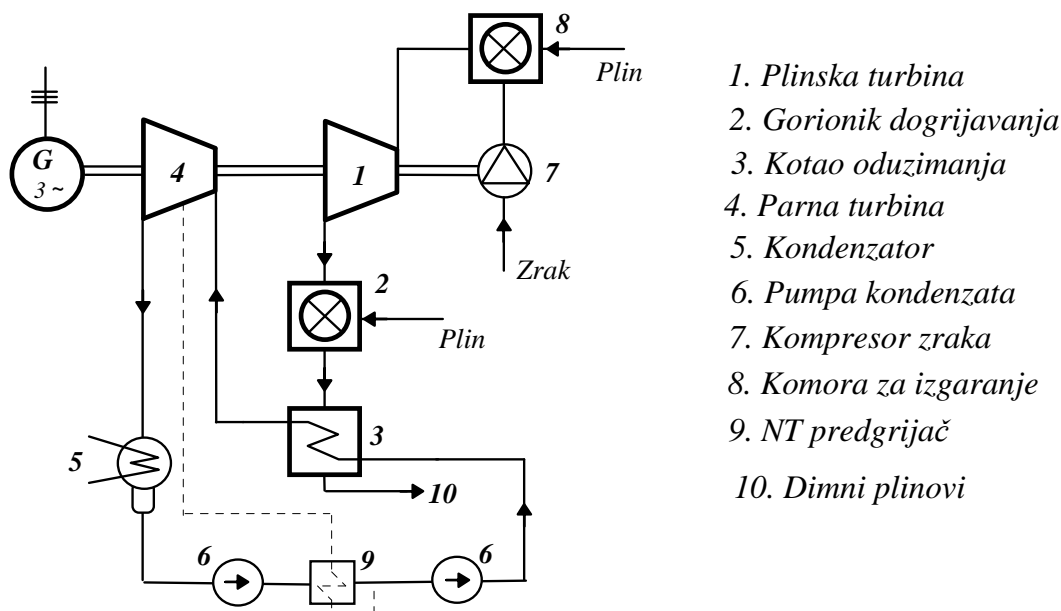
1.1.2 Postrojenja za srednje opterećenje

Osnovni element postrojenja za srednje opterećenje je jednostavno parno postrojenje bez međupregrijača i po mogućnosti dodatni plinski predproces s odgovarajućom turbinom. Na sl. 1.4 je shematski prikazano takvo rješenje. Na izlazu iz turbine plin sadrži još oko 80% zraka, tako da se može koristiti za izgaranje u ložištu kotla. Prednost ovakvog rješenja je u poboljšanju termičkog stupnja iskorištenja za oko 10% u odnosu na usporedivi jednostavni parni proces, kod čega tlak svježeg pare iznosi 60 do 90 bara, a temperatura 450 do 500 °C.



Sl. 1.4 - Parni proces sa plinskom turbinom za povećanje iskorištenja

Moguća je izmjena u ovakvom procesu na takav način da se koristi kotao koji sa strane dovoda plina ima tlak 6 do 10 bara, a za njega se komprimirani zrak dovodi iz kompresora. Plinovi se iz kotla vode na plinsku turbinu gdje ekspandiraju na atmosferski tlak. Temperatura procesa u plinskoj turbini se tako odabire da postoji ravnoteža između plinske turbine i kompresora, a to znači da se turbina ne može neovisno opterećivati preko generatora vanjskom električnom mrežom.

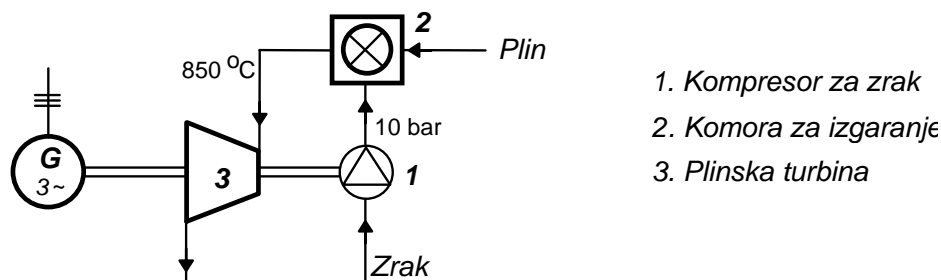


Sl. 1.5 - Kombinirani proces sa parnom i plinskom turbinom

Na sl. 1.5 prikazana je shema kombiniranog plinsko-parnog postrojenja. U odvodnoj struji plina iz turbine predviđen je parni kotao sa plinskim ložištem. U kotlu prizvedena para vodi se na parnu turbinu, a iz nje na vodom hlađeni kondenzator. Kako je parni proces povezan sa plinskim, mora biti opterećenje parne turbine prilagođeno opterećenju plinske turbine. Prilagodba se može poboljšati odgovarajućom regulacijom dogrijavanja s pomoću plina. Težište proizvodnje se dobrim dijelom prenosi na plinski proces, a u tehničkom i ekonomskom smislu kotao sa ložištem za parnu turbinu ima manje zahtjeve. Tako ovakva postrojenja mogu startati iz polutoplog stanja i predstavljaju prijelaz prema postrojenjima za vršna opterećenja u elektroenergetskom sustavu.

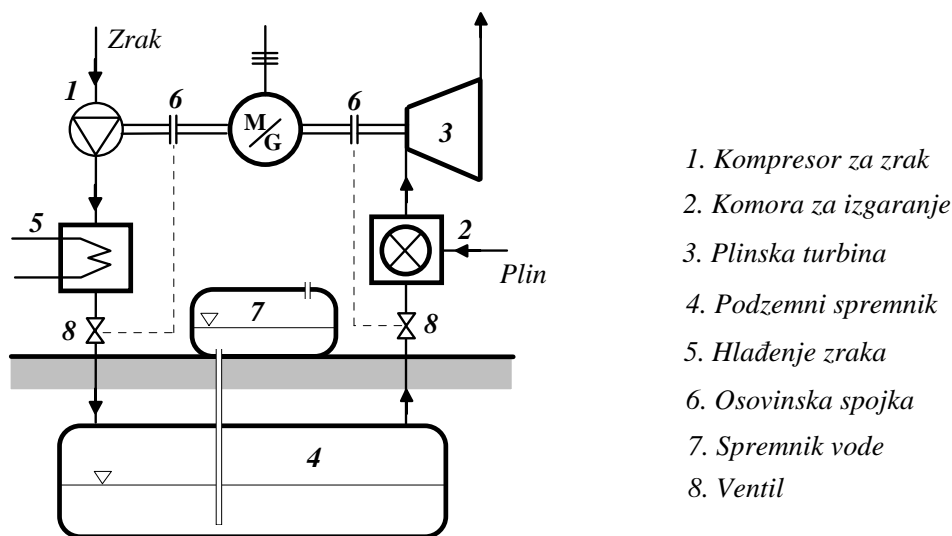
1.1.3 Postrojenja za vršno opterećenje

Postrojenja za vršno opterećenje mogu se koristiti za ispunjenje različitih zahtjeva sa strane električne mreže. Kod reverzibilnih hidroelektrana se uglavnom predviđa povećana potražnja tijekom podneva i večeri, dok se noćna energija temeljnih termoelektrana koristi za povećanje gornjih akumulacija. Za kratkotrajna vršna opterećenja i brzu rezervu koriste se plinske turbine sa vremenima startanja između 3 i 5 minuta, a cijene ovakvih postrojenja su nešto niže radi toga što specifična potrošnja goriva igra manju ulogu nego kod postrojenja za temeljno opterećenje.



Sl.1.6 - Otvoreni proces s plinskom turbinom

Na sl. 1.6 je prikazana shema otvorenog plinsko-turbinskog procesa. Kao gorivo se mogu koristiti zemni plin, rafinerijski plin ili lako loživo ulje. Radna temperatura plinske turbine je oko 850°C , a tlak komprimiranog zraka je oko 10 bara. Stupanj termičkog iskorištenja je bitno manji nego kod postrojenja za temeljno opterećenje i doseže oko 28%. Kako je za komprimiranje zraka potrebno približno dvije trećine snage turbine, ostaje za generator oko jedne trećine snage turbine kao ono što se može dati u mrežu. Potrebne količine rashladne vode i energije za pokretanje postrojenja su vrlo male, a prikladna je i mogućnost potpunog daljinskog upravljanja i kontrole. Tako se mogu lokacije ovakvih postrojenja birati u skladu sa potrebama konzuma, a često se koriste za osiguranje vlastite potrošnje većih nuklearnih elektrana.



Sl.1.7 - Plinski proces sa spremnikom zraka

Veliki udio snage za potrebe komprimiranja zraka doveo je na ideju da se ono izvede u vrijeme minimalne potražnje, za što se mora riješiti problem spremnika zraka. Prema shemi na sl. 1.7 radi u tom periodu sinkroni stroj kao motor za pogon kompresora sa uključenom pripadajućom elastičnom spojkom, dok je turbina odspojena sa osovine motor-generatora i zatvoren dovod plina i zraka u komoru za izgaranje. Komprimirani zrak se hladi i odvodi u

podzemni spremnik (komprimiranje i hlađenje se obično izvodi u više stupnjeva radi manjeg utroška energije).

U vrijeme vršnog opterećenja radi sinkroni stroj kao generator, pri čemu je kompresor odspojen na osovini. Iz spremnika se uzima komprimirani zrak i u komori za izgaranje plina postiže potrebna radna temperatura. Radni plin se vodi u turbinu gdje ekspandira do atmosferskog tlaka na izlazu. I ekspanzija se može izvesti u dva stupnja u slučaju dovoljno visokog tlaka u spremniku. Da se izbjegnu prevelike oscilacije tlaka kod punjenja i pražnjenja spremnika, morao bi on imati relativno veliku zapreminu. U istu svrhu se u njemu može koristiti voda iz posebnog gornjeg rezervoara kao potisni medij, što osigurava praktički konstantan radni tlak za vrijeme trajanja vršnih opterećenja.

1.2 Osnovna svojstva parnog procesa

Radni proces u termoelektrani je kružni proces, što znači da se pretvorba energije provodi periodičnim promjenama stanja radnog medija (ovdje voda odnosno para). Ovo jednako vrijedi za primjere kada uvijek isti radni medij cirkulira u procesu kao i kada se taj medij stalno obnavlja (primjerice otvoreni turbinski proces u sl. 1.6). Kod toga je važno da proces uvijek ponovo prolazi jednaka stanja (periodično ponavljanje procesa).

Termodinamičke zakonitosti kružnih procesa detaljno su obrađene u literaturi. Rezultati se mogu svesti na pravila, koja je moguće formulirati na različite načine. Za naše potrebe možemo postaviti dvije formulacije: (1) toplina je oblik energije koji se može dobiti iz mehaničkog rada i u njega opet pretvoriti; (2) toplina se nikada ne može sama od sebe prenijeti sa tijela niže temperature na tijelo više temperature. Ova dva pravila zajedno vode na uvjet da je pretvorba topline u mehanički rad nužno povezana postojanjem razlike temperatura (temperaturni pad).

U tehnički uobičajenim pogonskim uvjetima vodena para se ne može promatrati kao idealni plin, ali osnovna razmatranja iz termodinamike plinova mogu ipak koristiti u razumjevanju procesa s njom. Stanje idealnog plina određeno je pomoću tri jednostavne veličine stanja: tlaka p , temperature T i specifičog volumena v . Njihova uzajamna ovisnost definira se termičkom jednadžbom stanja $p \cdot v = R \cdot T$, gdje je R plinska konstanta. Pretvorba toplinske energije u mehanički rad provodi se u tehnici ekspanzijom para ili plinova.

Na sl. 1.8 prikazan je primjer ekspanzije u (p, v) - dijagramu. Ako se plinu kod konstantnog volumena dovodi izvana toplina, tlak toga plina raste. Ako se dozvoli porast volumena plina od v_1 na v_2 , dobije se vanjski rad kao površina ispod krive 1-2 :

$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dv \quad (1.3)$$

Označimo sa u specifičnu unutarnju energiju plina koja ovisi samo o temperaturi i koja uvijek zadržava svoju vrijednost kada se plin nakon određenih promjena stanja vrati u polazno stanje. Pravilo (1) može se onda izraziti relacijom:

$$dq = du + p \cdot dv \quad (1.4)$$

Pri tome je pretpostavljeno da je plinu sa unutarnjom energijom u dovodi količina topline dq i da on pri tome ekspandira i vrši vanjski rad $p \cdot dv$. Pri konstantnom volumenu bi dq bilo utrošeno samo na povećanje unutarnje energije. Vanjski rad je prema sl. 1.8 ovisan o tijeku promjene stanja između 1 i 2, te nije veličina stanja. Specifična entalpija h je izvedena veličina stanja i definirana je kao:

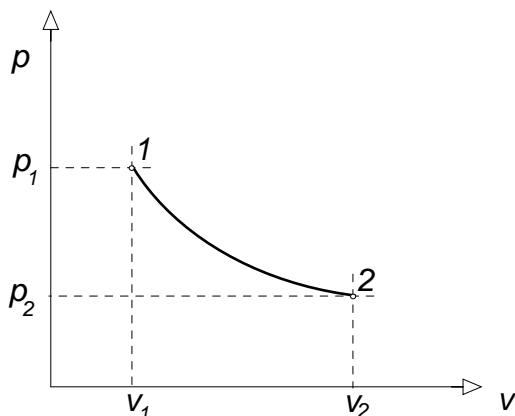
$$h = u + p \cdot v \quad (1.5)$$

Računanje sa entalpijom je uglavnom prikladnije nego sa unutarnjom energijom. Promatrajmo energetske bilancu radnog stroja prema sl. 1.9. Ako nema izmjene topline sa okolinom, prema pravilu (1) mora biti ukupna vani predana energija jednaka razlici unutarnjih energija plina kod ulaza u stroj i izlaza iz njega. Dakle vrijedi:

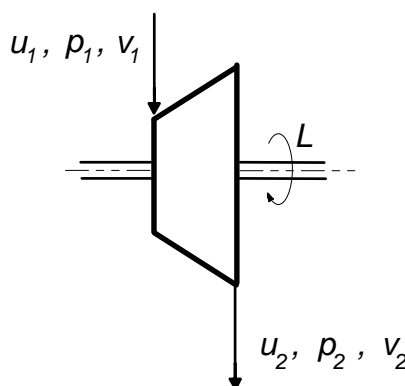
$$u_1 - u_2 = L_{12} \quad (1.6)$$

Ako se vrijednosti unutarnje energije zamijene prema jedn.(1.5), dobijemo:

$$h_1 - h_2 = L_{12} + p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2 = L \quad (1.7)$$

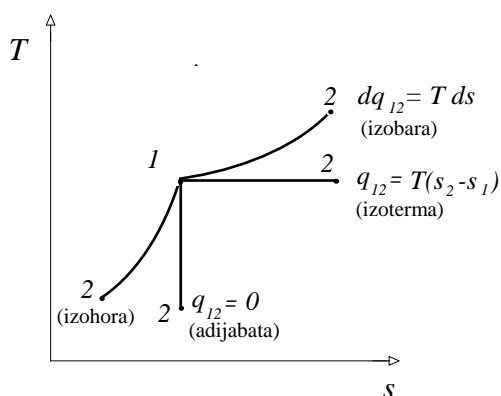
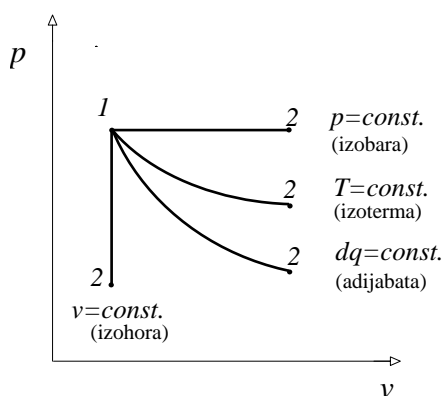


Sl. 1.8 - Ekspanzija plina u (p,v) - dijagramu



Sl.1.9- Energetska stanja radnog stroja

Nasuprot vanjskom radu jednog volumena plina, L označava mehanički rad jednog procesa. Vidi se iz jedn.(1.7) da je mehanički rad jednak padu entalpije $h_1 - h_2$ kod ekspanzije plina bez gubitaka, odnosno bez izmjene topline sa okolinom.



Sl.1.10 - Promjene stanja idealnog plina (konstantna specifična toplota)

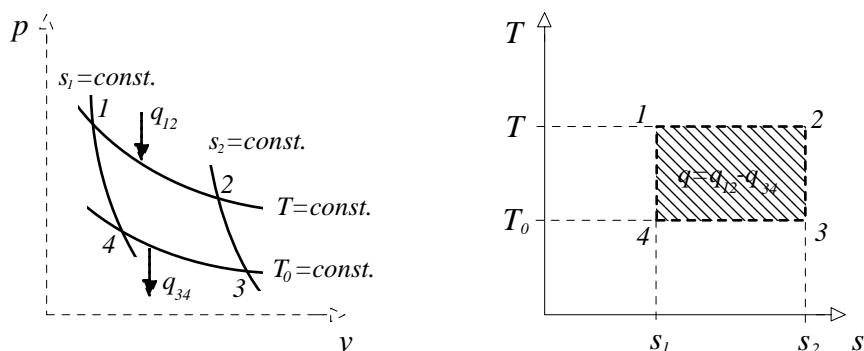
U termodinamici se također uvodi specifična entropija s kao izvedena veličina. Ona je mjera reverzibilnosti (povrativosti) promjene stanja. Ako je promjena stanja reverzibilna, entropija s ukupnog sistema ostaje nepromijenjena. Ako je pak promjena stanja ireverzibilna (nepovrativa), kakav je slučaj kod stvarnih procesa (utjecaji trenja, prigušenja i sl.), entropija raste. Ta se promjena definira po Clausiusu relacijom:

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{du + p \cdot dv}{T} \quad (1.8)$$

Na sl. 1.10 prikazan je tijek karakterističnih promjena stanja u (p,v) - i (T,s) - dijagramu za idealni plin (konstantne specifične topline) kod konstantnih vrijednosti pojedinih veličina stanja. Za razliku od ovih pojedinačnih promjena, kod kružnog procesa promatramo niz promjena stanja koji opet dovodi radni medij u početno stanje.

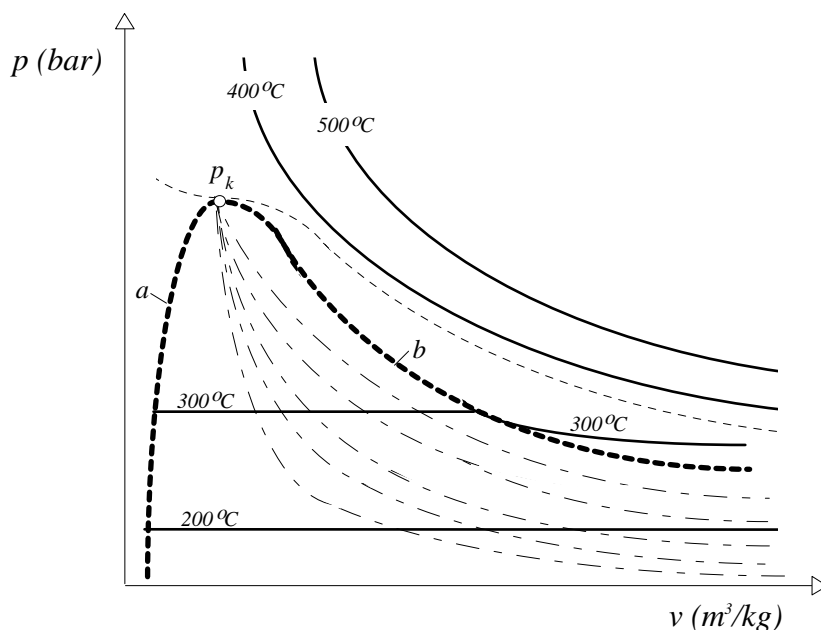
Na sl. 1.11 prikazan je u (p,v) - i (T,s) - dijagramu Carnotov kružni proces koji opisuje zatvorenu površinu. Sastavljen je od dvije izoterme i dvije adijabate. Iz stanja 1 plin ekspandira izotermno uzimajući izvana toplinu q_{12} do stanja 2 i nakon toga adijabatski ($q_{23} = 0$) do stanja 3. Iz stanja 3 se plin komprimira do stanja 4 predajući okolini toplinu q_{34} , a nakon toga uz $q_{34} = 0$ i tome odgovarajuće povišenje temperature do polaznog stanja 1. U Carnotovu kružnom procesu korištena toplina $q = q_{12} - q_{34} = q_{do} - q_{od}$ jednaka je razlici između dovedene i odvedene topline, pa je termički stupanj iskorištenja ($s_1 = s_4$, $s_2 = s_3$):

$$\eta_{tC} = \frac{q_{do} - q_{od}}{q_{do}} = \frac{L}{q_{do}} = \frac{T(s_2 - s_1) - T_0(s_3 - s_4)}{T(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (1.9)$$



Sl.1.11 - Carnotov kružni proces

Ovaj termički stupanj iskorištenja Carnotovog kružnog procesa je najveći koji se može postići između temperatura T i T_0 . Podizanje temperature T i / ili smanjenje temperature T_0 vodi povećanju termičkog stupnja iskorištenja η_{tC} . U stvarnom tehničkom kružnom procesu svako odstupanje od idealnih adijabatskih i / ili izotermnih promjena stanja plina ima za posljedicu samo smanjenje termičkog stupnja iskorištenja. Carnotov kružni proces je reverzibilan i može se ponavljati u radnim ciklusima. Nakon svakog ciklusa entropija s radnog medija ima svoju početnu vrijednost.

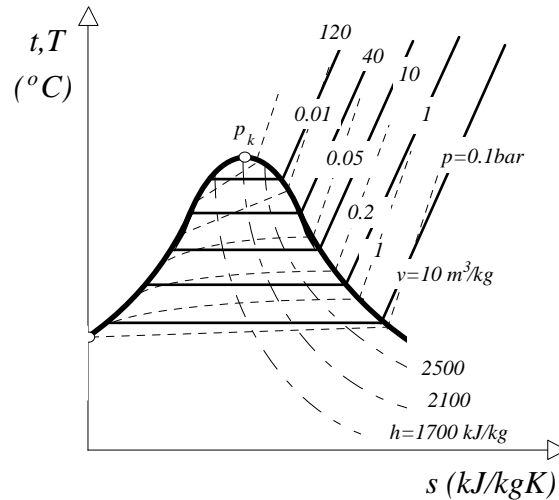


Sl.1.12 - (p,v) - dijagram vodene pare

Za realne plinove i pare ne vrijede jednačbe termičkog stanja idealnih plinova. Posebice bi bilo teško teoretski obuhvatiti ponašanje mješavine vode i vodene pare, ali je ono

dovoljno poznato iz praktičnih istraživanja. Najvažnije vrijednosti za vodu i vodenu paru dane su točno u tablicama. Na sl. 1.12 je pokazan (p,v) - dijagram za vodu i vodenu paru sa kritičnom točkom k kod tlaka $p_k = 220,45$ bara, temperature $t_k = 373,860$ i specifičnog volumena $v_k = 0,00311$ m³/kg. Ova točka je tjeme granične krivulje ispod koje se nalazi područje stanja mokre pare. Lijevo od njenog dijela **a** je područje vode, a desno od dijela **b** područje pregrijane pare. Na granici **b** imamo stanje zasićene pare. Kod tlakova iznad kritičnog prelazi voda sa porastom temperature i tlaka u stanje pregrijane pare bez međufaze mokre pare. U području mokre pare označen je relativni težinski udio (sadržaj) pare sa x , te je $x_a = 0$ odnosno $x_b = 1$. Ako označimo sa v' specifični volumen vode na početku isparavanja, a sa v'' specifični volumen zasićene pare, iznosi specifični volumen mokre pare:

$$v = (1 - x) \cdot v' + x \cdot v'' \quad (1.10)$$



Sl.1.13 - (T,s) -dijagram vodene pare

Na sl. 1.13 prikazan je (T,s) - dijagram vodene pare gdje granična krivulja ima zvonolik oblik. Po konvenciji je entropija vode jednaka nuli kod 0 °C u stanju zasićenja. Izobare se u svom lijevom kraju praktički poklapaju sa graničnom krivuljom. Na temelju ovih podataka može se razmatrati kružni proces s realnim radnim medijem kakav je vodena para.

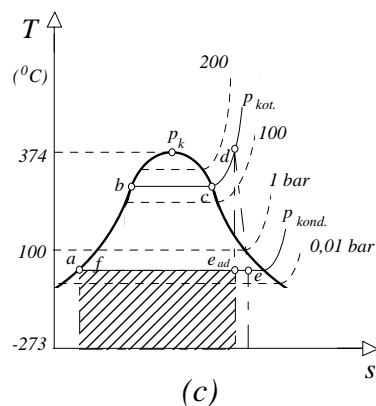
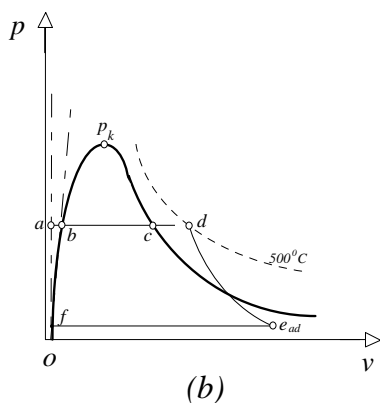
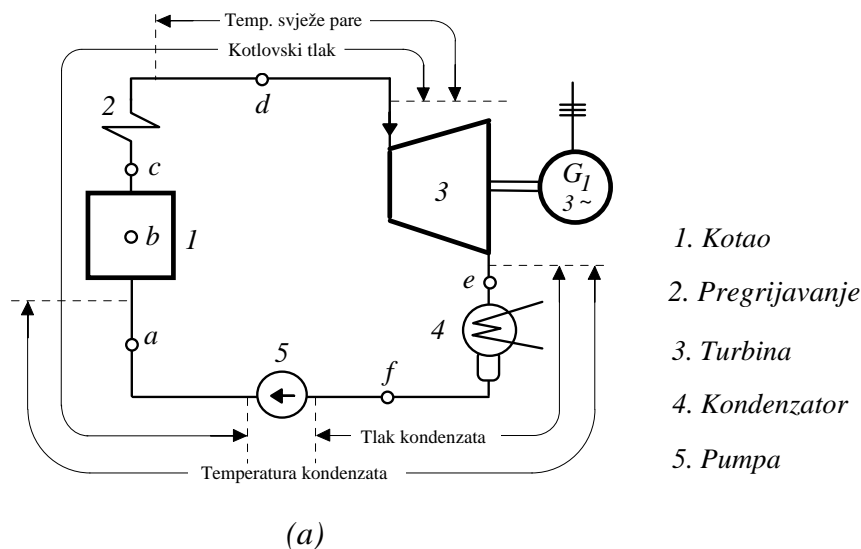
Na sl. 1.14 je prikazana shema jednostavnog parnog procesa (Clausius-Rankine) i njegov tijek u (p,v) - i (T,s) - dijagramu. Ovdje zanemarujemo odstupanja koja se pojavljuju u praksi (posebno kod ekspanzije) kod izobarnih i adijabatskih promjena stanja. U isparivaču kotla dovodi se kondenzatu toplina $q_v(a-b)$ dok tlak ne dostigne temperaturu ključanja, a zatim toplina isparavanja $q_{mp}(b-c)$ do stanja zasićene pare. U pregrijaču se dalje dovodi pari toplina pregrijavanja $q_{pp}(c-d)$ dok se ne dostigne projektirana temperatura pregrijane pare. Ukupno je dakle potrebno dovesti toplinu $q_{do} = q_v + q_{mp} + q_{pp}$. Uzduž adijabate $(d-e_{ad})$ pregrijana para ekspandira u turbini (idealna ekspanzija) na tlak kondenzata (primjerice 0,05 bara) dolazeći u područje mokre pare. Para iz turbine u kondenzatoru izobarno i izotermno kondenzira po $(e_{ad}-f)$, pri čemu se s pomoću rashladne vode odvodi toplina q_{od} . Da se kružni proces zatvori, mora se kondenzat uzduž $(f-a)$ izohorno dovesti opet na početno stanje kotlovskog tlaka pomoću pumpe. U (T,s) - dijagramu su točke **a** i **f** praktički na istom mjestu.

Iz (T,s) -dijagrama se može dobiti dovedena toplina q_{do} kao površina ispod $a-b-c-d$, a odvedena toplina q_{od} kao površina ispod $e_{ad} - f$. Slično kao kod Carnotovog procesa, kod Clausius-Rankineovog procesa dobije se za teoretski termički stupanj iskorištenja:

$$\eta_{ICR} = \frac{q_{do} - q_{od}}{q_{do}} = \frac{L}{q_{do}} = \frac{h_d - h_{e_{ad}}}{h_d - h_a} \quad (1.11)$$

Na sl. 1.15 je (h,s) - dijagram (t.zv. Mollierov dijagram) za vodenu paru iz kojega se može zgodno očitavati posljednji dio gornje jednačbe. Dobije se iz (T,s) - dijagrama integriranjem uzduž izobare ($dh = T \cdot ds$). Dovedena toplota q_{do} uzduž izobare $a-b-c-d$ na sl. 1.14 dobije se u (h,s) - dijagramu kao razlika entalpija:

$$q_{do} = \int_a^d (dh + v \cdot dp) = \int_a^d dh = h_d - h_a \quad (1.12)$$



Sl.1.14 - Jednostavni parni proces (Clausius-Rankine)

Za izobarno ($dp = 0$) odvođenje topline od e_{ad} do f dobije se analogno:

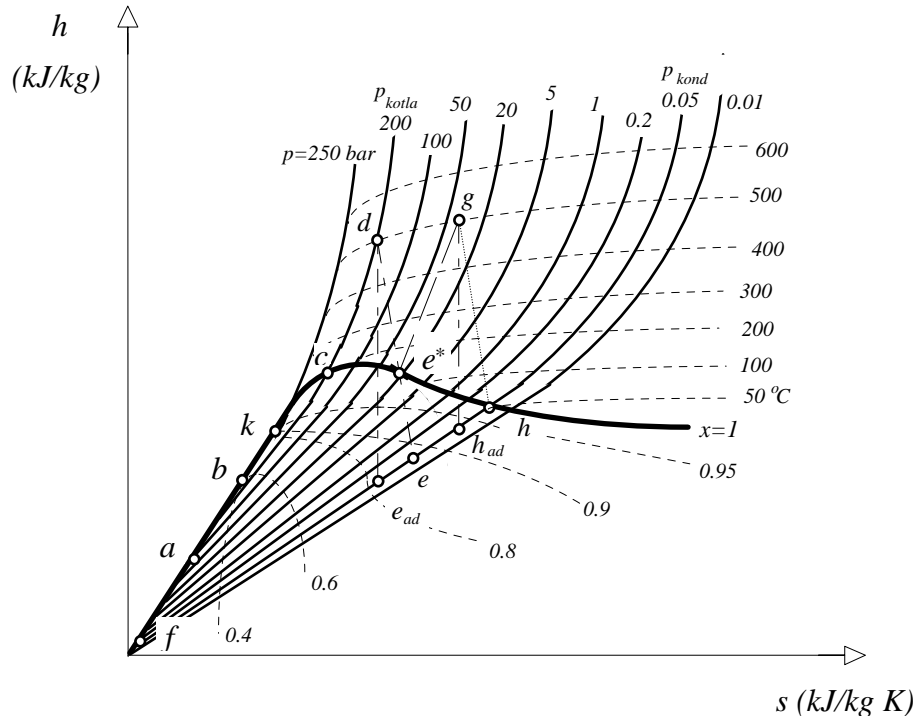
$$q_{od} = \int_f^{e_{ad}} (dh + v \cdot dp) = \int_f^{e_{ad}} dh = h_{e_{ad}} - h_f \quad (1.13)$$

Uzimajući da je $h_f \approx h_a$, dobijemo iz prethodnih jednačbi $q_{do} - q_{od} \approx h_d - h_{e_{ad}}$. Iz (h,s) -dijagrama se može lako odrediti termički stupanj iskorištenja procesa za različite uvjete. Kod temperature svježe pare 500°C i tlaka $150 \div 200$ bara, dobije se uz tlak kondenzata $0,04$ bara da je $\eta_{tCR} \approx 0,43 \div 0,45$. Ako tlak kondenzata poraste na 1 bar (otvoreni proces), u istim ostalim uvjetima smanjuje se termički stupanj iskorištenja procesa na $\eta_{tCR} \approx 0,35 \div 0,37$.

Ranije je pomenuto da se Clausius-Rankineov proces ne može u potpunosti realizirati, prije svega što adijabatska ekspanzija nije u praksi bez gubitaka (usljed prigušenja strujanja i prijenosa topline). Zato se u praksi ekspanzija odvija uzduž $(d-e)$, pa je stoga pad entalpije

manji. Gubici se mogu uzeti u obzir pomoću unutarnjeg stupnja iskorištenja turbine η_i , pa je termički stupanj iskorištenja:

$$\eta_t = \eta_{iCR} \cdot \eta_i = \eta_{iCR} \cdot \frac{h_d - h_e}{h_d - h_{e_{ad}}} = \frac{h_d - h_e}{h_d - h_a} \quad (1.14)$$



Sl.1.15 - (h,s) - dijagram za vodenu paru

Kao mogućnosti za poboljšanje η_t uglavnom se koriste (1) povećanje tlaka i temperature svježeg pare, (2) predgrijavanje kondenzata, (3) međupregrijavanje pare i (4) kombinacija sa plinskom turbinom. Pogledajmo redom ove mogućnosti:

(1) Već je u jedn.(1.8) pokazano za Carnotov proces da je moguće povećanje termičkog stupnja iskorištenja porastom početne temperature T . U osnovi isto vrijedi i za proces sa parom. U postrojenjima za temeljno opterećenje sa međupregrijavanjem ide se danas do temperature svježeg pare $530 \div 550^\circ\text{C}$ uz tlak između 180 i 250 bara. Najveća temperatura pregrijavanja kod određenog tlaka ovisi o materijalima postrojenja (prije svega kotla), te se u izradi koriste visokolegirani austenitni krom-nikl čelici.

(2) Poređenjem (T,s) - dijagrama za Carnotov (sl. 1.11) i Clausius-Rankineov proces (sl. 1.14), vidi se da u procesu sa parom imamo veliko odstupanje površine $q_{do} - q_{od}$ od idealnog oblika. Približenje ovog procesa Carnotovom i odgovarajuće povećanje η_t postiže se stupnjevanim predgrijavanjem kondenzata pomoću pare oduzete na turbini. Ovim putem je moguće povećanje termičkog stupnja iskorištenja do 10%.

(3) Iz sl. 1.15 se vidi da se kod konstantno niskog tlaka kondenzata sa porastom tlaka u kotlu povećava pad entalpije. Ipak se na kraju ekspanzije na izlazu iz turbine stanje pare nalazi daleko u području mokre pare i postavlja na turbinu često previsoke konstrukcije zahtjeve. Kao mjera za smanjenje udjela vode u mokroj pari može se koristiti povećanje temperature svježeg pare uvođenjem međupregrijavanja. Za ovo mora turbina biti izvedena sa dva ili više stupnjeva: visokotlačni (VT), niskotlačni (NT) i eventualno srednjotlačni (ST) dio.

Na sl. 1.15 je proces sa stupnjevanom turbinom prikazan linijom crta-točka. Pregrijana para (stanje d) ekspanzira u visokotlačnom dijelu turbine do blizu granične krivulje (stanje e^*), a onda se vodi u međupregrijač (obično se koriste dimni plinovi), izobarno ugrijava opet do temperature svježeg pare (stanje g), te privodi NT (ili ST+NT) dijelu turbine. Na kraju ekspanzije u ovom dijelu turbine postiže se vlažnost pare manja od 0,1. Za termički stupanj iskorištenja uz međupregrijavanje dobije se:

$$\eta_{im} = \eta_{iCRm} \cdot \eta_i = \frac{(h_d - h_{e^*}) + (h_g - h_h)}{(h_d - h_a) + (h_g - h_{e^*})} \quad (1.15)$$

Ovdje je h_{e^*} entalpija pare na ulazu u međupregrijač. Znači da se jednostavnim međupregrijavanjem pare može popraviti termički stupanj iskorištenja i te vrijednosti poboljšanja su obično 3 ÷ 5 %.

1.3 **Parni kotlovi**

Namjena postrojenja parnog kotla u termoelektrani je da privedenu napojnu vodu predgrije, zagrije do isparenja i pregrije na potrebnu izlaznu temperaturu (temperatura svježeg pare). Kod procesa sa međupregrijavanjem dodatno se iz turbine oduzeta para opet dogrijava na temperaturu koja općenito odgovara temperaturi svježeg pare ali uz znatno niži tlak. Stupanj iskorištenja kotla u procesu pretvorbe kemijske energije u toplinsku može se odrediti prema relaciji:

$$\eta_k = \sum (\Delta h_k \cdot D_k) / (B \cdot H_i) \quad (1.16)$$

pri čemu je B količina goriva donje ogrjevnice moći H_i , a D_k količina pare čiji je prirast entalpije Δh_k . Pri ovome je potrebno zbrojiti sve postojeće doprinose grijanja i predgrijanja kondenzata, te pregrijanja i međupregrijanja pare prema shemi procesa.

Rješenje parnog kotla bitno ovisi o vrsti goriva (kruto, tekuće ili plinovito), njegovoj ogrjevnoj moći i ostatku izgaranja. Korištena goriva su uglavnom kameni ugljen i njegovi produkti, mrki ugljen, lignit i otpadni materijali iz obrade (industrijski plinovi), zemni plin i derivati nafte, pa čak i otpad mehaničke prerade drva. Može postojati potreba korištenja više goriva u jednom postrojenju kotla, pa se ono gradi za traženu kombinaciju.

Kod velikih kotlovskih postrojenja kakva imamo kod blok-elektrana treba dovesti gorivo u ložište u lako zapaljivom stanju. Plinovita i tekuća goriva ne trebaju prethodnu pripremu, osim predgrijavanja kod teških derivata nafte (ulja, mazuta) radi lakšeg transporta i potpunijeg izgaranja. Drugačije je sa krutim gorivima. Ugljen se melje i suši u mlinu, a zatim upuhuje u prostor izgaranja (ložište) s pomoću struje predgrijanog zraka. Ako kruto gorivo sadrži veći udio vlage (mrki ugljen i lignit), koristi se za sušenje i transport takođe nazad usisani vrući dimni plin iz kotla. Poslije mljevenja i sušenja preostala gruba vlaga, kao i higroskopska vlaga i finoća ugljene prašine, bitno određuju potpunost izgaranja. Kameni ugljen sa udjelom vlage između 15 i 40% treba sušiti do oko 1% preostale vlage, a mrki ugljen sa udjelom vlage između 50 i 60% treba sušiti na oko 15 do 25% preostale vlage. Veličina zrna mljevenog ugljena podliježe jednostavnom iskustvenom zahtjevu: što se ugljena prašina slabije pali, to mljevenje mora biti finije.

Postrojenja za mljevenje kamenog ugljena opremljena su obično mlinovima čekićarima, dok je mljevenje mrkog ugljena i lignita uobičajeno na principu kotača za drobljenje sa otpuhivanjem dobijene prašine. Samljeveni ugljen se većinom upuhuje u prostor za izgaranje pomoću gorionika, što je jednostavnije i jeftinije za normalno očekivane zahtjeve regulacije kotlovskog postrojenja. Za dodatne zahtjeve moguće je predvidjeti i prolazna spremišta između mlina i ložišta.

Ostaci izgaranja ovise o kvaliteti ugljena i obično sadrže 4 - 30% krupnijih krutina, 10 - 20% drozge i ostatak pepela. Odvođenje krutih ostataka izgaranja iz ložišta može se izvesti u čvrstom ili tekućem obliku. Tekuće odvođenje postiže se na način da se smanji prijenos topline na grijane površine u ložištu i temperatura u njegovoj zoni toliko poraste da dostigne temperaturu taljenja ostataka izgaranja. Kod oba oblika odvođenja se ostaci izgaranja hlade u vodenoj kupki, ali je prednost tekućeg odvođenja da se dobije granulirani oblik drozge koji je lako čistiti i transportirati, a može poslužiti kao ispuna u specijalnim vrstama betona.

Spaljivanje mrkog ugljena i lignita radi se u pravilu sa suhim odvodom pepela. Ovdje se gorionici raspoređuju u kutovima prostora izgaranja sa upuhivanjem usmjerenim tako da se dobije vrtložni krug izgaranja. Njime postignuto vrtloženje plamena osigurava lakše paljenje i potpunije izgaranje ugljene prašine. Kod izgaranja plina i naftnih derivata nema takvih ograničenja glede rasporeda gorionika, te oni mogu biti raspoređeni na razne načine (frontalno, kutno, odozdo ili komorno).

Sa dimnim plinovima izlaze iz kotla sitniji i lakši dijelovi drozge (leteći pepeo), koje se mora iz ekoloških razloga zaustaviti pomoću elektrofiltera. Efikasnost filtera mora biti preko 99% izdvojenog pepela, a radi održavanja se postavljaju uvijek paralelne filterske komore.

Tlačni sistem kotla može biti realiziran kao kružni ili protočni, pri čemu postoji niz sistema sa paralelnim granama kao primjerice s prirodnom cirkulacijom, s paralelnim kružnim strujanjem odnosno s prisilnim protjecanjem (pomoću pumpi).

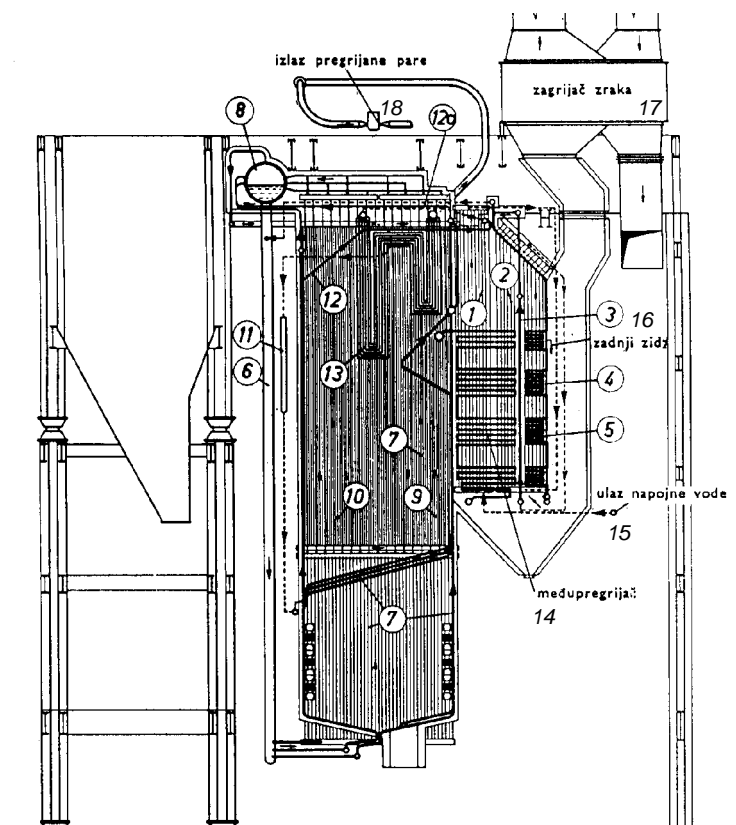
Kotlovi sa prirodnom cirkulacijom imaju jedan ili više visoko postavljenih bubnjeva na koje su odozdo priključene sabirne vertikalno spuštajuće (padne) cijevi. Ove cijevi se nalaze iza stijene komore izgaranja i ne griju se, a povezane su sa uzdižućim cijevima koje čine stijene prostora izgaranja i snažno se zagrijavaju. Usljed razlika u zagrijavanju dolazi do prirodnog strujanja, a u grijanim cijevima nastaje mješavina vode i vodene pare, koja se vodi u bubanj. Iz bubnja struji para u pregrijač. Ovaj sistem prirodnog strujanja radi zadovoljavajuće do blizu stanja kritičnog tlaka, gdje se specifične težine ključale vode i pare ne razlikuju, pa više ne funkcionira prirodno razdvajanje pare i vode u bubnju. Postoji kod ovog sistema ograničenje i za tlakove ispod kritičnog, jer kod visokog tlaka jako raste udio topline potreban za pregrijavanje. Mora se općenito tada dio površine pregrijača smjestiti u prostor izgaranja.

Kotlovi sa paralelnim protjecanjem grade se za tlakove preko 160 bara. Prisilno strujanje se osigurava pumpom. Kotlovi firme Sulzer daju krajnju točku isparavanja u sistemu cijevi nepromjenjenu sa opterećenjem, dok kod kotlova firme Benson ova točka polagano klizi. Za protočne kotlove sa paralelnim protjecanjem je važno da sve cijevi pri malim opterećenjima imaju jednako protjecanje i da su jednoliko hladene. Ovaj zahtjev primorava da se u kotlu osiguraju izvanredno visoke brzine strujanja koje dovode do odgovarajućeg pada tlaka između 45 i 60 bara kod punog opterećenja.

Kotlovi sa prirodnom cirkulacijom imaju slijedeća obilježja: (1) manji gubitak tlaka od kotlova sa prisilnim protjecanjem, (2) minimalno opterećenje je određeno izgaranjem a ne cijevnim sistemom isparivača, (3) kod pada tlaka može se oduzeti odgovarajuća količina pare, (4) moguće je brzo startanje iz toplog ili bar polutoplog stanja. Karakteristične značajke kotlova sa prisilnim cirkuliranjem su: (1) radni tlak svježe pare smije prijeći vrijednost kritičnog tlaka, (2) temperatura svježe pare može se održavati konstantnom u cijelom području opterećenja, (3) dozvoljena brzina pada tlaka je veća nego kod kotla sa prirodnom cirkulacijom, (4) dobra svojstva reguliranja opterećenja, (5) brzo startanje iz bilo kojeg termičkog stanja.

Oblik kotla se može birati u širokom rasponu prema raznim vanjskim uvjetima. Dimenzije kotla za mrki ugljen su kod jednake proizvodnje pare veće nego za kameni ugljen, a ove su opet veće nago kod kotlova za naftne derivate odnosno plin. Na sl. 1.16 je u

osnovnome prikazana izvedba parnih kotlova za kameni ugljen s prirodnom cirkulacijom vode i vrtložnim loženjem s tekućim odvođenjem drozge. Za prikazani primjer su osnovni podaci: kapacitet svježe pare 200 t/h, tlak 176 bara, temperatura svježe pare 535°C, temperatura međupregrijane pare 525°C. Oznake su kako slijedi: (1)÷(5) predgrijanje kondenzata, (6) sabirne spuštajuće cijevi, (7) isparivač, (8) bubanj, (9), (10), (12), (13) pregrijanje pare, (11), (12a) hladnjak pare s ubrizgavanjem, (14) međupregrijač pare, (15) ulaz napojne vode, (16) zadnji zid, (17) zagrijač zraka, (18) izlaz pregrijane pare. U svrhu reguliranja je međupregrijač pare smješten paralelno sa zagrijačem vode.



Sl. 1.16 -Kotao za kameni ugljen s prirodnim opticanjem vode

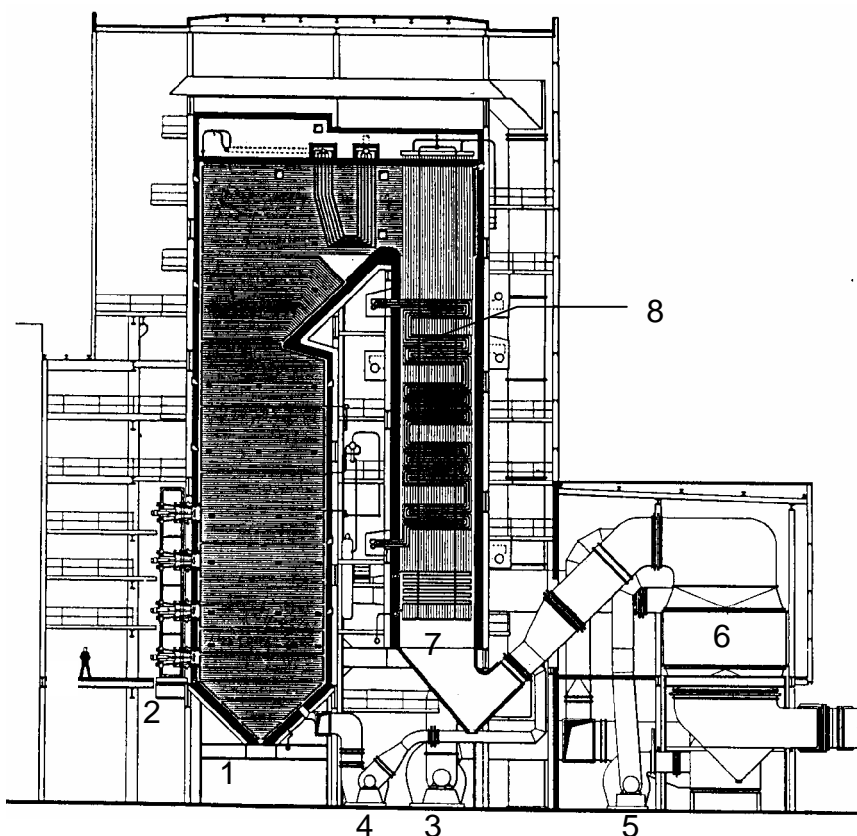
Na sl. 1.17 je u osnovnome prikazana izvedba parnih kotlova za loženje sa uljem i zemnim plinom. Za prikazani primjer su osnovni podaci: kapacitet svježe pare 500 t/h, tlak 210 bara, temperatura svježe pare 540°C, temperatura međupregrijane pare 540°C. Oznake su kako slijedi: (1) prostor izgaranja, (2) plinsko-uljni gorionik, (3) kompresor zraka, (4) kompresor dimnog plina, (5) kompresor zagrijanog zraka, (6) predgrijanje zraka, (7) predgrijanje napojne vode, (8) pregrijanje pare.

Kod modernih kotlova nema vanjskog zidanja objekta, nego se vanjski dio tijela kotla sastoji od stijenki sa cijevima, koje su plinotijesno varene i izvana toplinski izolirane. Ovakva konstrukcija dozvoljava kod postrojenja na plin i naftu nadtlak na dimnoj strani u komori za izgaranje i efikasno izvlačenje dimnih plinova bez ulaganja u zračne kompresore.

Iskorištenje goriva kod konvencionalne proizvodnje pare je bitno ovisno o vrsti goriva i izgaranja. Za razumjevanje mogu koristiti orijentacione veličine. Za blok od 300 MW za kameni ugljen donje ogrjevne moći $H_i = 25$ MJ/kg očekuje se stupanj termičkog iskorištenja oko 93% , a kod toga je temperatura odvedenog dimnog plina oko 1200°C. Kod mrkog ugljena sa $H_i = 7,5$ MJ/kg može stupanj termičkog iskorištenja dosegnuti 88% . Industrijski plin sa $H_i = 4$ MJ/nm³ i 130°C temperature odvedenog dimnog plina može dosegnuti 92% ,

zemni plin sa $H_i = 33,5 \text{ MJ/nm}^3$ i 120°C na izlazu oko 94,5% i loživo ulje sa $H_i = 40 \text{ J/kg}$ oko 94% .

Za snabdijevanje ložišta potrebnom količinom svježeg zraka koriste se odgovarajući kompresori. Oni mogu biti nadomješteni plinskim turbinama, pri čemu umjesto zraka za izgaranje dolazi izlazni plin turbine s visokom temperaturom i velikim pretičkom zraka. Postrojenje plinske turbine i parnog kotla (t.zv. kombi-blok) postiže visoki stupanj termičkog iskorištenja, ali je primjenjiv samo za zemni plin i loživo ulje. Ako je pak parni kotao postavljen ispred turbine, pojavljuje se on u ulozi komore za izgaranje plinske turbine i radi uz povišeni pretlak.



Sl. 1.17 Kotao sa prisilnim strujanjem za zemni plin i mazut

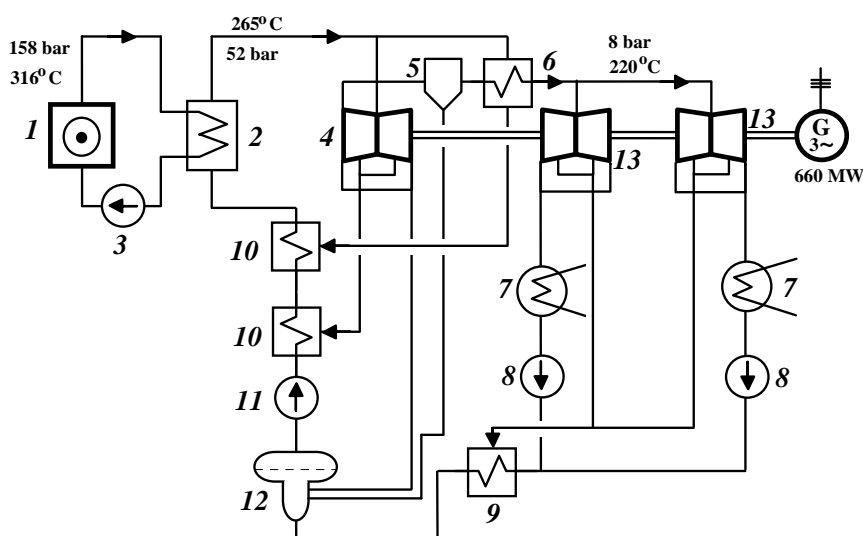
1.4 **Nuklearna proizvodnja pare**

Pretvorba nuklearne energije u toplinsku a zatim u električnu energiju od posebnog je značenja za zemlje u kojima ne postoje zadovoljavajuće iskoristive vodne snage ili rezerve fosilnih goriva. Potpuni raspad 1 kg izotopa urana 235 dao bi oko 24000 MWh termičke energije, što odgovara energiji 3000 tona kamenog ugljena. Međutim, u prirodnom uranu je samo oko 0,7% izotopa U-235, te se u postrojenjima za obogaćivanje ovaj procent povećava pomoću posebnog postupka koji nosi visoke rizike radioaktivnog zagađenja.

Najveći broj izgrađenih reaktora spada u grupu lakovodnih (koji se izvode kao reaktori sa ključalom vodom ili kao reaktori sa vodom pod tlakom) ili plinom hlađenih reaktora (s moderiranjem pomoću grafita). U novije vrijeme su izgrađeni visokotemperaturni helijem hlađeni reaktori koji u dvokružnom sistemu hlađenja proizvode svježju paru kod tlaka 180 bara i temperature 530°C .

Općenito reaktori imaju reaktorski spremnik pod tlakom (izrađen iz prednapregnutog betona ili željeza, nepropustan za plin i radioaktivno zračenje), reaktorsku jezgru, te uređaje za hlađenje i sigurnost. Kod reaktora sa ključalom vodom služi laka voda za hlađenje i moderaciju. Ona se od gorivih štapova grije do ključanja, a dobijena zasićena para preko izmjenjivača topline (ili neposredno) vodi na turbinu.

Sl. 1.18 pokazuje pojednostavljenu shemu reaktora sa vodom pod tlakom: (1) reaktor, (2) parogenerator, (3) glavna pumpa, (4) turbina za zasićenu paru, (5) odvajanje vode, (6) međupregrijač, (7) kondenzator, (8) glavna pumpa kondenzata, (9) niskotlačni predgrijač, (10) visokotlačni predgrijač, (11) napojna pumpa, (12) spremnik s otplinjačem, (13) turbina za svježiju paru. Laka voda je pod tlakom da se postigne dobar toplinski prelaz, pri čemu voda zadržava i ulogu moderatora. Turbina je naravno u sekundarnom krugu napajana iz izmjenjivača topline (parogeneratora).



Sl. 1.18 - Shema sa reaktorom hlađenim vodom pod tlakom

Kod ovakvih lakovodnih reaktora mogu se bez dodatnih mjera dobiti samo znatno niži tlakovi i temperature svježje pare u odnosu na parne kotlove. Kako se tu radi o relativno većim volumenima pare i većem udjelu vode u pari u izlaznim stupnjevima turbine, grade se turbine i generatori za 1500 o/min kod frekvencije 50 Hz. Nekad to nije dovoljno, te se grade posebni paralelni niskotlačni (izlazni) stupnjevi turbine sa odgovarajućom duljinom lopatica.

Kod visokotemperaturnih reaktora koristi se helij kao rashladni medij, a grafit kao moderator. Visoko zagrijani helij prenosi toplinsku energiju u parogeneratoru na turbinski krug sa vodenom parom. Kod toga je parogenerator zajedno sa reaktorom u zajedničkom tlačnom kontejneru. Kod nekih reaktora nije gorivo u obliku štapova nego u obliku kugli iz grafita sa uložnim dijelovima iz visoko obogaćenog urana 235 i torija 232. Primjerice, za reaktor termičke snage 300 MW potrebno je 675000 takvih gorivih kuglastih elemenata. Rashladni plin se grije na 795°C, pa se može postići za svježiju paru tlak oko 180 bara i temperatura 530°C. Daljnji razvoj visokotemperaturnih reaktora je u pravcu uvođenja turbine u primarni krug uz ekspanziju helija u njoj. Kako se helij ponaša slično idealnom plinu, termodinamička iskoristivost procesa je veća, a i mehanička opterećenja lopatica izlaznih stupnjeva nisu kritična kao kod pare.

Mogući ponovni rast broja nuklearnih elektrana u svijetu postaviti će i problem nalazišta uranove rude (U_2O_8) po prihvatljivim troškovima u par desetljeća. Zato su istraživanja usmjerena na razvoj brzih (samooplodnih) reaktora. Tu se radioaktivnim raspadom proizvodi više goriva nego je potrebno u procesu održavanja lančane reakcije. Rashladni medij je tečni natrij, a postavlja se niz tehnoloških problema koji traže visoka ulaganja uz znatno manje

troškove za gorivo tijekom eksploatacije elektrane. Fizikalna istraživanja pokušavaju dati odgovor na pitanje je li moguća realizacija fuzionog reaktora za proizvodnju električne energije, ali se tu još nije došlo do rezultata koji bi otvarali tehničku perspektivu.

Primjena nuklearne energije zakonski je regulirana u svim zemljama koje imaju takva postrojenja i nalazi se pod kontrolom međunarodne agencije. Detaljna načela, iz kojih proizlaze zahtjevi na izbor lokacije, projektiranje, izvedbu, te mjere i postupke zaštite, osiguravaju pretpostavke za djelotvornu zaštitu u tehnološki suvremenom i discipliniranom pogonu. U izoliranom objektu reaktora ostavlja se i prostor za skladištenje rezervi goriva i drugih visoko radioaktivnih materijala. Za trajno odlaganje radioaktivnog materijala moraju se osigurati propisna spremišta, a istrošeno gorivo se može davati na obogaćivanje. Postupak obogaćivanja goriva spada u izuzetno prljave tehnologije (obzirom na radioaktivnost) i cijena obnovljenog goriva ne razlikuje se bitno od novoga, ali postupak uključuje eliminiranje dijela nuklearnog otpada iz vlastite sredine. Konačno, predstoji zatvaranje starih nuklearnih postrojenja koja više ne mogu ispuniti sigurnosne uvjete u eksploataciji, što nosi vrlo visoke troškove u odnosu na zatvaranje zastarjelih konvencionalnih postrojenja.

1.5 **Parne i plinske turbine**

U parnoj turbini se potencijalna energija pare visokog tlaka pretvara u mehaničku energiju za pogon generatora. Kod ekspanzije dolazi do strujanja pare koje odgovara smanjenju njenog tlaka. Promjenom smjera pare koja struji preko zakrivljenih lopatica rotora turbine prenosi se na njih energija koja rezultira odgovarajućim momentom na osovini turbine. Stupanj iskorištenja energetske pretvorbe je ovisan o odnosu obodne brzine lopatica prema brzini strujanja pare. Tlak svježje pare ora se zato stupnjevano iskorištavati, te se i turbine grade sa takvim prilagođenjem.

U svakom stupnju turbine (visokotlačni, srednjetačni-i niskotlačni stupanj) koristi se točno određeni pad tlaka. Takav stupanj turbine sastoji se iz nepokretnog kola sa lopaticama za privođenje pare (stator) i pokretnog kola na osovini sa lopaticama koje se vrte (rotor). Zakrivljenje lopatica mora biti tako izvedeno da izlazno strujanje pare iz privodnog kola obzirom na obodnu brzinu rotora ulazi na njegove lopatice bez udara. Isto vrijedi za strujanje iz rotora na slijedeće privodno kolo.

Iskorištenje pada tlaka u jednom stupnju turbine može se izvesti na dva načina. Jedan je da do pada tlaka dolazi isključivo u privodnom kolu, pri čemu se na zakretnom kolu samo mijenja smjer strujanje pare istovremeno proizvodeći zakretni moment (akcioni princip). Drugi način je da imamo približno jednako podijeljen pad tlaka na pa privodnom i zakretnom kolu (reakcioni princip). U prvom slučaju imamo na ulazu i izlazu zakretnog kola jednak tlak, dok u drugom slučaju imamo na ulazu zakretnog kola veći tlak nego na njegovom izlazu i moramo osigurati odgovarajuće brtvljenje.

U praktičnoj izvedbi ćemo imati i kod akcionih turbina mali pad tlaka na lopaticama zakretnog kola radi pripadnih gubitaka protjecanja (uslijed trenja sa površinama lopatica i vrtloženja pare, posebice ako raste udio vode u pari). Stupanj iskorištenja u ovakvoj pretvorbi energije je kod reakcionih turbina malo veći nego kod akcionih turbina, ali uzimajući sve faktore u obzir mogu se obe izvedbe općenito smatrati jednako povoljnim.

Energija koju parna turbina predaje generatoru na osovini ovisi o količini svježje pare D_t i razlici njenih stanja na ulazu (entalpija h_d) i izlazu (entalpija h_e), te mehaničkom stupnju djelovanja η_m same turbine. Ova energija pretvara se u generatoru u električnu, pa uz stupanj djelovanja generatora η_g vrijedi jednadžba energetske bilance za blok turbina - generator:

$$P_g = D_t \cdot (h_d - h_e) \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (1.17)$$

Uobičajeno je izvesti neke pokazatelje procesa, kao što je specifična potrošnja pare d (ili specifična električna energija $w = 1/d$) gdje je:

$$d = \frac{D_t}{P_g} = \frac{1}{(h_d - h_e) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (1.18)$$

te specifična potrošnja topline:

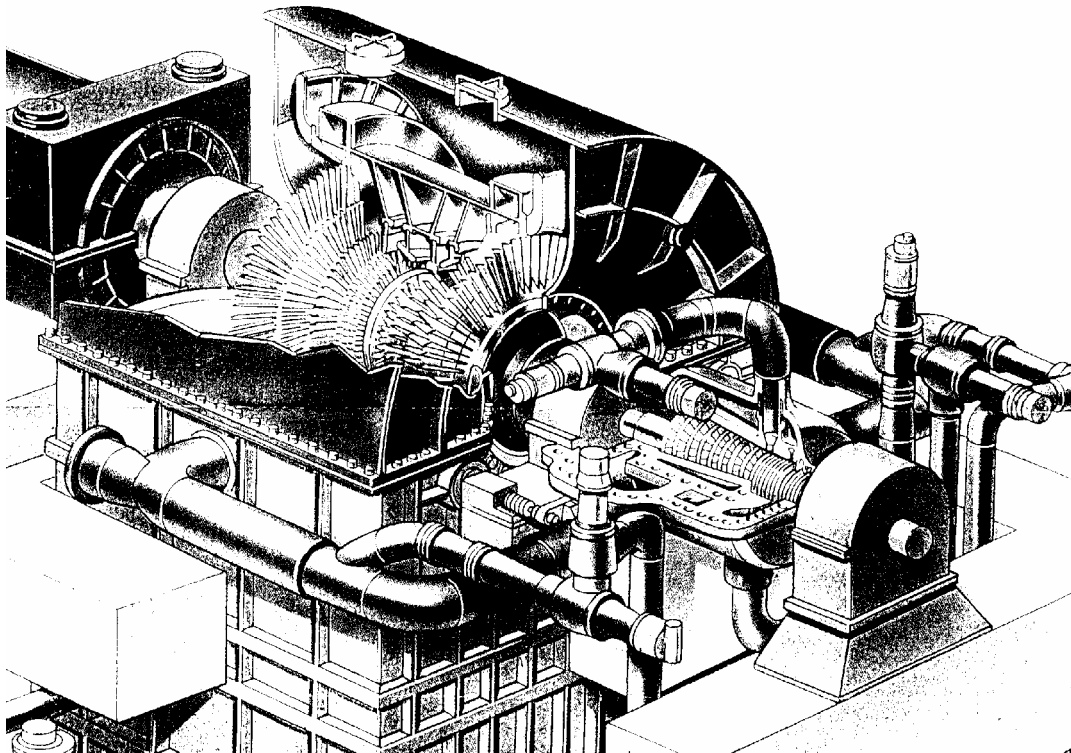
$$q = \frac{Q}{P_g} = \frac{D_t \cdot (h_d - h_a)}{P_g} \quad (1.19)$$

odnosno specifična potrošnja goriva:

$$b = \frac{D_t \cdot (h_d - h_a)}{H_i \cdot \eta_k \cdot \eta_c \cdot P_g} \quad (1.20)$$

Turbine koje trebaju iskoristiti veliki pad tlaka moraju biti izvedene u više stupnjeva. Veći broj stupnjeva može značiti da se oni ne mogu efikasno realizirati na jednoj osovini (preveliki razmak između ležaja i temperaturne razlike na kućištu). Zato se koriste izvedbe sa više kućišta, a osovine su neposredno povezane tako da se omogućuje kompenzacija njihove dilatacije i kvalitetno dinamičko balansiranje rotirajućih masa.

Kod ekspanzije pare povećava se njen volumen. Kako s time mora presjek strujanja biti sve veći, raste i duljina lopatica u smjeru strujanja. Pomenuli smo utjecaj obodne brzine na supanj iskorištenja u pretvorbi energije. Kako rastu volumeni u niskotlačnim dijelovima kondenzacionih turbina, moraju se povećavati promjeri zakretnih kola. Kod velikih jedinica vodi ovo na primjenu dva ili više paralelnih niskotlačnih stupnjeva da se postigne zadovoljavajući presjek strujanja.



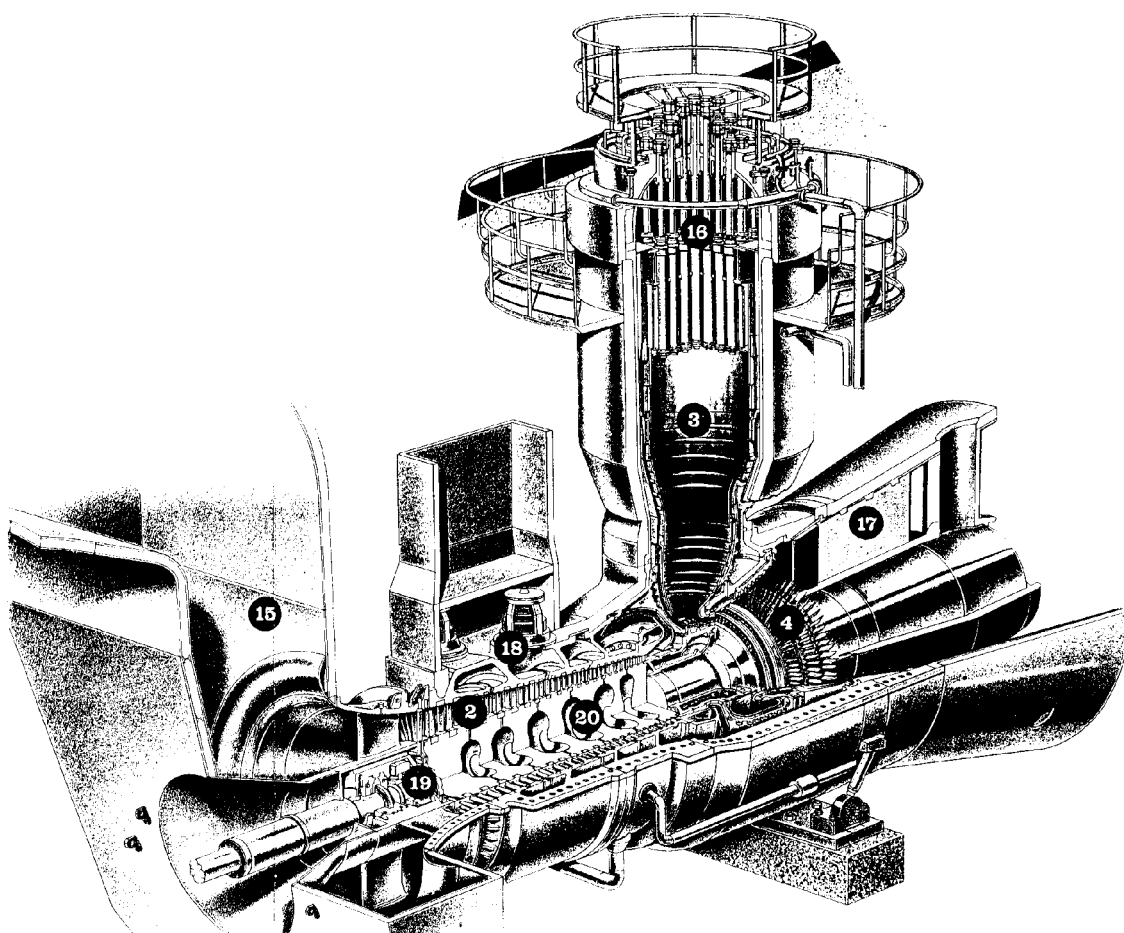
Sl. 1.19 - Visokotlačna kondenzaciona turbina 173 MW

Na sl. 1.19 je prikazana parna turbina u tandem kompaundiranoj izvedbi, gdje su u niskotlačnom dijelu izlazni stupnjevi postavljeni na istoj osovini s nasuprotnim strujanjem pare. Para se privodi u sredinu, odakle struji aksijalno na obe strane. Ovakav način znatno smanjuje aksijalne sile na osovinske ležaje turbine. Nazivna izlazna snaga turbine je 173 MW.

Visokotlačnom stupnju se privodi 130 kg/s svježe pare tlaka 75 bara i temperature 520°C, a niskotlačnim stupnjevima dolazi 150 kg/s pare tlaka 6,5 bara i temperature 200°C. Tlak u kondenzatoru iznosi 0,04 bara.

Kako kod reakcionih turbina redovito postoji razlika tlaka između ulaza i izlaza iz zakretnog kola, pojavljuje se sila na osovinu rotora u smjeru strujanja pare. Ovo izaziva aksijalnu silu koja se ne može preuzeti u jednom potisnom ležaju. Pojedina kućišta se moraju zato tako priključiti da se pomak kompenzira nasuprotnim silama kao kod pomenutog izlaznog stupnja. Kada ovo nije moguće realizirati, prije svega ako se radi o turbini s jedinstvenim kućištem, mora se primijeniti kompenzacioni klip. On proizvodi u smjeru suprotnom strujanju pare silu koja odgovara rezultanti aksijalnih sila pojedinih zakretnih kola turbine.

Turbine većih snaga za termoelektrane na fosilna goriva grade se isključivo sa jednim parom polova (3000 o/min kod 50 Hz), pri čemu je osovina generatora neposredno spojena sa osovinom turbine. U pogonu su jedinice snaga između 300 i 800 MW, a granična snaga ovakvih jednoosovinskih turbo-grupa još nije dostignuta. U nuklearnim elektranama su u pogonu jednoosovinske grupe od 600 do 1200 MW. Ove jedinice za 1500 o/min neposredno su spojene sa četvoropolnim generatorima. Prema završenim razvojnim istraživanjima lopatica za izlazne stupnjeve turbina, na redu je realizacija jedinica snage 1200 MW za 3000 o/min.



Sl. 1.20 - Plinska turbina 150 MW na kombinirano gorivo

Na sl.1.20 prikazana je plinska turbina koja može koristiti više vrsta goriva. Označeni su osnovni dijelovi u prerezu: (2) kompresor, (3) komora za izgaranje, (4) turbina, (15) dovod zraka, (16) gorionik, (17) ispusni plinski difuzor, (18) ventili kompresora, (19) ležaji prema generatoru, (20) olakšana rotorska osovina kompresora. S metanom kao gorivom je snaga

ovakve turbine 150 MW, s prirodnim plinom kao gorivom je snaga 139 MW, a ako se koristi rafinerijsko ulje u posebnoj pripremi postiže se snaga 116 MW. Kod najveće snage iz turbine dobijemo 505 kg/s izlaznog plina temperature 558 °C, koji se koristi dalje za proces s parnom turbinom. Za blok s parnom turbinom snage 500 MW dodavanje plinskog bloka znači povećanje stupnja djelovanja sa 0,413 na 0,4586 i dobitak iskorištenja od 11%. Treba ipak obratiti pažnju na ulaganja za ovakve plinske blokove, koji u komori za izgaranje postižu temperature preko 1100°C.

1.6 ***Pogonsko rješenje termoelektrane***

Kod velikih jedinica u termoelektranama danas se skoro isključivo primjenjuje gradnja u blokovima kotao - turbina - generator. Kotao, turbine i pumpe kondenzata su međusobno dobro prilagođene prema svojim radnim karakteristikama. Postrojenja za rashladnu vodu su koncipirana pretežno na principu zbirnog pogona, mada i tu postoje rješenja sa povezivanjem rashladnih tornjeva i pumpi u blokove. Međutim, ako se vrši oduzimanje pare (za potrebe industrije ili grijanja, dakle za bliske potrošače toplinske energije) vladaju drugačiji odnosi i redovito se opredjeljujemo za rješenje zbirnog pogona radi ekonomičnosti i sigurnosti snabdijevanja. Iz jednakih razlog se radi također priprema vode (za parni proces) s mehaničkim i kemijskim prečišćavanjem kao zbirni pogon.

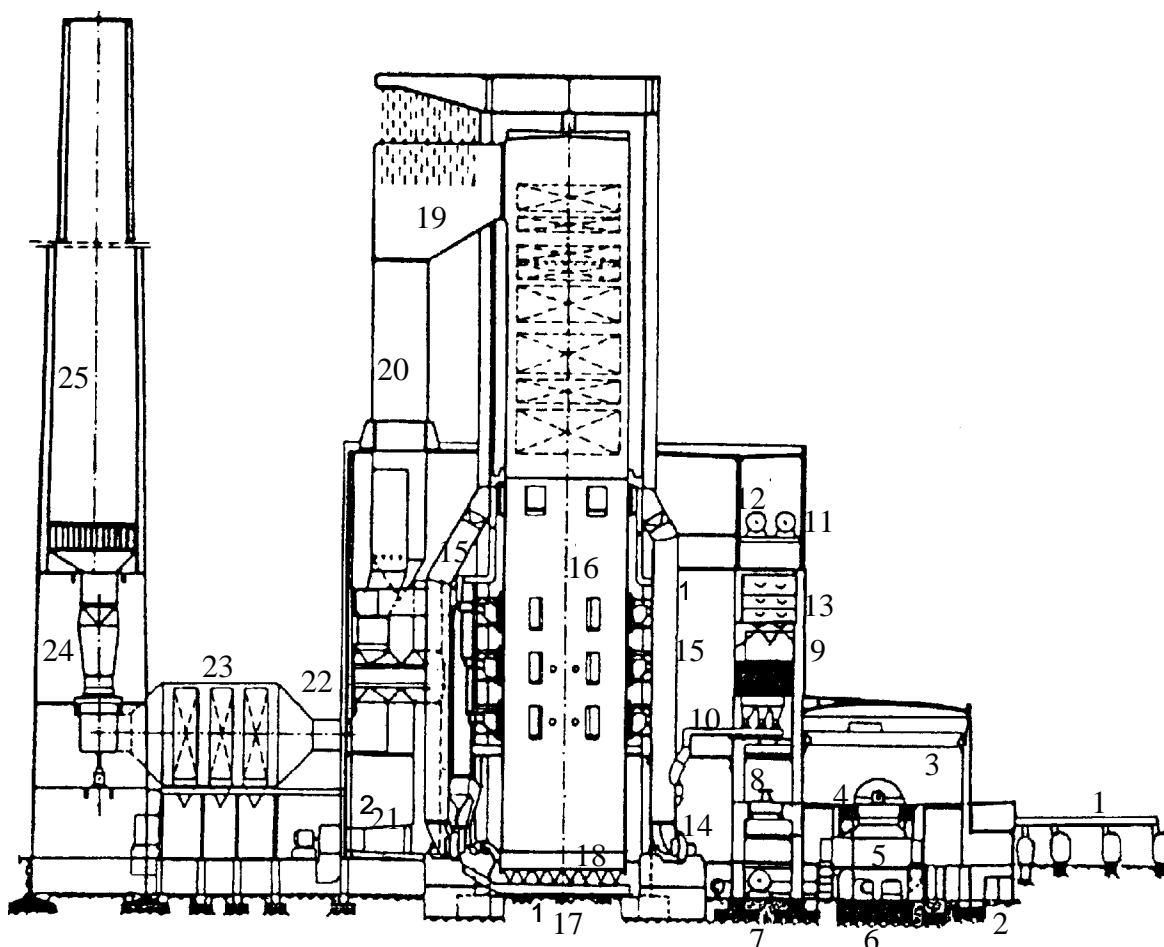
Obzirom na građevinske objekte razlikujemo u termoelektrani kotlovnicu, strojarnicu, rasklopnicu i transportirnicu. Ova posljednja je redovno izvedena iz armirano-betonske konstrukcije radi visokih opterećenja i potrebna je samo kod ložišta na kruto gorivo (ugljen). Može se locirati između kotlovnice i strojarnice s oslanjanjem na njih, pa se kotlovnica i strojarnica mogu izvesti iz željezne konstrukcije kao otvorena skela odnosno uz korištenje lakih pregrada unutar konstrukcije.

Veliki energetske blokovi za kruta goriva postavljaju se u t.zv. ravnoj gradnji, pri čemu elektro-filter stoji na niskoj skeli iza kotlovnice, a zatim slijedi dimnjak na specijalnom temelju. Kotlovska postrojenja za velike jedinice bloka imaju ponekad gornji dio (gdje ne postoji otpuhivanje čađi) postavljen u otvorenoj izvedbi. Za elektrane na zemni plin i ulje, gdje nemamo objekt transportirnice i elektro-filter, primjenjuje se također gradnja sa prednapregnutim armiranim betonom. Ovdje se kotao ovjesi na dva stupa na kojima se nalazi vezni jaram koji nosi dimnjak. Prednja i zadnja obloga kotlovnice izvode se iz lakog materijala koji mora zadovoljiti na zvučnu izolaciju. Umjesto stupova koriste se i armirani profili koji bolje zatvaraju prostor kotlovnice.

Strojarnica može biti izvedena zajednička za cijelu elektranu ili da svaki energetske blok ima svoju strojarnicu. U prvom slučaju je kod velikih jedinica zahtjev da je postavljanje turbine paralelno sa uzdužnom osi strojarnice, inače bi kran strojarnice morao biti izveden za nepotrebno veliki raspon. U svakom slučaju mora biti temelj turbine izveden odvojeno od temelja objekta strojarnice, kako bi se spriječio prijenos vibracija strojeva na građevinsku konstrukciju. Predgrijač se postavlja u strojarnici pored turbine radi što kraćeg cjevovoda. Pumpe za kondenzat mogu biti postavljene u strojarnici, transportirnici ili čak u vlastitom pumpnom objektu.

Za dopunu u cirkulacionom krugu voda / para mora biti pripravljena količina vode koja odgovara bar jednom procentu ukupne maksimalne količine. Kod novih postrojenja je ovaj iznos veći obzirom na potrebe podešavanja tijekom pogona. Odvođenje plinova iz vode izvodi se u kondenzatoru turbine ili u zasebnom otplinjaču. Danas se većinom predviđa kemijska priprema vode poslije koje čista voda ima praktično kvalitetu kondenzata. Sirova voda se uzima na zahvatu, te pumpa u taložnike i preko mehaničkog filtera vodi na omekšavanje. Za tu svrhu se koriste ionski izmjenjivači i aktivni kemijski filteri za

postizanje kemijske neutralnosti i otklanjanje kemijskih nečistoća. Kvaliteta pripreme je bitna za troškove održavanja i gubitke u proizvodnji topline.



Sl. 1.21 - Prikaz termoelektrane 600 MW za smeđi ugljen

Rasklopno postrojenje za vlastitu potrošnju smješta se ili u posebnom objektu ili u transportirnici ukoliko tamo postoji dovoljno prostora. Obično se postrojenje 6 ili 10 kV planira u posebnom objektu, a 0,4 kV u transportirnici ili u kotlovnici. Za lokaciju je mjerodavan raspored najvećih trošila kao i potrebne duljine kablova. Najveći broj niskonaponskih trošila nalazi se u kotlovnici.

Sl.1.21 služi za primjer planiranja gradnje jedne termoelektrane, gdje su označeni: (1) transformatori, (2) rasklopnica, (3) mosna dizalica strojarnice, (4) turbina, (5) kondenzator, (6) strojarnica, (7) transportirnica, (8) pumpa kondenzata, (9) bunker za ugljen, (10) doprema ugljena, (11) spremnik kondenzata, (12) spremnik sa otplinjačem, (13) mlinski razdjeljivač ugljena, (14) mlin za ugljen, (15) povrat dimnih plinova, (16) parni kotao, (17) kotlovnica, (18) odvod drozge, (19) pranje dimnih plinova, (20) dimni kanal, (21) kompresor zraka, (22) predgrijač zraka, (23) elektro - filter, (24) odsisni kompresor, (25) dimnjak. Pri tome u slici nije obuhvaćen niz pratećih postrojenja, prije svega krug rashladne vode (hlađenje protočnom vodom, povratno hlađenje u rashladnim tornjevima ili zračna kondenzacija), zaštita okoliša (visina dimnjaka, izdvajanje spojeva sumpora iz dimnih plinova, ograničenje zagrijavanja vodotoka odnosno isparenja, zaštita od buke u naseljenim područjima i dr.). Sada se sve više koriste skuplja rješenja sa suhim tornjevima koji manje utječu na prirodnu ravnotežu okoliša.

2. Hidroelektrane

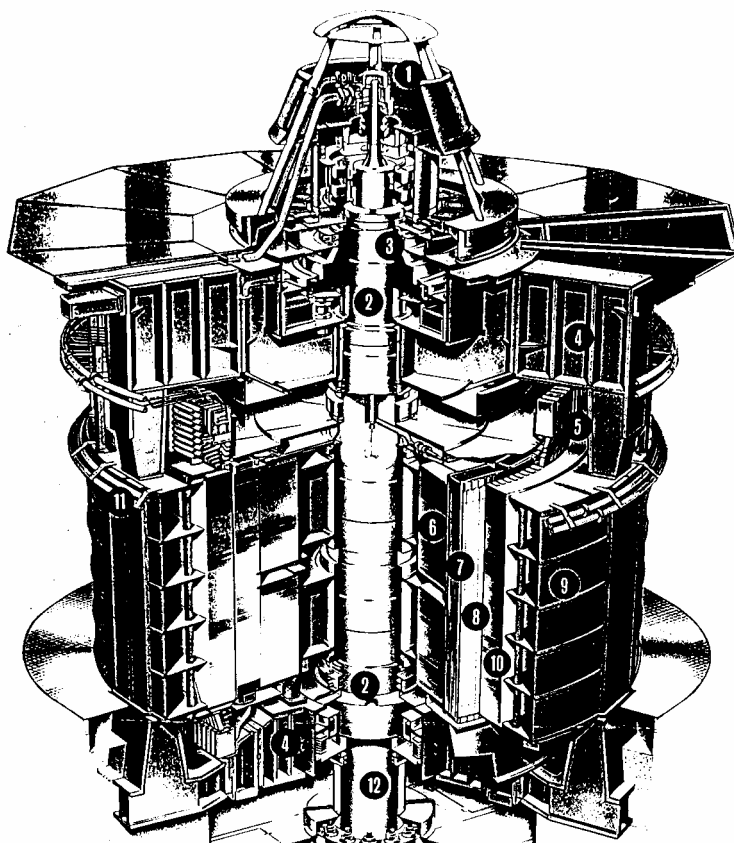
2.1 *Osnovne značajke hidroelektrana*

Uvjetovani topografskim i klimatskim prilikama područja, vodotokovi u razvijenim zemljama su posljednjih desetljeća visoko iskorišteni radi niskih troškova proizvodnje u hidroelektranama. U cilju pokrivanja vršnih opterećenja i sekundarne regulacije u mreži, negdje su aktualna pumpno - generatorska postrojenja kao dopuna postojećim elektranama i dobra alternativa neželjenim novim nuklearnim elektranama. U područjima Azije, Afrike i Amerike postoje još velike mogućnosti izgradnje hidroelektrana. Bogati vodotokovi zahtijevaju vrlo velike blokove turbina - generator i niz novih konstrukcijskih i tehnoloških rješenja. Iako je razvoj u industrijski razvijenim zemljama usmjeren sada na termičku proizvodnju energije, još uvijek su značajna ulaganja u izgradnju reverzibilnih (pumpno-generatorskih) postrojenja koja služe za pokrivanje vršnih opterećenja i kao regulacione elektrane uključene u sekundarnu regulaciju mreže. Posebnu vrijednost imaju ovakva postrojenja ako mogu preuzeti dio proizvodnje nuklearnih elektrana kako bi ovima bilo osigurano barem približno jednoliko opterećenje.

Razvoj velikih hidrogeneratora temelji se na hidrauličkim odnosima i u posljednjim desetljećima su postignuta bitna povećanja jediničnih snaga posebice kod niskih brojeva okretaja i kod pumpno - generatorskih postrojenja. Kao i kod turbogeneratorskih, iskorištenje strojeva je znatno povećano kroz smanjenje dodatnih gubitaka i vodeno hlađenje statorskog namota, a djelomično i željeza statora i rotorskog namota. Sve ovo vodi ka generatorima visokog stupnja djelovanja odnosno smanjenih dimenzija.

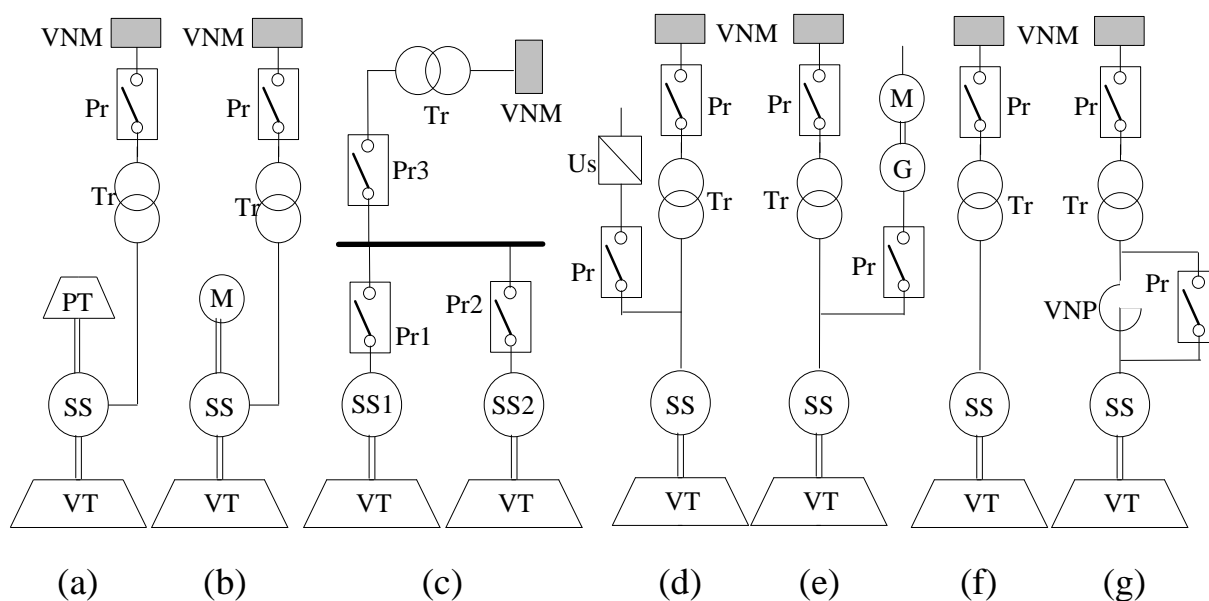
Na sl. 2.1 prikazan je primjer presjeka generatora sa vodenim hlađenjem i osnovnim podacima: nazivna prividna snaga 360 MVA, nazivni faktor snage 0,86 , nazivna brzina 333 o/min, nazivni napon 19,5 kV i nazivna frekvencija 50 Hz. Rotorski namot se hladi vodom koja protječe kroz spojnu jedinicu (1). Osovina generatora (12) je u gornjem dijelu smještena u aksijalni (2) i vodeći (3) ležaj koji su unutar konzolnih nosača (4). Dalje su oznake kako

slijedi: statorski namot (5), jezgra rotora (6), rotorski namot (7), jezgra pola (8), kućište statora (9), jezgra statora (10), te privod rashladne vode statorskom namotu (11).



Sl. 2.1 - Presjek hidrogeneratora

Uvođenje turbina koje se koriste i kao pumpe u reverzibilnim elektranama donijelo je nove probleme zaleta. Zalet u generatorski pogon normalno se obavlja s pomoću turbinskog pogona, te se sinkronizirani stroj ukapča na mrežu. No kod zaleta u pumpnom pogonu ili za prijelaz iz generatorskog režima rada u motorni pumpni pogon mora postojati neovisni energetski izvor za zalet sinkronog stroja. To na istoj osovini mogu biti posebna turbina pogonjena vodom iz akumulacijskog bazena ili poseban motor napajan iz mreže.



Sl. 2.2 - Sheme zaleta sinkronog stroja u pumpnom radu

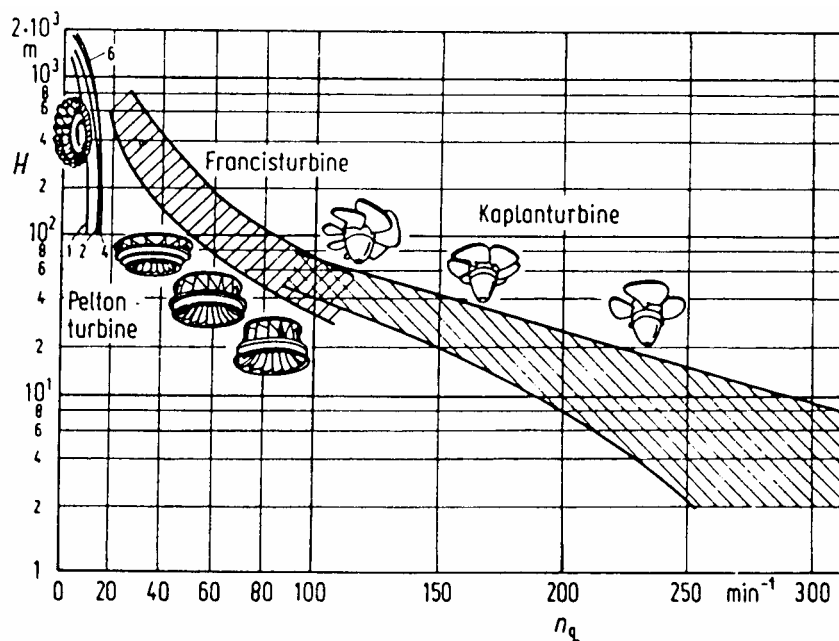
Za prijelaz iz generatorskog u motorni pogon može se koristiti sinkroni zalet uključivanjem motor - generatorske grupe, statičkog pretvarača frekvencije ili ako naš sinkroni stroj radi na istim sabirnicama sa paralelnim susjednim blokom.

Izuzev zadnjeg, navedena su rješenja vrlo skupa. Za mrežu i sinkroni stroj je puno nepovoljnije da se koristi jeftini direktni asinkroni zalet koji uzrokuje nagla opterećenja i visoke struje. Rješenja se traže u konstrukciji stroja (masivni polovi umjesto lameliranih sa prigušnim namotom) i paralelnoj prigušnici koja ograničava pad mrežnog napona kod asinkronog zaleta (normalno je prigušnica u trajnom pogonu premoštena pomoću rastavnog prekidača).

Na sl. 2.2 prikazane su opisane mogućnosti zaleta sinkronog stroja u pumpnom pogonu: (a) pomoću zasebne turbine, (b) pomoću zasebnog motora, (c) sinkroni frekventni ili djelomično frekventni zalet pomoću paralelne jedinice, (d) sinkroni zalet pomoću statičkog pretvarača, (e) sinkroni zalet pomoću zasebnog motor-generatora, (f) asinkroni zalet s direktnim uklapanjem, te (g) asinkroni zalet s uklapanjem preko prigušnice. Jasno je da asinkroni zalet ima nisku cijenu ali i veliko udarno opterećenje za mrežu, pa je najpovoljniji frekventni zalet ako za njega postoji mogućnost (dva ili više blokova paralelno) .

2.2 Vodene turbine

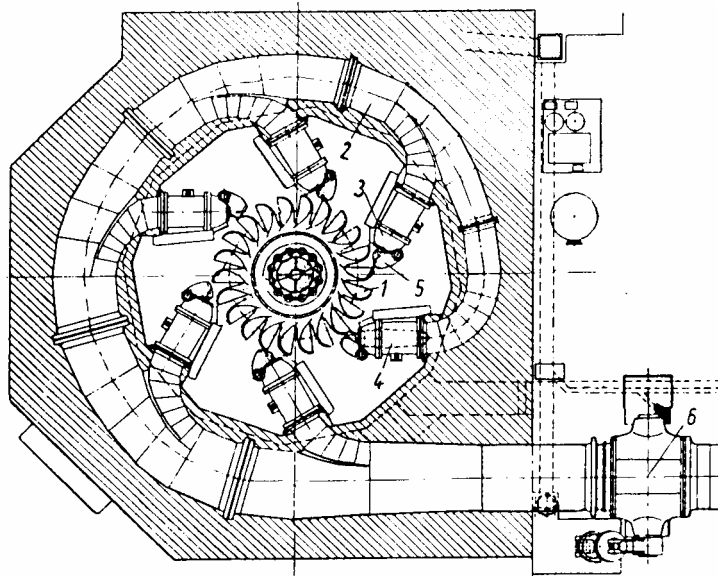
Ovisno o specifičnim uvjetima, u hidroelektranama se koriste Peltonove, Francisove ili Kaplanove odnosno propelerne turbine. Područje primjene pojedinih tipova pokazano je na sl. 2.3, a ovisi o neto padu vode H i specifičnom broju okretaja n_q . Skicirani su oblici turbinskih kola, a kod turbina slobodnog mlaza (Pelton) označene su karakteristike za izvedbe sa 1, 2, 4 i 6 mlaznica. Specifični broj okretaja n_q može se izvesti pomoću teorije sličnosti strojeva sa strujanjem nekompresibilnih fluida. On daje broj okretaja turbinskog kola geometrijski sličnog promatranome kada ima volumni protok $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ kod neto pada vode $H = 1 \text{ m}$.



Sl. 2.3 - Područja primjene tipova vodenih turbina

Specifični broj okretaja n_q (min^{-1}) odnosi se na točku punog opterećenja i predstavlja karakterističan broj koji služi za izbor tipa turbine, kada kod željenog broja okretaja n (min^{-1}) trebamo iskoristiti danu veličinu protoka Q (m^3/s) i pada H (m) vode. Dobijemo ga prema relaciji:

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (2.1)$$



Sl. 2.4 - Pelton turbina sa 6 mlaznica $P = 167 \text{ MW}$, $n = 180 \text{ o/min}$

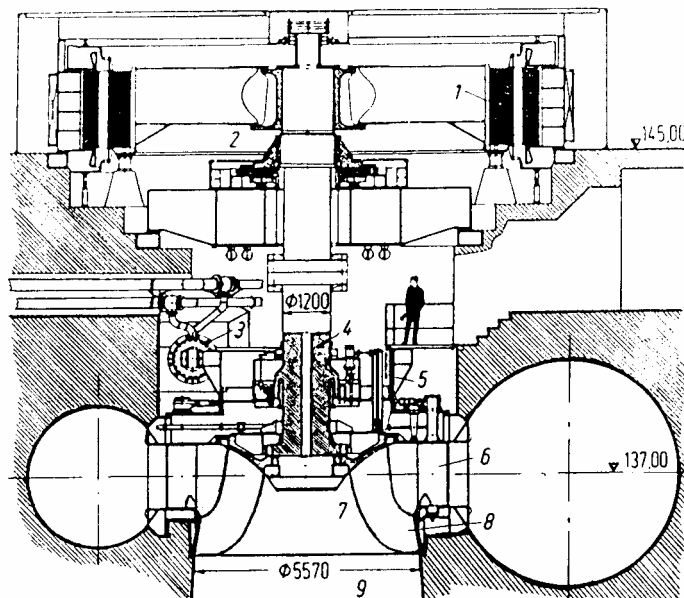
Na sl. 2.4 prikazan je primjer Pelton turbine kakve se većinom koriste kod padova iznad 100 m (ovdje je pad $H = 413 \text{ m}$ i protok $Q = 46 \text{ m}^3/\text{s}$). Kod ove vrste turbina pretvara se pomoću mlaznica (3) sva potencijalna energija vode u kinetičku energiju. Mlaz vode dolazi tangencijalno na turbinsko kolo (1) na čijem obodu su raspoređene zdjelčaste lopatice, udara u njih i pritom im predaje svoju energiju. Ovisno o protoku izvode se turbine s jednom ili više mlaznica. Izlazni presjek mlaznice (3) može se u svrhu reguliranja snage turbine mijenjati pomoću aksijalno pomične igle (4). Pomak igle može se izvesti mehanički preko rašljaste poluge izvana ili pomoću ugrađenog servomotora (2) oko kojega struji voda iz privoda (2). Ovo drugo rješenje (sl. 2.4) omogućava veći radijus zakrivljenosti i manju turbulenciju i gubitke strujanja u privodima. Stupanj djelovanja ovisi primarno o izvedbi zakrivljenja lopatica i kod ovakvih turbina je obično $0,80 \div 0,88$.

Kod naglog pada opterećenja turbine morao bi se brzo smanjiti protok vode da se ne poveća brzina vrtnje (slobodni broj okretaja turbine naziva se pobjeg i ovdje doseže 170% nazivnog broja okretaja). Brzina smanjenja protoka ograničena je opasnim povećanjem tlaka u privodima, pa se koristi sustav otklanjanja mlaza. Otklanjač mlaza (5) ulazi sa strane u mlaz, djelomično ga otklanja smanjujući količinu vode koja udara u lopatice i time vrlo brzo umanjuje pogonsku snagu turbine. Istovremeno ali znatno sporije pomjeraju se igle u mlaznicama u novi položaj manjeg protoka, a otklanjač mlaza smanjuje skrenutu količinu vode. Grubo namještanje protoka turbine može se raditi na ulaznom zatvaraču (6).

Dok se kod turbina slobodnog mlaza (Pelton) pretvorba energije događa kod jednakog tlaka vode (akcioni princip), kod Francisove i Kaplanove turbine imamo pad tlaka na turbinskom kolu (reakcioni princip). Ovdje je turbinsko kolo kod svih pogonskih stanja potpuno izloženo tlaku vode. Tlak na ulazu turbinskog kola je veći nego na njegovom izlazu.

Francis turbina se koristi u području geodetskih razlika visine između 60 i 600 metara, a pobjeg im je $1,7 \div 2,0$ puta veći od nazivnog broja okretaja. Na sl. 2.5 je crtež presjeka bloka turbina-generator snage $P = 221 \text{ MW}$ kod $n = 138,5 \text{ min}^{-1}$ za pad $H = 87,5 \text{ m}$ i protok $Q = 284 \text{ m}^3/\text{s}$. U vertikalnom rasporedu smještena je turbina neposredno ispod generatora (1), te centrirana pomoću aksijalnog (2) i samopodmazujućeg vodećeg (4) ležaja. Voda najprije

prostrujava kroz ulaznu spiralu (8) koja raspoređuje privedenu količinu vode, te se preko privodne rešetke (6) usmjerava pod najpovoljnijim kutom na lopatice turbinskog kola (7), a onda kroz difuzor (9) istrujava izvan turbine u bazen donje vode. Ulazna spirala (8) osigurava osno simetričnu raspodjelu brzina vodenih čestica pred ulazom na lopatice privodne rešetke. Privodne lopatice su hidrodinamički profilirane (analogno aerodinamičkom obliku nosivog krila), a mogu se zakretati oko uzdužne osi pomoću zajedničkog regulacionog prstena (5).



Sl. 2.5 - Francis turbina sa generatorom 221 MW, 138,5 o/min

Zakretanje se regulira preko dva (rjeđe četiri) hidraulična servomotora (3) smještene na poklopcu turbine. Kod velikih turbina novije izvedbe koriste se pojedinačni servomotori za svaku privodnu lopaticu.

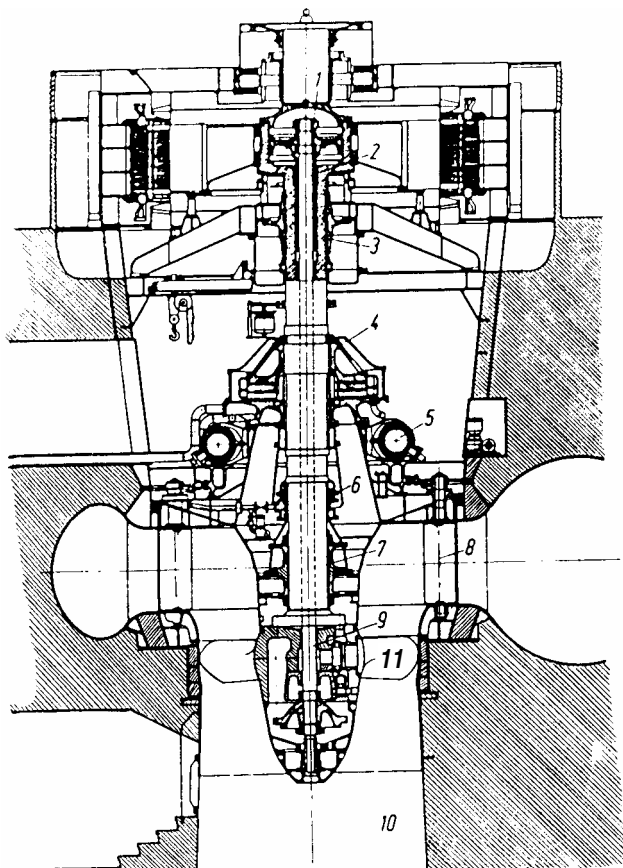
Podešavanjem položaja privodnih lopatica regulira se turbina. Kod nazivnog radnog stanja (opterećenja) postavljene su privodne lopatice tako da imamo minimalno vrtloženje kod protjecanja vode na zakretnom kolu. Kod djelomičnog opterećenja ili kod preopterećenja mijenja se položaj privodnih lopatica, a time i promjena zakretanja toka pred turbinskim kolom i površine presjeka protjecanja koji odgovaraju tom opterećenju. Promjena zakretanja toka ima smisao promjene neto pada, a promjena presjeka protjecanja ima smisao promjene volumnog protoka. Sada imamo prostrujavanje kod jednakog broja okretaja turbine koje je znatno vrtložnije, pa se može pojaviti i neželjena trešnja turbine ili čak i cijelog agregata. Ova pojava mora biti u razvoju konstrukcije turbine posebno kontrolirana jer se konstrukciona greška takve vrste ne može naknadno ispraviti.

Zadaća difuzora na izlazu iz turbine je da iskoristi dio preostale kinetičke energije vode. Kod izvedbi nadtlačnih turbina, gdje spadaju i Francis turbine, treba posebnu pažnju obratiti pojavi kavitacije. Na mjestima osobito smanjenog tlaka (pretežito u zakretnom kolu) dolazi do isparavanja strujeće vode pa kasnije do udarne kondenzacije mjehurića pare u vodenom toku. Pri ovome mogu biti kontaktne površine (posebice lopatice i vijenac turbinskog kola) izložene oštećenju.

Kaplan turbina prema sl. 2.6 je prikladna za protoke kod promjenljivih i relativno malih padova do oko 70 metara, pa je najprikladnija za protočne elektrane (ovdje je pad $H = 38$ m i protok $Q = 75$ m³/s), a pobjeg im je 2,0÷2,8 puta veći od nazivnog broja okretaja. U odnosu na Francis turbine imaju Kaplan turbine prednost da su također lopatice okretnog kola podesive, a ostali dijelovi (spiralni privod, privodna rešetka, okretno kolo, difuzor) su u osnovi jednake izvedbe. Time dobijemo dvostruku regulaciju (privodnih i rotorskih) lopatica što omogućava puno bolju prilagodbu turbine promjenljivim pogonskim uvjetima, te se

stupanj korisnog djelovanja relativno malo mijenja i kod većih odstupanja od nazivnog opterećenja.

Reguliranje Kaplan turbina izvodi se (preko odgovarajućeg regulacionog kruga) podešavanjem privodnih lopatica zakretanjem regulacionog prstena pomoću servomotora (5). Naknadno se podešavaju lopatice (11) zakretnog kola pomoću krivuljne ploče dok se ne postignu u regulacionom krugu optimalni uvjeti. Pogon je osiguran pomoću servomotora (1) koji je ovdje smješten na gornjem kraju turbinske osovine (inače se može postaviti blizu poklopca zakretnog kola). Vertikalnost osovine (2) osigurava se centrirajućim ležajem (3) obzirom na aksijalni ležaj (4). Osovinskom brtvom (6) odijeljen je turbinski dio osovine sa ležajem (7). Između privodne rešetke (8) i difuzora (10) nalazi se zakretno kolo (9) sa podesivim zakretanjem lopatica.

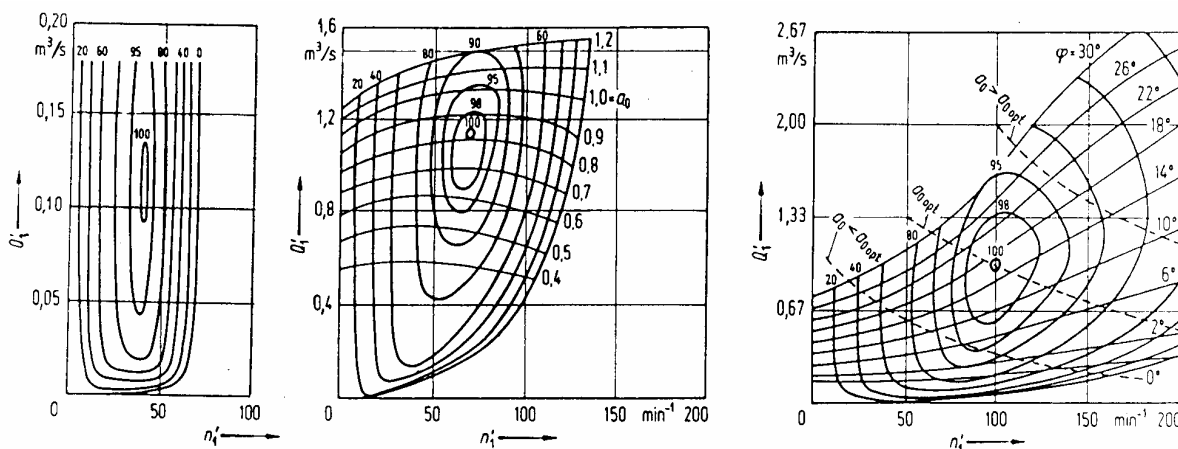


Sl. 2.6 - Kaplan turbina sa generatorom 24,8 MW, 200 o/min

Da se mogu točno definirati hidrodinamička svojstva turbina, slično specifičnom broju okretaja n_q , uvode se pojmovo također jedinični volumni protok Q'_1 i jedinični broj okretaja n'_1 , koji u okviru zakona geometrijske sličnosti protjecanja služe izvedbi različitih veličina turbine na temelju rezultata modelnih ispitivanja. Polazeći od volumnog protoka Q i neto pada H dobije se iz jedn. (2.1) specifični broj okretaja n_q i iz dijagrama na sl. 2.3 odredi najprikladniji tip turbine. Međutim se na temelju ovoga još ne može ništa reći o dimenzioniranju odabranog tipa turbine. Potrebno je poći od zahtjeva da turbina ima maksimalan stupanj korisnog djelovanja η_{\max} kod protoka koji odgovara očekivanom srednjem godišnjem protoku Q_{sr} . U ovu svrhu se obično koriste dijagrami prikazani na sl. 2.7. Za postavljanje takvog dijagrama projektira se i gradi modelna turbina slične geometrije protjecanja kod promjera $D = 1$ metar i neto pada $H = 1$ metar. Na ovakvoj modelnoj turbini može se tada snimiti primjerice kod Francis turbine krivulje $Q'_1(n'_1)$ i $\eta(n'_1)$ za različite položaje α_0 lopatica privodne rešetke (otvorenost privoda) i to ucrtati kako je prikazano u sl.

2.7b. Za jedinični volumni protok Q'_1 odnosno jedinični broj okretaja n'_1 vrijede sljedeće relacije:

$$Q'_1 = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad , \quad n'_1 = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (2.2)$$



a) Pelton ($n_q = 4,5$)

b) Francis ($n_q = 70$)

c) Kaplan ($n_q = 120$)

Sl. 2.7 - Karakteristike protjecanja o brzini vrtnje turbina

Ako su poznati protok Q , neto visina H i dijagram prema sl. 2.7 koji daje jedinični volumni protok Q'_1 kod maksimalnog stupnja korisnog djelovanja η_{\max} , može se iz prve jedn. (2.2) izračunati promjer D kod kojega turbina može ispuniti postavljene zahtjeve. Iz druge jedn (2.2) za ovaj promjer D i jedinični broj okretaja kod n'_1 (po dijagramu) slijedi broj okretaja n za traženu turbinu. Ako se ova vrijednost uvrsti u jedn. (2.1), treba rezultat dovoljno dobro odgovarati specifičnom broju okretaja n_q koji je pretpostavljen za odabrani tip turbine na početku proračuna.

U sl. 2.7c je dana također ovisnost o položaju lopatica (kut φ) zakretnog kola Kaplan turbine, koji se može mijenjati unutar 30° i time popravljati stupanj djelovanja turbine za različite protoke.

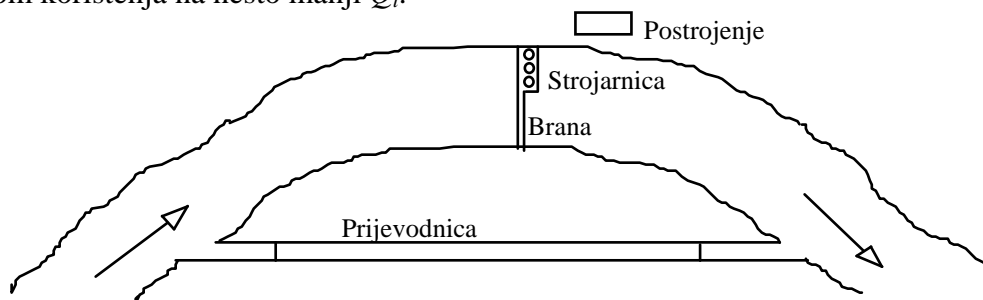
Značajno je primijetiti iz sl. 2.7 da optimalna pogonska područja leže kod različitih vrijednosti specifičnog broja okretaja n_q i jediničnog volumnog protoka Q'_1 . Za jednu određenu kombinaciju visine pada H i protoka vode Q traži se dakle sasvim određeni tip turbine. To je prikazano pomoću karakterističnih područja za pojedine tipove u dijagramu na sl. 2.3. Pri tome su u zonama preklapanja pojedinih područja primjenjiva u osnovi oba tipa turbine, a za konačni izbor se koriste dodatni tehnički i ekonomski kriteriji (doprema, održavanje i sl.). Uobičajeno je da se izbor glavnih dimenzija turbine provodi na temelju specifičnih podataka (dijagrama ili tablica) pojedinih proizvođača.

2.3 Protočne i akumulacione elektrane

Kod hidroelektrana se u osnovi razlikuju protočne i akumulacione elektrane. Strojarnice elektrana mogu biti smještene blizu vodotoka odnosno akumulacije, ali mogu biti i na određenoj udaljenosti povezane prikladnim kanalom odnosno tunelom (cjevovodom) radi boljeg iskorištenja pada vode (derivacioni tip elektrane).

Kod protočnih elektrana imamo tijekom godine obično vrlo jaki utjecaj oscilacija količine vode koja je na raspolaganju u vodotoku, te geološke i hidrološke prilike bitno utječu na proizvodnju energije i raspoloživost kapaciteta. Protok na koji se dimenzionira izgradnja Q_i

uvjetovan je gospodarskim, vodoprivrednim i tehničkim uvjetima. Protok se može samo djelomice koristiti za proizvodnju energije iz tehničkih razloga, ali često postoji potreba i da se ostave riblja staza, prijevodnica za plovila ili jednostavno nešto vode da se kod derivacionih elektrana ne isuši staro korito rijeke i poremeti režim podzemnih voda. Potreba za većim iskorištenjem vodotoka upućuje na povećanje Q_i , a želja za moguće duljim vremenom korištenja na nešto manji Q_i .



Sl. 2.8 - Shema protočne elektrane

Kod hidroelektrana se koristi potencijalna energija vode koja se nalazi na određenoj visini. Visina pada vode (geodetska visina) odnosi se na razliku razina između gornje vode i donje vode. U jednom vodotoku može se prirodni pad iskoristiti za postizanje korisnog pada podizanjem razine gornje vode ili spuštanjem razine donje vode pomoću ustave, ili kanalnim odnosno tunelskim privodom vode.

Mogućnost izvršenja rada određene količine vode odgovara njenoj potencijalnoj energiji. Obično se kao snaga jednog vodotoka daje njegova bruto snaga:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{g \cdot m \cdot H}{t} = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \quad (2.3)$$

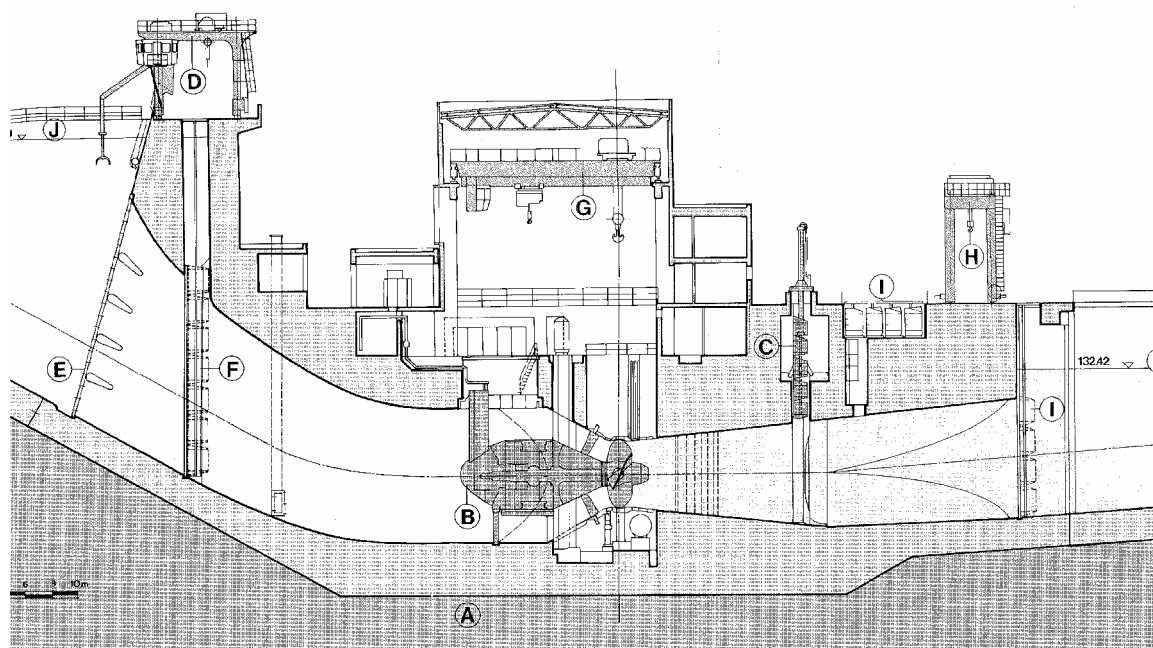
Pri tome je volumni protok $Q = V/t$, a specifična masa $\rho = m/V$ (za vodu se uzima $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$). Uzimajući u račun gubitke trenja, te električne gubitke koji se javljaju u generatoru i transformatoru, dobije se neto snaga vodotoka efektivno:

$$P_{ef} = \eta_{uk} \cdot g \cdot \rho \cdot Q \cdot H = c \cdot Q \cdot H \quad (2.4)$$

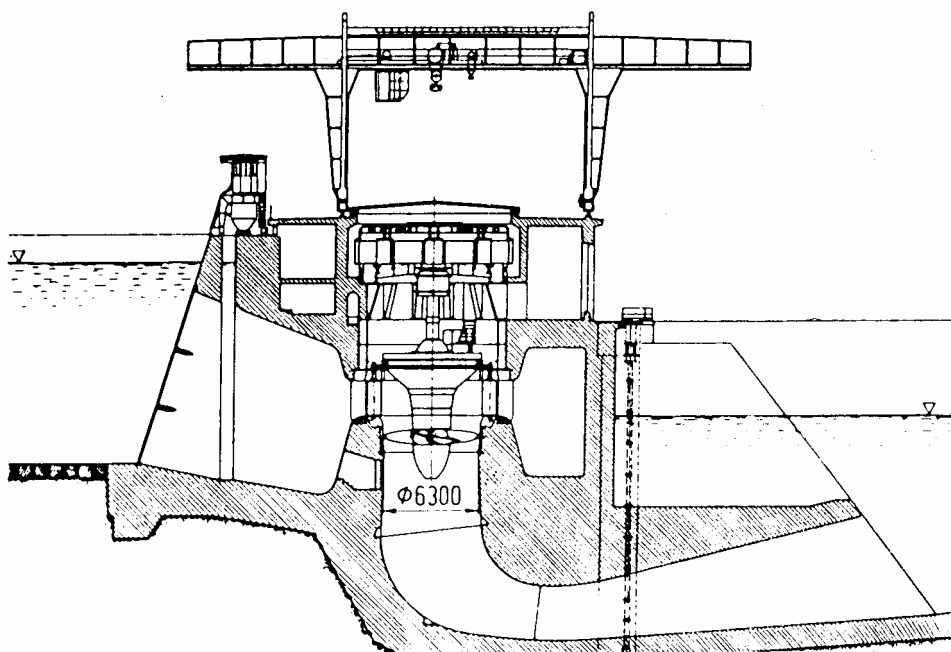
Ovdje je ukupni stupanj korisnog djelovanja produkt pojedinih stupnjeva (primjerice je za cijevovod $\eta_{cj} \approx 0,93 \div 0,99$, za turbinu $\eta_t \approx 0,85 \div 0,94$, za generator $\eta_g \approx 0,95 \div 0,99$, za transformator $\eta_{tr} \approx 0,97 \div 0,99$). Ukupni stupanj korisnog djelovanja nalazi se između 0,75 i 0,92. Ako se uzme približna vrijednost $\eta_{uk} \approx 0,82$, dobijemo da je koeficijent neto snage $c \approx 8$, podrazumijevajući da manje vrijednosti ima kod agregata manje snage. Najjednostavnije rješenje iskorištenja vodotoka možemo postići kada imamo znatan protok sa zadovoljavajućim padom kod strmih obala, te postavljamo poprečnu branu na prikladnom mjestu. Pri tome nije poželjno postaviti rasklopno postrojenje neposredno uz branu nego podalje na obali.

Na sl. 2.9 prikazan je presjek kroz strojarnicu hidroelektrane Dubrava na Dravi izgrađenu 1985÷90. godine. Akumulacija iznosi 93 km^3 , a instalirana snaga je 75 MW za protok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ i neto pad 16,85 m. Najveća visina betonske brane je 23,5 m, a u strojarnici su ugrađene dvije proizvodne grupe cijevne izvedbe s vodoravnom osovinom. Turbine su dvostruko regulirane, s nazivnim protokom $250 \text{ m}^3/\text{s}$, promjeraom radnog kola 5,4 m, brzinom vrtnje 125 min^{-1} , maksimalne snage 40,3 MW kod konstrukcijskog pada 17,5 m. Generatori su snage 42 MVA, napona 6,3 kV, nazivnog faktora snage 0,95 s prisilnom cirkulacijom zraka za hlađenje pretlaka 2 bara. Blok transformatori su snage 43 MVA i prijenosnog odnosa 6,3/115 kV. Oznake na sl. 2.9 su kako slijedi: A - naslage šljunka, B - cijevni agregat (propelerna turbina s generatorom), C - brzi zatvarač protoka, D - dizalica s čistilicom rešetke, E - rešetka, F - uzvodne gredne zapornice, G - glavna dizalica agregata, H - portalna

dizalica, I - nizvodne gredne zapornice, J - normalni uspor (gornja voda), K - donja voda za nazivni protok.



Sl. 2.9 - Presjek sa strojarnicom hidroelektrane Dubrava

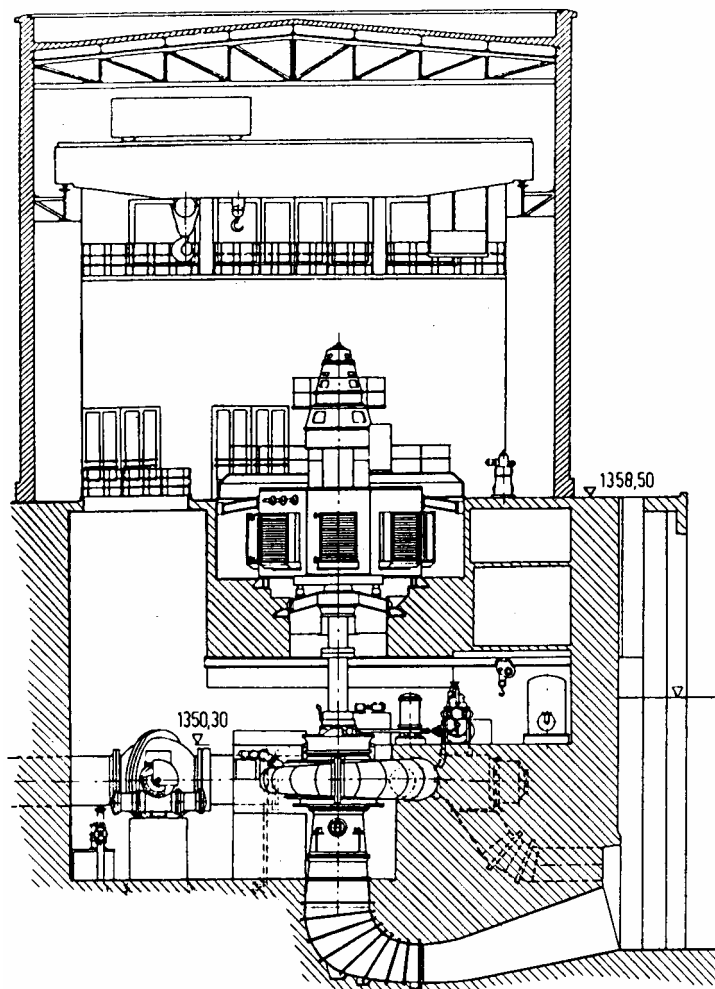


Sl. 2.10 - Protočna elektrana sa Kaplan turbinom 24 MW, 83,4 o/min

Na sl. 2.10 prikazan je presjek protočne elektrane sa zaštićenom izvedbom generatora jer je izbjegnuta gradnja strojarnice u punoj visini. Snaga agregata je 24 MW kod $83,4 \text{ min}^{-1}$, a nazivni pad je 11 m uz protok $251 \text{ m}^3/\text{s}$. Radi troškova gradnje i zaštite okoliša inzistira se u zadnje vrijeme na čim nižim izvedbama protočnih elektrana. Kako je visina strojarnice određena njenim kranom koji mora pokrivati prostor iznad svih generatora, novije je opredjeljenje da se koristi otvoreni portalni kran koji može neupadljivo stajati uz obalu. Naravno da to znači izvedbu pomičnih poklopaca iznad generatora i odvojeni smještaj pojedinih uređaja za uzbuđu generatora.

Na sl. 2.11 je pokazan presjek elektrane sa vertikalnim generatorom i Francis turbinom snage 56 MW i broja okretaja 400 min^{-1} kod protoka $20,3 \text{ m}^3/\text{s}$ i pada 311 m. Radi smanjenja

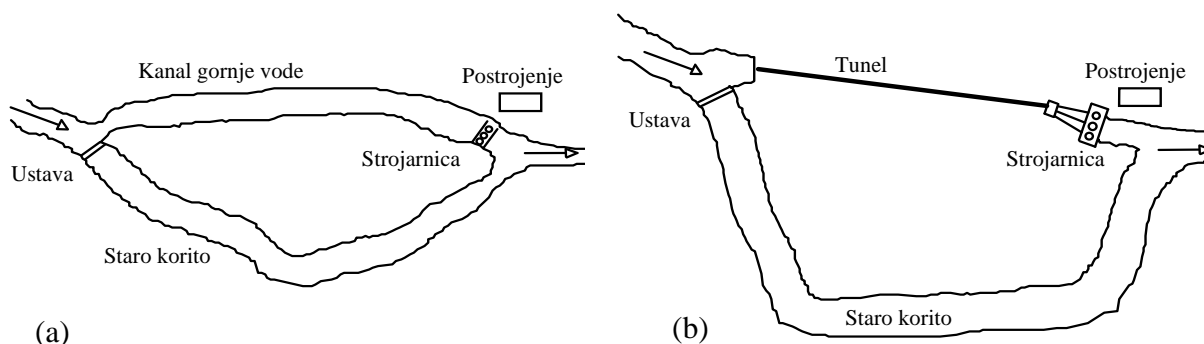
troškova i očuvanja okoliša trebaju ovakve elektrane biti građene što niže. Visina građevnog objekta određena je u osnovi dizaličnim postrojenjem koje osigurava mogućnost podizanja generatora i druge strojarske opreme. Zato je povoljno izmjestiti uređaje za uzбудu i regulaciju, a u novije vrijeme se izvođe objekti bez visoke strojarnice. Ovdje postoje pomični pokrovi pojedinih generatora, a portalna dizalica se dovodi na mjesto montaže sa zaštićenog mjesta uz obalu.



Sl. 2.11 - Presjek bloka sa Francis turbinom 56 MW, 500 o/min

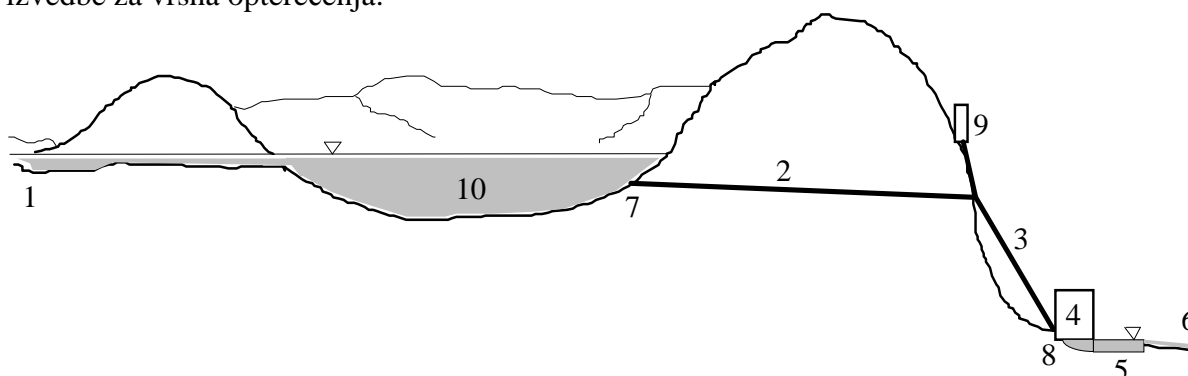
Daljnje smanjivanje visine objekta može se postići primjenom cijevnih turbina. To su horizontalne propelerne turbine sa planetarnim reduktorom, kojim se prenosi vrtnja na generator. Propelerna turbina je hidraulički slična Kaplan turbini. Ovdje okretno i privodno kolo imaju podesive lopatice, a turbina je protjecana u aksijalnom smjeru. Gotovo ravna usisna cijev ima bolji stupanj djelovanja kod visokih protoka. Pošto sada ne postoji ulazna spirala, može se razmak između pojedinih turbina značajno smanjiti. Voda struji oko generatora pa on mora iz hidrauličkih razloga biti što manjeg promjera, što uvjetuje uvođenje reduktora koji će kod male brzine turbine povećavati broj okretaja generatora.

Ako je konfiguracija obala nepovoljna za pribransku protočnu elektranu, može se izvesti elektrana sa kanalnim privodom vode. Na prikladnom mjestu se postavlja ustava i voda kanalom gornje vode s minimalnim padom vodi do strojarnice koja je locirana uz korito rijeke, gdje se koristi pad između gornje i donje vode (prema shemi na sl. 2.12-a). Kod iskorištavanja planinskih vodotokova nije uvijek moguće niti svrhovito locirati elektranu u koritu ili kanalu, nego se koristi tunel kroz brijeg kojim na izlazu ima zatvaračnicu. Odavde se voda cjevovodom privodi turbinama, kako je shematski ilustrirano u sl. 2.12-b.



Sl. 2.12 - Shema protočne elektrane: (a) s kanalom, (b) s tunelom

Pojedine planinske zemlje imaju vrlo razvijeno korištenje vodotokova, gdje su izgrađeni cijeli sustavi hidroelektrana. Uobičajena je izgradnja elektrana u neprekinutom nizu gdje je donja voda jedne elektrane istodobno gornja voda naredne elektrane. Obzirom na iskorištenje vodotoka ovakvi nizovi elektrana u elektroenergetskom sustavu se koriste obično za pokrivanje temeljnog opterećenja. Ako imamo prije prve ili iza zadnje brane mogućnost posebne akumulacije vode, moguće je izvesti oduzimanje vode i to koristiti kod odgovarajuće izvedbe za vršna opterećenja.



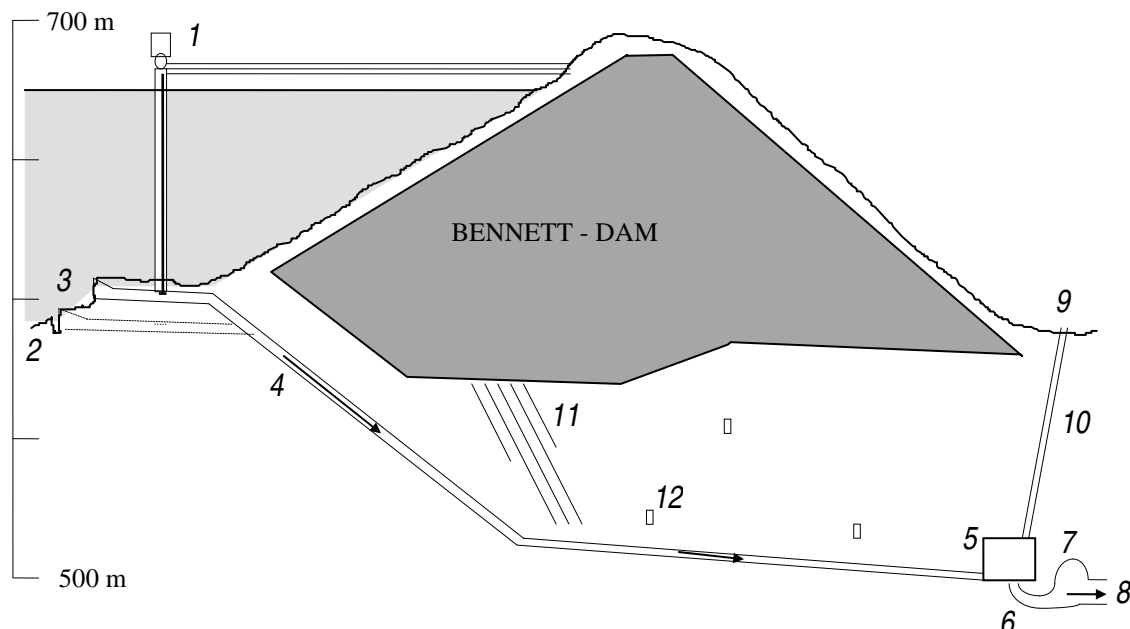
Sl. 2.13 - Shema akumulacione elektrane

Dobri uvjeti za proizvodnju električne energije postoje ako imamo jezero na dovoljnoj nadmorskoj visini i sa dovoljnim dotokom (1). Ako se prirodni odvod iz jezera (10) djelomice ili potpuno zatvori, voda se tunelom (2) i cjevovodom (3) može dovesti na turbine elektrane (4) i tek odavde u bazen donje vode (5) i odvod (6) u prirodni tok. Zapornica (7) i zatvaračnica (8) služe za reguliranje protoka, a vodostan (9) za ograničenje tlaka kod naglih smanjivanja protoka. Pojednostavljena shema rješenja prikazana je na sl. 2.13.

Ako su oscilacije vodotoka takve da se on ne može ekonomično koristiti tijekom godine, gradi se akumulacija koja će osigurati sabiranje vode u vrijeme manje potrebe proizvodnje energije odnosno većih dotoka. Tako je moguće pokriti veću potrošnju u vrijeme manjih dotoka. Ovakve akumulacije se obično dijele na godišnje, mjesečne, tjedne i dnevne prema veličini akumulacije. Kako protok vode kroz elektranu značajno oscilira s opterećenjem, nizvodno je potrebno osigurati jedan ili više bazena za izjednačavanje. Kod akumulacione elektrane, kao uostalom kod svih visokotlačnih postrojenja, mora se na kraju vodnog tunela a ispred tlačnog cjevovoda predvidjeti vodostan (vodna komora). U slučaju da turbine elektrane treba brzo zaustaviti, vodna komora se naglo puni kroz tunel strujećom vodom i time smanjuje tlačni udar u cjevovodu i na dijelovima zatvaračkog mehanizma.

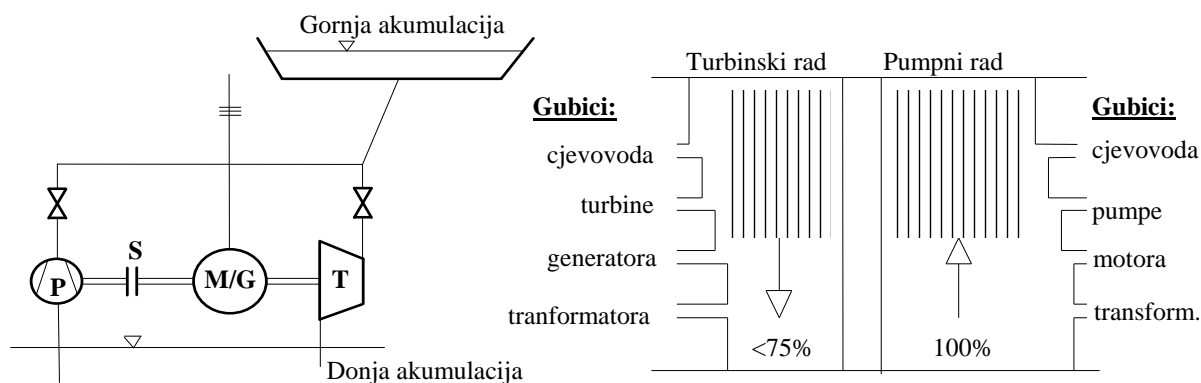
Na velikim vodotokovima, primjerice u USA (Columbia), Canadi (Manicouagan, Churchill brzaci) i Sibiru izgrađene su velike hidroelektrane sa vještačkim jezerima. Strojarnice su nerijetko smještene u zemlji. Na sl. 2.14 je shema elektrane sa branom Benett na rijeci Peace (Canada, Britanska Columbia) kojih 900 km sjeverno od Vancouvera. Brana je duga 2040 m i visoka 83 m, a jezero prima godišnju akumulaciju od približno 36 km^3 vode.

Zbog curenja su u tlo injektirane vodonepropusne obloge (11), te postavljen sustav horizontalnih i vertikalnih kanala (12) za odvod iscedka. Za deset ulaza (2,3) u tlačne tunele (4) postavljeno je upravljanje (1). U spilji strojarnice (5) nalazi se deset vertikalnih agregata sa Francis turbinama snage $P = 10 \times 227 \text{ MW}$ kod $n = 150 \text{ min}^{-1}$ (48 polni generatori za 60 Hz) za pad $H = 152 \text{ m}$ i protok $Q = 170 \text{ m}^3/\text{s}$, od kojih dio pokriva vršna opterećenja. Iz difuzora (6) voda dolazi u sabirnu komoru (7) i odlazi ispusnim tunelom (8). 500 kV transformatorsko postrojenje (9) povezano je sa strojarnicom kabelskim tunelom (10).



Sl. 2.14 - Visinski profil akumulacione elektrane s ukopanom strojarnicom

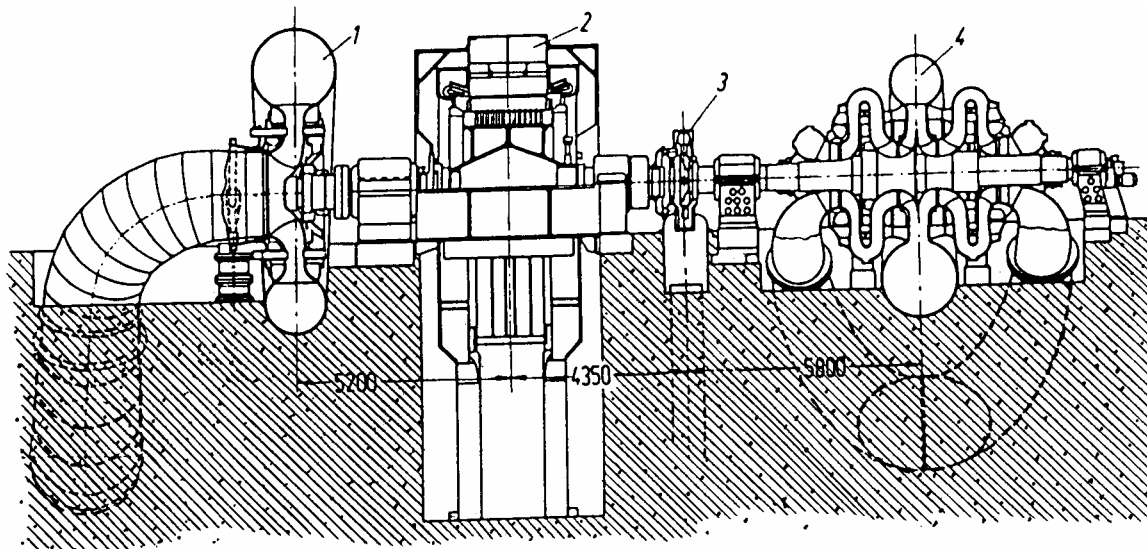
Ako je dotok u akumulaciju mali ili terminski neprikladan usljed specifičnih hidroloških prilika, mogu se kod povoljnih geoloških okolnosti graditi reverzibilna postrojenja. To znači da se u periodu suviška (jeftine) električne energije ona koristi za pumpanje vode u akumulacije na višoj nadmorskoj visini, kako bi se u periodima vršnih opterećenja ova voda koristila za pogon turbine i proizvodnju energije. Isti sinkroni stroj se koristi u motorskom odnosno generatorskom režimu rada jer o njegovom stupnju djelovanja ne ovisi značajno iskorištenje ovakve akumulacije energije.



Sl. 2.15 - Shema i iskorištenje reverzibilne elektrane

Na sl. 2.15 je osnovna shema reverzibilnog postrojenja s vodom turbinom i pumpom. Pumpa je rastavljivom spojkom povezana s blokom turbina-generator i može puniti akumulaciju u motornom režimu rada sinkronog stroja (tada se vodna turbina vrti u praznom hodu). U generatorskom režimu rada pumpa je mehanički odspojena sa osovine bloka.

Prijelaz sa jednog na drugi režim rada vrši se jednostavno pomoću spojke i upravljivih ventila. Ukupni stupanj djelovanja ovakvog postrojenja određen je pojedinačnim stupnjevima djelovanja pojedinih dijelova u pumpnom i turbinskom režimu rada. Koristeći suvremenu raspoloživu opremu ukupno se može dobiti nazad do 3/4 uložene energije.

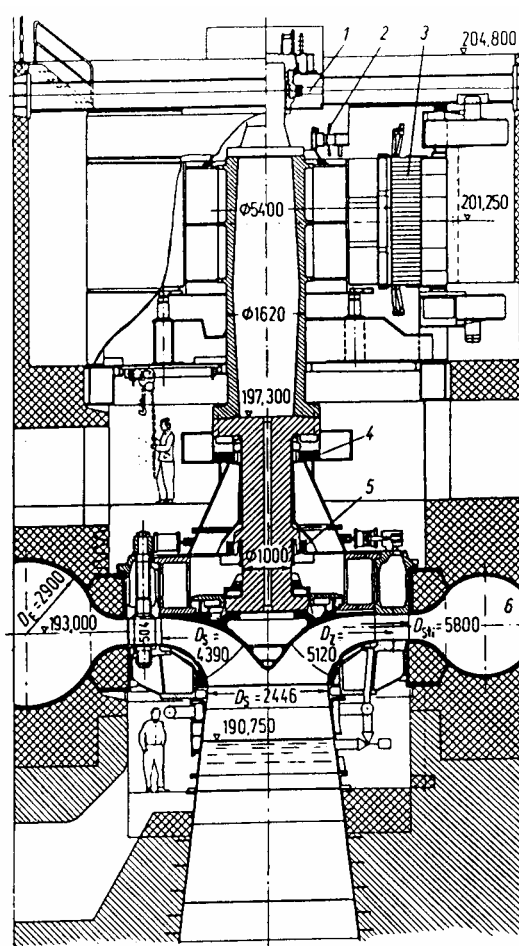


Sl. 2.16 - Presjek bloka 90 MW u reverzibilnoj elektrani

Na sl. 2.16 prikazana je jedna jedinica pumpno-turbinskog postrojenja. Spiralna Francis turbina (1) izvedena je za maksimalnu snagu 104 MW kod 428 o/min za pad $265 \div 290$ m i protok $37 \div 39,5$ m³/s. Sinkroni stroj (2) je projektiran za rad u motornom i generatorskom režimu, a zaletna akciona turbina (3) sa spojkom ima snagu 2,7 MW kod pada 288 m i protoka 1,31 m³/s. Paralelna dvostupanjska pumpa (4) ima maksimalnu snagu 76 MW. Turbina je kruto vezana na osovinu generatora i njen pogon ovisi o privodu vode. Kod prijelaza na pumpni režim treba prvo isprazniti pumpu komprimiranim zrakom, pa je zaletiti pomoću male akcione (Pelton) turbine do sinkrone brzine vrtnje. Nakon toga uklopi zupčasta spojka osovinu sinkronog stroja koji preuzima pogon, a isključi se komprimirani zrak koji onemogućava dotok vode u pumpu.

Pored rješenja sa posebnom turbinom i pumpom, u novije vrijeme koristi se izvedba pumpa-turbine. Pri tome je pumpa-turbina hidraulički stroj sa promjenjivim smjerom vrtnje, a za cjelokupno reverziranje treba oko 70 sekunda. Na sl. 2.17 je prikazano takvo rješenje sa vrtikalnom osovinom koja ima gornji (1), donji (5) i aksijalni ležaj (4). U gornjem dijelu su smješteni pomoćni generator (2) i motor-generator (3) snage 230 MVA i brzine $333,3 \text{ min}^{-1}$, a u donjem dijelu pumpa-turbina (6) snage 215/200 MW. Zalet u pumpnom pogonu se ovdje izvodi direktno sa mreže, a može se predvidjeti i pomoću zasebnog motora.

Usljed tromosti i nestlačivosti radnog medija kakav je voda, regulacioni organi kod postrojenja sa vodenim turbinama ne smiju djelovati tako brzo kao kod parnih turbina radi opasnosti pojave previsokih tlakova u postrojenju. Zato se turbine i većinom također generatori grade s dovoljno velikim zamašnim masama. Za slučaj da kod potpunog rasterećenja zatvarački organi turbine ne zatvore protok unatoč djelovanju regulatora ili padu tlaka ulja, mora se računati sa porastom broja okretaja koji će dosegnuti između dvostruke i trostruke vrijednosti nazivne brzine. Točna vrijednost ovisi o tipu turbine i odabranom sistemu regulacije, a za tu vrijednost mora biti računano dozvoljeno naprezanje generatora sa izraženim polovima koji koristimo u bloku.



Sl. 2.17 - Presjek bloka s pumpa-turbinom u reverzibilnoj elektrani 200 MW

Nasuprot termičkim postrojenjima gdje je veličina potrebnih ulaganja uglavnom malo ovisna o lokaciji elektrane, cijena hidroelektrane bitno ovisi o prirodnim uvjetima i pogodnostima da se izgrade svi građevinski objekti i adaptira okoliš. Period izgradnje je znatno duži i nastoji ga se povezati sa drugim zadaćama iz okvira vodoprivrede, poljoprivrede i sl., jer hidroelektrane obuhvaćaju znatno veće prostorne površine u odnosu na druga postrojenja. U eksploataciji se ovako visoka ulaganja vraćaju kroz niske troškove proizvedene energije (u odnosu na termoelektrane otpadaju troškovi goriva, a također su bitno manji troškovi održavanja i broj uposlenih). Posebno je delikatno pitanje opravdanosti reverzibilnih postrojenja koje bitno ovisi o termoelektranama u cjelokupnoj mreži i zahtjevima da se pokriju određena vršna opterećenja.

3. **Generatori u elektrani**

3.1 ***Izvedba i hlađenje generatora***

Proizvodnja značajnijih količina električne energije danas se izvodi isključivo pomoću sinkronih generatora za frekvencije 50 (Europa) ili 60 Hz. U nekim srednjoeuropskim zemljama postoje još u elektranama za napajanje željezničke mreže veliki generatori za frekvenciju $16\frac{2}{3}$ Hz kao ostatak ranijih tehnoloških rješenja. Male hidroelektrane snage do cca 100 kW izvode se također sa asinkronim generatorima radi niže cijene i jednostavnijeg održavanja.

Izbor izvedbe generatora u elektrani (turbogenerator ili generator sa izraženim polovima) ovisi o broju okretaja pogonskog stroja, sa kojim se u pravilu nalazi direktno spojen. Samo izuzetno, kod malih turbina u postrojenjima za proizvodnju tehnološke pare mogu se naći reduktori između turbine i generatora. Kod termoelektrana na fosilna goriva (ugljen, nafta, plin i dr.), gdje imamo proces za pregrijanom parom, ugrađuju se generatori sa jednim parom polova ($p = 1$) i sinkronim brojem okretaja $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$ kod 50 Hz, odnosno $n_s = 3600 \text{ min}^{-1}$ kod 60 Hz. Isti generatori se koriste i u nuklearnim elektranama sa plinom hlađenim visokotemperaturnim reaktorima. Kod reaktora hlađenih lakom vodom imamo znatno niže temperature i tlakove svježeg pare (proces sa zasićenom parom), te ugrađujemo generatore sa dva para polova ($p = 2$) i sinkronim brojem okretaja $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$ kod 50 Hz, odnosno $n_s = 1800 \text{ min}^{-1}$ kod 60 Hz.

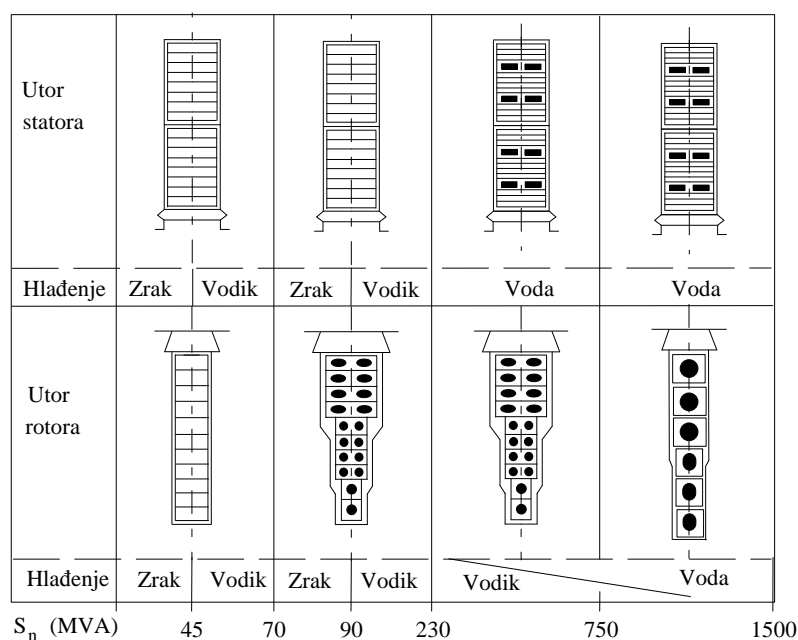
Ako su sinkroni generatori pogonjeni vodenom turbinom ili dieselskim motorom, koriste se višepolne izvedbe čiji sinkroni broj okretaja može biti čak ispod 100 min^{-1} . Generatori u akumulacionim i reverzibilnim elektranama imaju najčešće sinkroni broj okretaja $600 \div 750 \text{ min}^{-1}$, dok generatori većih protočnih elektrana imaju sinkroni broj okretaja u području $60 \div 120 \text{ min}^{-1}$. Primjerice je za sinkroni broj okretaja $n_s = 125 \text{ min}^{-1}$ potrebna izvedba sa 48 polova ($p = 24$).

Kod turbogeneratora se na obodu rotora pojavljuju velike centrifugalne sile. Pri tome su najveća naprezanja materijala u glavama namota. Zato se promjer rotora ograničava danas na

cca 1250 mm, odnosno na obodnu brzinu cca 200 m/s kod nazivnog broja okretaja. Uzбудni namot se raspoređuje po obodu punog rotora. Turbogeneratori hlađeni zrakom grade se do snaga cca 40 MVA uobičajeno kao industrijski turboagregati. Oni se mogu graditi do cca 170 MVA uz nešto nepovoljniji stupanj djelovanja. Iz ekonomskih razloga se danas u pravilu grade turboagregati preko 50 MVA s hlađenjem pomoću vodika, koji pod tlakom $3 \div 5$ bara cirkulira kroz šuplje profile vodiča.

Još veće iskorištenje stroja postiže se neposrednim vodenim hlađenjem statorskog namota i djelomice također rotorskog namota. Poboljšanje hlađenja omogućava značajno povećanje statorskog strujnog obloga $A = 3 \cdot N \cdot I_n / (p \cdot \tau_p)$, gdje je I_n nazivna struja, N broj zavoja po grani, p broj pari polova, a τ_p polni korak. Razmjerno strujnom oblogu povećava se značajka korisnosti:

$$c = \frac{S_n}{n_s \cdot l_i \cdot D^2} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \xi \cdot A \cdot B_\delta \quad (5.1)$$



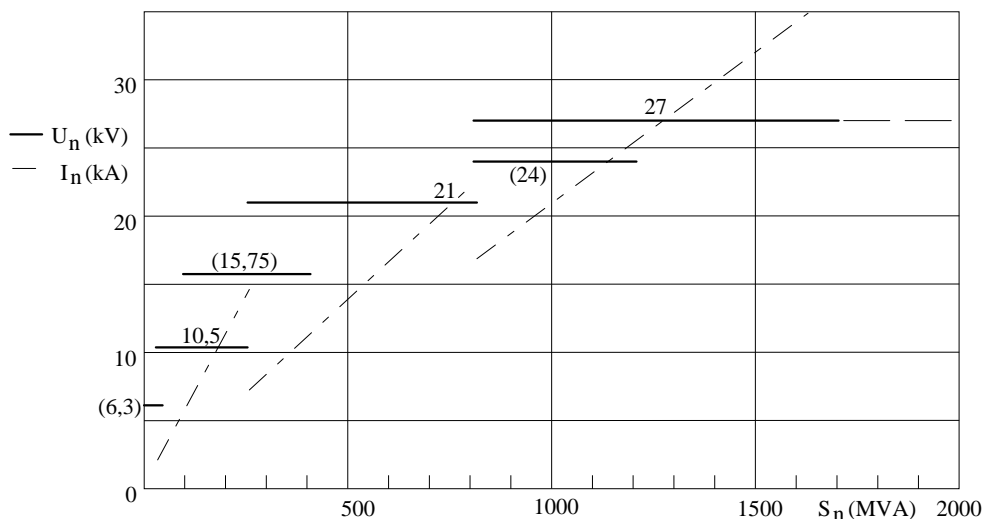
Sl. 3.1 - Hlađenje statorskog i rotorskog namota generatora

gdje je S_n nazivna prividna snaga sinkronog stroja, $n_s = 60 \cdot f/p$ sinkroni broj obrtaja (u minuti), D promjer provrta statora, l_i idealna duljina željeza stroja, ξ razultantni faktor namota (kod turbogeneratora iznosi oko 0,9), B_δ magnetska indukcija u zračnom rasporu (svedena na promjer D), A strujni oblog statora (sveden na promjer D). Orientacione vrijednosti su kako slijedi: za hlađenje zrakom $c = 5$, za hlađenje vodikom $c = 9$, za hlađenje kroz šuplje vodiče rotora $c = 15$, za hlađenje kroz šuplje vodiče rotora i statora $c = 22$, te za hlađenje vodom kroz vodiče $c = 40$. Na sl. 3.1 prikazani su presjeci statorskog i rotorskog namota s primjenjenim hlađenjem i približnom nazivnom prividnom snagom generatora.

Kod velikih dvopolnih generatora je u zadnjih osamdeset godina veličina magnetske indukcije B_δ u zračnom rasporu porasla sa 0,62 na 1,2 T, a veličina strujnog obloga A sa $0,123 \times 10^5$ na $2,5 \times 10^5$ A/m. Ovakvo povećanje iskorištenja materijala uz forsirano hlađenje podrazumijevalo je i mjere za smanjenje dodatnih gubitaka. Ovdje u prvom redu dolaze usukivanje statorskog namota po cijeloj duljini, te mjere u području krajeva rotora kao nemetalna učvršćenja glava namota, magnetski zaslони i materijali iz prešanog željeza statora sa niskim gubicima. Kod velikih generatora se stoga kod punog opterećenja danas postižu visoki stupnjevi iskorištenja od oko 98,5% .

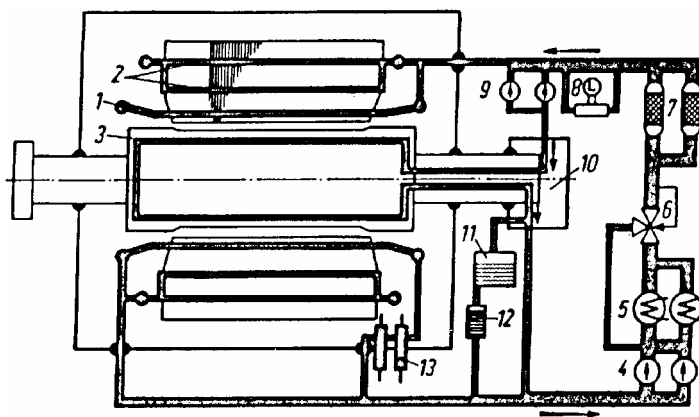
Ranije korišteni izolacioni materijali na bazi tinjca i šel-laka zamijenjeni su umjetnim smolama na bazi poliestera koje su termoelastične i otporne na otapala. Tako je danas moguće proizvesti vacuumski impregniranu izolaciju statora vrlo visoke trajnosti (izolacijsko starenje) i potpuno otpornu na ulje i vodu.

Nazivni napon generatora približno se određuje prema sl. 3.2 ovisno o njegovom opterećenju. Za podešavanje treba predvidjeti područje od najmanje $\pm 5\%$ od nazivnog napona. Kod generatora niskog napona je snaga ograničena na oko 2 MVA za 400V.



Sl.3.2 - Nazivni naponi generatora prema nazivnoj snazi

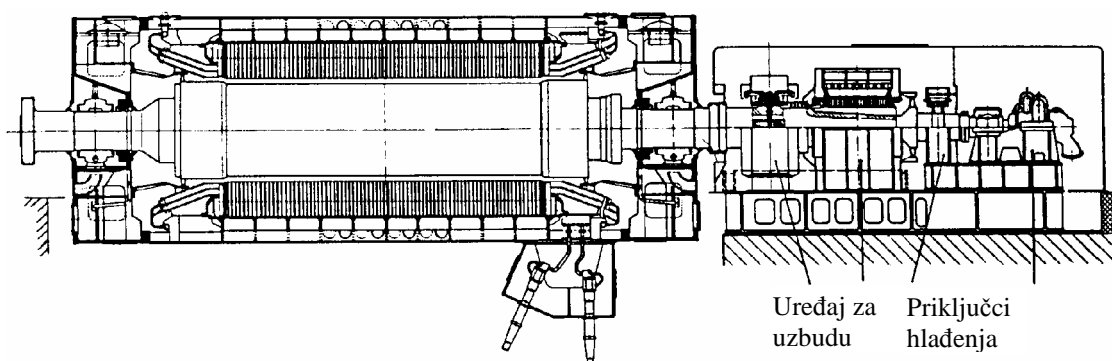
Generatori sa direktnim vodenim hlađenjem statorskog namota i direktnim vodikovim hlađenjem rotora su danas tipično rješenje za velike 2-polne i 4-polne strojeve. Povećanje snage stroja moguće je u direktnoj svezi s rješenjem vodenog hlađenja statorskog i rotorskog namota. Mogućnosti odvođenja topline obzirom na korišteni rashladni medij su u dosta uskim relacijama. Tako je omjer zrak : vodik : voda u srazmjeri 1:5:50.



Sl. 3.3 - Krug rashladne vode u statoru i rotoru turbogeneratora

Na sl. 3.3 prikazan je princip kružnog protoka kod vodenog hlađenja statora i rotora generatora s detaljima kako slijedi: (1) statorski namot, (2) statorski paket limova, (3) rotorski namot, (4) glavna pumpa, (5) hladnjak vode, (6) regulacija temperature, (7) filter, (8) mjerenje vodljivosti, (9) dodatna pumpa, (10) priključna glava za vodu rotora, (11) iscurena voda, (12) spremnik vode, (13) izvodi generatora. U direktno hlađenje vodom uključeni su namoti, njihove obloge i statorski paket sa masivnim metalnim dijelovima. Prostor rotora je zatvoren unutar jednog cilindra da se može evakuirati na podtlak između 0,3 i 0,5 bara, a prostor statora ispunjava se dušikom.

Moguće je drugačije rješenje, kada su statorski i rotorski namot direktno hlađeni vodom, dok su drugi dijelovi hlađeni vodikom. Na sl. 3.4 je prikazan crtež presjeka ovakvog rješenja za turbogenerator reda današnje granične snage (uređaj za uzbudu je starije koncepcije). Perspektivne granične snage su 2 GVA kod dvopolnih, a 2,5 GVA kod četvoropolnih izvedbi.



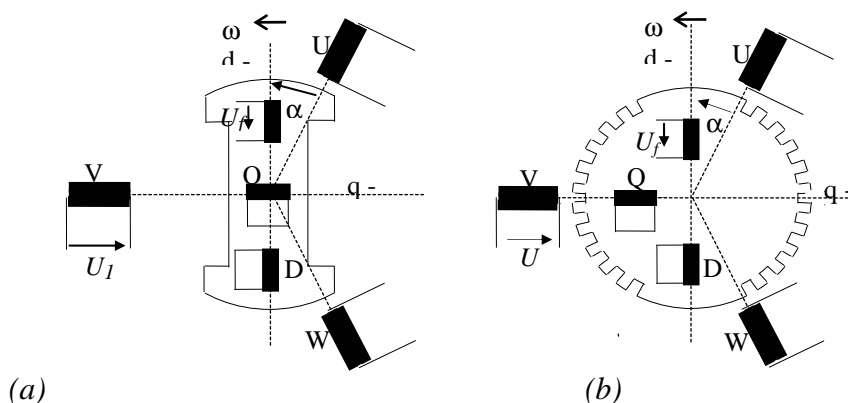
Sl. 3.4 - Turbogenerator 1530 MVA, $\cos \varphi = 0,8$, 27 kV, 50 Hz, 1500 o/min

Pokazalo se da granične snage turbogenerators nisu u prvoj liniji određene problemima hlađenja nego također nizom parcijalnih problema. Tu prvenstveno spadaju porast prijelazne reaktancije sa povećanjem iskorištenja, značajna tehnološka otpornost materijala, te mogućnosti proizvodnje i prijevoza. Rotor jednog četvoropolnog generatora snage 1500 MVA teži oko 200 tona, a transportna težina njegovog statora je oko 370 tona (vanjske dimenzije statora su približno $4,2 \times 4 \times 10,6$ m). Rotori velikih turbogenerators rade se kao jedinstveni blokovi ili su sastavljeni iz više dijelova, pri čemu se obavlja lokalna montaža na osovini.

Značajno povećanje snage generatora iznad područja od 2 GVA čini se danas moguća jedino ako se još poveća stupanj iskorištenja. Kao logičan nastavak razvoja vodom hlađenih generatora pojavljuju se strojevi sa vodičima u supravodljivom stanju. Današnja tehnička razina ovog rješenja opterećena je nizom problema prije svega fizikalne naravi (materijal supravodiča i njegova radna temperatura). Dostignute su vrijednosti magnetske indukcije u zračnom rasporu preko 1 T, a gustoće struje idu od 50 do 150 A/mm².

3.2 Fazorski dijagrami generatora

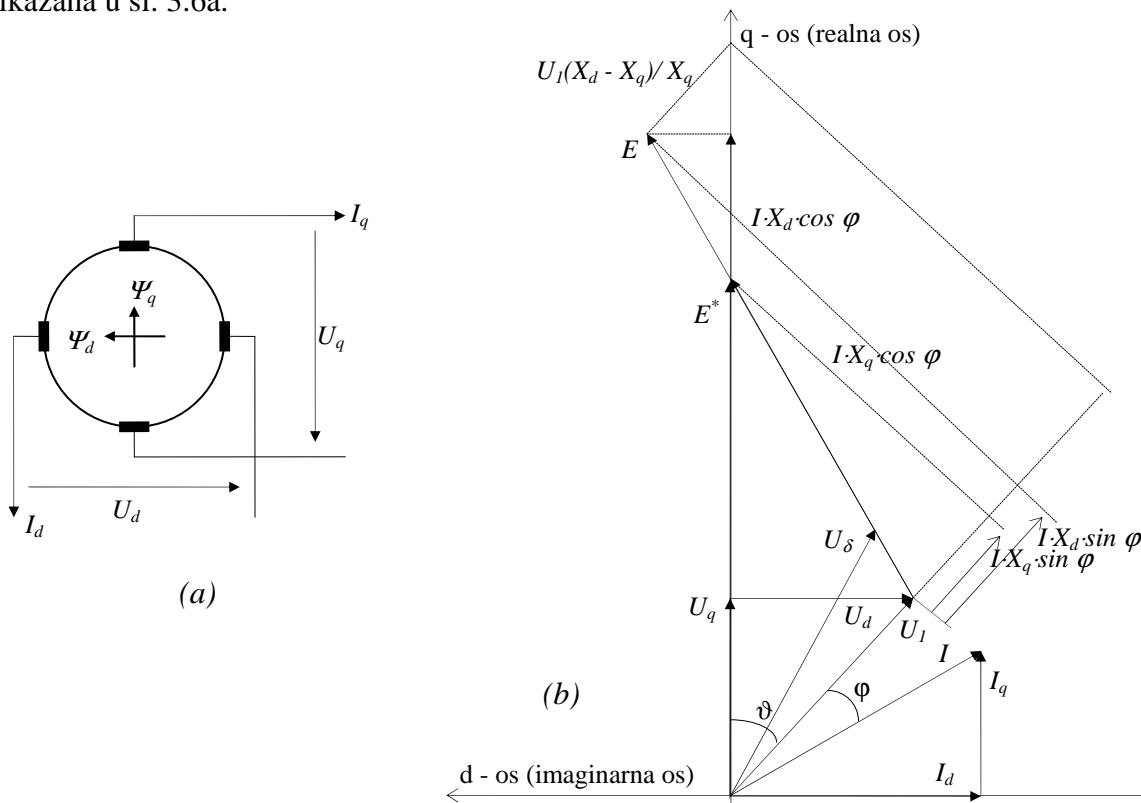
Veliki generatori za proizvodnju električne energije su u osnovi strojevi izvedeni sa unutarnjim polovima (na rotoru). Sa mirujućeg statorskog namota odvodi se električna energija preko generatorskih stezaljki. Rotoru se uzbuđna struja dovodila općenito preko kliznih prstena, a kod novijih rješenja uzbude (primjerice sa rotirajućim diodama) prsteni su nepotrebni. Različitost u izvedbi rotora kod turbogenerators i generatora sa izraženim polovima donosi i različite električne karakteristike.



Sl. 3.5 - Osi namota (a) generatora s izraženim polovima i (b) turbogeneratora

Na sl. 3.5 je prikazana pojednostavljena shema u presjeku generatora sa naznačenim osima pojedinih namota. Statorski namoti sa izvodima U, V, W su jednaki za turbogenerator i generator sa izraženim polovima. Dok rotor turbogeneratora možemo u prvoj aproksimaciji smatrati za rotaciono simetričan, to rotor generatora sa izraženim polovima svakako nije. Zato stroj sa izraženim polovima ima vrlo različite vrijednosti reaktancije ovisno o položaju polova rotora, pa se za ekstremne vrijednosti utvrđuju pripadne osi. Za maksimalnu vrijednost reaktancije veže se uzdužna os (ili d-os), a za minimalnu vrijednost reaktancije veže se poprečna os (ili q-os).

Kod dvoosne teorije sinkronog stroja nadomješta se statorski namot sa dva namota koji su međusobno pomaknuti za 90° električnih i miruju u odnosu na uzbudni namot, a čije se osi podudaraju sa uzdužnom i poprečnom osi. Tako je moguće definirati stacionarne i prijelazne karakteristike sinkronog stroja na dvopolnom modelu. Rotor modela ima dvopolni namot sa komutatorom, na kojem je jedan par četkica postavljen u d-smjeru a drugi par u q-smjeru. Stator modela ima jedan par polova sa uzbudnim namotom u smjeru d-osi. Shema modela je prikazana u sl. 3.6a.



Sl. 3.6 - (a) Shema modela i (b) fazorski dijagram generatora s izraženim polovima

Da bi generator odavao djelatnu snagu mora njegov rotor vanjskim pogonskim momentom biti ubrzan na sinkronu brzinu n_s i na takav kut opterećenja ϑ da se, bez obzira na gubitke, pojavi takav elektromagnetski (kočioni) moment koji je u ravnoteži sa pogonskim momentom.

U fazorskom dijagramu na sl. 3.6b pretpostavljeno je uobičajeno opterećenje generatora u kome on odaje djelatnu i jalovu induktivnu snagu. Struja statora tada kasni za naponom stezaljki za fazni kut φ . Pretpostavljamo stacionarni pogon i fazni napon $U_1 = U/\sqrt{3}$. Da bi dijagram bio pregledniji, zanemareni su djelatni otpori u odnosu na reaktancije. Također je radi jednostavnosti zgodno postaviti realnu os podudarno sa q-osi, pa dobijemo da je napon zračnog raspóra:

$$\mathbf{U}_\delta = \mathbf{U}_1 + j X_s \mathbf{I} \quad (3.2)$$

a uzbuda koja bi zadovoljavala da su uzdužna i poprečna reaktancija jednake $X_d = X_q$ (kao kod turbogeneratora):

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{U}_1 + j X_q \mathbf{I} \quad (3.3)$$

dok je stvarno potrebna uzbuda:

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}_1 + j X_d \mathbf{I}_d + j X_q \mathbf{I}_q \quad (3.4)$$

kod čega su uzdužna odnosno poprečna reaktancija:

$$X_d = X_s + X_{gd} ; \quad X_q = X_s + X_{gq} \quad (3.5)$$

sastavljene iz rasipne reaktancije statora X_s i glavnih reaktancija u uzdužnom X_{gd} odnosno poprečnom smjeru X_{gq} . Prema sl. 3.6b vrijedi za kut opterećenja:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{X_q I \cos \varphi}{U_1 + X_q I \sin \varphi} \quad (3.6)$$

za djelatnu snagu:

$$P_1 = \frac{U_1 E}{X_d} \sin \vartheta + \frac{U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \quad (3.7)$$

i za jalovu snagu:

$$Q_1 = \frac{U_1 (E \cos \vartheta - U_1)}{X_d} + \frac{U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) (\cos 2\vartheta - 1) \quad (3.8)$$

Drugi član u relaciji za snagu jedn. (3.7) je neovisan o uzbuđi stroja i određuje reakcioni krug promjera $D = (1/X_q) - (1/X_d)$. Generator s izraženim polovima može bez uzbude odavati djelatnu snagu koja se tada naziva reakciona snaga i čija je najveća vrijednost kod kuta opterećenja $\vartheta = 45^\circ$. U jedn. (3.4) imamo definirano mjerilo za uzbudu potrebnu kod određenog stanja opterećenja stroja.

Za daljnja razmatranja je radi preglednosti korisno uvesti jedinične ili *per unit* (p.u.) vrijednosti koje dobijemo svođenjem napona, struja, impedancija i snaga na nazivne vrijednosti generatora. Ove vrijednosti označavamo malim slovima, a dobijemo ih kako slijedi, i to za impedanciju:

$$z = \frac{Z}{Z_n} = Z \frac{S_n}{U_n^2} ; \quad Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{U_{1n}}{I_n} = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.9)$$

za fazni napon i struju:

$$u_1 = U_1 / U_{1n} ; \quad i = I / I_n \quad (3.10)$$

za prividnu, djelatnu i jalovu snagu:

$$s = \frac{S}{S_n} ; \quad p = \frac{P}{S_n} ; \quad q = \frac{Q}{S_n} ; \quad S_n = 3 U_{1n} I_n \quad (3.11)$$

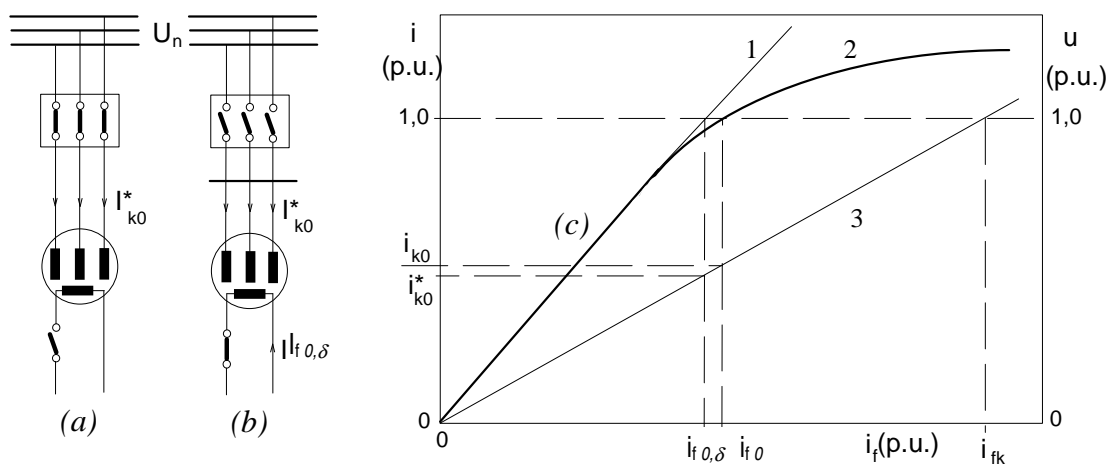
te za uzbudni napon i uzbudnu struju:

$$u_f = U_f / U_{f0,\delta} ; \quad i_f = I_f / I_{f0,\delta} \quad (3.12)$$

Ovdje je $I_{f0,\delta}$ uzbudna struja praznog hoda kod nezasićenog sinkronog stroja. Jedinične vrijednosti reaktancija generatora u p.u. mijenjaju se samo malo u ovisnosti o nazivnoj snazi i

naponu stroja, pa se orijentacione vrijednosti mogu prikazati u tabeli 3.1. Vrijednosti se daju u relativnim p.u. jedinicama ili u procentima, pri čemu je $x (\%) = x (\text{p.u.}) \cdot 100$. Za razliku od jedn. (3.12), u literaturi se može naći podatke za uzbudne struje svedene na struju praznog hoda kod zasićenog sinkronog stroja.

Sinkrona reaktancija generatora može se zorno predočiti tako da se promatra nezasićeni stroj koji se kod nazivnog napona neuzbuđen vrti nazivnom brzinom priključen na mrežu, kako je prikazano na sl. 3.7a. U statoru tada imamo struju I_{k0}^* , a sa $X_d = U_{1n} / I_{k0}^*$ određena je reaktancija koju generator predstavlja za mrežu. Ako se nezasićeni stroj u sinkronoj vrtnji na stezaljkama kratko spoji prema sl. 3.7b, kod uzbudne struje praznog hoda $I_{f0,\delta}$ teče u statoru jednaka struja I_{k0}^* kao u prethodnom spoju (sl. 3.7a). Ako se ova struja svede na nazivnu struju, dobije se time omjer nezasićenog praznog hoda i kratkog spoja. Sinkrona reaktancija $x_d (\text{nezasićeno})$ u p.u. je recipročna vrijednost omjera nezasićenog praznog hoda i kratkog spoja. Vrijednost uzdužne reaktancije se obično daje za nezasićeno stanje, pa imamo



Sl. 3.7 - Spojevi (a) praznog hoda, (b) kratkog spoja i (c) karakteristike generatora

$$x_{d (\text{nezasićeno})} = \frac{U_{1n}}{I_{k0}^*} \cdot \frac{I_n}{U_{1n}} = \frac{1}{i_{k0}^*} \quad (3.13)$$

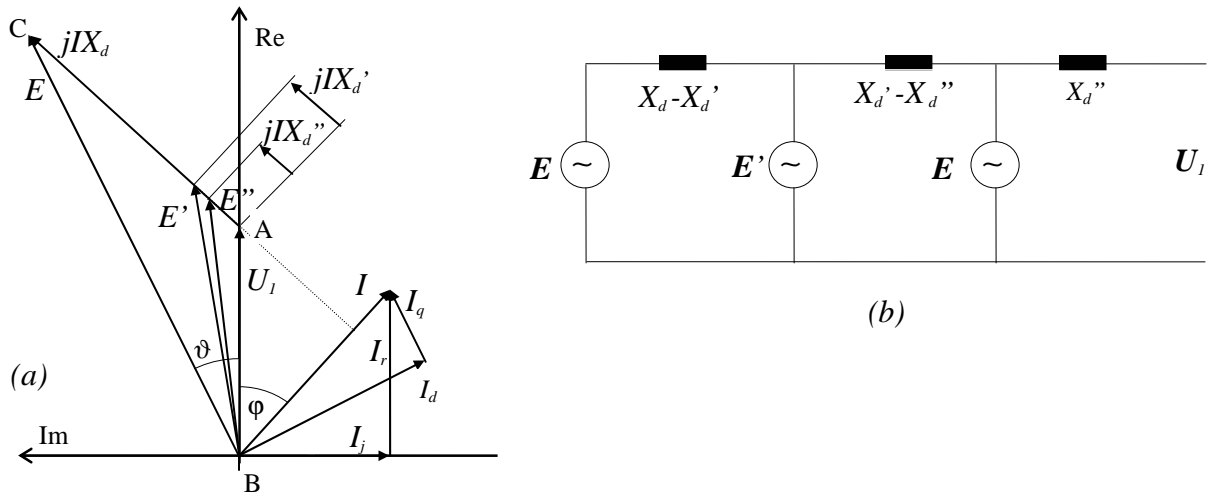
Općenito se pod omjerom praznog hoda i kratkog spoja podrazumijeva vrijednost kod zasićenog stanja, što znači da je dakle trajna struja kratkog spoja svedena na nazivnu struju (I_{k0} / I_n). Ovdje je trajna struja kratkog spoja I_{k0} ona koja odgovara struji uzbude praznog hoda I_{f0} generatora sa zasićenjem, kako je prikazano na sl. 3.7c. Recipročna vrijednost omjera zasićenog praznog hoda i kratkog spoja je zasićena vrijednost reaktancije $x_d (\text{zasićeno})$. Zasićenje u pogonu je ovisno o uvjetima opterećenja (napon, struja, stupanj opterećenja), pa je vrijednost reaktancije koja se dobije iz karakteristike kratkog spoja zapravo za djelomično zasićenje.

Ako sa i_{fk} označimo jediničnu uzbudnu struju kod koje je struja kratkog spoja jednaka nazivnoj struji, vrijedi omjer:

$$i_{k0} = \frac{I_{k0}}{I_n} = \frac{1}{x_{d (\text{zasićeno})}} \approx \frac{1}{i_{fk}} \quad (3.14)$$

Turbogeneratori imaju u pravilu vrijednosti omjera *odnosno* $i_{k0} \approx (0,4 \div 0,5)$, dok za generatore s izraženim polovima vrijedi $i_{k0} \approx (0,8 \div 1,0)$. Fazorski dijagram za turbogenerator može se neposredno izvesti iz dijagrama generatora sa izraženim polovima prema sl. 3.6b. Dok je kod generatora sa izraženim polovima uzdužna reaktancija veća od poprečne, kod turbogeneratora su te vrijednosti približno jednake ($x_d \approx x_q$), što se vidi u tabeli 3.1. Na sl.

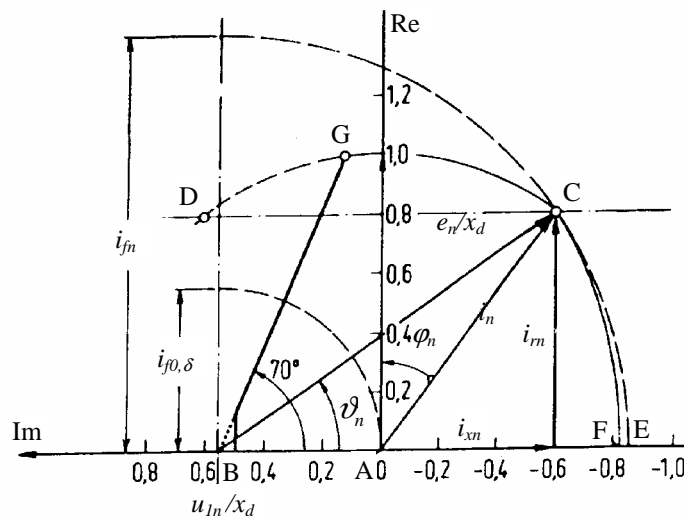
3.8a pokazan je fazorski dijagram turbogeneratorsa. Fazni napon radi jednostavnosti postavljen je u realnu os kompleksne ravnine. Na sl. 3.8b je pokazana nadomjesna shema turbogeneratorsa kojom su obuhvaćena i dinamička stanja stroja pomoću početne i prijelazne reaktancije X_d'' odnosno X_d' .



Sl. 3.8 - (a) Fazorski dijagram i (b) nadomjesna shema turbogeneratorsa

Iz sl. 3.8a slijedi $U_1 = U_1$, $X_d = X_q$, a kompleksna snaga stroja $S = 3U_1 I^*$ (struja je dana kao konjugirano-kompleksna vrijednost u simboličkom računu), pa iz jednačbi (3.7) i (3.8) dobijemo:

$$S = 3U_1 I (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \frac{3U_1 E}{X_d} \left[\sin \vartheta + j \left(\cos \vartheta - \frac{U_1}{E} \right) \right] \quad (3.15)$$



Sl. 3.9 - Fazorski dijagram struja turbogeneratorsa

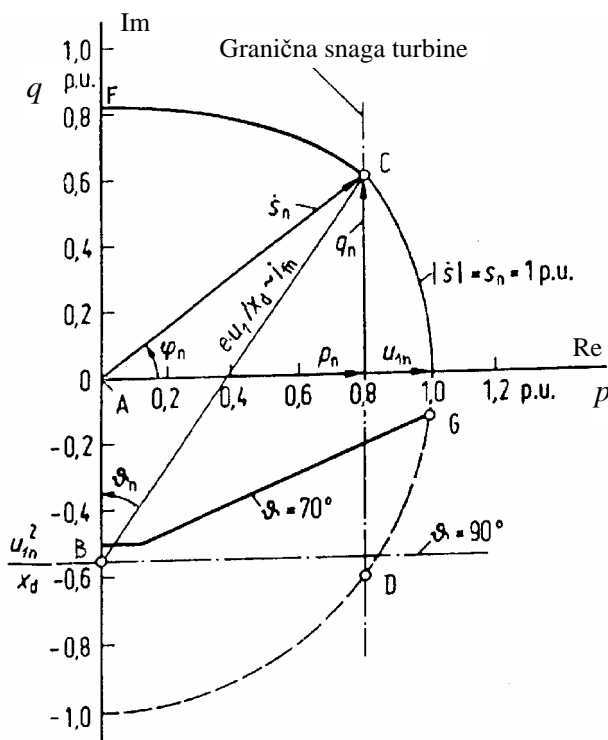
Da se dobije fazorski dijagram struja turbogeneratorsa prema sl. 3.9, treba fazore napona u dijagramu na sl. 3.8a pomnožiti sa $(-j/X_d)$ i tako dobijene struje svesti na nazivnu struju I_n . Pri tome ostaje karakteristični trokut ABC u oba dijagrama podudaran. Naponi u sl. 3.9 svedeni su na nazivni fazni napon (u p.u.), a za uzdužnu reaktanciju vrijedi $x_d = X_d I_n / U_{1n}$. Koordinatno ishodište prenosi se ovdje u ishodište vektora struje (točka A), a u crtež su uneseni nazivni podaci za napon, struju i fazni kut iz čega slijede i ostale veličine koje opisuju pogonsko stanje pri nazivnim uvjetima. Tako je kod struje opterećenja $i = i_n$ veličina e_n / x_d jednaka struji trajnog kratkog spoja i_k (struji I_k svedenoj na nazivnu struju I_n) kod nezasićenog

stroja i nazivne uzbude. Rastavljajući nazivnu struju na djelatnu i jalovu komponentu $i_r - j \cdot i_x$ možemo definirati kut opterećenja:

$$tg\vartheta = \frac{i_m}{i_{x_n} + u_{l_n}/x_d} = \frac{x_d i_n \cos \varphi_n}{x_d i_n \sin \varphi_n + u_{l_n}} \quad (3.16)$$

Točke opterećenja za nazivnu struju i za faktore snage veće od nazivnog uključivo i područje poduzbude leže na kružnom luku koji generator ne može dosegnuti radi ograničenja djelatne snage turbine. Veličina granične snage turbine umanjena za djelatne gubitke generatora je ujedno granična veličina djelatne snage koju generator može dati u mrežu i u strujnom dijagramu predstavlja tetivu luka paralelnu imaginarnoj osi. Područje poduzbude ima još ograničenje uvjetovano uvjetima statičke stabilnosti u pogonu generatora. Teoretska granica stabilnosti turbogeneratora je kod kuta opterećenja $\vartheta_{\max} = 90^0$. Radi sigurnosti se određuje manja praktična granica stabilnosti $\vartheta \approx 70^0$ i usto se traži granična uzbuda od najmanje $0,1 \cdot i_{f0}$. Ova praktična granica stabilnosti vrijedi međutim kao granica samo ako nije predviđeno korištenje naponskog regulatora.

Za faktore snage manje od nazivnog imamo u području preuzbude ograničenje obzirom na zagrijavanje rotora i otuda granični kružni luk CE radiusa e_n/x_n . Ako se koriste jedinične vrijednosti (p.u.), onda kod nazivnih uvjeta imamo da dužini AC odgovara nazivna struja opterećenja i_n , a dužini AB odgovara uzbudna struja praznog hoda $i_{f0,\delta} = 1$ p.u. Obzirom na zasićenje željeza kod povećanog magnetskog toka usljed povećane uzbude, biti će približno razmjerno manji inducirani napon i time veće zakrivljenje luka, tako da imamo lučnu granicu CF. Iz ovih razloga mora biti i jalova struja i_x kod pogona kao sinkronog kompenzatora manja od nazivne struje generatora i_n , što je izraženije kod pogona u poduzbuđenom području (sl. 3.9).



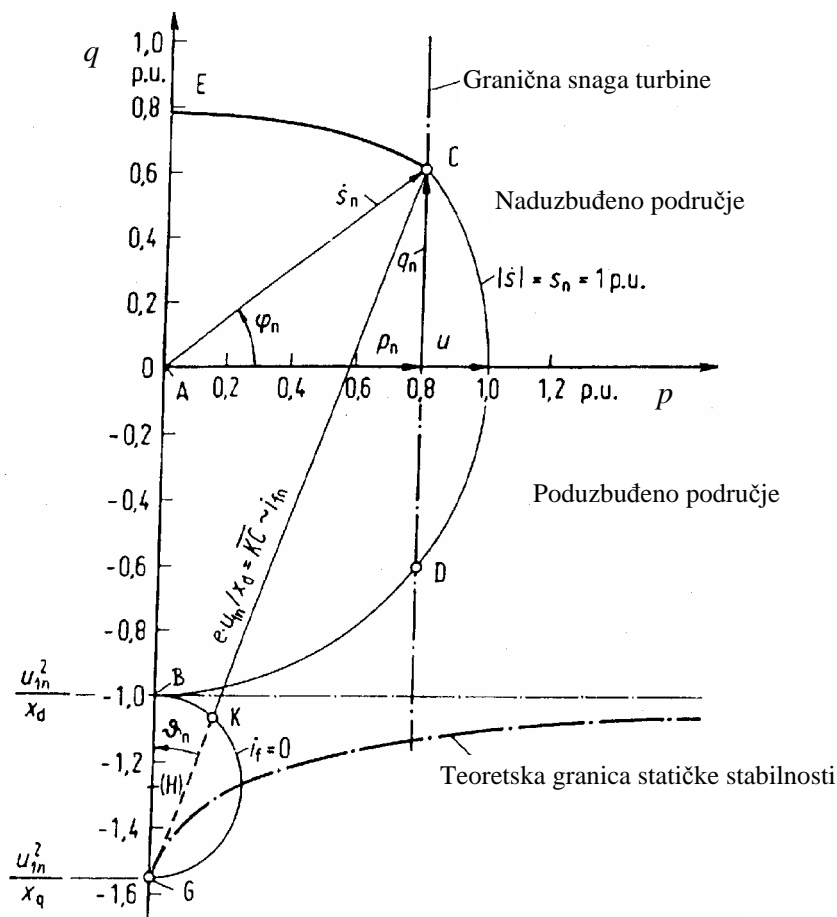
Sl. 3.10 - Pogonska karta turbogeneratorske

Iz strujnog dijagrama turbogeneratorsa na sl. 3.9 može se uzimanjem konjugirano-kompleksnih struja i njihovim množenjem sa u_1 dobiti pogonska karta (dijagram snaga) stroja kako je prikazana na sl. 3.10 (pri tome je povoljno smjestiti u_1 u realnu os kompleksne ravnine). Za kompleksnu snagu vrijedi:

$$s = p \pm j q \quad (3.17)$$

I ovdje je dužina AB razmjerna uzbudnoj struji praznog hoda $i_{f0,\delta} = 1$ p.u. . Kod nezasićene sinkrone reaktancije x_d generatora, dužina BC je razmjerna nazivnoj uzbudnoj struji i_{fn} . Također za svaku drugu radnu točku u pogonskoj karti može se odrediti pripadna uzbudna struja prema relaciji:

$$i_f = i_{f0,\delta} \cdot e/u_{1n} \quad (3.18)$$



Sl. 3.11 - Pogonska karta generatora sa izraženim polovima

Analogno sl. 3.9, možemo u sl. 3.10 ucrtati granice stabilnosti u poduzbuđenom području (teoretska granica stabilnosti je kod $\vartheta = 90^\circ$, a praktična kod $\vartheta = 70^\circ$). Treba imati na pameti da u svakom pojedinom slučaju stvarna granica stabilnosti ovisi o uzbuđenom sistemu, prenosnoj funkciji regulatora napona i vanjskoj reaktanciji (prijenosne mreže).

Pogonska karta generatora s izraženim polovima prikazana je u sl. 3.11. Razlika između uzdužne i poprečne sinkrone reaktancije definira reakcioni krug. Za pogonsku točku izvan reakcionog kruga uzbudna struja je veća od nule, za pogonsku točku na reakcionom krugu uzbudna struja je jednaka nuli, a za eventualnu pogonsku točku unutar reakcionog kruga imamo negativnu uzбудu.

Teoretska statička granica stabilnosti kod generatora sa izraženim polovima pojavljuje se pri kutu opterećenja manjem od 90° . Da se odredi kut opterećenja kod maksimalne djelatne struje odnosno djelatne snage, potrebno je naći nestanak sinkronizirajućeg djelatnog opterećenja odnosno da vrijedi uvjet $p_{\sin} = \partial p / \partial \vartheta = 0$.

Iz jedn. (3.7) se dobije svođenjem na nazivnu prividnu snagu $S_n = 3U_{1n} I_n$ u jediničnim (p.u.) vrijednostima:

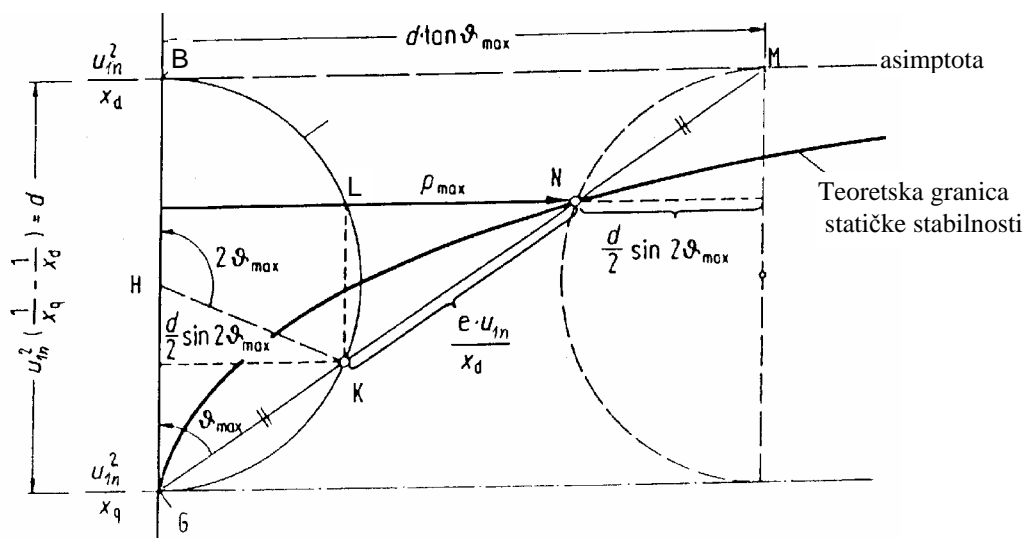
$$p = \frac{u_1 e}{x_d} \sin \vartheta + \frac{u_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\vartheta \quad (3.19)$$

Deriviranjem gornje jednadžbe i izjednačavanjem sa nulom imamo za sinkronizirajuće djelatno opterećenje:

$$p_{\sin} = \frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{u_1 e}{x_d} \cos \vartheta + u_1^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\vartheta = 0 \quad (3.20)$$

Označimo li sa ϑ_{\max} kut opterećenja kod kojega imamo najveću djelatnu snagu ($p_{\sin} = 0$), dobije se iz prethodne jednadžbe:

$$\cos \vartheta_{\max} = \frac{-e x_q}{4 u_1 (x_d - x_q)} \pm \sqrt{\left[\frac{e x_q}{4 u_1 (x_d - x_q)} \right]^2 + \frac{1}{2}} \quad (3.21)$$



Sl. 3.12 - Statička granica stabilnosti generatora sa istaknutim polovima

Iz jedn. (3.20) dobijemo relaciju:

$$\frac{u_1 e}{x_d} = - \frac{u_1^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\vartheta_{\max}}{\cos \vartheta_{\max}}$$

i uvrstimo u jedn. (3.19), pa dobijemo za najveću djelatnu snagu:

$$p_{\max} = u_1^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \left(- \frac{\cos 2\vartheta_{\max}}{\cos \vartheta_{\max}} \sin \vartheta_{\max} + \frac{\sin 2\vartheta_{\max}}{2} \right) \quad (3.22)$$

Da dobijemo prikladnu ovisnost o kutu opterećenja, uvodimo sređivanje u drugoj zagradi pomoću relacije $-\cos 2\vartheta_{\max} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_{\max} = \operatorname{tg} \vartheta_{\max} - \sin 2\vartheta_{\max}$ pa slijedi:

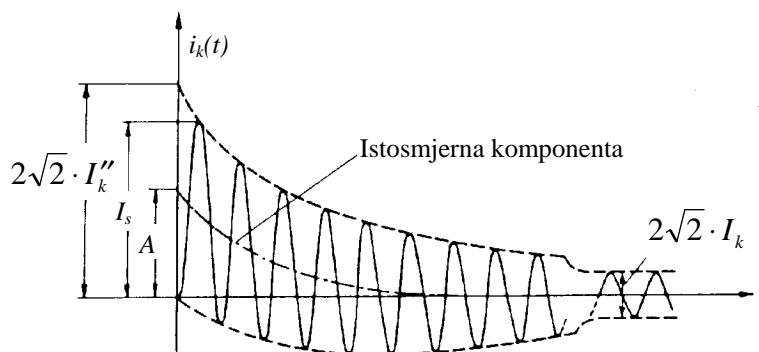
$$p_{\max} = u_1^2 \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \left(\operatorname{tg} \vartheta_{\max} - \frac{1}{2} \sin 2\vartheta_{\max} \right) \quad (3.23)$$

Odavde se može napraviti zorna grafička konstrukcija granice statičke stabilnosti kako je prikazano u sl. 3.12 za slučaj $u_n = u_{1n}$. Za podatke faznog napona te uzdužne i poprečne

reaktancije ucrtta se reakcioni krug. Prva dva člana produkta predstavljaju promjer reakcionog kruga D . Za neovisnu varijablu ϑ_{\max} na danom reakcionom krugu odredimo točku K koja definira kut $2\vartheta_{\max}$ u točki H. Također na paraleli sa realnom osi u točki B odredimo točku M. U slici se vide dužine koje odgovaraju razlici članova u jedn. (3.22). Kroz točku K povuče se paralela sa imaginarnom osi i odredi na reakcionom krugu točka L. Iz točke L povuče se paralela sa realnom osi i odredi točka N kao presjecište sa dužinom GM. Točka N određuje maksimalnu djelatnu snagu p_{\max} za dani kut opterećenja ϑ_{\max} u mjerilu na realnoj osi. Variranjem kuta opterećenja dobije se krivulja statičke granice stabilnosti prikazana na sl. 3.12.

3.3 **Kratki spoj na stezaljkama generatora**

Kod trenutnog kratkog spoja na stezaljkama generatora, pojavljuje se vrlo visoka struja u poređenju sa nazivnom strujom. Ona se sastoji od izmjenične i istosmjerne komponente struje kratkog spoja. Kod izmjenične komponente struje kratkog spoja razlikuju se početna (subtranzientna), prijelazna (tranzientna) i trajna struja kratkog spoja. Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja s vremenom opada na nulu, dok izmjenična komponenta prelazi u trajnu struju kratkog spoja. Na sl. 3.13 je pokazana vremenska promjena struje kratkog spoja s maksimalnim udjelom istosmjerne komponente. Početna struja kratkog spoja označena je sa I_k'' , trajna struja kratkog spoja sa I_k , udarna struja kratkog spoja sa I_s , a početna vrijednost istosmjerne komponente sa A .

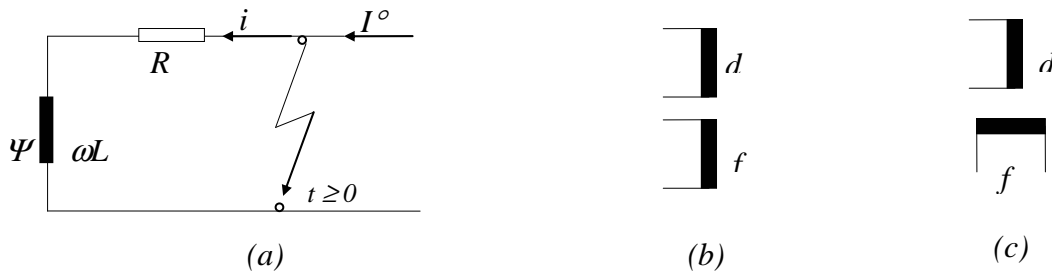


Sl. 3.13 - Struja kratkog spoja na stezaljkama generatora

Na sl. 3.14 je prikazana zavojnica kroz koju protječe struja I^0 ulančena pripadnim magnetskim tokom ψ^0 . Kratkim spojem u trenutku $t = 0$ neće se stanje mijenjati trenutno nego sa vremenskom konstantom $T = L/R$ električnog kruga zavojnice: $i = I^0 \cdot e^{-t/T}$ odnosno $\psi = \psi^0 \cdot e^{-t/T}$. Zanemarenjem djelatnog otpora R neograničeno vrijeme bi tekla struja I^0 nakon nastanka kratkog spoja, a sa njome ostajao i nepromijenjeni ulančani magnetski tok ($d\psi/dt = 0$). Za razmatranje prijelaznih pojava kod kratkog spoja na stezaljkama generatora općenito je povoljno svesti problem na ovako jednostavan slučaj.

Oscilogram struje kratkog spoja na stezaljkama generatora pokazuje u bitnom dvije prijelazne pojave do novog stacionarnog stanja sa trajnom strujom kratkog spoja. Prvu nazivamo subtranzientna (početna), a drugu tranzientna prijelazna pojava. Subtranzientna prijelazna pojava temelji se na međudjelovanju statorskog i prigušnog namota (kod turbogeneratora se smije uzeti da je prigušni namot jednako postavljen u uzdužnoj i poprečnoj osi). Ova prijelazna pojava ima vremensku konstantu T_d'' . S druge strane, tranzientna prijelazna pojava temelji se na međudjelovanju statorskog i uzbudnog namota, pa je vezana za (uzdužnu) d-os. Ova prijelazna pojava ima vremensku konstantu T_d' . Tranzientna vremenska

konstanta je bitno veća od subtranzientne vremenske konstante, pa je i nestanak subtranzientne prijelazne pojave odgovarajuće brži.



Sl. 3.14 - Kratki spoj strujno protjecanog namota impedancije $R+j\omega L$

Promatrajmo nepomični namot d (odgovara namotu statora) koji ima induktivitet $L_{dg}(1+\sigma_d)$ i pomični namot f (odgovara namotu rotora) koji ima induktivitet $L_{dg}(1+\sigma_f)$. Ovdje induktivitet L_{dg} odgovara glavnom magnetskom toku, a relativna rasipanja magnetskog toka su σ_d za stator i σ_f za rotor. Djelatni otpori se zanemaruju radi jednostavnijeg objašnjenja. Neka kroz pomični namot rotora protječe struja uzbude i_f . Također, neka kratki spoj nastane u trenutku kada je os pomičnog namota okomita na os nepomičnog namota (sl. 3.14c), što ovdje znači da je magnetski tok ulančan sa oba namota jednak nuli. Sa daljnjim gibanjem namota f pojavljuje se i raste ulančanje namotom d glavnog toka ψ_d (koji je proizveden strujom uzbude i_f). Ovo inducira u namotu d kratkospojnu struju koja po Lenzovom zakonu i dalje održava nepromijenjen magnetski tok $\psi_d = 0$. Najveća vrijednost ulančanja postiže se nakon četvrtine okretaja pomičnog namota. Za taj trenutak možemo postaviti jednadžbe ulančanih tokova nepomičnog odnosno pomičnog namota:

$$\begin{aligned} i'_d L_{dg} (1 + \sigma_d) + i'_f L_{dg} &= 0 \\ i'_f L_{dg} (1 + \sigma_f) + i'_d L_{dg} &= i_f L_{dg} (1 + \sigma_f) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Uvođenjem skraćenja:

$$\sigma' = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_d)(1 + \sigma_f)} \quad (3.25)$$

dobije se iz prethodnih jednadžbi za prijelazne kratkospojne struje:

$$i'_d = \frac{i_f (1 + \sigma_f)}{1 - (1 + \sigma_d)(1 + \sigma_f)} = - \frac{i_f}{\sigma' (1 + \sigma_d)} \quad (3.26a)$$

$$i'_f = i_f / \sigma' \quad (3.26b)$$

Ako ovo primijenimo na generator u praznom hodu (nezasićeno stanje) gdje je struja uzbude $i_{f0,\delta} = 1$ p.u. da se dobije nazivni fazni napon U_{1n} , tada je tranzientna (prijelazna) struja kratkog spoja $i'_d = \sqrt{2} I'_k$. Preračunavanjem struje uzbude na struju armature imamo $i_{f0,\delta} = \sqrt{2} \cdot U_{1n} / X_{dg}$ i sređivanjem jedn.(3.26a) dobijemo efektivnu vrijednost prijelazne struje kratkog spoja:

$$I'_k = \frac{U_{1n}}{\sigma' (1 + \sigma_d) X_{dg}} = \frac{U_{1n}}{\sigma' X_d} = \frac{U_{1n}}{X'_d} \quad (3.27)$$

$\sigma' X_d = X'_d$ je tranzientna (prijelazna) reaktancija generatora u uzdužnoj osi. Kada se ne polazi od praznog hoda generatora, dobije se na već poznati način (sl. 3.8b za $X''_d = 0$) prijelazna kratkospojna struja:

$$I'_k = E' / X'_d \quad (3.28)$$

Ako se efektivna vrijednost prijelazne struje kratkog spoja prema jedn. (3.26) svede na struju koja odgovara omjeru praznog hoda i kratkog spoja prema jedn. (3.13) za (nezasićeno stanje) uzbudnu struju praznog hoda $i_{f0,\delta}$, dobijemo:

$$\frac{I'_k}{I_{k0}^*} = \frac{I'_k X_d}{U_{1n}} = \frac{X_d}{X'_d} = \frac{1}{\sigma'} \quad (3.29)$$

Jednako se dobije za struju prema jedn. (3.26b) svođenjem na $i_{f0,\delta} = 1$ p.u.:

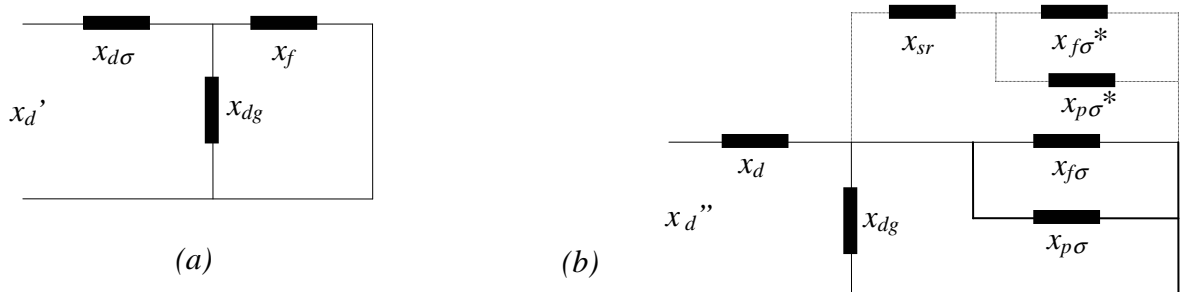
$$\frac{i'_f}{i_{f0,\delta}} = \frac{1}{\sigma'} \quad (3.30)$$

Jasno je da su struje statora i rotora jednako velike ako se računaju u p.u. (svedene na nazivne vrijednosti statora odnosno rotora). Ako se u jedn.(3.25) uvedu vrijednosti koeficijenata magnetskog rasipanja stratorskog odnosno rotorskog namota $\sigma_d = x_{d\sigma} / x_{dg}$, $\sigma_f = x_{f\sigma} / x_{dg}$ dobijemo:

$$\sigma' = \frac{x_{d\sigma}}{x_{dg} + x_{d\sigma}} + \frac{x_{f\sigma} \cdot x_{dg}}{(x_{dg} + x_{d\sigma})(x_{dg} + x_{f\sigma})} \quad (3.31)$$

Tada se za prijelaznu (tranzientnu) reaktanciju dobije jednačba koja definira nadomjesnu shemu prema sl. 3.15a:

$$x'_d = \sigma' (x_{dg} + x_{d\sigma}) = x_{d\sigma} + x_{dg} x_{f\sigma} / (x_{dg} + x_{f\sigma}) \quad (3.32)$$



Sl. 3.15 - Nadomjesne sheme za (a) prijelaznu i (b) početnu reaktanciju generatora

Ako se želi dodatno uzeti u obzir djelovanje prigušnog namota i prigušno djelovanje željeza rotora, uvodimo rasipanje $\sigma_p = x_p / x_{dg}$, tako da je približno početna reaktancija generatora:

$$x_d'' = \sigma'' x_d = x_d \left[1 - (1 + \sigma_d)^{-1} \left(1 + \frac{\sigma_f \cdot \sigma_p}{\sigma_f + \sigma_p} \right)^{-1} \right] \quad (3.33)$$

Za početnu reaktanciju se dobije jednačba koja definira nadomjesnu shemu prema sl. 3.15b (bez crtkanog dijela):

$$x_d'' = (x_{d\sigma} + x_{dg}) \sigma'' = x_{d\sigma} + \frac{x_{dg} \cdot x_{f\sigma} \cdot x_{p\sigma}}{x_{dg} (x_{f\sigma} + x_{p\sigma}) + x_{f\sigma} \cdot x_{p\sigma}} \quad (3.34)$$

Iz sl. 3.8b vidi se da je kod trofaznog kratkog spoja na stezaljkama generatora početna struja kratkog spoja:

$$I_k'' = E'' / X_d'' \quad (3.35)$$

Iz stanja opterećenja generatora neposredno prije nastanka kratkog spoja računa se početni unutarnji (inducirani) napon stroja:

$$E'' \approx U_{1G}^o \left(1 + \frac{I_G^o X_d'' \sin \varphi^o}{U_{1G}^o} \right) \quad (3.36)$$

gdje je fazni napon generatora $U_{1G}^o = U_G^o / \sqrt{3}$, I_G^o je struja generatora, a φ^o je fazni kut između napona i struje (pozitivan je kod preuzbude generatora, a negativan kod poduzbude) neposredno prije nastanka kratkog spoja.

Za točnije određivanje struja rotorskog namota induciranih kod kratkog spoja na stezaljkama generatora uobičajeno je podijeliti rasipne reaktancije $x_{f\sigma}$ uzbuđenog i $x_{p\sigma}$ prigušnog namota na njihove vlastite reaktancije $x_{f\sigma^*}$ odnosno $x_{p\sigma^*}$ i spojnu reaktanciju rotora x_{sr} , kako je pokazano crtkano u nadomjesnoj shemi sl. 3.15b.

Za razliku od stanja koje smo uzeli kao polazno za jedn. (3.24), pretpostavimo sada da do kratkog spoja dolazi u trenutku kada je statorski namot protjecan najvećim magnetskim tokom uzbuđenog namota rotora (sl. 3.14b). Ulančanje se mijenja kosinusoidalno, a najveća struja pojavljuje se nakon okretaja rotora za jedan polni korak kada takvim zakretanjem magnetski tokovi statora i rotora dobiju nasuprotne smjerove. U tom trenutku bi se morala inducirati dvostruko velika struja da održi početnu raspodjelu magnetskog toka, pa sada možemo postaviti jednadžbe kako slijedi:

$$\begin{aligned} i_{dk} L_{dg} (1 + \sigma_d) - i_{fk} L_{dg} &= i_f L_{dg} \\ i_{fk} L_{dg} (1 + \sigma_f) + i_{dk} L_{dg} &= i_f L_{dg} (1 + \sigma_f) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Uvođenjem skraćenja prema jedn.(3.25) dobije se iz prethodnih jednadžbi za prijelazne kratkospojne struje:

$$i_{dk} = 2i_f / [\sigma' (1 + \sigma_d)] \quad (3.38)$$

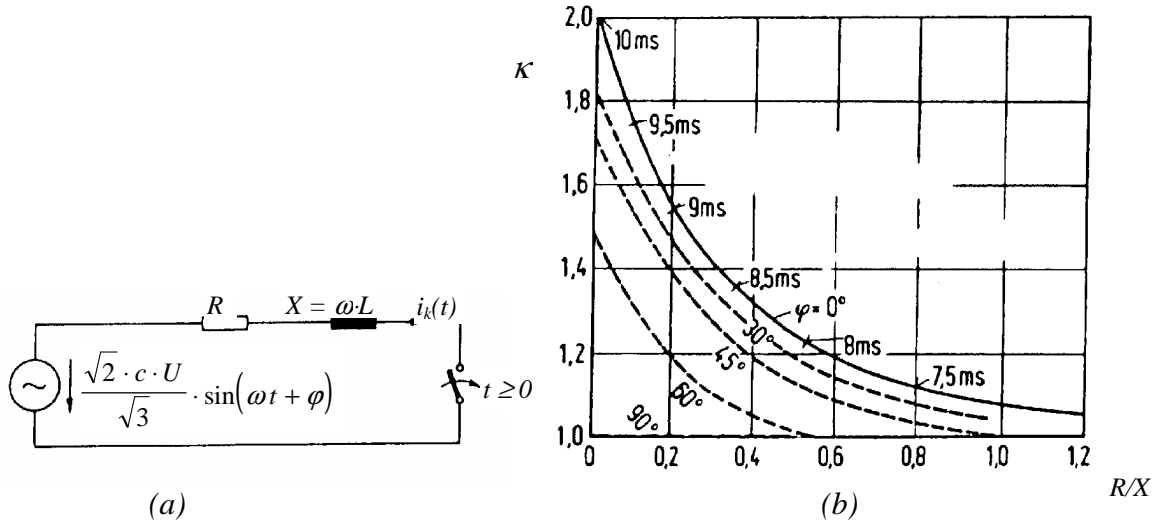
$$i_{fk} = i_f [(2 - \sigma') / \sigma'] \quad (3.39)$$

Znamo da je veličina struje kratkog spoja ovisna o trenutku nastanka kratkog spoja. Za pojavu kratkog spoja u trenutku maksimalnog napona ($dU/dt = 0$) doseže trenutna vrijednost struje kratkog spoja svoj najveći iznos $\sqrt{2} I_k''$ i to nakon 5 ms kod frekvencije $f = 50$ Hz. Ako u trenutku nastanka kratkog spoja napon mijenja predznak ($U = 0$), pojavljuje se maksimalna vrijednost istosmjerne komponente struje koja doseže trenutni iznos $\sqrt{2} I_k''$ nakon pola perioda (10 ms kod 50 Hz). U oba primjera se podrazumijeva da se obje komponente struje smanjuju sa vremenom. Kada se uzme u obzir da početna struja kratkog spoja opada s vremenskom konstantom T_d'' , a istosmjerna komponenta s vremenskom konstantom T_a , onda struja kratkog spoja neće dosegnuti vrijednost $2\sqrt{2} I_k''$, nego nešto manju vrijednost koja predstavlja udarnu struju I_s , a koja se definira uvođenjem udarnog faktora κ tako da vrijedi:

$$I_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (3.40)$$

Ako se za proračun udarnog faktora koristi pojednostavljena prijelazna pojava prikazana nadomjesnom shemom na sl. 3.16a prema njemačkim propisima (VDE 0102), pokazuje se stvarna vrijednost djelatnog otpora statorskog namota generatora premalena. Uobičajeno je tada da se stvarna vrijednost zamijeni fiktivnom i uzme da je: $R_{sG} = 0,05 \cdot X_d''$ za

visokonaponske generatore nazivne snage 100 MVA i više; $R_{sG} = 0,07 \cdot X_d''$ za visokonaponske generatore nazivne snage ispod 100 MVA; $R_{sG} = 0,12 \cdot X_d''$ za niskonaponske generatore. Naravno da fiktivni otpor služi samo za proračun udarne struje i uzima u obzir opadanje prijelazne struje kratkog spoja tijekom prvih 10 ms nakon njegovog nastanka. Stvarni otpori statoskih namota većih generatora su znatno manji od fiktivnih vrijednosti R_{sG} u računu.



Sl. 3.16 - (a) Nadomjesna shema i (b) ovisnosti udarnog faktora κ

Za određivanje udarnog faktora kratkog spoja κ postavljamo diferencijalnu jednadžbu za prijelaznu pojavu prema shemi u sl. 3.16a u trenutku nastanka kratkog spoja $t = 0$:

$$L \frac{di_k(t)}{dt} + R i_k(t) = \sqrt{2} c U_{1n} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.41)$$

Rješenje možemo napisati u obliku:

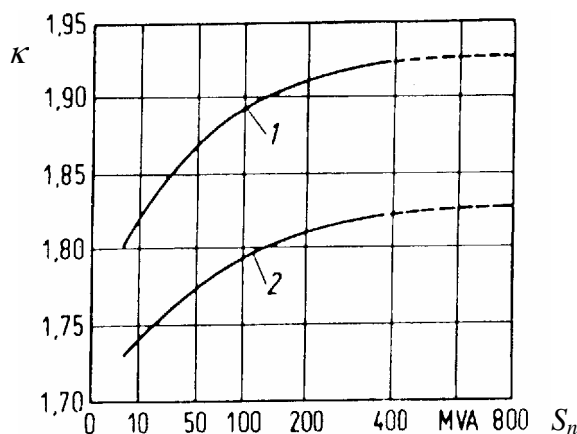
$$i_k(t) = \sqrt{2} I_k'' [\sin(\omega t + \varphi - \psi) - e^{-t/T} \sin(\varphi - \psi)] \quad (3.42)$$

$$I_k'' = c U_{1n} / \sqrt{R^2 + X^2}; T = X / (\omega R); \psi = \text{atg}(X/R)$$

pri čemu je vrijednost udarnog faktora κ u kutnoj zagradi i može se grafički prikazati kao na sl. 3.16b. Maksimalna vrijednost udarnog faktora dobije se za $\varphi = 0^\circ$ i unutar prvih 10 ms (kod 50 Hz) od nastanka kratkog spoja ovisno o omjeru djelatnog i induktivnog otpora u kratkospojnom krugu. Kod nastanka kratkog spoja u maksimumu napona (kada je $\varphi = 90^\circ$) nemamo pojavu istosmjernog člana kratkospojne struje, te je $\kappa = 1$.

Zanemarujući činjenicu da se tjemena vrijednost struje kratkog spoja $i_k(t)$ pojavljuje nešto ranije nego prva tjemena vrijednost njenog izmjeničnog člana (dakle nešto prije isteka 10 ms), dobije se da je tjemena vrijednost kratkospojne struje za $\varphi = 0^\circ$ i $\omega t = \pi/2 + \psi$, pa imamo približnu relaciju za najnepovoljnije vrijednosti udarnog faktora:

$$\kappa \approx 1 + \left[1 + (R/X)^2 \right]^{-1/2} e^{-aR/X}; a = \text{atg}(X/R) + \pi/2 \quad (3.43)$$



Sl. 3.17 - Udarni faktor kod trolnog kratkog spoja na stezaljkama turbogenerators

Na sl. 3.17 su kao primjer prikazane iskustveno određene vrijednosti udarnog faktora κ za trolni kratki spoj u najnepovoljnijem trenutku kod turbogenerators ovisno o njegovoj prividnoj snazi. Krivulja 1 vrijedi za kratki spoj iz stanja praznog hoda uz nazivni napon i broj okretaja. Krivulja 2 vrijedi za kratki spoj iz stanja 80÷100% nazivnog opterećenja uz nazivni faktor snage. Izrazito uvećane vrijednosti κ dobiju se kod kratkog spoja koji slijedi praznom hodu generators, što posebno vrijedi kod velikih generators. Ovo vrijedi također kod kratkih spojeva na stezaljkama višeg napona kod blok-transformators. Ovdje se međutim može računati tijekom najvećeg dijela pogonskog vremena generators da postoji odgovarajuće predopterećenje (za generators preko 100 MVA uzima se primjerice $\kappa \approx 1,86$).

Kako se u sve tri faze pojavljuju izmjenične i istosmjerne komponente struje kratkog spoja, za generators sa potpunim prigušnim namotom (gdje vrijedi $X_d'' = X_q'', T_d'' = T_q''$) imamo vremensku ovisnost struje kratkog spoja po fazama:

$$\begin{aligned} i_{kR}(t) &= \sqrt{2} I_{k-}(t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) + I_{k-}(t) \cdot \sin \varphi \\ i_{kS}(t) &= \sqrt{2} I_{k-}(t) \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi) + I_{k-}(t) \cdot \sin(\varphi + 2\pi/3) \\ i_{kT}(t) &= \sqrt{2} I_{k-}(t) \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3 - \varphi) + I_{k-}(t) \cdot \sin(\varphi + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Ovdje su I_k'' početna, I_k' prijelazna i I_k trajna struja kratkog spoja. Vremenske konstante su T_d'' za početnu struju, T_d' za prijelaznu struju i T_a za istosmjernu struju kratkog spoja, a efektivna vrijednost izmjenične komponente:

$$I_{k-}(t) = (I_k'' - I_k') \cdot e^{-t/T_d''} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-t/T_d'} + I_k \quad (3.45)$$

dok je maksimalna vrijednost istosmjerne komponente:

$$I_{k-}(t) = I_{k-} \cdot e^{-t/T_a} = \sqrt{2} I_k'' \cdot e^{-t/T_a} \quad (3.46)$$

Ako je u trenutku nastanka kratkog spoja fazni kut $\varphi = \pi/2 = 90^\circ$, dobijemo iz gornjih jednadžbi najveću istosmjernu komponentu struje kratkog spoja u R fazi:

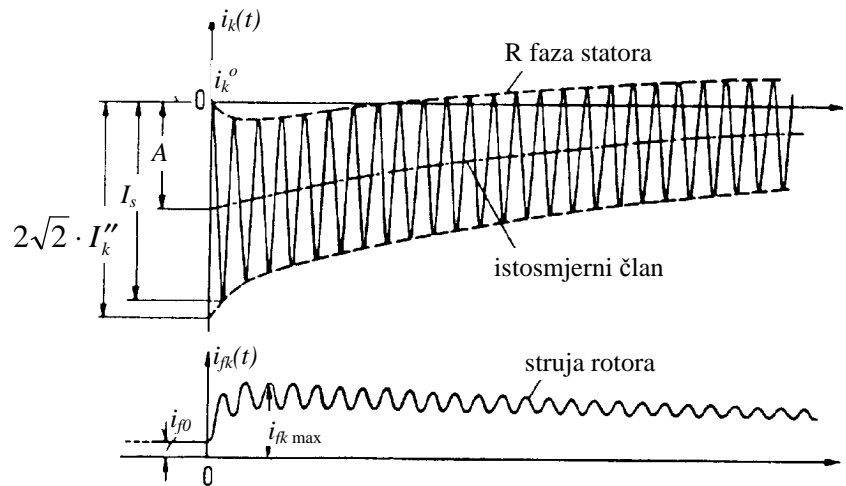
$$\begin{aligned} i_{kR} &= -\sqrt{2} I_{k-}(t) \cdot \cos \omega t + I_{k-}(t) \\ i_{kS} &= -\sqrt{2} I_{k-}(t) \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) - I_{k-}(t)/2 \\ i_{kT} &= -\sqrt{2} I_{k-}(t) \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3) - I_{k-}(t)/2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

U svakom trenutku vrijedi da je suma tri izmjenične komponente i suma tri istosmjerne komponente struje kratkog spoja jednaka nuli:

$$i_{kR-} + i_{kS-} + i_{kT-} = 0; \quad i_{kR-} + i_{kS-} + i_{kT-} = 0 \quad (3.48)$$

Ako do kratkog spoja na stezaljkama dođe kod vrtnje neopterećenog generatora (index 0), kod nepromijenjene uzbude (također tijekom kratkog spoja) vrijedi $E'' = E' = E = U_1$, a struja u R fazi (sa maksimalnom istosmjernom komponentom) dobije se prema prvoj jedn. (3.47):

$$i_{kR0} = -\sqrt{2} U_1 \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot \cos \omega t + \sqrt{2} U_1 \frac{1}{X_d''} \cdot e^{-t/T_a} \quad (3.49)$$



Sl. 3.18 - Tropolni udarni kratki spoj iz stanja praznog hoda

Na sl. 3.18 pokazan je primjer oscilograma struje kratkog spoja u fazi R i pripadajuće struje uzbude turbogeneratora sa nazivnim podacima 300 MVA, 21 kV, 50 Hz ($x_d = x_q \approx 1,8$; $k \approx 0,2 \div 0,3$; $i_{fk \max} \approx 6 \times i_{f0}$; $x_d' = 0,3$; $x_d'' = x_q'' = 0,2$; $T_d' \approx 0,8 \text{ s}$; $T_d'' \approx T_q'' \approx 0,03 \text{ s}$; $T_a \approx 0,4 \text{ s}$). Vidi se da istosmjerna struja uzbude dobija sa kratkim spojem pored povećanja još i jednu izmjeničnu komponentu koja je rezultat istosmjerne komponente struje kratkog spoja u statorskom namotu. Zato ova izmjenična komponenta struje uzbude nestaje sa vremenskom konstantom T_a . Karakteristična ovisnost uzbudne struje može se opisati relacijom:

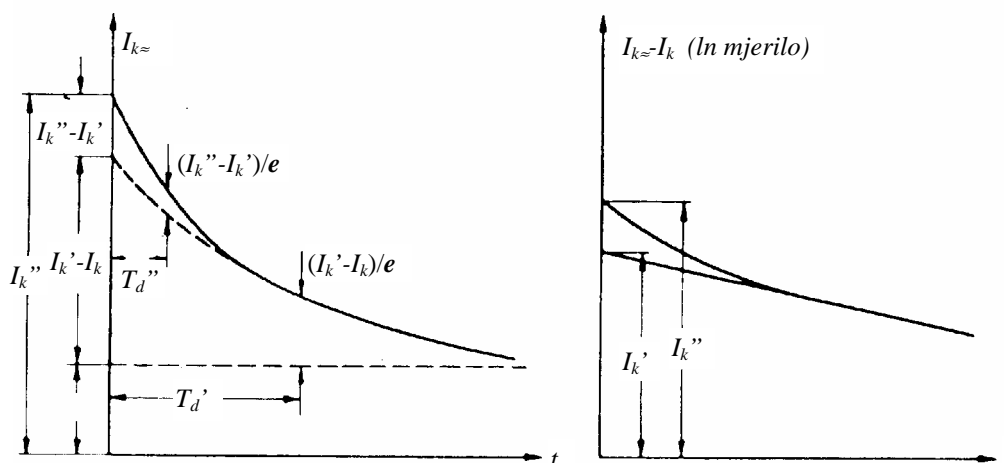
$$i_{fk0} \approx i_{f0} \left\{ 1 + \frac{X_d + X_d'}{X_d'} \left[e^{-t/T_d'} - (1-k) e^{-t/T_d''} - k e^{-t/T_a} \cos \omega t \right] \right\} \quad (3.50)$$

gdje se kod zanemarivog djelatnog otpora r_p prema reaktanciji prigušnog namota x_p koeficijent k može približno odrediti kao:

$$k \approx x_d' (x_d'' - x_b) / [x_d'' (x_d' - x_b)]; \quad x_b = x_{d\sigma} + x_{dg} x_{sr} / (x_{dg} + x_{sr}) \quad (3.51)$$

Na sl. 3.18 se vidi da u nekoliko prvih perioda poslije nastanka kratkog spoja struja ne prolazi kroz nulu, što je posljedica visoke istosmjerne komponente i veličina vremenskih konstanti. Kod generatora prividne snage ispod 100 MVA ovakvo stanje se može očekivati najduže do cca 50 ms. Ovo vrijeme se povećava sa veličinom generatora i za velike jedinice dostiže cca 500 ms. Ako tijekom ovog vremena generatorski prekidač otvori svoje kontakte, treba većinom očekivati da će se nepostojanje prolaza kroz nulu pojaviti samo u jednoj fazi. Prekidom struje u fazi u kojoj imamo prolaz struje kroz nulu, dolazi do naglog faznog pomaka struja u ostale dvije faze koje još provode, a time i do vrlo brzog okončanja perioda neprolaženja struje kroz nulu. Ako je napon električnog luka generatorskog prekidača 10% faznog napona generatora, biti će vremenska konstanta istosmjerne komponente struje bitno

smanjena (n.pr. sa 500 ms na cca 50 ms), tako da se prolazi kroz nulu mogu očekivati u sve tri faze unutar vremena isklapanja odabranog prekidača.



Sl. 3.19 - Izmjenične komponente struje kratkog spoja

Na sl. 3.19a prikazana je vremenska promjena efektivne vrijednosti struje kratkog spoja prema jedn.(3.45). Vremenska konstanta početne struje kratkog spoja T_d'' (e je baza prirodnog logaritma) određena je početnom reaktancijom X_d'' i djelatnim otporom prigušnog kruga sinkronog stroja, a većinom je u granicama $0,02 \div 0,05$ s za turbogeneratore odnosno $0,02 \div 0,07$ s za generatore sa izraženim polovima i prigušnim namotom. Vremenska konstanta prijelazne struje kratkog spoja T_d' , s kojom ova opada na veličinu trajne struje kratkog spoja, dobije se pomoću vremenske konstante prijelazne struje iz stanja praznog hoda T_{d0}' prema relaciji:

$$T_d' = T_{d0}' X_d' / X_d \approx T_f X_d' / X_d ; \quad T_f = x_f / (r_f \omega) \quad (3.52)$$

Vremenska konstanta T_{d0}' se može približno odrediti iz induktiviteta uzbuđnog namota (rotora) kod otvorenog namota armature (statora) i uzbude za nazivni napon, te djelatnog otpora uzbuđnog namota. Vrijednosti su obično $5 \div 15$ s za turbogeneratore, a $4 \div 10$ s za generatore sa izraženim polovima.

Korištenje oscilografiranih vrijednosti pokazano je na sl. 3.19b. Od vrijednosti izmjenične komponente $I_{kc}(t)$ odbije se trajna struja kratkog spoja I_k i vrijednosti nanose na ordinatu u logaritamskom mjerilu. Vrijednosti za prijelaznu struju I_k' bi morale ležati na pravcu, te se ona može jasno razlučiti od početne struje I_k'' . Ako su početne vrijednosti istosmjerne komponente jednake i pomaknute međusobno za 120° , može se jednim mjerenjem u najmanje dvije faze odrediti njihova maksimalna vrijednost I_{k-} neovisno o trenutku nastanka kratkog spoja. Pri tome se uzimaju dobijene vrijednosti istosmjernih komponenti u pojedinim fazama kao projekcija vektora I_{k-} na osi namota tih faza. Osnovne vrijednosti reaktancija i vremenskih konstanti za sinkrone generatore dane su u Tab. 3.1.

Kod pojave kratkog spoja izvan elektrane, struje kratkog spoja i pripadne vremenske konstante ovise i o impedanciji mreže između stezaljki generatora i mjesta kratkog spoja. Zato u nadomjesnim shemama treba dodati parametrima generatora odgovarajuće parametre mreže. Kod pojave nesimetričnog opterećenja generatora imamo inverzni sistem struja I_i generatora, čija se veličina definira u odnosu na njegovu nazivnu struju I_n . Za zaštitu od opasnih stanja koriste se releji koji djeluju ovisno o vrijednosti $(I_i / I_n)^2$ ili $(I_i / I_n)^2 t$.

Podatak	Generatori s izraženim polovima	Turbo-generatori	Napomene
Početna uzdužna reaktancija x_d'' (zasićena)	$0,12 \div 0,30^{a)}$ $0,09 \div 0,16^{b)}$	$0,09 \div 0,22^{c)}$	^{a)} veći iznos za veće snage ^{b)} niskonaponski generator ^{c)} veći iznos za sporiji stroj
Početna poprečna reaktancija x_q'' (zasićena)	$(1 \div 1,1) x_d''$	$(1 \div 1,2) x_d''^{d)}$	^{d)} također $x_q'' \leq x_d''$
Prijelazna uzdužna reaktancija x_d'	$0,14 \div 0,35^{e)}$	$0,20 \div 0,45$	^{e)} $x_d' = (1,4 \div 1,7) x_d''$
Sinkrona uzdužna reaktancija x_d (nezasićena) ^{f)}	$1,40 \div 3,00$	$80 \div 140$	^{f)} vrijednosti su zasićene reaktancije manje 5-10%
Sinkrona poprečna reaktancija x_q (nezasićena) ^{f)}	$(0,9 \div 1) x_d$	$(0,6 \div 0,7) x_d$	
Inverzna reaktancija x_i	$(x_d'' + x_q'')/2 \approx x_d''$		
Nulta reaktancija x_o	$0,03 \div 0,10$	$0,05 \div 0,20$	$x_o \approx x_d'' (0,4 \div 0,8)$
Početna vremenska konstanta $T_d''(s)$	$0,02 \div 0,05$	$0,02 \div 0,07$	$T_q'' \approx T_d''; T_d'' = T_{d0}'' x_d''/x_d'$
Prijelazna vremenska konstanta $T_d'(s)$	$0,8 \div 1,5$	$0,7 \div 2,2$	$T_d' = T_{d0}' x_d'/x_d$
Prijelazna vremenska konstanta praznog hoda $T_{d0}'(s)$	$5 \div 15$	$4 \div 10$	$T_{d0}' = \frac{x_f}{r_f \omega} + \frac{x_p}{r_p \omega} - T_{d0}''$
Istosmjerna vremenska konstanta $T_a(s)$	$0,05 \div 0,4^{g)}$	$0,1 \div 0,4$	$T_a = x_d''/(r_s \omega)$ ^{g)} veliki generatori
Nazivno vrijeme zaleta $T_z(s)^{h)}$	$5 \div 10$		^{h)} s rotorom turbine

Tab. 3.1 - Osnovni podaci za sinkrone generatore

3.4 Turbogenerator u asinkronom pogonu

Kod kratkog spoja na stezaljkama generatora dobijemo prema prvoj jednadžbi (3.45) kod $\varphi = 0$ da kratkospojna struja ne sadrži istosmjernu komponentu, pa imamo:

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-t/T_d''} + (I_k' - I_k) e^{-t/T_d'} + I_k \right] \sin \omega t \quad (3.53)$$

Može se uzeti da je $I_k'' = U_1/X_d''$, $I_k' = U_1/X_d'$, $I_k = U_1/X_d$ ako je do kratkog spoja došlo kod generatora koji je radio u praznom hodu. Koristeći relativne jedinice ($u_{1n}=1,00$) imamo sada:

$$i_k(t) = \sqrt{2} u_{1n} \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{x_d} \right] \sin \omega t \quad (3.54)$$

Da bi se mogla odrediti struja statora sinkronog stroja kod pogonskog stanja kakvo je asinkroni pogon sa klizanjem s , može se koristiti Laplaceova ili Carsonova integralna transformacija. Ovime se vremenska ovisnost zamjenjuje frekventnom ovisnošću, pa se član $e^{-t/T}$ preslikava u $(j\omega T)/(1 + j\omega T)$. Ovdje je kružna frekvencija $\omega = s \cdot \omega_h$, pri čemu je s klizanje

a nazivna kružna frekvencija $\omega_n = 2\pi f$. Izraz u jedn.(3.54) može se shvatiti kao recipročna vrijednost reaktancije u (uzdužnoj) d-osi koja je funkcija klizanja, dakle $x_d(js\omega_n)$, pa dobijemo:

$$\frac{1}{x_d(js\omega_n)} = \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{js\omega_n T_d''}{1 + js\omega_n T_d''} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{js\omega_n T_d'}{1 + js\omega_n T_d'} + \frac{1}{x_d} \quad (3.55a)$$

Sređivanjem desne strane jedn.(3.55a) i uvođenjem da je $T_d'' = T_{d0}'' x_d''/x_d'$, $T_d' = T_{d0}' x_d'/x_d$ dobijemo:

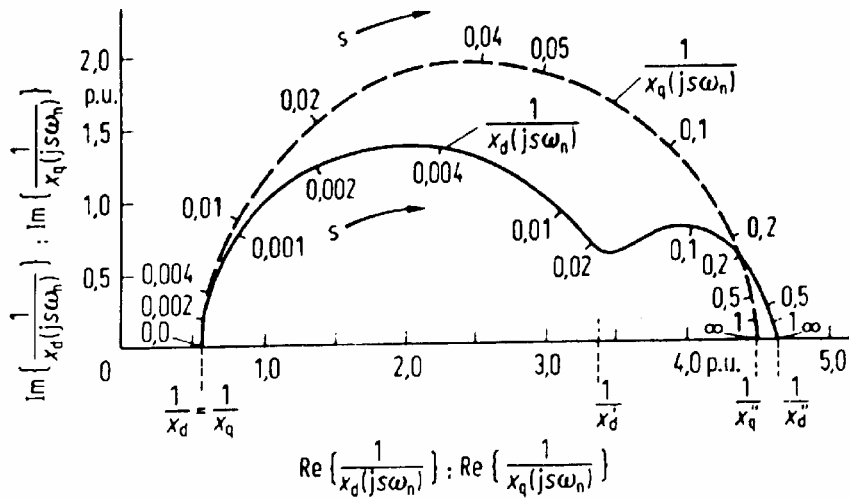
$$\frac{1}{x_d(js\omega_n)} = \frac{1}{x_d} \cdot \frac{1 + js\omega_n T_{d0}''}{1 + js\omega_n T_d''} \cdot \frac{1 + js\omega_n T_{d0}'}{1 + js\omega_n T_d'} \quad (3.55b)$$

U (poprečnoj) q-osi nema uzbuđnog namota, pa vrijedi da je $x_q' = x_q$. Postavljajući relaciju analogno onoj u jedn.(3.55), dobijemo za recipročnu vrijednost reaktancije u (poprečnoj) d-osi koja je funkcija klizanja, dakle $x(js\omega_n)$:

$$\frac{1}{x_q(js\omega_n)} = \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \cdot \frac{js\omega_n T_q''}{1 + js\omega_n T_q''} + \frac{1}{x_q} \quad (3.56a)$$

Sređivanjem desne strane jedn.(3.56a) i uvođenjem da je $T_q'' = T_{q0}'' x_q''/x_q$ dobijemo:

$$\frac{1}{x_q(js\omega_n)} = \frac{1}{x_q} \cdot \frac{1 + js\omega_n T_{q0}''}{1 + js\omega_n T_q''} + \quad (3.56b)$$



Sl. 3.20 - Promjena recipročnih vrijednosti reaktancija sa klizanjem

Na sl. 3.20 pokazane su karakteristike kod recipročnih vrijednosti reaktancija u kompleksnom području za generator sa slijedećim podacima: $S_n = 240$ MVA; $n_n = 3000$ o/min; $f_n = 50$ Hz; $x_d = 1,72$; $x_q = 1,72$; $x_d' = 0,297$; $x_d'' = 0,215$; $x_q' = 0,222$; $T_d' = 0,82$ s; $T_{d0}' = 4,74$ s; $T_d'' = 0,028$ s; $T_{d0}'' = 0,039$ s; $T_q' = 0,066$ s; $T_{q0}' = 0,511$ s.

Poznavanje struje ovisno o klizanju može poslužiti za zaštitu generatora kada se nađe u asinkronom pogonu. Kod otvorenog uzbuđnog namota i asinkrone vrtnje stroja, struja statora imapribližno frekvenciju $\omega = s \cdot \omega_n$ i određuje se iz srednje vrijednosti

$$1/[2x_d(j\omega)] + 1/[2x_q(j\omega)]$$

Ako je potrebna točnija vrijednost, primjerice kod razmatranja pri kratko spojenom uzбудnom namotu, treba još dodati kod frekvencije $\omega=1+2\cdot s\cdot\omega_n$ član struje statora

$$1/[2x_d(j\omega)] - 1/[2x_q(j\omega)]$$

3.5 **Momenti kod kratkog spoja**

Kod nastanka višepolnog kratkog spoja na stezaljkama generatora pojavljuje se (uslijed izuzetno visokog elektromagnetskog zakretnog momenta opterećenja) visoki mehanički moment i naprezanja na zajedničkoj osovini generatora i pogonskog stroja, te dodatni momenti opterećenja građevinskih temelja. Kod proračuna ovih naprezanja ne uzimamo u obzir smanjivanje kratkospojne struje sa vremenom jer nas interesiraju najveća naprezanja, a pojednostavljujemo relacije. Polazeći od jedn. (3.47), kada je u trenutku prije nastanka kratkog spoja generator bio u praznom hodu, možemo uzeti $E'' = U_{1n}$ i dobijemo za trolepolni kratki spoj:

$$\begin{aligned} e_R'' &= \sqrt{2} U_{1n} \sin \omega t & i_{kR}'' &= -\sqrt{2} I_k'' [\cos \omega t - 1] \\ e_S'' &= \sqrt{2} U_{1n} \sin(\omega t - 2\pi/3) & i_{kS}'' &= -\sqrt{2} I_k'' [\cos(\omega t - 2\pi/3) + 1/2] \\ e_T'' &= \sqrt{2} U_{1n} \sin(\omega t + 2\pi/3) & i_{kT}'' &= -\sqrt{2} I_k'' [\cos(\omega t + 2\pi/3) + 1/2] \end{aligned} \quad (3.57)$$

Za nazivni napon vrijedi $U_n = \sqrt{3} \cdot U_{1n} = \sqrt{3} \cdot E''$, a prividna snaga mjerodavna za naprezanja je ona u početku nastanka kratkog spoja te dobijemo:

$$S_{k(3p)}(t) = S_{k(3p)}''(t) = e_R'' i_{kR}'' + e_S'' i_{kS}'' + e_T'' i_{kT}'' = \sqrt{3} U_n I_k'' \sin \omega t \quad (3.58)$$

Uz nazivnu prividnu snagu $S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$ vrijedi da je nazivni zakretni moment $M_n = S_n / \omega$. Ako prividnu snagu iz jedn. (3.58) svedemo na njenu nazivnu vrijednost (1 p.u.), dobijemo kod trolepolnog kratkog spoja na stezaljkama generatora u jediničnim vrijednostima za prividnu snagu:

$$s_{k(3p)}(t) = \frac{S_{k(3p)}(t)}{S_n} = \frac{\sqrt{3} U_n I_k''}{\sqrt{3} U_n I_n} \sin \omega t = \frac{1}{x_d''} \sin \omega t \quad (3.58a)$$

Analogno svodeći vrijednost na nazivni zakretni moment, dobijemo za moment trolepolnog kratkog spoja:

$$m_{k(3p)}(t) = \frac{M_{k(3p)}(t)}{M_n} = \frac{1}{x_d''} \sin \omega t \quad (3.58b)$$

Kod dvopolnog kratkog spoja na stezaljkama generatora u fazama S i T pojavljuje se rezultatni inducirani napon kao razlika faznih napona promatranih faza, a u njima također međusobno jednake i nasuprotne struje koje dobijemo prema jedn. (3.57): $e_S'' - e_T'' = \sqrt{3} \sqrt{2} U_{1n} \sin \omega t$, $i_{k(2p)S}'' = -i_{k(2p)T}'' = \sqrt{2} I_k'' (1 - \cos \omega t)$. Koristimo pretpostavku da promatrani generator ima definirane početne reaktancije odnosno struje kratkog spoja: $x_q'' = x_d''$, $I_{k(2p)}'' = \sqrt{3} I_k'' / 2$. Iz ovoga se dobije za ukupnu prividnu snagu dvopolnog kratkog spoja S i T faze:

$$S_{k(2p)}(t) = S_{k(2p)}''(t) = e_S'' i_{k(2p)S}'' + e_T'' i_{k(2p)T}'' = \sqrt{3} U_n I_k'' (\sin \omega t - 0,5 \sin 2\omega t) \quad (3.59)$$

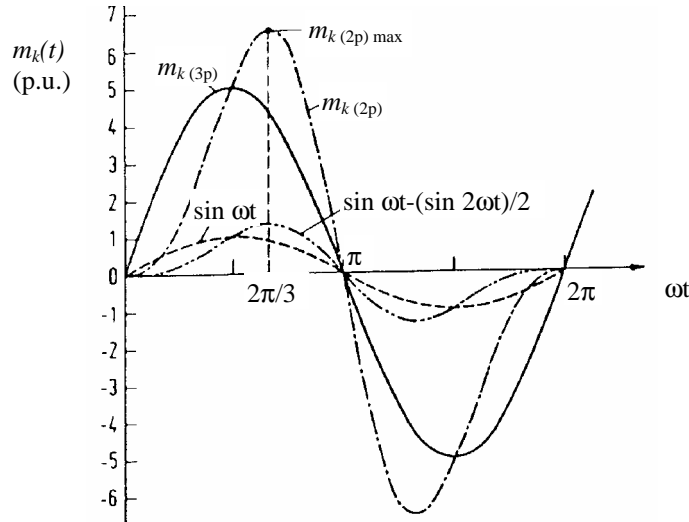
Analogno jednađbama (3.58a) i (3.58b) dobije se za jedinične vrijednosti prividne snage i momenta kod dvopolnog kratkog spoja:

$$s_{k(2p)}(t) = \frac{S_{k(2p)}(t)}{S_n} = \frac{1}{x_d''} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \quad (3.59a)$$

$$m_{k(2p)}(t) = \frac{M_{k(2p)}(t)}{M_n} = \frac{1}{x_d''} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \quad (3.59b)$$

Najveća vrijednost momenta kod dvopolnog kratkog spoja nalazi se deriviranjem po ωt i izjednačenjem sa nulom, pa dobijemo uvjet: $\cos \omega t = \cos 2\omega t$. Ovo je zadovoljeno za $\omega t = 2\pi/3 = 120^\circ$ i tada moment kod dvopolnog kratkog spoja iznosi:

$$m_{k(2p)\max} = 3\sqrt{3}/(4 x_d'') \approx 1,3 \cdot m_{k(3p)\max} \quad (3.60)$$



Sl. 3.21 - Momenti kod dvopolnog i trolnog kratkog spoja

Na sl. 3.21 prikazana je vremenska promjena momenata kratkog spoja prema jedn.(3.58b) odnosno (3.59b) kao primjer kod $x_d'' = 0,2$. Pulzirajući kratkospojni momenti koji djeluju na rotor generatora prenose se preko zajedničke osovine generatora i turbine kao pulzirajuća zakretna opterećenja. Neka je J_G moment tromosti rotora generatora, J_T moment tromosti rotora turbine, c konstanta elastičnosti osovine, a $\gamma = \varphi_T - \varphi_G$ razlika kutova zakreta rotora turbine spram rotora generatora uslijed opterećenja tako da je moment torzije $c \cdot \gamma$. Ako se kao narinuti moment uvede iz (3.58b) moment trolnog kratkog spoja $M_{k(3p)}(t) = M_{k(3p)} \cdot \sin \omega t$ i uzme da je neposredno prije kratkog spoja bilo neopterećeno pogonsko stanje, jednadžbe mehaničke ravnoteže na osovini generatora odnosno turbine glase:

$$\begin{aligned} J_G \ddot{\varphi}_G - c \cdot (\varphi_T - \varphi_G) + M_{k(3p)} \sin \omega t &= 0 \\ J_T \ddot{\varphi}_T + c \cdot (\varphi_T - \varphi_G) &= 0 \end{aligned} \quad (3.61)$$

Podijelimo li obje relacije sa pripadnim momentima tromosti J_G odnosno J_T i oduzmimo prvu od druge, dobijemo:

$$\ddot{\gamma} + \frac{J_G + J_T}{J_G \cdot J_T} \cdot c \cdot \gamma = \ddot{\gamma} + \omega_0^2 \gamma = \frac{M_{k(3p)}}{J_G} \cdot \sin \omega t \quad (3.62)$$

gdje je kut uslijed momenta $\gamma = \varphi_T - \varphi_G$, a vlastita frekvencija rotirajućih dijelova agregata generator - turbina označena je sa ω_0 . Rješenje diferencijalne jedn. (3.62) dobije se pomoću integralne (primjerice Laplaceove) transformacije i glasi:

$$\gamma = \frac{M_{k(3p)}}{J_G} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega_0^2 - \omega^2} - \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (3.63)$$

Torzioni moment na osovinskom spoju između generatora i turbine kod trolnog kratkog spoja sada iznosi $c \cdot \gamma$, pa imamo:

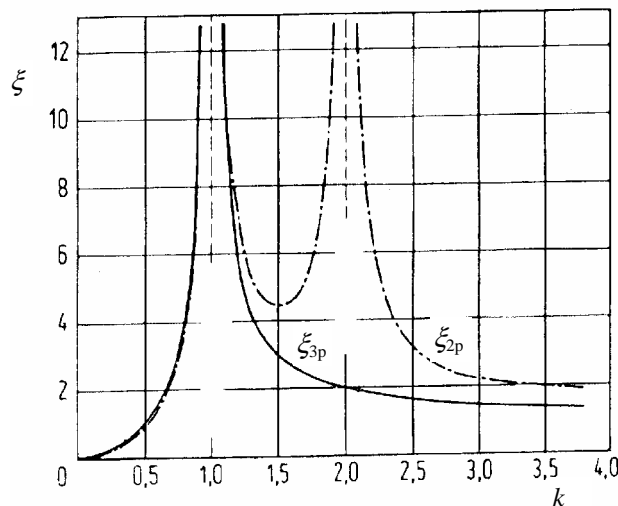
$$M_{Sk(3p)}(t) = M_{k(3p)} \frac{J_T}{J_T + J_G} \left(\frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \sin \omega_0 t \right) \quad (3.64)$$

Ako se uvede omjer između vlastite frekvencije rotirajućih dijelova bloka generator - turbina i frekvencije elektromagnetskog momenta kratkog spoja $k = \omega_0 / \omega$, a moment iz jedn.(3.64) svede na nazivni $M_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n / \omega$, dobijemo jedinični moment na spoju osovina generatora i turbine kod trolnog kratkog spoja:

$$m_{Sk(3p)}(t) = \frac{1}{x_d''} \frac{J_T}{J_T + J_G} \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \cdot \sin \omega t - \frac{k}{k^2 - 1} \cdot \sin \omega_0 t \right) \quad (3.65)$$

Najveća vrijednost momenta na osovini koja se može eventualno pojaviti prema jedn.(3.65) dobije se zbrajanjem apsolutnih vrijednosti amplituda sinusnih oscilacija i može se izraziti s pomoću faktora pojačanja ξ . Faktor pojačanja ovisi samo o omjeru frekvencija k i kod trolnog kratkog spoja iznosi:

$$\xi_{3p} = \left| \frac{k^2}{k^2 - 1} + \frac{k}{k^2 - 1} \right| = \left| \frac{k}{k - 1} \right| \quad (3.66)$$



Sl. 3.22 - Faktor pojačanja torzionog momenta na osovini kod kratkog spoja

Na sl. 3.22 je prikazana ovisnost faktora pojačanja ξ_{3p} o omjeru frekvencija k . Vidi se da kod trolnog kratkog spoja imamo rezonantnu frekvenciju za $k = 1$ odnosno kada je $\omega_0 = \omega$. Sa krutošću osovine raste opružna konstanta c i za idealno krutu osovину imamo vlastitu frekvenciju ω_0 koja teži beskonačnom, pa tako i omjer k . U tom slučaju imamo maksimalni moment koji bi se teoretski mogao pojaviti na osovini:

$$m_{Sk(3p)\max} = \frac{1}{x_d''} \frac{J_T}{J_T + J_G} \quad (3.67)$$

Vidimo da kod određene početne reaktancije generatora, ovdje moment ovisi samo o omjeru momenta tromosti turbine i ukupnog momenta tromosti svih rotirajućih dijelova na osovini bloka.

Ako je prije nastanka kratkog spoja generator bio opterećen, onda je turbina morala davati $M_T = M_{k(3p)} \cdot \sin \alpha$ i ovaj moment će ostati nepromijenjen u prvom trenutku nakon nastanka

kratkog spoja (α je fazni pomak uslijed opterećenja na osovini). Jednadžbe (3.60) u ovom slučaju glase:

$$\begin{aligned} J_G \ddot{\varphi}_G - c \cdot (\varphi_T - \varphi_G) + M_{k(3p)} \sin(\omega t + \alpha) &= 0 \\ J_T \ddot{\varphi}_T + c \cdot (\varphi_T - \varphi_G) &= M_{k(3p)} \sin \alpha = M_T \end{aligned} \quad (3.68)$$

Analogno postupku kod jedn.(3.62) dobijemo diferencijalnu jednadžbu:

$$\ddot{\gamma} + \omega_0^2 \gamma = \frac{M_{k(3p)}}{J_G} \cdot \sin(\omega t + \alpha) + \frac{M_{k(3p)}}{J_T} \cdot \sin \alpha \quad (3.69)$$

i njeno rješenje:

$$\begin{aligned} \gamma = \frac{M_{k(3p)}}{J_G} \left[\frac{\sin(\omega t + \alpha)}{\omega_0^2 - \omega^2} - \cos \alpha \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\sin \Omega_0 t}{\omega_0^2 - \omega^2} + \right. \\ \left. + \sin \alpha \cdot \left(\frac{1}{\omega_0^2} - \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \cdot \cos \omega_0 t + \frac{J_G}{J_T} \cdot \frac{\sin \alpha}{\omega_0^2} \right] \end{aligned} \quad (3.70)$$

Uvođenjem torzionog momenta osovine $M_{Sk(3p)}(t) = c \cdot \gamma$ i njegovim svođenjem na nazivni moment M_n , dobijemo jediničnu vrijednost momenta kratkog spoja na osovini agregata:

$$\begin{aligned} m_{Sk(3p)}(t) = \left\{ \frac{J_T}{J_T + J_G} \cdot \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \left[\sin(\omega t + \alpha) - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \omega_0 t - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \omega_0 t \right] + \frac{J_G}{J_T + J_G} \cdot \sin \alpha \right\} \cdot m_{k(3p)} \end{aligned} \quad (3.71)$$

Za torziono statički prednapregnutu osovину u trenutku nastanka kratkog spoja uobičajeno je veličinu kuta torzije α zamijeniti u gornjoj jednadžbi sa $\text{tg } \varepsilon = (\omega/\omega_0) \text{tg } \alpha$. U slučaju da je veličinu kuta torzije α jednaka nuli, prelazi ova jednadžba u jedn. (3.64).

Kod dvopolnog kratkog spoja polazimo od jedn. (3.59b) gdje imamo još dodatni član $-(\sin 2\omega t)/2$ odnosu na jedn. (3.58b) kod trolnog kratkog spoja. Analogno jedn.(3.61), dobijemo u tom slučaju diferencijalnu jednadžbu:

$$\ddot{\gamma} + \omega_0^2 \gamma = \frac{M_{k(2p)}}{J_G} \cdot \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \cdot \sin 2\omega t \right) \quad (3.72)$$

i njeno rješenje u obliku:

$$\begin{aligned} m_{Sk(2p)}(t) = \frac{1}{x_d''} \cdot \frac{J_T}{J_T + J_G} \cdot \left[\frac{k^2}{k^2 - 1} \cdot \sin \omega t - \frac{1}{2} \cdot \frac{k^2}{k^2 - 4} \cdot \sin 2\omega t - \right. \\ \left. - \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{k^2}{k^2 - 4} \right) \cdot \sin \omega_0 t \right] \end{aligned} \quad (3.73)$$

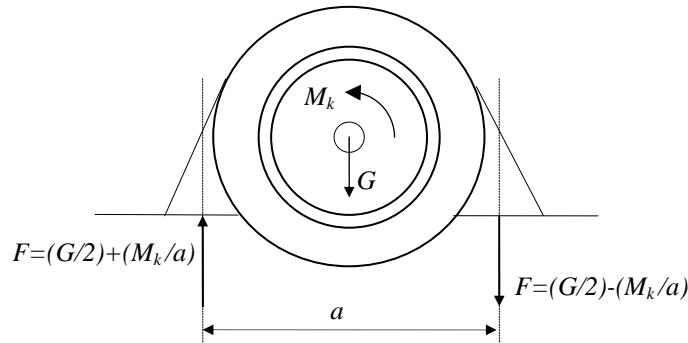
Kod idealno krute osovine ($k \rightarrow \infty$) nalazi se maksimum za $\omega t = 2\pi/3$ (sl. 3.21) i iznosi:

$$m_{Sk(2p)\max} \approx \frac{1,3}{x_d''} \frac{J_T}{J_T + J_G} \quad (3.74)$$

Najveći mogući moment na osovini kod dvopolnog kratkog spoja opet se može odrediti zbrajanjem apsolutnih vrijednosti sinusnih oscilacija, pa je faktor pojačanja ovdje:

$$\xi_{2p} = \left| \frac{k^2}{k^2-1} \right| + \left| \frac{1}{2} \cdot \frac{k^2}{k^2-4} \right| + \left| \frac{k}{k^2-1} + \frac{k}{k^2-4} \right| \quad (3.75)$$

Na sl. 3.22 se vidi da postoji rezonancija ako je vlastita frekvencija rotirajućih dijelova agregata jednaka ili dvostruko veća od frekvencije mreže ($k = \omega_0 / \omega = 1$ ili $k = 2$). Za vrijednosti iznad područja rezonancije kod izmjeničnih generatora su vrijednosti momenta dvopolnog kratkog spoja pojačane do praktički dvostruke vrijednosti.



Sl. 3.23- Sile na temelje stroja kod kratkog spoja

Kratkospojni momenti imaju za posljedicu također pojavu izmjeničnih sila na temelj generatora. Ako se radi o krutom temeljenju generatora težine G na temeljnim zavornjima razmaka a , prema sl. 3.23 dobijemo resultantne sile:

$$F = (G/2) \pm (M_k / a) \quad (3.76)$$

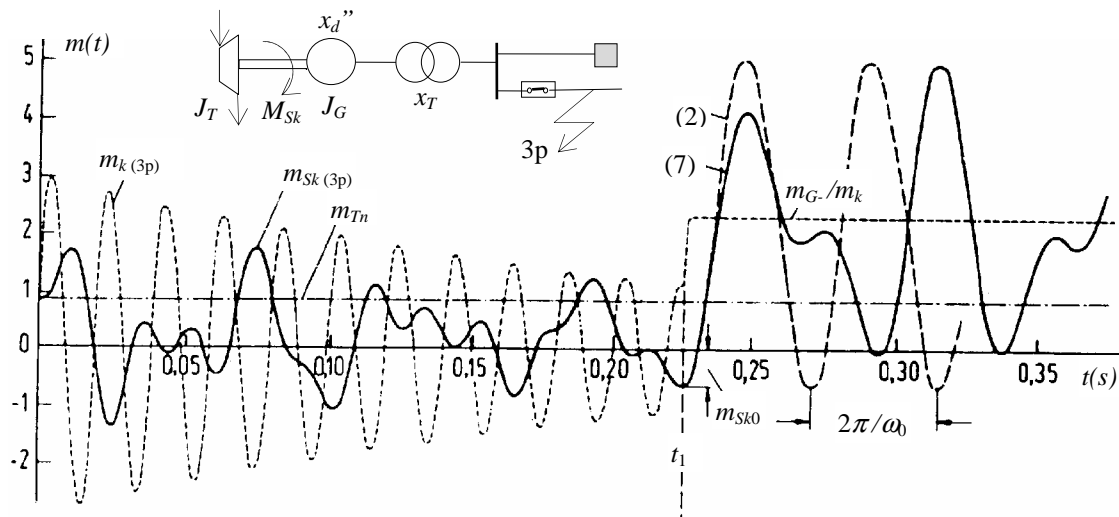
Kod najveće vrijednosti momenta dvopolnog kratkog spoja iznose maksimalne sile na sidrene vijke temelja:

$$F = (G/2) \pm (1,3/x_d'') \cdot (M_k / a) \quad (3.77)$$

Da se smanji djelovanje sila na temelj generatora uslijed kratkog spoja, uvodi se između generatora i temelja elastični uložak pri čemu dolazi i do smanjenja faktora pojačanja iz sl. 3.22 . Torzioni momenti na osovini i naprezanja spojke između generatora i turbine tijekom kratkog spoja mogu biti još uvećani. Ukoliko kod povrata napona na nazivnu vrijednost nakon isklapanja kratkog spoja u mreži postoji fazni pomak između mrežnog napona i unutarnjeg (induciranog) napona generatora, onda se na prijelaznu pojavu uslijed kratkog spoja nadovezuje nova prijelazna pojava uslijed povrata napona.

Ovisno o trenutku isklapanja kratkog spoja, kutu opterećenja kod povrata napona i njihaju rotirajućih masa bloka turbine - generator, mogući su torzioni momenti koji nadmašuju i torzione momente uslijed pogrešne sinkronizacije kod fazne razlike od cca 120° . Podešavanje minimalnog vremena isklapanja kod višepolnih kratkih spojeva u mreži i na sabirnicama je ovdje jako važno jer značajno smanjuje visinu naprezanja izazvanih povratom napona.

Na sl. 3.24 prikazana je prijelazna pojava kod nastanka i isklapanja trolnog kratkog spoja u mreži u obliku kompjuterske simulacije sa 2 zamašne mase (rotori turbine i generatora) crtkano, te sa 7 zamašnih masa (sve rotirajuće mase na zajedničkoj osovini) gdje je stanje puno bliže onome u stvarnosti. Ovdje je zanemareno povećanje amplituda uslijed pulzirajućih momenata i prigušenje. Vidi se da najveće amplitude na spoju osovina generatora i turbine nastaju nakon trolnog kratkog spoja i njime prouzročenog dinamičkog predopterećenja spoja osovina kada se povrat nazivni mrežni napon u najnepovoljnijem faznom pomaku (kod negativnog maksimuma momenta m_{sk0} prema sl. 3.24). Smanjenje amplitude momenta tijekom trajanja kratkog spoja u mreži ($t_1=0,224$ s) nije bilo dovoljno da kompenzira fazni pomak u trenutku iskapčanja kratkog spoja u mreži.



Sl. 3.24 - Torzioni momenti kod kratkog spoja i ponovnog ukapčanja

Kod približnog proračuna sa zamašnim masama rotora generatora J_G i turbine J_T pretpostavljen je konstantan moment turbine $m_T = M_T / M_n$. Od momenta generatora izazvanog razlikom između unutarnjeg napona generatora i oporavljenog mrežnog napona uzimamo samo istosmjernu komponentu $m_G = M_G / M_n$, pa iz jednadžbi (3.60) dobijemo:

$$\ddot{\gamma} + \omega_0^2 \gamma = (M_{G-} / J_G) + (M_T / J_T) \quad (3.78)$$

za uvjete od trenutka povrata napona (iskapčanja kratkog spoja u mreži). Rješavanjem ove diferencijalne jednadžbe i uvodeći da je moment na spoju osovine generatora i turbine $m_{Sk(3p)2}(t) = c \cdot \gamma / M_n$ dobijemo za vrijeme od trenutka iskapčanja kratkog spoja mreže ($t \geq t_1$) vrijednost tog momenta:

$$m_{Sk(3p)2}(t) = \left(m_{Sk0} - m_{G-} \frac{J_T}{J_T + J_G} - m_T \frac{J_G}{J_T + J_G} \right) \cdot \cos \omega_0 t + \\ + m_{G-} \frac{J_T}{J_T + J_G} + m_T \frac{J_G}{J_T + J_G} \quad (3.79)$$

Kada se uvedu uvjeti praznog hoda turbine ($M_T = 0$) i neopterećene osovine ($M_{Sk0} = 0$), ova relacija prelazi u približnu jednadžbu torzionog momenta kod sinkronizacije sa pogrešnim faznim kutom (u zoni oko 120° dobiju se najveći udarni momenti), pa imamo za najveći udarni moment na spoju osovine:

$$m_{Sk(sin)} = m_{G-} \cdot \frac{J_T}{J_T + J_G} (1 - \cos \omega_0 t) \quad (3.80)$$

Električni luk na prekidnom mjestu u prekidaču kod isklapanja kratkog spoja i vremenski pomak u isklapanju prve i ostalih faza ovdje povoljno djeluju jer donose smanjenje torzionih naprezanja (može se računati smanjenje za približno 20%).

Za približni račun prema jedn.(3.79) sa rezultatima u sl. 3.24 korišten je blok sa prijelaznom reaktancijom generatora $x_d'' = 0,20$ i reaktancijom blok-transformatora $x_T = 0,13$. Kod pogona sa nazivnim opterećenjem i faktorom snage $\cos \varphi_n = 0,85$ u trenutku nastanka trolnog kratkog spoja vrijedi $m_T = m_{k(3p)} \cdot \sin \alpha = 0,85$ i $m_{k(3p)} = 1 / (x_d'' + x_T) = 3,03$, pa slijedi da je $\sin \alpha = 0,281$. Pretpostavimo da je moment tromosti turbine četverostruko veći od momenta tromosti generatora $J_T / (J_T + J_G) = 0,8$ i $J_G / (J_T + J_G) = 0,2$, a omjer vlastite i

mrežne frekvencije $k = \omega_0 / \omega = 0,442$. Uz ove podatke se dobije iz jedn.(3.71) za torzioni moment:

$$m_{Sk(3p)}(t) = -0,583 \cdot \sin(\omega t + \alpha) + 1,521 \sin(\omega_0 t + \varepsilon) + 0,170$$

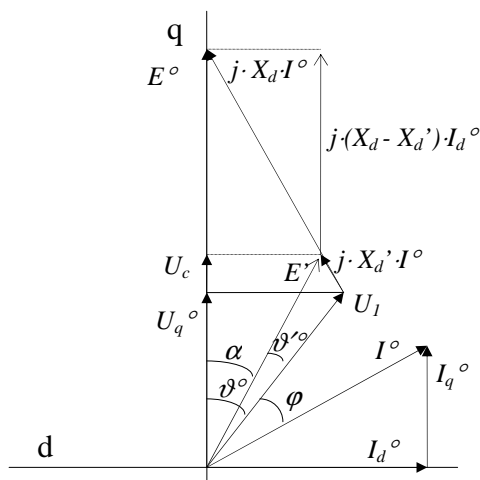
Suma apsolutnih vrijednosti amplituda daje najveći mogući moment na spoju osovina $m_{Sk(3p) \max} = 2,274$. Kod trolnog kratkog spoja je amplituda momenta prema jedn.(3.58b) $m_{k(3p)} = 1 / x_d'' = 5,0$, faktor pojačanja prema jedn.(3.65) $\xi_{3p} = 0,794$, te prema jedn. (3.68) maksimalni torzioni moment $m_{Sk(3p) \max} = 3,17$. Od trenutka isključenja kvara ($t_1=224$ s) prema sl. 3.24 imamo uz $m_{Sk0} = 0,67$ i $m_G = 2,5$ za torzioni moment osovine:

$$m_{Sk(3p)2}(t \geq t_1) = -2,84 \cos \omega_0 t + 2,17$$

Zbrajanje apsolutnih vrijednosti daje jedinični iznos 5,01 (vidi sl. 3.24).

3.6 *Dinamički dijagrami snaga*

Dinamički dijagram snage opisuje karakteristike generatora kod iznenadnih promjena opterećenja, pri čemu se zanemaruju subtranzientna prijelazna pojava i omski otpori namota. Pretpostavimo da za generator vrijedi $X_d = X_q$ i da prije promjene opterećenja ($t < 0$) ima djelatnu komponentu struje statora I_r^o i struju uzbuđene I_f^o . Kod promjene opterećenja nastoje magnetski tokovi u uzdužnoj osi ostati nepromijenjeni. Reaktancija X_d se smanjuje na veličinu X_d' , a time i reaktivni pad napona kod nepromijenjenog faznog napona. Na sl. 3.25 se vidi fazorski dijagram u kome kao posljedicu imamo smanjeni inducirani napon E' , a njegova projekcija na q-os je u tranzientnom periodu konstantno inducirani napon U_c .



Sl. 3.25 - Fazorski dijagram za definiciju napona U_c

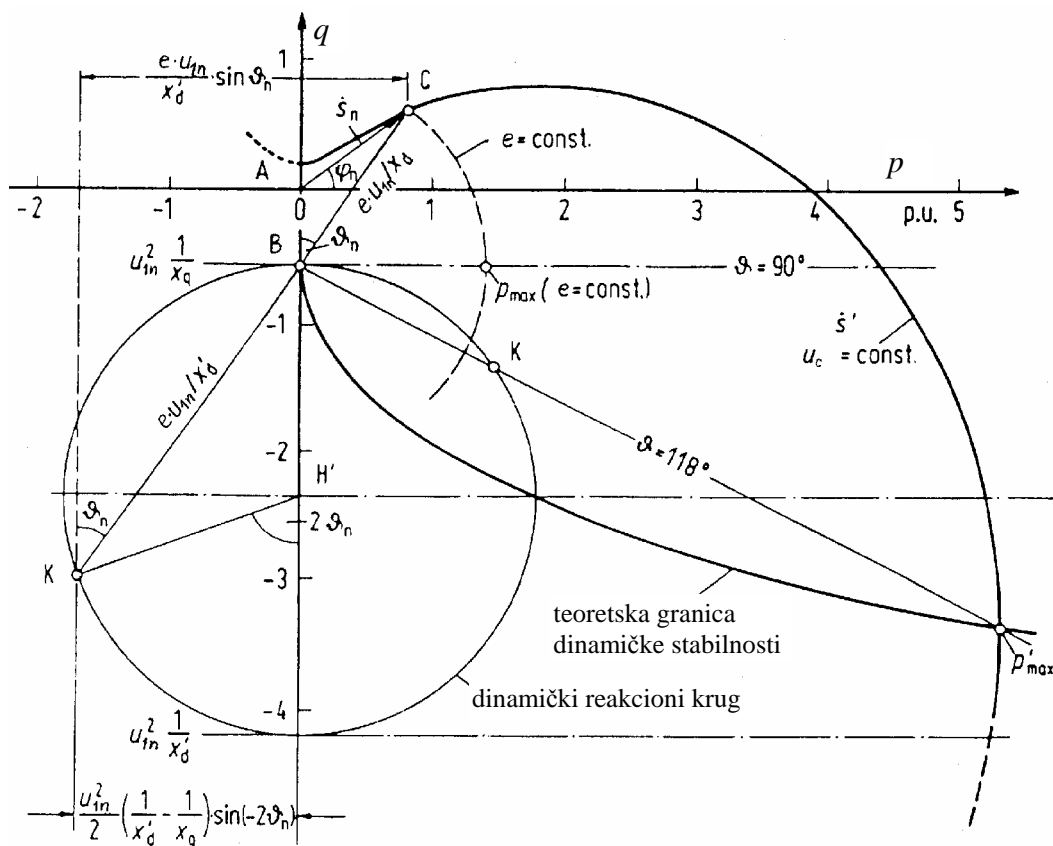
Dinamički dijagram snage konstruira se slično kao kao dijagram snage za generator sa izražnim polovima (sl. 3.11). Umjesto napona E i reaktancije X_d dolaze U_c odnosno X'_d . Polazeći od jedn.(3.19) dobijemo jednadžbu dinamičke snage za turbogenerator ($X_d = X_q$) svedenu na nazivnu prividnu snagu:

$$p' = \frac{u_1 u_c}{x'_d} \cdot \sin \vartheta + \frac{u_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{x'_a} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta \quad (3.81)$$

Reaktivni krug kod nazivnog faznog napona ima središte u točki H' i promjer

$$u_{1n}^2 \cdot \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_a} \right)$$

Za kut opterećenja ϑ između 0° i 90° je reaktivna snaga negativna što pokazuje drugi član u jedn.(3.81). Na sl. 3.26 prikazan je reaktivni krug generatora sa $X_d = X_q$ i konstantnim ulančanim tokovima ($U_{PC} = \text{const.}$) za nazivne pogonske uvjete prije promjene opterećenja ($u^\circ = 1,0$; $s^\circ = 1,0$; $\cos \varphi^\circ = 0,8$; $\vartheta^\circ = 34,7^\circ$; $x_d = x_q = 1,8$; $x'_d = 0,24$). Polazeći od točke H' odredi se točka K i s time negativna reaktivna snaga ($0^\circ < 2\vartheta < 180^\circ$). Vrijedi da je dužina BC jednaka $u_{In} \cdot u_c / x_d$ dok je dužina KC jednaka $u_{In} \cdot u_c / x'_d$. S pomoću dužine KC može se konstruirati dinamička prividna snaga s' u ovisnosti o kutu opterećenja ϑ . Teoretska granica dinamičke stabilnosti dobije se analogno statičkoj stabilnosti na sl. 3.12 a granični kut nalazi se iznad 90° . Cijela krivulja teoretske dinamičke stabilnosti ucrtana je na sl. 3.26. Ovakva teoretska granica dinamičke stabilnosti može se također interpretirati kao teoretski dostižna granica statičke stabilnosti kod uključenja na krutu mrežu (kojoj je impedancija praktično jednaka nuli) sa uzбудnim sistemom i regulatorom bez poremećaja. U stvarnosti se može ovoj granici samo približiti.



Sl. 3.26 - Dinamički reakcioni krug turbogeneratora

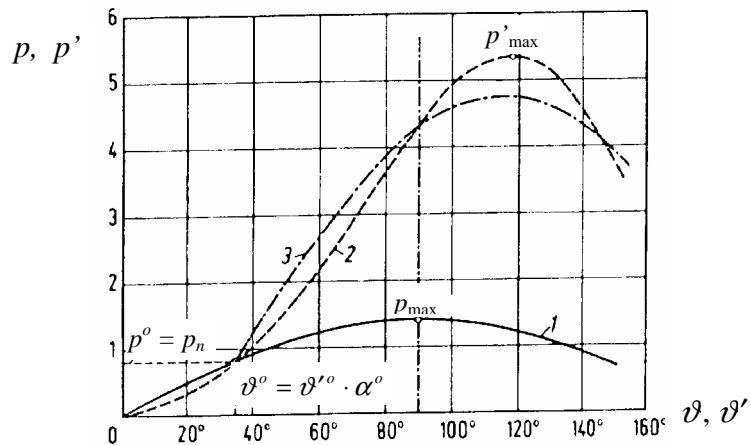
Na sl. 3.27 prikazana je usporedba statičke (p) i dinamičke (p') djelatne snage u ovisnosti o kutu opterećenja ϑ . Podaci za generator su iz prethodne slike. Krivulja 1 prikazuje statičku djelatnu snagu (za $x_d = x_q$ i ϑ) prema jedn.(3.7). Dinamičku djelatnu snagu prikazuju prema jedn.(3.81) krivulja 2 (za x'_d, x_q i ϑ) i krivulja 3 (za $x_q = x'_d$ i ϑ'). Krivulje 1 i 2 imaju zajedničku točku kod $p = p^\circ$ i $\vartheta = \vartheta^\circ$.

Kod generatora sa izraženim polovima ($X_d \neq X_q$) treba u sl. 3.25 za turbogeneratora zamijeniti napon E° naponom $E^{*\circ}$, pa je sada inducirani napon $E^\circ = E^{*\circ} \cdot X_d / X_q$. U ovom slučaju vrijedi:

$$U_c = E^\circ \cdot (X_q / X_d) - I_d^\circ \cdot (X_q - X_d) = \text{const.} \quad (3.82)$$

Do sada smo pretpostavljali da generator radi direktno na krutu mrežu. Ako je impedancija mreže veća od nule i iznosi $z_N = r_N + j x_N$, onda u analizi stabilnosti uzimamo da je ova impedancija priključena na stezaljke generatora serijski sa idealno krutom mrežom. Tako sve reaktancije generatora (x_d , x_q , x'_d) u jednažbama uvećavamo za reaktanciju mreže x_N , gdje su svi podaci u jediničnim vrijednostima p.u. (t.j. svedeni na nazivne podatke generatora).

Smanjenje reaktancije x_d na x'_d kod iznenadne promjene struje (primjerice pojavom kvara u mreži) povoljno djeluje na stabilnost. U rotoru nastaju dodatne struje koje se mogu shvatiti kao vlastita kompaundacija. Na stabilnost u izvjesnoj mjeri povoljno djeluju i brzina uređaja za uzbudu i regulaciju napona, kao i dodatne korekcije na temelju klizanja ($\dot{\vartheta}$) i njihanja ($\ddot{\vartheta}$) rotora generatora. Ipak, kod bliskih kvarova u mreži sa velikim smanjenjem napona na njegovim stezaljkama, može samo brzo isklapanje spriječiti ispadanje generatora sa mreže. Kod brzog i velikog smanjenja napona stezaljki smanjuje se naime i elektromagnetski protumoment, dok se pogonski moment održava nepromijenjen i uvjetuje brzi porast kuta opterećenja. U novije vrijeme nastoji se ovakav porast kuta opterećenja ograničiti brzim kratkotrajnim oduzimanjem snage turbini u kritičnim trenucima pomoću specijalnih ventila (fast valving).



Sl. 3.27 - Statička i dinamička promjena djelatne snage

Približno ali zorno se može pratiti stabilnost kod jednostavnih prijelaznih pojava s pomoću poređenja površina. Kod kvarova u mreži ili preklapanja (primjerice kod isklapanja paralelnog dalekovoda) koristi se dinamička promjena djelatne snage otprilike prema sl. 3.27. Karakteristika 1 opisuje sporo promjenjivo stanje, 2 opisuje brzu promjenu iz stanja punog opterećenja, a 3 brzu promjenu iz neopterećenog stanja. Radi pojednostavljenja prijelazne pojave uzima se E' kao konstantan unutarnji napon (vidi sl. 3.25) pod kutom ϑ'^o prema faznom naponu stezaljki u_1 . Tada se za realnu mrežu ($x_N \neq 0$) dobije:

$$p' = \frac{u_1 e'}{x'_d + x_N} \cdot \sin(\vartheta - \alpha) = \frac{u_1 e'}{x'_d + x_N} \cdot \sin \vartheta' \quad (3.83)$$

Na sl. 3.27 uneseno je $p' = f(\vartheta)$ prema jedn.(3.83) za $x_N = 0$ da se dobije snaga p^o kod $\vartheta'^o = \vartheta^o - \alpha$. Za $x_N \neq 0$ podudarnost promjene djelatne snage je bolja, jer tada razlika između poprečne i prijelazne uzdužne reaktancije manje utječe na rezultat.

Na sl. 4.1 je prikazana shema jednostavnog sektorskog regulatora kakav se koristio za male generatore s istosmjernim paralelnim strojem kao uzбудnikom. Namot regulatora priključen je na linijski napon generatora i na Ferrarisovom principu induciranja vrtložnih struja djeluje na zakretljivi aluminijski bubanj. Bubanj je uravnotežen perima (a), a zakretanjem kližu kružni sektori (b) po otporničkim kontaktima. Uslijed premoštenja koje se time uspostavlja, mijenja se otpor i time također struja uzbude generatora. Za smanjenje neželjenih oscilacija u regulaciji koristi se elektromehaničko prigušenje povezano preko opruge (c). Sektor s nazubljenjem (d) okreće okruglu aluminijsku pločicu (e) koja se vrti između permanentnih magneta (f). Induciranje struja u pločici proizvodi kočioni moment i amortizira njihovanja to efikasnije što je ono veće učestanosti. Kazaljka (g) pokazuje podešenost i djelovanje regulatora. Ovakav regulator ima prednosti da ne treba vlastiti izvor napona, jer se potrebna sila ostvaruje pomoću opruge. Željena vrijednost se jednostavno postavlja i regulacioni otpor varira svoju vrijednost za potrebnu struju uzbude.

Najčešće primjenjivani sistemi uzbude su danas u elektroničkoj izvedbi, pri čemu se napajanje izvodi sa stezaljki generatora odnosno iz sustava vlastite potrošnje. U osnovi imamo mogućnosti da uzbudu izvedemo pomoću izmjeničnog uzbuđnog generatora sa sklopom mirujućih ili rotirajućih dioda ili pomoću tiristora. Kompaundna uzbuda se naročito primjenjuje kod malih generatora u specijalnim uvjetima (primjerice kod brodskih generatora). Neke od ovih izvedbi potpuno izbjegavaju klizne kontakte koji su nepoželjni radi zahtjevnijeg održavanja.

4.1.1 Izmjenična uzbuda s ispravljačem

Na sl. 4.2 prikazana je principijelna shema uzbude s izmjeničnim pomoćnim generatorom (1) i ispravljačkim mosnim sklopom (2) na rotirajućoj osovinu. Polje glavnog generatora (G) regulira se uzbuđnom strujom iz dioda (2). Kako je potreban promjenjiv napon uzbude U_f radi prilagođenja opterećenju generatora, diode su napajane promjenjivim naponom izmjeničnog uzbuđnika (1) koja se nalazi na istoj osovinu i obično se projektira za veću frekvenciju (primjerice 150 Hz). Uzbuđna struja samog uzbuđnika dobija se iz pomoćnog uzbuđnika (3) s permanentnim magnetima na mjestu polova, a koji se također nalazi na istoj osovinu pogonjenoj turbinom. Struja uzbuđnika (1) regulira se preko prilagodnog transformatora (6) i tiristorskog postavnog člana (4) koji je upravljan naponskim regulatorom (5). Veličine napona i opterećenja regulator dobije preko odgovarajućih mjernih transformatora, a na njemu se namješta željena vrijednost napona. Za rezervu se koristi ručno reguliranje preko podesivog prilagodnog transformatora (7), ispravljača (8) i sklopke (10). Otpor (9) sa sklopkom za razbuđivanje koristi se kod zaustavljanja pogona s ciljem da se izbjegnu neugodno visoki naponi samoindukcije. Slična je shema izvedbe s 'rotirajućim diodama' koja omogućuje pouzdanije rješenje uzbuđnika.

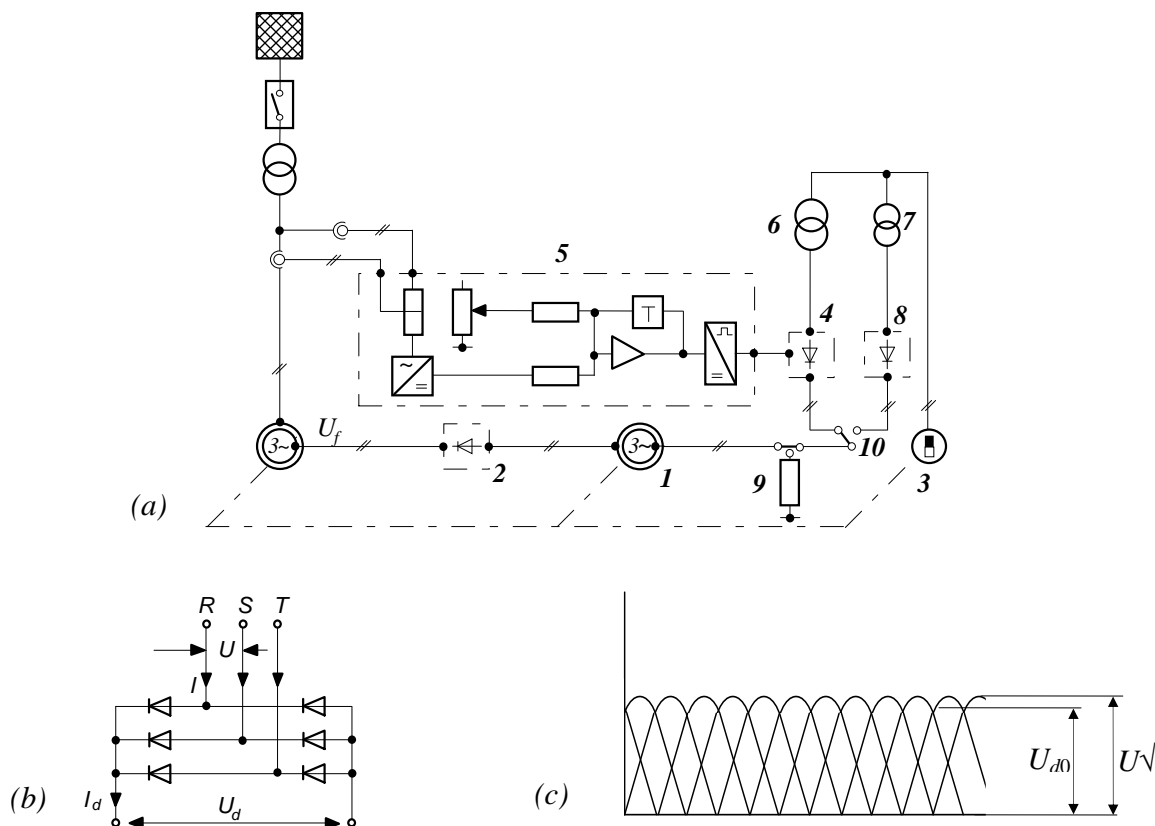
Obično su diode u trofaznom mosnom spoju prema sl. 4.2b. Najveća vrijednost istosmjernog napona u neopterećenom stanju odgovara tjemenoj vrijednosti izmjeničnog trofaznog napajanja $U_{d,max} = \sqrt{2} \cdot U$, pa za srednju vrijednost istosmjernog napona vrijedi:

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U = 1,35 \cdot U \quad (4.1)$$

Istosmjerni napon opterećenog mosnog spoja je $U_d = U_{d0} - U_{dX} - U_{dR} - U_{dv}$, gdje su dani induktivni i djelatni padovi napona na mostu, te smanjenje napona prema karakteristici ventila. Ako se stavi da je izmjenična snaga jednaka istosmjernoj $\sqrt{3} \cdot U \cdot I = U_{d,max} \cdot I_d$, dobije se za ovaj spoj odnos struja:

$$I_d / I = \sqrt{6} / 2 = 1,2247 \quad (4.2)$$

Maksimalni napon uzbude $U_{f,max}$ se kod turbogeneratorsa uzima $40 \div 80\%$ veći od nazivnog. Kod ovoga se mora voditi računa i o padu napona u uzбудniku usljed opterećenja.

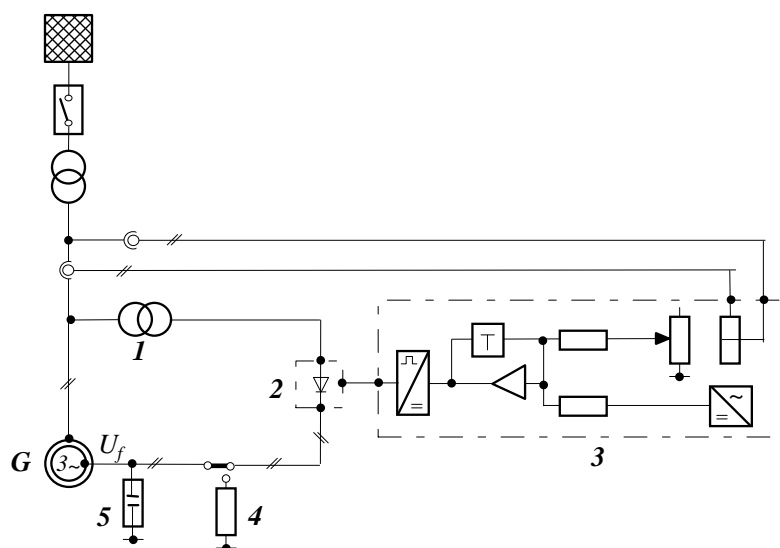


Sl. 4.2 - Shema (a) uređaja sa izmjeničnim uzбудnikom i mirujućim diodama, (b) trofaznog mosnog spoja s diodama, (c) ispravljeni napon

4.1.2 Tiristorska uzbuda

Tiristorska uzbuda ima prednost u brzini regulacije. Tiristorski mosni sklop (2) upravljani je pomoću konstantnog napona naponskim regulatorom (3), a napajanje se može izvesti preko ispravljačkog transformatora (1) sa stezaljki generatora (sl. 4.3) ili iz pomoćne mreže konstantnog napona ili pak iz izmjeničnog uzбудnika konstantnog napona mehanički vezanog na osovinu generatora. Otpor za razbuđivanje (4) uključuje se preko slopke, a ventilni odvodnik prenapona (5) otklanja mogućnost nepotrebnog naprezanja izolacije kod brzog preklapanja. Regulator napona ima napajanje i mjerenje pomoću mjernih transformatora, te postavljanje referentnog napona pomoću upravljačkog napona tiristora.

Pokazalo se u suvremenoj zaštiti mreža, gdje se kod kratkog spoja ili zemljospoja oštećeni dio u najkraćem vremenu isključuje, da je najjednostavniji priključenje tiristora na stezaljke generatora vrlo efikasno. Napon uzbude je raspoloživ odmah po isklapanju kratkog spoja i magnetsko polje generatora može se lakše održati. Ipak, zbog veće pouzdanosti i proizvodnog iskustva te prilagodbe ostalim elementima, često uzbuda s 'rotirajućim diodama' ima prednost kod proizvođača.



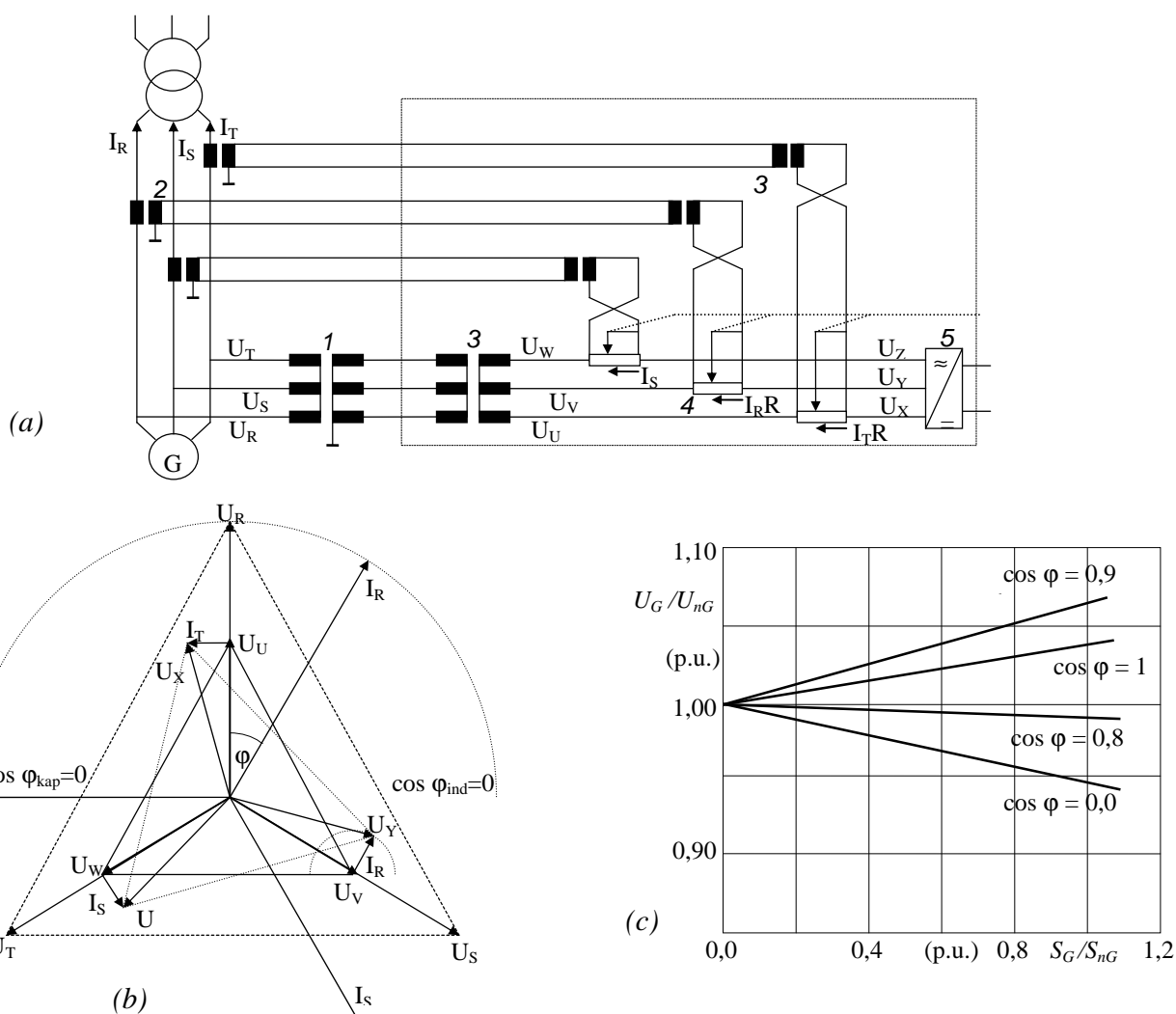
Sl. 4.3 - Shema uzbuđe sa tiristorima napajanim sa stezaljki generatora

4.1.3 Statika naponske regulacije

Elektronički regulatori napona su u osnovi jednako koncipirani za razne uzbuđne uređaje. Kako proizlazi iz sl. 4.2a i sl. 4.3, u regulatoru se određuje razlika ε između postavljene (referentne) i vrijednosti napona izmjerene na stezaljkama generatora. Postavljena vrijednost se dobije iz pomoćnog izvora konstantnog napona koji je većinom u vezi sa zener diodom, a može se mijenjati pomoću potencijometra u određenim granicama (primjerice promjena koja odgovara području između $\pm 10\%$ ili $\pm 5\%$ nazivnog napona generatora). Razlika ε u obliku istosmjernog napona dovodi se na ulaz istosmjernog pojačala u kome pomoću prikladnog sklopa dobija potrebnu prijenosnu obradu. Izlaz pojačala se vodi na upravljačku elektrodu tiristora u mosnom spoju.

Regulacija napona generatora može se bolje prilagoditi odnosima u mreži dodatnim uključivanjem struja koje mijenjaju karakteristike regulacije. Obično se dodaju djelatno ili induktivno ovisni utjecaji na mjerene vrijednosti napona. Za razliku od shema u slikama 4.2a i 4.3, sl. 4.4a pokazuje shemu prijenosa pomoću naponskog (1) i strujnih (2) mjernih transformatora. Uključivanjem otpora (4), na mjerenu vrijednost napona jedne faze superponira se napon $I \cdot R$ proporcionalan struji prethodne faze. Međutransformatori (3) koriste se za odvajanje potencijala i prilagođenje ulazu elektroničkog sklopa regulatora preko ispravljača (5). Na sl. 4.4b vidi se utjecaj ovog spoja na prienos mjerenih napona. Trokut napona ($U-V-W$) prelazi u trokut ($X-Y-Z$) i njemu proporcionalna mjerena vrijednost vodi se regulatoru. Kod konstantne referentne vrijednosti napona, napon generatora se regulira ovisno o jalovoj snazi i faktoru snage prema karakteristikama na sl. 4.4c.

Razlika između napona neopterećenog generatora i napona nazivno (sa S_{nG}) opterećenog generatora kod $\cos \varphi = 0$ (naduzbuđen proizvodi jalovu snagu) naziva se statika generatora i daje u procentima nazivnog napona (primjerice oko 6% na sl. 4.4c). Statika generatora se može podešavati mijenjanjem vrijednosti otpora R (označen sa 4 na sl. 4.4a). Obično se ostavlja mogućnost promjene statike između 0 i 15%.



Sl. 4.4 - Regulacija napona sinkronog generatora s utjecajem prethodne faze: (a) shema spoja, (b) vektorski dijagram, (c) statika generatora

4.2 Regulacija napona

4.2.1 Matematičko modeliranje

Za razmatranje reguliranja napona generatora moramo prvo razmotriti prijelazne pojave i mogućnosti njihovog opisivanja odgovarajućim matematičkim metodama. Općenito možemo reći da se uzajamne ovisnosti fizikalnih veličina u nekom tehničkom sustavu (u ovom primjeru je to blok turbina - generator) mogu opisati jednačbama koje uvažavaju njihove promjene s vremenom. U tu svrhu koristimo diferencijalne ili integralne jednačbe, a dobijamo ih iz općenito poznatih zakonitosti uz iskustvenu provjeru svih koeficijenata u tim jednačbama. Ukoliko imamo n jednačbi sa n nepoznatih veličina stanja (napon, tlak, temperatura, količina i sl.) i to tako da se niti jedna od njih ne može dobiti kombinacijom preostalih (t.j. one su linearno neovisne), dobili smo matematički model našeg bloka. Jasno je da model može biti jednak i za neki sasvim drugačiji fizikalni, fizikalno - kemijski ili čak biološki sustav, te da uvijek mora biti poznata stvarna veza između modela i realnosti.

Sustav diferencijalnih ili integralnih jednadžbi rješava se poznatim metodama, od kojih su neke indirektno (primjerice transformacija sustava diferencijalnih jednadžbi u sustav algebarskih jednadžbi) a neke direktne i izvedive praktički samo pomoću računala. Među prvim se široko koriste integralne transformacije, od kojih su najpoznatije Laplaceova (L -) i Carsonova (L_C -) transformacija. Transformacija se obavlja preslikavanjem svih vremenski ovisnih funkcija (originala) u funkcije kompleksne varijable (slike). U kompleksnoj ravnini se može analizirati rješenje dobijenog sustava algebarskih jednadžbi i vratiti ga u originalno područje. Analiza u kompleksnom području prikazuje se u raznim dijagramima (primjerice Bodeov, Nyquistov i dr.), a izvode se kriteriji za ponašanje analiziranog tehničkog sustava koji čine nepotrebnim vraćanje rezultata u originalno područje (inverznu transformaciju). Iz poznatog ponašanja tehničkog sustava utvrđuju se karakteristike potrebnog regulatora i određuju uvjeti optimalne regulacije.

4.2.2 Računanje reguliranih promjena

U analizi slobodnih i regulacijskih prijelaznih pojava ograničavamo se na linearne sustave sa koncentriranim parametrima (R, L, C), što vodi na sustav linearnih diferencijalnih jednadžbi sa konstantnim koeficijentima. Za rješavanje ovih diferencijalnih jednadžbi koristimo L -transformaciju, pomoću koje originalnu vremensku funkciju $f(t)$ prenosimo u kompleksno područje kao sliku $F(s)$. Ovdje je neovisna varijabla $s = \sigma + j \cdot \omega$, a u slučaju signala čisto sinusnog oblika iščezava realna komponenta, t.j. $s = j \cdot \omega$. Laplaceova transformacija zadovoljava relaciju:

$$f(s) = \int_0^{\infty} F(t) \cdot e^{-st} \cdot dt = L\{F(t)\} \quad (4.3)$$

U elektrotehnici se često koristi Carsonova transformacija, koja je zapravo modificirana Laplaceova transformacija tako da je integral u gornjoj jednadžbi pomnožen kompleksnom varijablom s . Množenje sa jediničnom odskočnom funkcijom kod transformacije ostavlja nepromijenjenu vrijednost tako pomnožene funkcije. Carsonova transformacija zadovoljava relaciju:

$$g(s) = s \cdot \int_0^{\infty} F(t) \cdot e^{-st} \cdot dt = L_c\{F(t)\} \quad (4.4)$$

U tabeli 4.1 dane su kompleksne slike Laplaceove i Carsonove transformacije za originalne funkcije kakve najčešće srećemo u praksi.

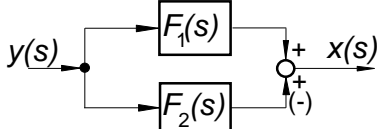
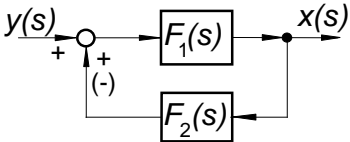
Ako funkcija $f(t)$ opisuje svojstva jednog člana regulacionog kruga, onda je njena slika $F(s)$ omjer (kompleksne) funkcije na izlazu u_i (odziva) i (kompleksne) funkcije na ulazu u_u (signala) tog člana (podrazumijeva se da je odziv posljedica signala) i naziva se njegovom prijenosnom funkcijom. Kada je jedan prijenosni sustav složen iz više članova, onda se prijenosna funkcija takvog sustava može odrediti iz prijenosnih funkcija pojedinih članova na temelju veza među njima (t.zv. algebra blokova). Osnovne relacije su dane u tabeli 4.2. Ako je ponašanje jednog člana određeno diferencijalnom jednadžbom prvog reda, dobijemo kod sinusnog signala ($s = j \cdot \omega$) prijenosnu funkciju tog člana:

$$\frac{u_i(j\omega)}{u_u(j\omega)} = F(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T} \Leftrightarrow u_i(t) = U_u(1 - e^{-t/T}) \quad (4.5)$$

Br.	Original: $F(t)$	Laplace: $f(s)$	Carson: $g(s)$
1	1 (step-funkcija)	$1/s$	1
2	t	$1/s^2$	$1/s$
3	$t^{n-1}/(n-1)!$	$1/s^n$	$1/s^{n-1}$
4	$e^{\pm at}$	$1/(s \mp a)$	$s/(s \mp a)$
5	$\frac{1}{T} e^{-t/T}$	$\frac{1}{1+sT}$	$\frac{s}{1+sT}$
6	$1 - e^{-t/T}$	$\frac{1}{s(1+sT)}$	$\frac{1}{1+sT}$
7	$t^n e^{-t/T}$	$\frac{n! T^{n+1}}{(1+sT)^{n+1}}$	$\frac{n! s T^{n+1}}{(1+sT)^{n+1}}$
8	$1 - \frac{T+t}{T} e^{-t/T}$	$\frac{1}{s(1+sT)^2}$	$\frac{1}{(1+sT)^2}$
9	$\frac{1}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2})$	$\frac{1}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$	$\frac{s}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$
10	$\frac{T_1 e^{-t/T_2} - T_2 e^{-t/T_1}}{T_1 T_2 (T_1 - T_2)}$	$\frac{s}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$	$\frac{s^2}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$
11	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\frac{s^2}{s^2 + \omega^2}$
12	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-D^2}} \cdot e^{-D\omega t} \cdot \sin(\omega \sqrt{1-D^2} \cdot t + \tau)$ $\tau = \arctg \frac{\sqrt{1-D^2}}{D} ; \quad D^2 < 1$	$\frac{\omega^2}{s(s^2 + 2D\omega s + \omega^2)}$	$\frac{\omega^2}{s^2 + 2D\omega s + \omega^2}$
13	$F'(t)$ $F''(t)$ (diferenciranje)	$s f(s) - F(0)$ $s^2 f(s) - sF(0) - F'(0)$	$s g(s) - F(0)$ $s^2 g(s) - s^2 F(0) - sF'(0)$
14	$\int_0^t F(t) dt$ (integriranje)	$\frac{1}{s} f(s)$	$\frac{1}{s} g(s)$

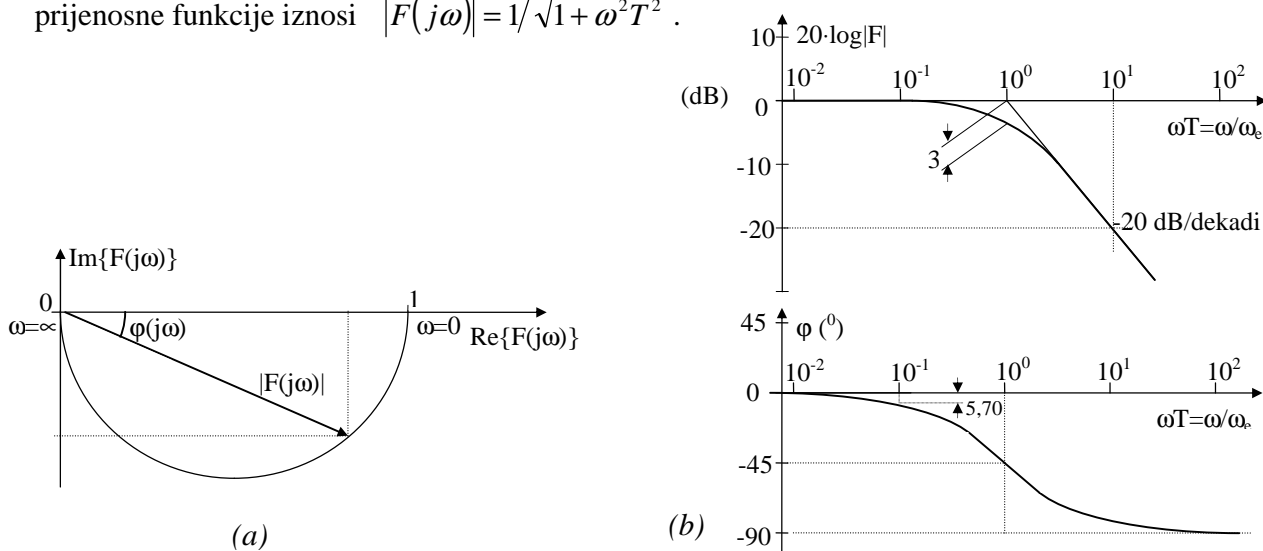
Tab. 4.1 - Izbor Laplaceovih i Carsonovih transformacija

Naziv	Shema vezanja	Prijenosna funkcija
Prijenosni član	$y(s) \rightarrow \boxed{F(s)} \rightarrow x(s)$	$F(s) = \frac{x(s)}{y(s)}$
Serijska veza	$y_1(s) \rightarrow \boxed{F_1(s)} \rightarrow x_1(s) \rightarrow y_2(s) \rightarrow \boxed{F_2(s)} \rightarrow x_2(s)$	$F(s) = F_1(s) F_2(s) = \frac{x_2(s)}{y_1(s)}$

Paralelna veza		$F(s) = F_1(s) (\pm) F_2(s)$
Povratna veza: pozitivna (negativna)		$F(s) = \frac{F_1(s)}{1 (\mp) F_1(s) F_2(s)}$

Tab. 4.2 - Prijenosne funkcije vezanih blokova

Prijenosna funkcija $F(j\omega)$ je frekvencijski ovisna kako je prikazano na sl. 4.5a (u Nyquistovom dijagramu) za promjenu ω između 0 i ∞ . Kako se ω pojavljuje s prvom potencijom, radi se o prijenosnoj funkciji 1. reda. Karakteristika je polukružnica promjera jednakog 1, a amplituda prijenosne funkcije iznosi $|F(j\omega)| = 1/\sqrt{1+\omega^2 T^2}$.



Sl. 4.5 -(a) Frekvencijska ovisnost $F(j\omega) = 1/(1+j\omega T)$ u kompleksnoj ravnini, (b) prijenosna funkcija 1. reda u Bodeovom dijagramu

Amplituda $|F|$ odgovara radius vektoru, a faza $\varphi(\omega) = \arctan \omega T$ kutu radius vektora prema realnoj osi (maksimalna faza je $\varphi = 90^\circ$ za $\omega = \infty$). Prikaz sa logaritamskim mjerilima (Bodeov dijagram na sl. 4.5b) ima prednosti kod računanja s prijenosnim funkcijama pojedinih članova složenog regulacionog kruga. Na ordinati se unose vrijednosti $20 \cdot \log |F|$ u decibelima (dB). Ako se ωT unosi na apscisu u logaritamskom mjerilu, dobijemo da je $20 \cdot \log [1/(1+j\omega T)]$ približno pravac paralelan apscisi (0 dB) od $\omega T \rightarrow \infty$ do točke $\omega T = 1$, a dalje približno pravac sa negativnim nagibom 20 dB/dekadi (za $\omega T \gg 1$ i $\omega_2/\omega_1 = 10$ dobijemo omjer $|F_1|/|F_2| = 20 \cdot \log 10 = 20$ dB). Odstupanje od pravaca je najveće za frekvenciju $\omega_e = 1/T$ i iznosi maksimalno $20 \cdot \log |1/(1+j)| = 20 \cdot \log (1/\sqrt{2}) = -3$ dB. Odstupanje vrijednosti faznog pomaka φ od idealizirane promjene (prikazana crtkano u sl. 4.5b) je znatno veće u istoj zoni.

Na sl. 4.6a prikazana je shema RLC - četvoropola kod kojega se veza između odziva i signala može opisati diferencijalnom jednačbom drugog reda:

$$LC \frac{d^2 u_i(t)}{dt^2} + RC \frac{du_i(t)}{dt} + u_i(t) = u_u(t) \quad (4.6)$$

Ako se uvede $\omega_e = 1/T$ kao vlastita kružna frekvencija sustava bez prigušenja ($R=0$), uz stupanj prigušenja D dobijemo:

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{T_L T_C}} = \frac{1}{T} ; \quad D = \frac{\omega_e RC}{2} = \frac{RC}{2T} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_C}{T_L}} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

pri čemu su vremenske konstante $T_L = L/R$ i $T_C = R \cdot C$. Ako se jedn.(4.6) transformira u kompleksno područje uz uvođenje T i D , dobijemo:

$$F(s) = \frac{u_i(s)}{u_u(s)} = \frac{\omega_e^2}{s^2 + 2D\omega_e s + \omega_e^2} = \frac{1}{1 + 2DTs + T^2 s^2} \quad (4.7)$$

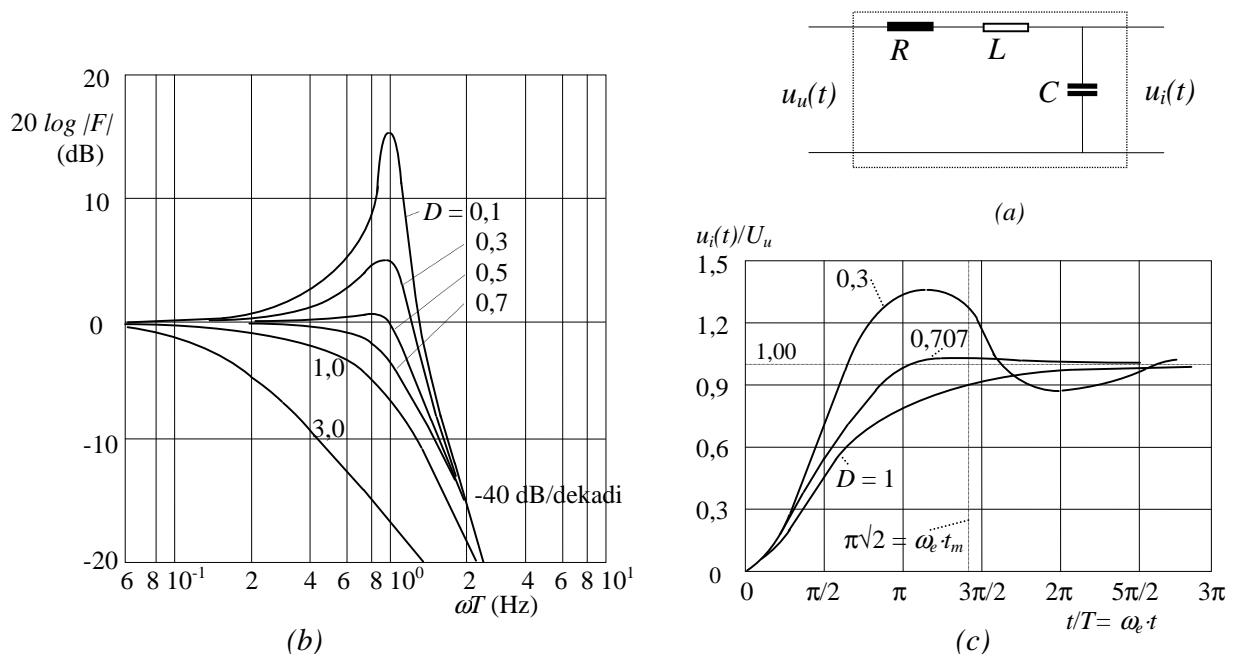
Vremenski odziv $u_i(t)$ jako ovisi o koeficijentu prigušenja D kada imamo signal $u_u(t) = U_u$. Ako je prigušenje jednako nuli, dobijemo neprigušene periodičke oscilacije. Drugi karakterističan slučaj je kada je prigušenje jednako jedan i nastaje aperiodička vremenska promjena (sl. 4.6c). Za veća prigušenja se sistem ponaša kao nadperiodički prigušen. Za odskočni signal dosiže odziv vrlo polagano trajno stanje i takva sporost nas redovno ne zadovoljava. Znači da je najvažniji slučaj kada imamo prigušenje manje od jedan, a odziv dolazi do trajnog stanja nakon kratkog prigušenog titranja.

Ako uvedemo $s = j\omega$, dobijemo iz jedn. (4.7) prijenosnu funkciju:

$$F(j\omega) = \frac{1}{1 + j2D(\omega/\omega_e) - (\omega/\omega_e)^2} = \frac{1}{1 + j2DT\omega - T^2 \omega^2} \quad (4.8a)$$

a njene vrijednosti amplitude odnosno faznog pomaka su određene kako slijedi:

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_e)^2]^2 + [2D\omega/\omega_e]^2}} ; \quad \varphi(j\omega) = \arctg \frac{-2D\omega/\omega_e}{1 - (\omega/\omega_e)^2} \quad (4.8b)$$



Sl.4.6 -(a) RLC član, (b) amplitudna karakteristika 2. reda, (c) odziv na odskočni signal

Na sl. 4.6b prikazana je promjena amplitude prigušnog člana drugog reda prema jedn. (4.8b) u Bodeovom dijagramu sa prigušenjem D kao parametrom. Kada frekvencija ω teži nuli tada vrijednost amplitude teži jedinici, a za $\omega \rightarrow \infty$ imamo da amplituda $|F| \rightarrow 1/(\omega/\omega_e)$. Ovdje imamo nagib -40 dB po dekad, za razliku od uspornog člana prvog reda gdje je nagib bio -20 dB/dekadi (sl.4.5b).

Najveću vrijednost amplitude dobijemo diferenciranjem nazivnika u jedn. (4.8b) i za tu vrijednost imamo rezonantnu frekvenciju $\omega_r = \omega_e \sqrt{1-2D^2}$. Za $D \geq 1/\sqrt{2}$ nemamo više izraženo rezonantno povećanje amplitude, kako se vidi za $D = 0,7$ u Bodeovom dijagramu na sl. 4.6b.

Za $u_i(t=0) = 0$ i $D^2 < 1$ imamo prema tabeli 4.1 (12. redak) da iz kompleksne ravnine prema jedn. (4.7) dobijemo u vremenskom području odziv:

$$u_i(t) = U_u \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-D^2}} \cdot e^{-D\omega_e t} \sin(\omega_d \cdot t + \tau) \right] \quad (4.9)$$

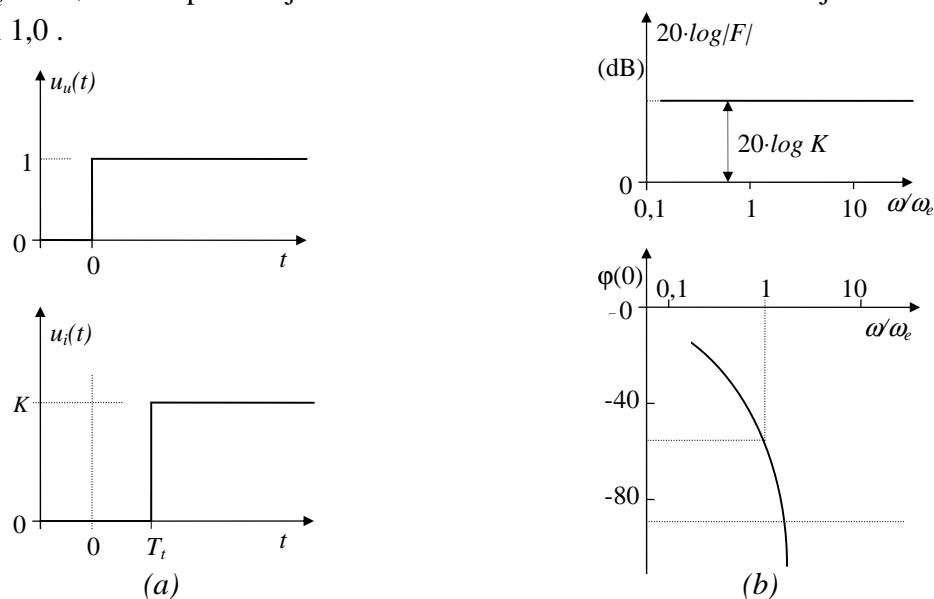
gdje je:

$$\tau = \arctg(\sqrt{1-D^2}/D); \quad \omega_d = \omega_e \sqrt{1-D^2} \quad (4.10)$$

Pri tome je ω_d prigušena vlastita frekvencija za $D^2 < 1$. Maksimalna vrijednost za odziv dobije se izjednačavanjem derivacije jedn. (4.9) s nulom. Kod toga se ima za argument sinusoide $\arctg(\omega_d t + \tau) = \sqrt{1-D^2}/D = \arctg \tau$. Uz $\omega_d t = \pi$ i kako je $\sin \tau = \sqrt{1-D^2}$, za $\hat{U}_i = \max\{u_i(t)\}$ dobije se najveća vrijednost spram signala:

$$\frac{\hat{U}_i}{U_u} = 1 + e^{-\pi D/\sqrt{1-D^2}} = 1 + e^{-\pi/\arctg \tau} \quad (4.11)$$

Za slučaj da nemamo izraženu rezonanciju u amplitudnoj karakteristici prema sl.4.6b, a to je već za $D=1/\sqrt{2}$, dobije se u sl. 4.6c prikazana vremenska promjena sa $\tau = \pi/4$ i $\hat{U}_i/U_u = 1 + e^{-\pi} = 1,043$ kod $\omega_e t = \pi\sqrt{2}$. Za poređenje su također ucrtane karakteristike za vrijednosti koeficijenta prigušenja 0,3 i 1,0.



Sl. 4.7 - (a) Vremenski i (b) Bodeov dijagram za mrtvo vrijeme

Za prijenosnu funkciju člana mrtvog vremena prema sl. 4.7 vrijedi:

$$u_i(t) = K \cdot u_u(t - T_t) \quad (4.12)$$

Da odredimo vremenske karakteristike, u gornju jednadžbu uvodimo sinusoidalne vrijednosti signala i odziva $u_u(t) = U_{u0} \cdot e^{j\omega t}$, $u_i(t) = U_{i0} \cdot e^{j\omega t}$, i $U_{i0} \cdot e^{j\omega t} = K \cdot U_{u0} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-j\omega T_t}$, te slijedi za prijenosnu funkciju mrtvog vremena:

$$F(j\omega) = K \cdot e^{-j\omega T_t} = K \cdot e^{-sT_t} \quad (4.13)$$

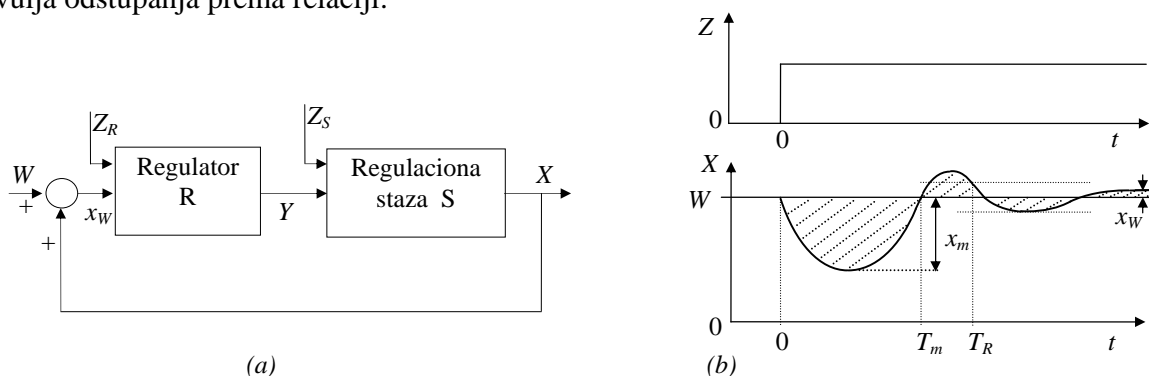
Iz sl. 4.7b se vidi da za amplitudnu karakteristiku vrijedi $|F(j\omega)| = K$, a za faznu karakteristiku $\varphi = -\omega T_t$. Odatle je kod $\omega = 1/T_t$ fazni kut $\varphi = -1 = -360^\circ/2\pi = -57,3^\circ$.

4.3 Regulacioni krug i regulator napona

4.3.1 Regulacioni krug

Osnovna shema jednostavnog regulacionog kruga dana je u sl. 4.8a. Regulaciona staza S (primjerice generator, ali i turbina, kotao, dovod goriva ili dr.) i regulator (uključujući uređaj za uzbudu) čine zatvoreni krug. Iz mjerene vrijednosti X regulirane veličine (primjerice napon stezaljki generatora) i njene postavljene (referentne) vrijednosti W određuje se odstupanje (greška) $x_W = X - W$. Odstupanje inicira djelovanje regulatora koji na ulaz regulacione staze dovodi vrijednost podešavanja Y (primjerice napon uzbude), koja je tako prilagođena da efikasno uklanja odstupanje koju ju je uzrokovalo. Ova odstupanja mogu biti posljedica poremećaja na regulacionoj stazi (objektu kakav je generator) ili na samom regulatoru.

Za određivanje ponašanja jednog regulatora koristimo prijelazno ponašanje u regulacionom krugu nakon nastanka poremećajne veličine Z . Na sl. 4.8b je prikazan trajni poremećaj i pripadajuća promjena mjerene veličine X uz pretpostavku da je prije poremećaja vrijedilo $X = W$. Kako je ucrtano, razlikuju se maksimalno odstupanje x_m koje se kompenzira potpuno u vremenu T_m , vrijeme T_R koje je potrebno da se odstupanje svede u granice tolerancije (primjerice $\pm 3\%$) oko postavljene vrijednosti W i preostalo odstupanje x_W nakon završetka prijelazne pojave. Iako sve ove veličine opisuju regulaciju, ipak općenito ne mogu biti mjerilo za njenu kvalitetu. Tu se koristi nekoliko kriterija ovisno o karakteru regulacije. Moguće je procjenu vršiti na temelju površine koju opisuje krivulja odstupanja prema relaciji:



Sl. 4.8 -(a) Princip regulacionog kruga, (b) prijelazna pojava i djelovanje regulacionog kruga

$$F_{\parallel} = \int_0^{\infty} |x_w| \cdot dt$$

(što je pokazano šrafirano u sl. 4.8b) pri čemu gornju granicu integrala treba ograničiti na (konačno) vrijeme kada se odstupanje prestaje mijenjati. U cilju optimiranja ne koristi se linearna nego kvadratna vrijednost ove površine prema relaciji:

$$F_{\diamond} = \int_0^{\infty} x_w^2 \cdot dt \rightarrow \min.$$

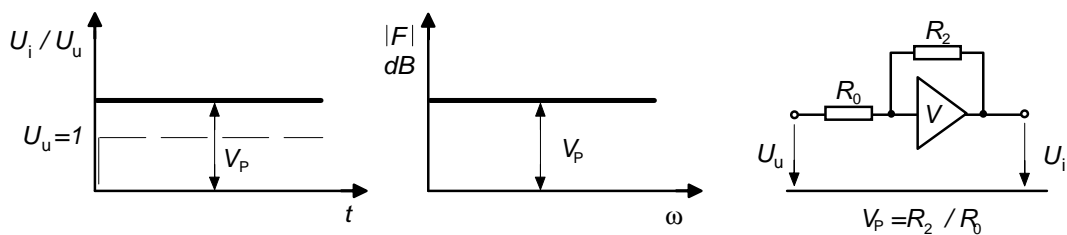
što ukazuje na uvećani utjecaj najvećih odstupanja (posebno prvog maksimuma). Kao treću mogućnost ocjene regulacije koristimo integral vremena pomnožen sa apsolutnom vrijednošću greške (odstupanja) prema relaciji:

$$F_{\parallel t} = \int_0^{\infty} |x_w| \cdot t \cdot dt \rightarrow \min.$$

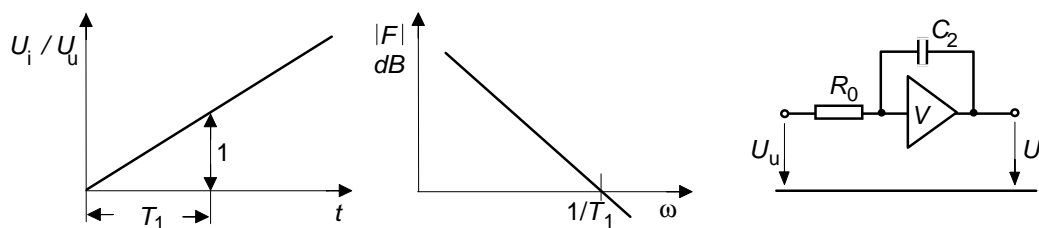
4.3.2 Regulatori

Razlikujemo proporcionalne (P), integralne (I), proporcionalno - integralne (PI), proporcionalno - diferencijalne (PD) i proporcionalno - integralno - diferencijalne (PID) regulatore. U slijedećem je kratak pregled svojstava regulatora u vremenskoj domeni kada na ulazu dobiju promjenu u obliku odskočne funkcije. Dane su njihove karakteristike u Bodeovom dijagramu i osnovna shema spoja regulatora u elektroničkoj izvedbi.

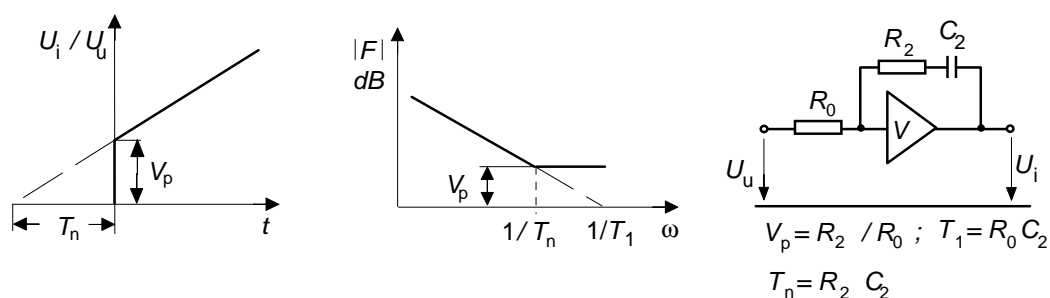
Osnova elektroničkog regulatora je operaciono (istosmjerno) pojačalo koje je izvedeno kao sklop integriranih krugova i ima vrlo visoko statičko pojačanje. U daljnjem ćemo pretpostavljati radi jednostavnosti razmatranja da imamo idealno pojačalo. Karakteristika idealnog pojačala je da su mu faktor pojačanja V , ulazni otpor R_0 i granična frekvencija f_{gr} praktički beskonačno veliki. Traženi oblik vremenske prijelazne pojave postiže se samo odgovarajućim spojem otpora i / ili kapaciteta između ulaza i izlaza pojačala i podešavanjem njihovih veličina.



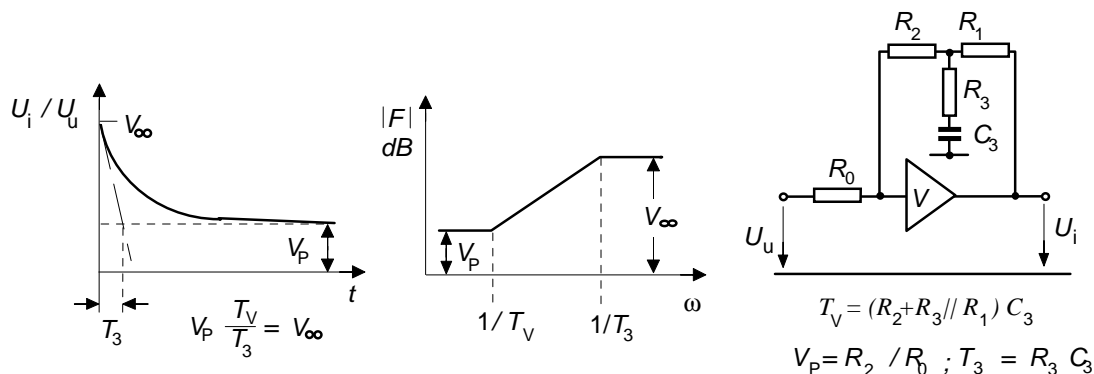
Sl. 4.9 - P - regulator



Sl. 4.10 - I - regulator



Sl. 4.11 - PI - regulator



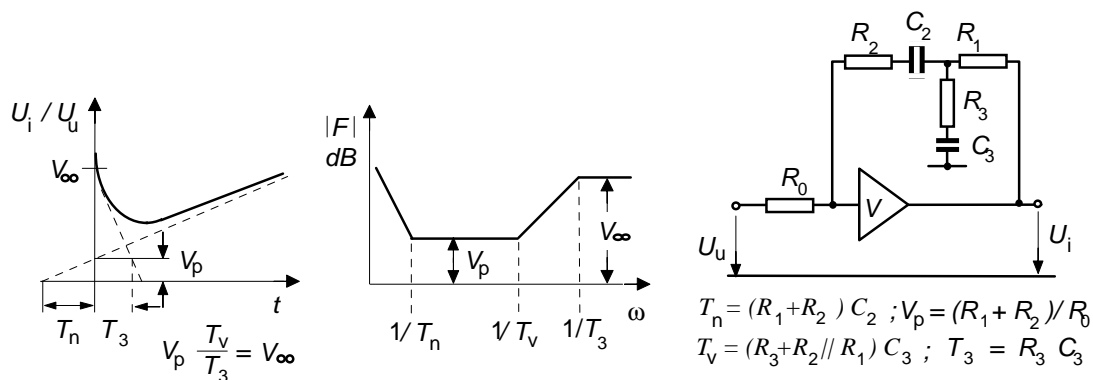
Sl. 4.12 - PD - regulator

Na slikama 4.9 do 4.13 prikazani su za različite regulatore vremenska promjena (lijevo), Bodeov dijagram (u sredini) i osnovna shema spoja (desno). Kako PID regulator sadrži korištene osnovne članove, mogu se osnovni odnosi pokazati na njemu. Prema oznakama na sl. 4.13 vrijedi u vremenskoj domeni:

$$u_i(t) = V_p \left(U_u + \frac{1}{T_n} \int_0^t U_u \cdot dt + T_v \frac{dU_u}{dt} \right) \quad (4.14)$$

pa je prijenosnu funkciju moguće dati u obliku:

$$F(s) = V_p \left(1 + \frac{1}{sT_n} + sT_v \right) \approx \frac{V_p}{sT_n} (1 + sT_v)(1 + sT_n) \quad (4.15)$$



Sl. 4.13 - PID - regulator

uz uvjet iz realnog fizikalnog stanja da je integraciona vremenska konstanta puno veća od derivacione vremenske konstante ($T_n \gg T_v$). U praksi ne možemo imati beskonačno veliko pojačanje kako bi slijedilo za $\omega=0$ i $\omega \rightarrow \infty$, pa imamo koljeno kod $\omega=1/T_3$ za realni PID regulator. Sada dobijemo da u realnom području vrijedi:

$$\frac{u_i(t)}{U_u} = V_p \left\{ 1 + \frac{T_v - T_3}{T_n} + \frac{t}{T_n} - e^{-t/T_3} \left(1 + \frac{T_v - T_3}{T_n} - \frac{T_v}{T_3} \right) \right\} \quad (4.17)$$

a da u kompleksnom području vrijedi:

$$F(s) = V_p \frac{(1 + sT_n)(1 + sT_v)}{sT_n(1 + sT_3)} \quad (4.18)$$

Kod karakteristika regulacije prema slikama 4.9 do 4.12 treba izostaviti članove koji nisu tamo korišteni. Tako za PI regulator vrijedi :

$$V_p + \frac{t}{T_1} = V_p \left(1 + \frac{t}{T_n} \right) \Leftrightarrow V_p + \frac{1}{sT_1} = V_p \left(1 + \frac{1}{sT_n} \right) \quad (4.19)$$

gdje je integraciona vremenska konstanta $T_n = V_p \cdot T_1$. Za PD regulator sa ograničenjem pojačanja i derivacionom vremenskom konstantom T_v vrijedi:

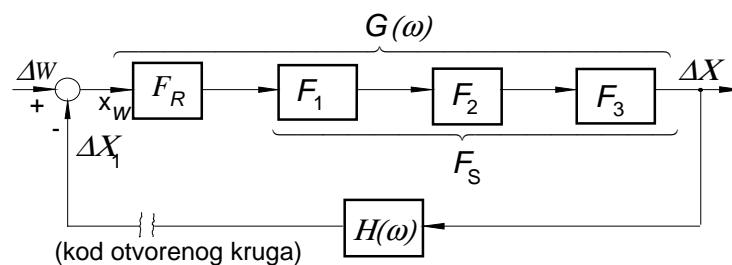
$$V_p \left(1 + \frac{T_v - T_3}{T_3} \cdot e^{-t/T_3} \right) \Leftrightarrow V_p \frac{1 + sT_v}{1 + sT_3} \quad (4.20)$$

Kod PID regulatora, kao i kod PI regulatora, ne ostaje teoretski nikakvo odstupanje (greška) regulacije, dok je brzina djelovanja pomoću diferencijalnog člana znatno povećana. Tako PID regulator ujedinjuje prednosti PI i PD regulatora.

4.3.3 Stabilnost regulacije

Kako se ugradnjom određenog regulatora želi odstupanje regulirane veličine X svesti na podešenu vrijednost W (znači da odstupanje x_w teži nuli), mora regulacioni krug za održavanje napona generatora imati negativnu povratnu spregu (Tab. 4.1). Prema sl. 4.14 iznosi odstupanje od referentne vrijednosti (greška) $x_w = \Delta W - \Delta X_1$, a regulaciona staza sadrži tri člana u seriji i njena prijenosna funkcija je $F_S(\omega) = F_1(\omega) \cdot F_2(\omega) \cdot F_3(\omega)$. Prijenosna funkcija direktne grane je $G(\omega) = F_R(\omega) \cdot F_S(\omega)$ i vrijedi:

$$\Delta X = x_w \cdot G(\omega) \quad (4.21)$$



Sl. 4.14 - Regulacioni krug sa negativnom povratnom spregom

a prijenosna funkcija povratne grane je $H(\omega)$ i vrijedi:

$$\Delta X_1 = \Delta X \cdot H(\omega) \quad (4.22)$$

Za regulaciono odstupanje dobijemo prema sl. 4.14:

$$x_w = \Delta W - \Delta X_1 = \Delta W - \Delta X \cdot H(\omega) \quad (4.23)$$

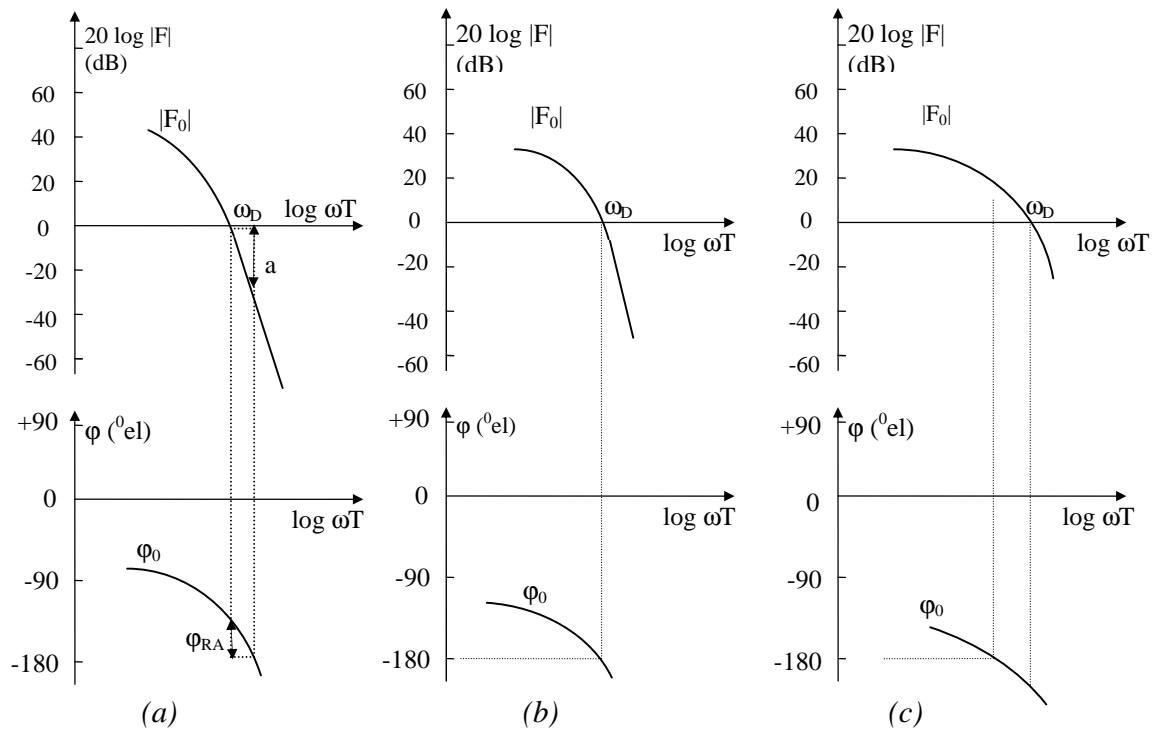
i uvrštavanjem u jedn. (4.21) dobijemo za prijenosnu funkciju regulacionog kruga:

$$F_w = \frac{\Delta X}{\Delta W} = \frac{G(\omega)}{1 + G(\omega) \cdot H(\omega)} = \frac{1}{H(\omega)} \cdot \frac{G(\omega) \cdot H(\omega)}{1 + G(\omega) \cdot H(\omega)} \quad (4.24)$$

$G(\omega) \cdot H(\omega)$ je prijenosna funkcija otvorenog kruga F_0 ako se on otvori prema sl. 4.14. Za $H(\omega) = 1$ dobijemo iz prethodne relacije:

$$F_w = \frac{G(\omega)}{1 + G(\omega)} = \frac{F_0}{1 + F_0} \quad (4.25)$$

Pretpostavimo da regulaciona staza sadrži više članova prvog reda, od kojih svaki uzrokuje fazni pomak od -90 stupnjeva kod velikih vrijednosti frekvencije ω (sl. 4.5b). Kod dva takva člana dosegne se fazni pomak $\varphi_{max} = 180^\circ$ i negativna povratna veza dolazi u svoju protufazu. Ako je $|F_0| > 1$ kod $\varphi = -180^\circ$ dolazi do njihajućeg odstupanja i izostaje funkcionalnost regulacije (regulacioni krug je nestabilan). Slijedi da iz prijenosne funkcije otvorenog regulacionog kruga možemo zaključivati o stabilnosti zatvorenog takvog kruga.



Sl. 4.15 - Određivanje stabilnosti u Bodeovom dijagramu

Za određivanje stabilnosti najjednostavnije je primijeniti Nyquistov kriterij. Za prijenosnu funkciju $F_0 = F_R \cdot F_S$ na sl. 4.15 ucrtane su u Bodeovom dijagramu vrijednost amplitude $20 \cdot \log |F_0| = 20 \cdot \log |F_R| + 20 \cdot \log |F_S|$ i faze $\varphi_0 = \varphi_R + \varphi_S$. Regulacioni proces je u otvorenom i zatvorenom krugu

stabilan samo kada kod dostignute amplitudne vrijednosti $|F_0| = 1$ (0 dB u Bodeovom dijagramu), pri čemu je prolazna frekvencija ω_D . Ako je kod faznog pomaka $\varphi_0 = -180^\circ$ amplituda $|F_0|$ manja od jedan odnosno manja od 0 dB, tada je regulacioni krug stabilan (a). Ako je pak kod istog faznog pomaka amplituda $|F_0|$ veća od jedan (odnosno od 0 dB), imamo nestabilnost regulacionog kruga (c). U sl. 4.15b je prikazan granični slučaj stabilnosti.

Da se osigura kvalitetno djelovanje, nastoji se postići kod regulacionog kruga da kod amplitude $|F_0| = 1$ (0 dB) fazni pomak ne prelazi granicu $\varphi_0 = -120^\circ$, što znači da imamo faznu rezervu stabilnosti $\varphi_{RA} > 60^\circ$. Također, kod faznog pomaka $\varphi_0 = -180^\circ$ treba amplituda iznositi ispod -10 dB i to se naziva amplitudnom rezervom stabilnosti (a u sl. 4.15a).

Za stabilnu regulaciju je povoljno da amplitudna karakteristika otvorenog regulacionog kruga u velikom području radnih frekvencija pada s -20 dB po dekadi, a iza prolazne frekvencije $\omega_D = 1/T_D$ lomi se kod frekvencije $\omega = 1/T$ i pada dalje s -40 dB po dekadi (primjerice pogledati sl. 4.18b i 4.19b). Takva karakteristika se može opisati pomoću relacija:

$$F_0 = \frac{1}{sT_D(1+sT)} ; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega T} \quad (4.26)$$

Uvođenjem gornjeg izraza u relaciju za prijenosnu funkciju kod negativne povratne veze imamo:

$$F_w = \frac{1}{1+1/F_0} = \frac{1}{1+sT_D+s^2T_DT} = \frac{1}{1+j\omega T_D-\omega^2T_DT} \quad (4.27)$$

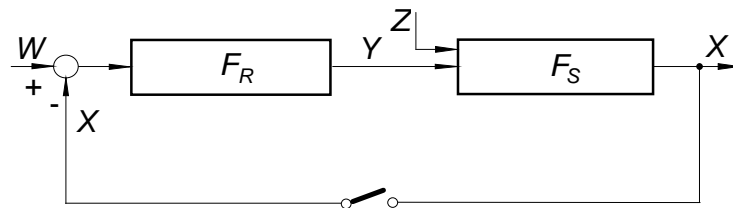
Poređenje sa jedn. (4.8a) i tamo uvedenim pomoćnim veličinama daje relacije:

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{T_DT}} ; \quad D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_D}{T}} ; \quad t_m = \frac{\pi}{\omega_e \sqrt{1-D^2}} = \frac{\pi \sqrt{T_DT}}{\sqrt{1-\frac{T_D}{4T}}} \quad (4.28)$$

Ovdje je vrijeme t_m mjera za vrijeme reguliranja (dovođenje mjerene veličine u granice regulacije) nakon signala u obliku step-funkcije. Da se postigne što kraće vrijeme reguliranja, povoljno je prema tome primijeniti regulator koji daje veće vrijednosti prolazne frekvencije $\omega_D = 1/T_D$. Na osnovu ovoga dobije se jednostavan postupak za određivanje optimalne prolazne frekvencije. Ako se želi dozvoliti samo malo osciliranje oko nove vrijednosti odziva, odabira se prigušenje iza kojeg slijedi:

$$D = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{T}{T_D} = \frac{\omega_D}{\omega} = \frac{1}{2} , \quad t_m = \pi \cdot T_D = \frac{\pi}{\omega_D} \quad (4.29)$$

Tada fazni pomak φ_0 za otvoreni regulacioni krug iznosi približno -120° kod prolazne frekvencije $\omega = \omega_D$.



4.16 - Stacionarno stanje u regulacionom krugu ($t \rightarrow \infty$)

Odnosi u stacionarnom stanju regulacionog kruga dobiju se tako da se ispuste vremenske ovisnosti uzimajući da vrijeme teži u beskonačno. Prema sl. 4.16 možemo pisati:

$$\Delta X = V_S \cdot (\Delta Y + \Delta Z) \quad (4.30)$$

$$\Delta Y = -V_R \cdot (\Delta X - \Delta W) \quad (4.31)$$

kod čega pojačanje regulatora V_R odgovara V_P (za P ili PD regulator) ili pak V_0 (za PI ili PID regulator). Ako se regulacioni krug zatvori a iz prethodnih jednadžbi eliminira ΔY , dobijemo promjenu na izlazu:

$$\Delta X = \frac{V_R \cdot V_S}{1 + V_R \cdot V_S} \cdot \Delta W + \frac{V_S}{1 + V_R \cdot V_S} \cdot \Delta Z \quad (4.32)$$

Pretpostavimo da je poremećaj u procesu zanemariv ($\Delta Z = 0$) i da se mijenja samo referentna veličina W . Ovo su uvjeti čistog vođenja u regulacionom krugu i imamo na izlazu:

$$\Delta X = \frac{V_R \cdot V_S}{1 + V_R \cdot V_S} \cdot \Delta W \quad (4.33)$$

Nasuprot tome, ako se referentna veličina W drži nepromijenjena i djeluje samo poremećaj Z , imamo u regulacionom krugu čisto održavanje stanja i vrijedi:

$$\Delta X = \frac{V_S}{1 + V_R \cdot V_S} \cdot \Delta Z = V_S \cdot R \cdot \Delta Z \quad (4.34)$$

U ovakvom slučaju bi djelovanje poremećaja bez prisustva regulatora proizvelo na izlazu:

$$\Delta X = V_S \cdot \Delta Z \quad (4.35)$$

Regulacioni faktor $R = 1/(1+V_R V_S)$ određuje djelovanje regulatora na smanjenje odstupanja regulirane veličine X . Pri tome produkt predstavlja pojačanje otvorenog regulacionog kruga. Da se održi zadovoljavajuće malo odstupanje X , treba pojačanje u krugu biti što veće a time regulacioni faktor R što manji, pri čemu regulacioni krug ne smije postati nestabilan (vidi sl. 4.15).

4.4 Reguliranje napona turbogenerators

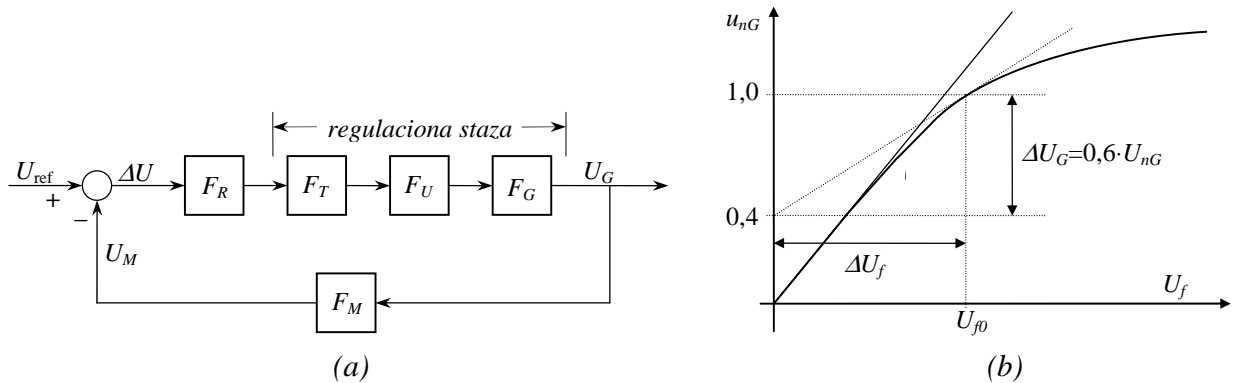
4.4.1 Regulacioni krug

Kao primjer prilagođavanja regulacije razmatramo turbogenerator s uzbudom pomoću dioda i slijedećim nazivnim podacima: snaga $S_n = 600$ MVA, napon $U_n = 20$ kV, faktor snage $\cos \varphi_n = 0,8$, brzina vrtnje $n_n = 3000$ o/min, frekvencija $f_n = 50$ Hz, prijelazna vremenska konstanta u praznom hodu za uzdužnu os $T'_{d0} = 5,6$ " , napon uzbude $U_{fn} = 600$ V (u praznom hodu $U_{f0} = 200$ V, a maksimalna uzbuda $U_{fmax} = 1000$ V). Uzbudnik ima ulazne napone: $U_{f0U} = 20$ V kod U_{f0} , $U_{fnU} = 60$ kod U_{fn} , $U_{fmaxU} = 100$ V kod U_{fmax} , te vremensku konstantu $T_U = 0,835$ " uzbude kod opterećenja. Tiristorski trofazni most (4 na sl. 4.2a) upravljan je elektroničkim sklopom s podacima: ulazni napon $U_u = \pm 10$ V, izlazni napon $U_i = \pm 100$ V (odgovara maksimalnoj uzbudi), vrijeme podešavanja $t_v = 0,0033$ ". Odabiremo PID regulator sa mogućnostima kontinuiranog podešavanja karakteristike i isključenja diferencijalnog člana. Treba napomenuti da se prijelazna vremenska konstanta sinkronog stroja koji

ne radi na mreži (izolirani pogon pod opterećenjem $Z_t = R_t + jX_t$, gdje možemo imati i zanemarivu reaktanciju tereta) može odrediti iz relacije:

$$T'_{dt} = T'_{d0} \cdot \frac{R_t^2 + (X_q + X_t)(X'_d + X_t)}{R_t^2 + (X_q + X_t)(X_d + X_t)}; \quad T'_{d0} \approx T_f = \frac{x_f}{\omega r_f} \quad (4.36)$$

gdje je prijelazna vremenska konstanta u praznom hodu za uzdužnu os T'_{d0} određena iz približne jednakosti sa vremenskom konstantom uzbuđenog namota T_f . Ako se reaktancija opterećenja može zanemariti, onda gornja jednadžba dobija znatno jednostavniji oblik.



Sl. 4.17 -(a) Regulacija napona za generator s diodnom uzbuđenjem, (b) karakteristika praznog hoda generatora snage 600 MVA

Na sl. 4.17a je blok-shema regulacionog kruga napona. Krug je sastavljen iz više članova koji trebaju uzeti u obzir nelinearne karakteristike (s magnetskim zasićenjima generatora, uzbuđenika i transformatora, te ograničenjima radnog područja regulatora i tiristorskog sklopa). Da bismo primijenili Bodeov dijagram u ovakvom slučaju, pretpostavljamo da su promjene oko radne točke tako male u relativnom smislu da se odnosi mogu uzeti linearizirani i daleko od granica radnog područja pojedinih članova kruga. Pod ovim uvjetima mogu se odrediti prijenosne funkcije pojedinih članova regulacionog kruga: generatora F_G , uzbuđenika F_U , tiristorskog sklopa uzbuđenika F_T , regulatora F_R i mjernog pretvarača F_M .

Prazni hod generatora može se opisati diferencijalnom jednadžbom prvog reda i prijenosna funkcija je u bitnom određena vremenskom konstantom T'_{d0} :

$$F_G = V_G \cdot \frac{1}{1 + sT'_{d0}} = \frac{\Delta U_G}{\Delta U_f} \cdot \frac{1}{1 + sT'_{d0}} \quad (4.36a)$$

Prema sl. 4.17b vrijednost $\Delta U_G / \Delta U_f = 0,6 \cdot U_n / U_{f0} = V_G$ određena je iz karakteristike praznog hoda strminom tangente u točki nazivnog napona generatora. Za podatke iz slike slijedi:

$$F_G = V_G \cdot \frac{1}{1 + sT'_{d0}} = 60 \cdot \frac{1}{1 + s \cdot 5,6''} \quad (4.36b)$$

Prijenosna funkcija uzbuđenika se analogno određuje na temelju vremenske konstante uzbuđenja:

$$F_U = \frac{V_B}{1 + sT_U} = \frac{\Delta U_U / \Delta U_T}{1 + sT_U} = \frac{\Delta U_{f0} / \Delta U_{f0U}}{1 + sT_U} = \frac{10}{1 + s \cdot 0,835''} \quad (4.37)$$

Tiristorski član ima vrlo malu vremensku konstantu koja se obično može zanemariti u odnosu na ostale vremenske konstante u regulacionom krugu. Tako je prijenosna funkcija tiristorskog člana:

$$F_T = \frac{\Delta U_T}{\Delta U_R} = \frac{\Delta U_{T_{\max}}}{\Delta U_{R_{\max}}} = V_T = \frac{100}{10} = 10 \quad (4.38)$$

jer za $U_{T_{\max}} = +100$ V i $U_{R_{\max}} = 10$ V iznosi faktor pojačanja $V_T = 10$. Pretvarač mjerene vrijednosti daje istosmjerni napon proporcionalan naponu na stezaljkama generatora kod trofaznog priključka (srednja vrijednost vezanih napona). Ovaj istosmjerni napon poredi se na komparatoru (sumacionoj točki) sa postavljenom vrijednosti napona i odstupanje dovodi regulatoru. Vremenska konstanta ugrađenog filtera za 'glačanje' napona je reda 0,01" i može se zanemariti u poređenju sa vremenskim konstantama rotacionih strojeva (T'_{d0} i T_U). Slijedi da je prijenosna funkcija naponskog mjernog pretvarača:

$$F_M = \frac{\Delta U_{mjer}}{\Delta U_{ref}} = \frac{10}{20000} = V_M = 0,0005 \quad (4.39)$$

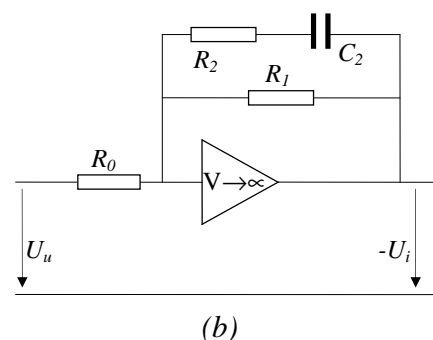
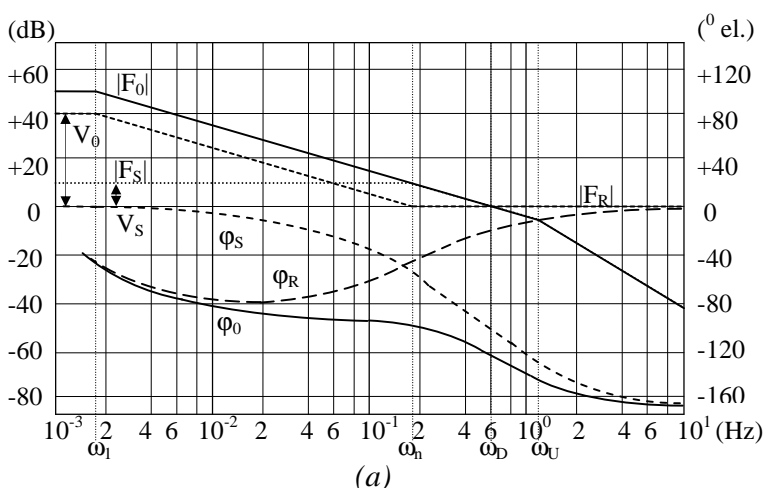
Sa prijenosnim funkcijama pojedinih članova dobijemo prijenosnu funkciju regulacione staze (vidi Tab. 4.1) :

$$F_S = F_G \cdot F_U \cdot F_T \cdot F_M = V_G \cdot V_U \cdot V_T \cdot V_M \cdot \frac{1}{1 + sT'_{d0}} \cdot \frac{1}{1 + sT_U} \quad (4.40a)$$

Kako je ukupno pojačanje regulacione staze $V_S = V_G \cdot V_U \cdot V_T \cdot V_M = 60 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 0,0005 = 3,00$ dobijemo prijenosnu funkciju staze:

$$F_S = \frac{V_S}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT_B)} = \frac{3}{(1 + s \cdot 5,6'')(1 + s \cdot 0,83'')} \quad (4.40b)$$

Na sl. 4.18a dane su amplitudna $|F_S|$ i fazna $\varphi(F_S)$ karakteristika u Bodeovom dijagramu. Amplituda je konstantna (pojačanje $V_S = 3$ odnosno 9,5 dB) do frekvencije $\omega_h = 1/T'_{d0} = 0,18$ Hz, a onda pada sa 20 dB/dekadi do frekvencije $\omega_U = 1/T_U \approx 1,2$ Hz te dalje sa 40 dB/dekadi.



Sl. 4.18 -(a) Bodeov dijagram regulacionog kruga sa PI regulatorom,
(b) shema regulatora s idealnim pojačalom

4.4.2 Prilagodba regulatora regulacijskoj stazi

Karakteristika regulatora mora biti prilagođena stazi tako da se dobiju najpovoljniji uvjeti brzine i točnosti regulacije. Za to su mjerodavni vrijeme $t_m = \pi/\omega_D$ (jedn.(4.29), s ω_D kao graničnom frekvencijom zatvorenog regulacionog kruga nakon skokovite promjene podešene vrijednosti, i faktor regulacije $R = 1/(1 + V_R \cdot V_S)$ prema jedn. (4.34). Obje veličine trebaju biti što je moguće manje, što se može postići s pomoću velike vrijednosti ω_u otvorenog regulacionog kruga $|F_0| = |F_R| \cdot |F_S|$ odnosno pomoću velikog pojačanja $|V_R| \cdot |V_S|$.

Prema odjeljku 4.2.2, za stabilan regulacioni krug ne smije fazni pomak otvorenog kruga kod granične frekvencije ω_D biti veći od -120° , ili (što je istog značenja) da amplitudna karakteristika $|F_0|$ između ± 6 dB ima strminu -20 dB/dekadi. Prema sl. 4.18a zadovoljava karakteristika $|F_S|$ ove uvjete kod dovoljnog prigušenja (fazna rezerva stabilnosti $\varphi_{rez} = 60^\circ$). Korištenje čisto proporcionalnog regulatora ne dolazi u obzir, jer on ne bi mogao poboljšati ni točnost niti brzinu regulacije.

PI-regulator :

PI-regulator ima karakteristiku F_R prema sl. 4.18a. Za razliku od sl. 4.11, ovdje imamo još jedno koljeno kod frekvencije $\omega_1 = 1/T_1$ ispred koga regulator ima konstantno statičko pojačanje V_0 . Ovo se postiže sa dodatnom frekventno neovisnom povratnom vezom pojačala (otpor R_1 na sl. 4.18b). Kod frekvencija $\omega \leq \omega_1$ imamo ovdje P - regulator (uporedi sl. 4.14, čime je jednoznačno određeno statičko pojačanje V_0 . Ovo ograničenje otklanja zahtjev na pretjeranu osjetljivost regulatora u području gdje nije praktički niti potrebna. Integraciona vremenska konstanta T_n (sl. 4.11) bira se jednaka prijelaznoj vremenskoj konstanti generatora u praznom hodu za uzdužnu os T'_{d0} . Ovo zato što želimo izbjeći koljeno u karakteristici $|F_0|$ koje bi se pojavilo usljed utjecaja staze ($|F_0|$) u području $|F| \geq 0$ dB. Pojačanje proporcionalnog člana uzima se $V_P = 1$ odnosno 0(dB) kako bi se osigurala fazna rezerva stabilnosti od oko 60° . Statičko pojačanje se postavlja $V_0 = 100$ odnosno 40 dB. Time je određeno i koljeno u karakteristici regulatora kod frekvencije $\omega_1 = 1/T_1 = V_P/(V_0 \cdot T_n)$ u Bodeovom dijagramu. Prijenosna funkcija regulatora je tada :

$$F_R = V_0 \cdot \frac{1 + sT_n}{1 + sT_1} = 100 \cdot \frac{1 + s \cdot 5,6''}{1 + s \cdot 560''} \quad (4.41)$$

Princip izvedbe PI - regulatora prikazan je u sl. 4.18b sa idealnim operacijskim pojačalom (ulazni otpor $R_u \rightarrow \infty$, izlazni otpor $R_i \rightarrow 0$ i pojačanje $V \rightarrow \infty$). Ovdje vrijedi:

$$V_0 = \frac{R_1}{R_0} = 100 \quad V_P = \frac{\frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1}}{R_0} = 1 \quad T_1 = (R_2 + R_1) \cdot C_2 = 560''$$

$$T_n = R_2 \cdot C_2 = 5,6''$$

Odaberemo li primjerice vrijednosti prema shemi u sl. 4.18b kako slijedi: $R_0 = R_2 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 2,2 \text{ M}\Omega$, $C_2 = 255 \text{ }\mu\text{F}$, dobijemo vremenski odziv $u_i(t)$ na odskočni signal U_u :

$$\frac{u_i(t)}{U_u} = V_0 \left(1 - \frac{(T_1 - T_n)}{T_1} e^{-t/T_1} \right) = 100 (1 - 0,99 \cdot e^{-t/560''})$$

Izlazni napon slijedi ovu funkciju srazmjerno tako dugo koliko je signal U_u mali, tako da se ograničenje dostigne teoretski tek nakon beskonačnog vremena. Promjena ide po eksponencijalnoj funkciji s vremenskom konstantom $T_1 = 560 \text{ sec}$ od početne vrijednosti 1 do 100. Kod malih

promjena referentne vrijednosti dobije se u zatvorenom regulacionom krugu vrijeme $t_m = \pi / \omega_D = \pi / 0,6 = 5,2$ sec za koje se izlaz regulatora mora samo malo promijeniti da regulira ovu promjenu. Za regulacioni faktor se dobije vrijednost:

$$R = \frac{1}{1 + V_R V_S} = \frac{1}{1 + V_0 V_S} = \frac{1}{301}$$

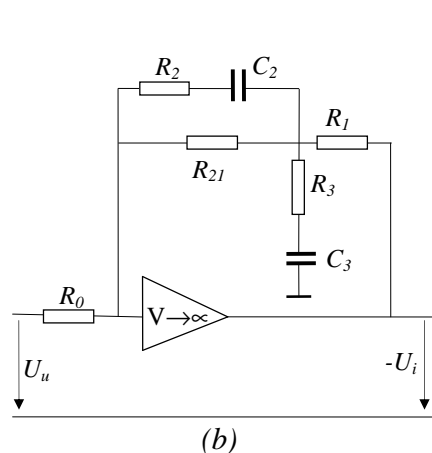
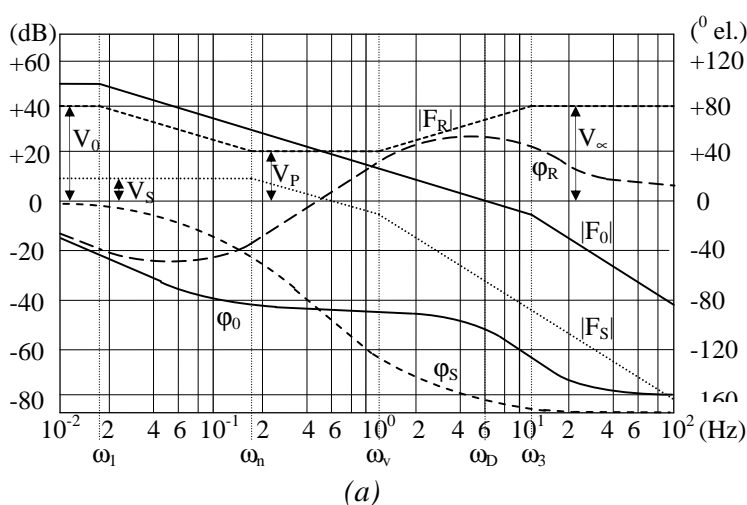
PID regulator :

Bodeov dijagram regulacionog kruga sa PID regulatorom prikazan je u sl. 4.19a. Prilagođenje se postigne tako da se odabere integraciona vremenska konstanta T_n jednaka prijelaznoj vremenskoj konstanti za uzdužnu os generatora T'_{d0} , a derivaciona vremenska konstanta T_v jednaka vremenskoj konstanti uzбудnika T_U . Na ovaj način se želi 'podignuti' mjesta lomova u amplitudnoj karakteristici regulacione staze. Osiguranje fazne rezerve stabilnosti na $\varphi_{rez} = 60^\circ$ određuje veličinu proporcionalnog pojačanja V_P regulatora. Dodatnom frekventno neovisnom povratnom spregom PID regulatora ograničava se statičko pojačanje V_0 kod $\omega = 0$ i $t \rightarrow \infty$. Za frekvencije manje od $\omega_1 = 1/T_1$ i veće od $\omega_3 = 1/T_3$ amplituda ostaje konstantna. Prema sl. 4.19a odabran je slučaj da vrijedi $T_1/T_n = T_v/T_3$ tako da $V_0 = V_\infty$. Tada je prijenosna funkcija regulatora određena kao:

$$F_R = V_0 \frac{(1 + sT_n)(1 + sT_v)}{(1 + sT_1)(1 + sT_3)} = 100 \frac{(1 + s \cdot 5,6'')(1 + s \cdot 0,83'')}{(1 + s \cdot 56'')(1 + s \cdot 0,083'')} \quad (4.42)$$

Na sl. 4.19b prikazana je principijelna shema PID regulatora sa idealnim operacionim pojačalom za koju dobijemo prijenosnu funkciju (paralelni spoj je označen simbolički \parallel):

$$F_R = \frac{R_1 + R_{21}}{R_0} \left\{ \frac{1 + s[(R_2 + R_1 \parallel R_{21})C_2 + (R_3 + R_1 \parallel R_{21})C_3]}{[1 + s(R_2 + R_{21})C_2][1 + sR_3C_3]} + \right. \\ \left. + \frac{s^2 C_2 C_3 [R_2 R_3 + (R_2 + R_3)R_1 \parallel R_{21}]}{[1 + s(R_2 + R_{21})C_2][1 + sR_3C_3]} \right\} \quad (4.43)$$



Sl. 4.19 -(a) Bodeov dijagram regulacionog kruga sa PID regulatorom, (b) shema regulatora s idealnim pojačalom

Ako se usporede desne strane jedn. (4.42) i (4.43) dobije se kako slijedi:

$$V_0 = \frac{R_1 + R_{21}}{R_0} = 100 ; \quad V_\infty = \frac{R_1 + R_2 \parallel R_{21} (1 + R_1 / R_3)}{R_0} = 100$$

$$T_n = (R_2 + R_1 \parallel R_{21}) \cdot C_2 = 5,6'' ; \quad T_1 = (R_2 + R_{21}) \cdot C_2 = 56''$$

$$T_v = \left(R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_{21}}{R_1 R_2 + R_1 R_{21} + R_{21} R_2} \right) \cdot C_3 = 0,83'' ; \quad T_3 = R_3 C_3 = 0,083''$$

Uzmemo li vrijednosti otpora $R_0 = R_1 = 22 \text{ k}\Omega$, slijede ostale vrijednosti prema gornjim relacijama: $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$, $R_{21} = 2,2 \text{ M}\Omega$, $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 23,2 \text{ }\mu\text{F}$, $C_3 = 37,7 \text{ }\mu\text{F}$.

Vremenski tijek odziva na odskočni signal dobije se inverznom Carsonovom transformacijom jednadžbe (4.42) i za PID regulator ima oblik:

$$\frac{u_i}{U_u} = V_0 \left[1 + \frac{(T_1 - T_v)(T_n - T_1)}{T_1(T_1 - T_3)} e^{-t/T_1} + \frac{(T_v - T_3)(T_n - T_3)}{T_3(T_1 - T_3)} e^{-t/T_3} \right] \quad (4.44)$$

Uvođenjem vrijednosti vremenskih konstanti za navedeni primjer imamo rezultat koji je jednak 100 u početnom trenutku i kada vrijeme teži beskonačnom:

$$\frac{u_i(t)}{U_u} = 100(1 - 0,89 \cdot e^{-t/56''} + 0,89 \cdot e^{-t/0,083''})$$

Ako odaberemo tako mali signal da se tek dosegne granica pojačala (ovdje je to $U_u = 0,1 \text{ V}$ kod $U_{R\max} = 10 \text{ V}$) onda vremenska promjena odgovara točno gornjoj jednadžbi. Kod većih vrijednosti ulaznog odskočnog napona biti će tako dobijene konačne vrijednosti odziva ograničene maksimalnim izlaznim naponom pojačala.

Za navedeni primjer prema sl. 4.19a pojačanje je jednako 0 dB kod frekvencije $\omega_D = 6 \text{ Hz}$ i vrijeme regulacije iznosi $t_m = \pi / \omega_D = 0,52 \text{ sec}$. U odnosu na prethodni slučaj korištenja PI regulatora dobije se ovdje točno deset puta brža regulacija, dok je regulacioni faktor ostao nepromijenjen:

$$R = \frac{1}{1 + V_R V_S} = \frac{1}{1 + V_0 V_S} = \frac{1}{301}$$

U ovom primjeru razmatran je regulacioni krug kod generatora u praznom hodu. Kod opterećenog generatora nije moguće prijenosnu funkciju tako jednostavno predstaviti. Ipak se u praksi pokazalo da se u uvjetima praznog hoda stabilizirani regulacioni krug većinom ponaša stabilno i kod opterećenja generatora. Određivanje vremena regulacije kod udarnih promjena opterećenja razmatra se uz korištenje tome sukladnih poremećajnih prijenosnih funkcija pri čemu ostaje primjena Bodeovog dijagrama i navedenih zakonitosti. Naravno da linearizacija karakteristika kakvu smo koristili u navedenom primjeru regulacije ne može biti od koristi kod velikih promjena opterećenja generatora (primjerice isklapanje kod punog opterećenja), jer do punog izraza dolaze promjenjive i konstantne nelinearnosti karakteristika pojedinih članova regulacionog kruga. Uz poznate karakteristike i ograničenja, analiza stabilnosti regulacionog kruga može se provesti pomoću prikladnog programa za računala.

4.5 Regulacija na turbini

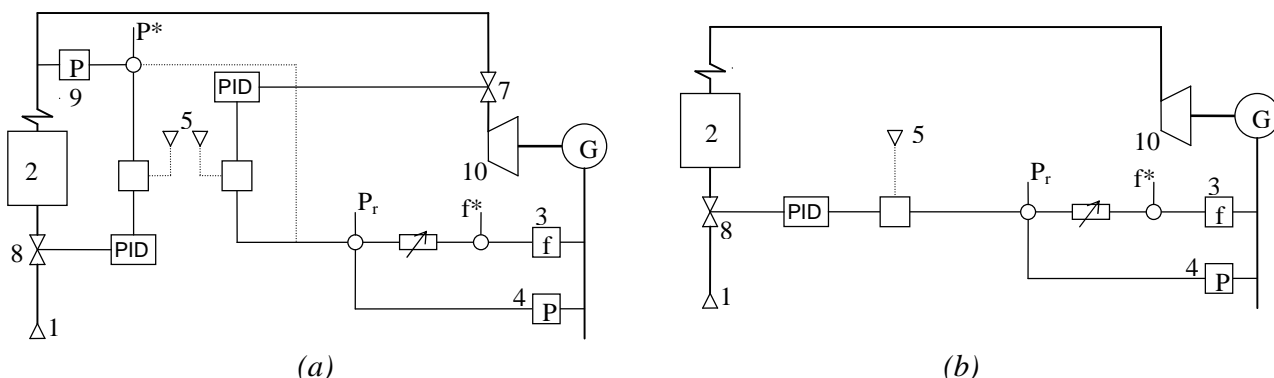
4.5.1 Primarna regulacija

Stabilno odavanje djelatne snage turbine uvjetovano je njenom primarnom regulacijom koja podrazumijeva postojanje proporcionalne promjene sa opterećenjem koja se obično naziva statika. Sukladno ovome mora regulacija odgovarati ponašanju bloka turbina - generator prema relaciji:

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = -\frac{1}{\delta} = -K_T \quad (4.45)$$

Statikom δ smo ovdje označili nagib karakteristika koje opisuju opadanje frekvencije (brzine vrtnje bloka) sa povećanjem opterećenja generatora. Negdje se uvodi faktor opterećenja K_T kao recipročna vrijednost statike δ . Ako svedemo promjenu frekvencije na nazivnu frekvenciju mreže, a promjenu opterećenja turbine na nazivnu snagu turbine, onda se iz jedn. (4.45) dobije jedinična vrijednost statike (p.u.):

$$\delta = \frac{\Delta f / f_n}{\Delta P / P_n} = \frac{P_n / f_n}{\Delta P / \Delta f} = \frac{P_n}{K_T f_n} \quad (4.46)$$



Sl. 4.20- Princip regulacije djelatne snage bloka elektrane

U osnovi se pogon parnog procesa može voditi na principu konstantnog tlaka svježje pare ili na principu klizajućeg tlaka svježje pare. Regulacija na principu čisto klizajućeg tlaka svježje pare samo se izuzetno primjenjuje jer nije prikladna za brzo djelovanje bloka kod reguliranja spontanijih promjena frekvencije, pa se umjesto toga primjenjuju samo uz prikladne modifikacije.

Na sl. 4.20a prikazana je principijelna shema regulacije djelatne snage kod konstantnog tlaka. Iz mjerenja (4) djelatnog opterećenja generatora uz korekciju pomoću mjerenja (3) frekvencije napona na stezaljkama generatora, regulira se preko PID regulatora pomoću ventila (7) privod pare turbini (10). To je osnovni regulacioni krug bloka turbina - generator, a tome je paralelan osnovni regulacioni krug kotla (2). Tu je prema djelatnoj snazi moguće podešavanje parametara svježje pare: količine pare, temperature pare i / ili tlaka pare. Kako smo se opredijelili za konstantan tlak, a temperaturu treba održavati što višom radi većeg stupnja iskorištenja, ostaje da reguliramo količinu pare koju privodimo turbini. Količina na izlazu iz pregrijača koja odgovara djelatnoj snazi turbine (uzimajući u obzir korekciju temperature i tlaka, te sve stupnjeve iskorištenja) podešava se kao referentna, a svako odstupanje od nje iz mjerenja (9) otklanja se preko PID regulatora i dozatora (8) u dovodu goriva. Ova dva regulaciona kruga moraju imati međusobnu vezu koja može biti realizirana

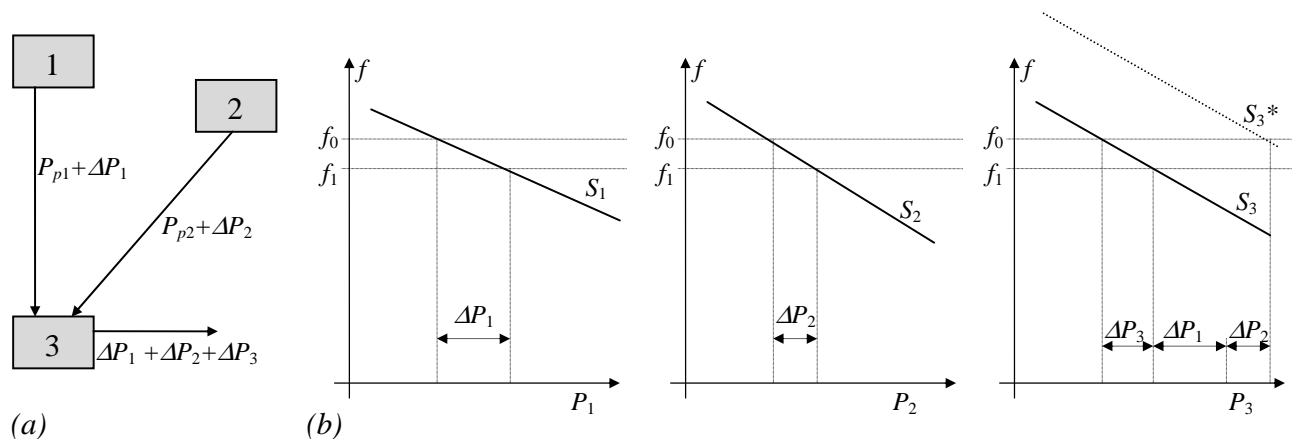
neposrednim utjecajem odstupanja u krugu bloka na količinu i parametre svježe pare u krugu kotla (crtkana veza u shemi). Znatno bolje rješenje se postiže uvođenjem prilagodnog člana (5) koji ima zadaću da poveća mogućnosti regulacije u brzini i ograničenju odstupanja.

Na sl. 4.20b prikazana je principijelna shema regulacije djelatne snage kod čisto klizajućeg tlaka. Iz neposrednog djelovanja PID regulatora na dovod goriva jasno se uočava smanjena mogućnost dobre prilagodbe zahtjevima kvalitetne regulacije (oznake su kao u sl. 4.20a).

4.5.2 Sekundarna regulacija

U mreži redovno imamo elektrane za vršna opterećenja koje se često nazivaju i regulacione elektrane radi njihove uloge u regulaciji frekvencije mreže. Obično se radi o pumpnim ili reverzibilnim elektranama, a u zemljama sa pretežno termičkom proizvodnjom električne energije to su odgovarajuća termoeenergetska postrojenja koja možemo brzo startati (primjerice određene izvedbe plinske elektrane). U tu svrhu uvodimo nadređenu mrežnu regulaciju, koja se obično zove sekundarna regulacija, a koja ima zadaću da frekvenciju nakon poremećaja dovede na nazivnu vrijednost pomoću uključivanja regulacionih elektrana. Sekundarna regulacija ima prvenstveno važnu zadaću da održava veličinu prenošene snage na spojnim granama pojedinih mreža unutar uskih granica oko zadane (i podešene) vrijednosti, pa moramo govoriti o regulaciji prijenosne snage i frekvencije kao povezanom procesu.

Sekundarna regulacija smije djelovati vremenski tek poslije primarne regulacije kako ne bi došlo do pojave njihanja (preregulacije) u pojedinim regulacionim krugovima. Naime, općenito takvo stanje može nastati kada imamo dva ili više regulatora koji djeluju na istoj regulacionoj stazi istovremeno i neovisno jedan od drugog. Istovremeno reguliranje frekvencije i prijenosne snage je moguće ako obje ove veličine stoje u jednom čvrstom odnosu koji se može definirati prikladnom regulacionom karakteristikom.



Sl. 4.21- Karakteristike mreža kod preuzimanja preopterećenja

Na sl. 4.21a je prikazan primjer tri povezane mreže. Mreže (1) i (2) su u stacionarnom stanju i kod nazivne frekvencije f_0 daju određenu snagu trećoj prema karakteristikama prikazanim u sl. 4.21b. Kod pojave dodatnog opterećenja u mreži (3) pada frekvencija u sve tri mreže na vrijednost $f_1 = f_0 - \Delta f$. Djelovanjem primarne regulacije svaka mreža preuzima dio od dodatnog opterećenja $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$ prema svojim karakteristikama statike kod nove frekvencije f_1 , kako se vidi na karakteristikama u slici. Mrežni regulatori svake pojedine mreže dobiju odstupanje frekvencije i prijenosne snage od referentnih vrijednosti. Kako je svaki mrežni regulator podešen na karakteristiku

vlastite mreže, kod mreža (2) i (1) kompenzira se negativna promjena frekvencije pozitivnom promjenom prijenosne snage, te mrežni regulatori stoga ne djeluju. Nasuprot tome, regulator u mreži (3) dobije odstupanja frekvencije i prijenosne snage koja se zbrajaju, te on djeluje na povećanje snage regulacione elektrane dok god ona ne pokrije u cjelosti promjenu opterećenja. U karakteristikama se to registrira kao podizanje statike od S_3 na S_3^* . Pri ovome se vrijednosti frekvencije u svim mrežama kao i opterećenja u mrežama (1) i (2) vraćaju na one prije poremećaja. Tako smo postigli da je poremećaj u jednoj od povezanih mreža kompenziran promjenom djelatne snage elektrana te mreže kao posljedica djelovanja njenog mrežnog regulatora. Regulacioni proces je završen povratom ravnoteže djelatne snage i opterećenja, a time i frekvencije na nazivnu vrijednost. U slučaju smanjenja opterećenja u mreži (3) imamo neposredno djelovanje mrežnog regulatora na regulacionu elektranu u cilju održanja frekvencije u pojasu vrijednosti $50 \pm 0,2$ Hz.

Kod velikih poremećaja u mreži pojavljuju se dinamičke promjene frekvencije koje mogu uzrokovati raspad mreže. Da se izbjegnu neželjene posljedice ovakvih prijelaznih pojava na mreži, na europskoj razini su utvrđene mjere i postupci kod kritičnih odstupanja frekvencije kako slijedi:

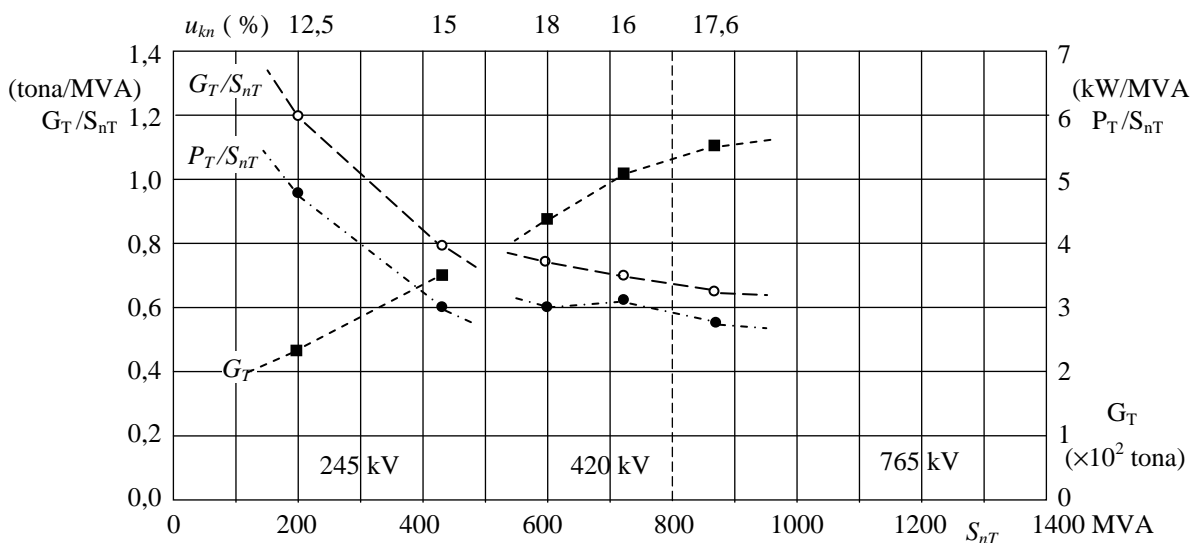
<u>Frekvencija</u> <u>(Hz):</u>	<u>Predviđene mjere i postupci:</u>
49,8	Alarmiranje te uključivanje svih raspoloživih rezervi
49,4	Isključenje određenih potrošača (obično djelovanjem podfrekventnih releja)
48,4	Preklapanje vlastite potrošnje na rezervno autonomno napajanje
47,6	Razdvajanje prijenosnih mreža na pojedine manje cjeline, te odvajanje svih elektrana od mreže s poremećajem ('otočni' rad)

Kako su istočnoeuropski elektroenergetski sustavi obično bili temeljeni na režimu rada koji izostavlja podfrekventnu zaštitu (primjerice Mađarska u vrijeme Domovinskog rata), jasno je da se napajanje pojedinih dijelova naše mreže iz takvih sustava moglo temeljiti samo na principu 'otočnog' rada.

5. Transformatori u elektrani

5.1 Opće značajke transformatora

Naponi do 27 kV koje generatori proizvode u elektrani i njima pripadne struje kod velikih snaga nisu prikladni za ekonomičan prijenos energije, pa se u bloku sa njima koriste (generatorski ili blok-) transformatori preko kojih se napon podiže na razinu 110, 220, 380 ili više kV. Naravno da su transformatori neophodni i u pojedinim čvornim točkama prijenosne odnosno distributivne mreže, no tu primjenu ovdje ne razmatramo. Blok transformatori snagom odgovaraju sinkronim generatorima sa kojima su u bloku. Granične snage određene su nazivnim višim naponom i mogućnostima transporta. Kod višeg napona 380 kV su granične snage trofaznih transformatora oko 1200 MVA kod željezničkog prijevoza, a oko 2000 MVA kod brodskog prijevoza. Prijelazom na jednofazne transformatore i više napone mogu se navedene snage znatno povećati.



Sl. 5.1 - Razvoj blok-transformatora u odnosu na težinu i gubitke

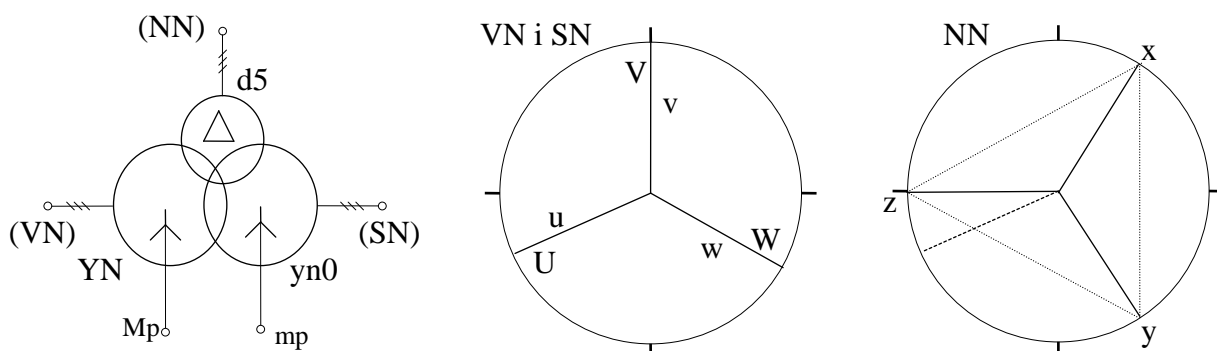
Na sl. 5.1 prikazan je razvoj blok transformatora u zadnjih tridesetak godina prema ukupnoj težini G_T (uključujući uređaje za hlađenje), specifičnoj težini G_T / S_{nT} (u odnosu na nazivnu snagu) i specifičnim gubicima P_T / S_{nT} . Naznačeni su također viši nazivni naponi i naponi kratkog spoja. Pri tome je niži nazivni napon bio između 10,5 i 27 kV, a izvedbe u kotlovima i s prekidačem za stupnjevano podešavanje prijenosnog omjera pod naponom.

U elektrani se također nalaze transformatori za napajanje vlastite potrošnje i za puštanje elektrane u rad i osiguranje neprekinutog napajanja na visokom naponu (obično 6 ili 10 kV), te transformatori za napajanje niskonaponskih trošila u elektrani.

5.2 Grupe spoja i namoti

U sl. 5.3 prikazana je tablica najviše korištenih grupa spoja za dvonamotne trofazne transformatore u skladu sa VDE 0532. Stezaljke višeg napona označene su sa U, V, W , srednjeg napona sa u, v, w , i nižeg napona sa x, y, z , te nadalje izvedena zvjezdišta sa N (odnosno sa n na srednjem i nižem naponu). U shemama je pretpostavljen jednak smjer motanja namota.

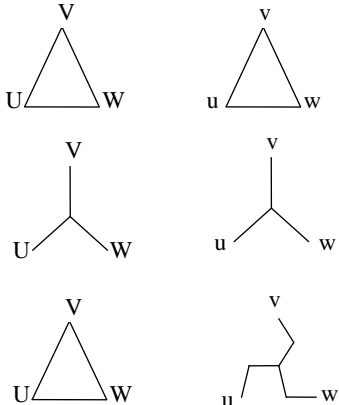
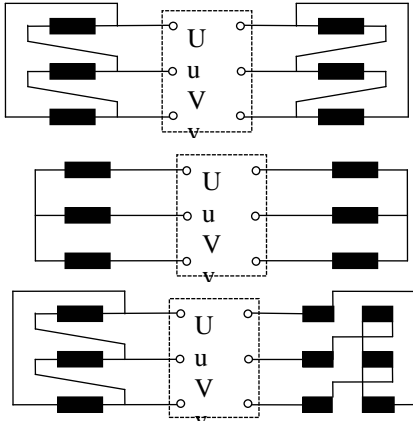
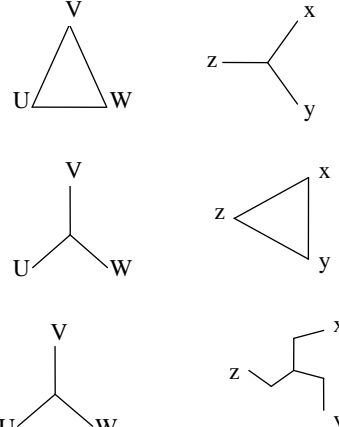
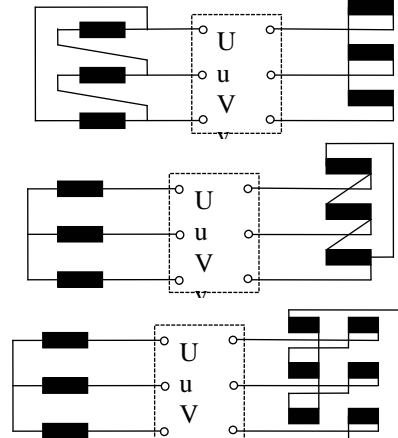
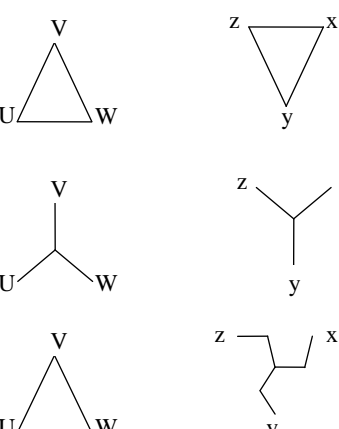
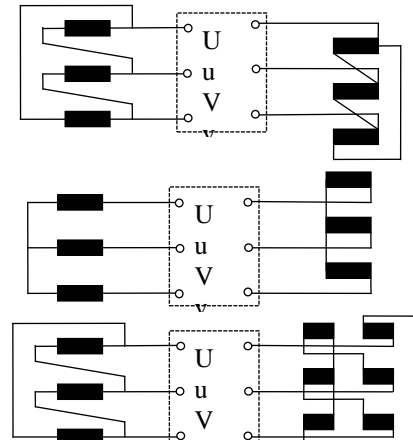
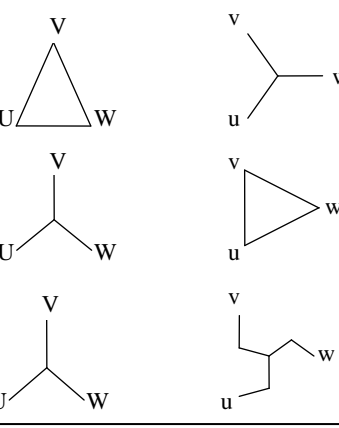
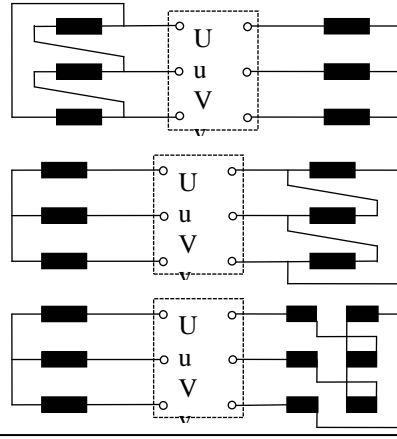
Karakteristični broj grupe spoja pokazuje koliko puta po 30° vektor na strani nižeg napona zaostaje za vektorom sa istom slovnim oznakom na strani višeg napona (podrazumijeva se svakako matematički pozitivan smjer vrtnje). Na sl. 5.2 pokazana je ova konvencija na primjeru tronamotnog transformatora sa oznakom YNyn0 d5 (niži i srednji napon dani su u istom vektorskom dijagramu).



Sl. 5.2 - Shema i fazorski prikaz tronamotnog transformatora

Ako se transformatori koriste u paralelnom spoju, moraju im biti jednaki karakteristični brojevi grupe spoja. Primjerice je mogućan paralelni rad transformatora sa brojevima grupe spoja 5 i 11, odnosno 0 i 6 pod uvjetom da se prije toga napravi zamjena spoja na stezaljkama i dobiju (i vremenski) identični naponi pojedinih faza. Inače kod paralelnog spajanja transformatora T1 i T2 mora se paziti na razdiobu opterećenja i ograničenje struja u njihovom (kratko spojenom) krugu i stoga odabrati prijenosne omjere $k_{T1} \approx k_{T2}$, napone kratkog spoja $u_{kn T1} \approx u_{kn T2}$, te prividne snage $S_{n T1} / S_{n T2} < 3$.

Ako se kod jednake snage odabere za namot transformatora spoj u zvijezdu, onda je u stacionarnom pogonu na njemu (fazni) napon $\sqrt{3}$ manji od nazivnog napona. Zato ovakvo spajanje ima prednost kod napona 110 kV ili viših, jer za jednak magnetski tok traži manji broj zavoja većeg presjeka. Daljnja prednost spajanja strane višeg napona u zvijezdu je mogućnost da se izvede zvjezdasti vodič, koga je moguće tada uzemljiti neposredno ili preko impedancije. Na ovaj način se smanjuje dielektrično naprezanje i potrebni stupanj izolacije zvjezdaste strane namota u odnosu na izolaciju ulaza. Ova prednost se koristi za napone 220 kV i više. Kod velikih struja transformatora na strani nižeg napona većinom se koristi trokut spoj kod kojega su struje namota $\sqrt{3}$ puta manje od (linijskih) struja u vodiču. Zato se kod blok-transformatora izrazito često koriste grupe spoja Yd5 odnosno Yd11.

<p>Dd0</p> <p>Yy0</p> <p>Dz0</p>		
<p>Dy5</p> <p>Yd5</p> <p>Yz5</p>		
<p>Dd6</p> <p>Yy6</p> <p>Dz6</p>		
<p>Dy11</p> <p>Yd11</p> <p>Yz11</p>		

Sl. 5.3 - Grupe spoja s fazorskim prikazom i spojnom shemom

U mnogim slučajevima se grupa spoja određuje na temelju stanja nul-točke u mreži. Niskonaponski transformatori za napajanje mreža sa zaštitnim sistemom nulovanja obično imaju grupe spoja Dy5 ili Yz5.

Kod visokonaponskih mrežnih transformatora bira se na objema stranama zvijezda spoj radi manjeg izolacionog napreznja i mogućnosti korištenja uzemljenja zvjezdista. Tada se dodatno predviđa namot za izjednačavanje u trokut spoju (sl. 5.2). Kod dostatno odmjerene namota u trokut spoju postiže se da kod jednopolnog kratkog spoja struja greške i nastali naponi na jednoj strani transformatora ostanu ograničeni i da se rasipni tokovi ne zatvaraju preko kotla transformatora.

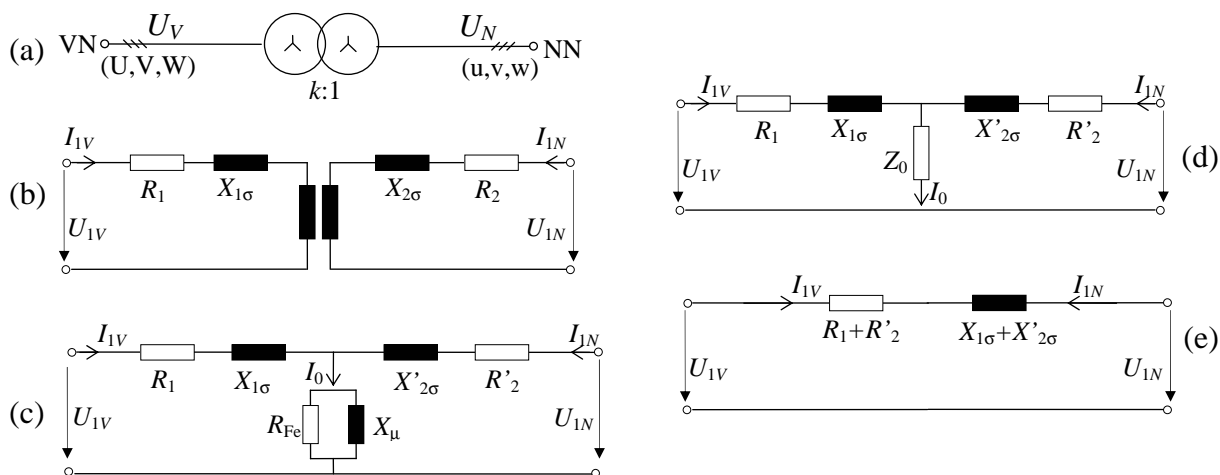
Namoti za izjednačavanje u trokut spoju uzimaju se najčešće za jednu trećinu nazivne prividne snage transformatora. Kod jednopolnog kratkog spoja teče u namotu za izjednačavanje struja $I''_{k1p} / \sqrt{3}$ (ako se pretpostavi prijenosni omjer $k = 1$). Za omjer X_{0T} / X_{1T} tada se dobije prema rasporedu namota vrijednost veća ili jednaka 1, dok se kod transformatora u spoju Yd- ili Dy- može očekivati da je $X_{0T} / X_{1T} \cong 0,9 \div 1,0$ (tabela ispred sl. 5.11). Za nazivni prijenosni omjer transformatora vrijedi $k_n = U_{nVN} / U_{nNN}$, t.j. $k \geq 1$, a može se odrediti iz pokusa praznog hoda.

5.3 Dvonamotni i tronamotni transformatori

5.3.1 Nadomjesna shema i vektorski dijagram

Nadomjesne sheme za direktni, inverzni i nulti sustav transformatora dane su detaljnije u sl. 5.14. Ovdje treba najprije obraditi nadomjesnu shemu dvonamotnog transformatora u direktnom sustavu. Pretpostavlja se da su omski (djelatni) otpori namota višeg i nižeg napona 'izvučeni' iz transformatora jednako kao i rasipne reaktancije nastale usljed razdiobe tokova u prostoru rasipanja. Nadalje treba provesti preračunavanje napona, struje i impedancije strane nižeg napona na stranu višeg napona. Tada se dobiju nadomjesne sheme prema sl. 5.4.

Na sl. 5.4 je nadomjesna shema dvonamotnog transformatora u spoju Yy0 (direktni i inverzni sustav): (a) shema spoja, (b) nadomjesna shema s induktivnom vezom, (c) nadomjesna shema s poprečnom impedancijom usljed struje magnetiziranja i gubitaka u željezu, (d) pojednostavljena nadomjesna shema i (e) nadomjesna shema uz zanemarenje struje praznog hoda.



Sl. 5.4 - Spajanje i nadomjesne sheme transformatora u Yy0 spoju

Radi jednostavnijeg indeksiranja ispušteni su indeksi kod direktnog i inverznog sustava za otpore i reaktancije, dok je kod nultog sustava prvi indeks nula. U sl. 5.4 su U_{1N} , U_{1V} fazni naponi u direktnom (inverznom) sustavu na strani nižeg odnosno višeg napona transformatora ($U_N = \sqrt{3} U_{1N}$, $U_V = \sqrt{3} U_{1V}$); R_1 , R_2 , $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$ su djelatni otpori odnosno rasipne reaktancije na strani višeg (indeks 1) i nižeg (indeks 2) napona transformatora; R_{Fe} je djelatni otpor koji odgovara gubicima u željezu (gubici poraznog hoda P); X_μ je reaktancija magnetiziranja koja odgovara glavnom magnetskom toku; \dot{Z}_0 je impedancija praznog hoda koja odgovara struji \dot{I}_0 praznog hoda, a impedancija kratkog spoja transformatora je

$$\dot{Z}_T = R_T + j X_T = R_1 + R'_2 + j(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) \quad (5.1)$$

Kod prijelaza sa sl. 5.4b na 5.4c preračunavaju se napon, struja i impedancija strane nižeg napona na stranu višeg napona kako slijedi

$$\dot{U}'_{1N} = k_n \dot{U}_{1N}; \quad I'_{1N} = I_{1N} / k_n; \quad R'_2 = k_n^2 R_2; \quad X'_{2\sigma} = k_n^2 X_{2\sigma} \quad (5.2)$$

Impedancija praznog hoda računa se iz izmjerene struje praznog hoda I_0 kod priključenog nazivnog sinusoidalnog napona nazivne frekvencije

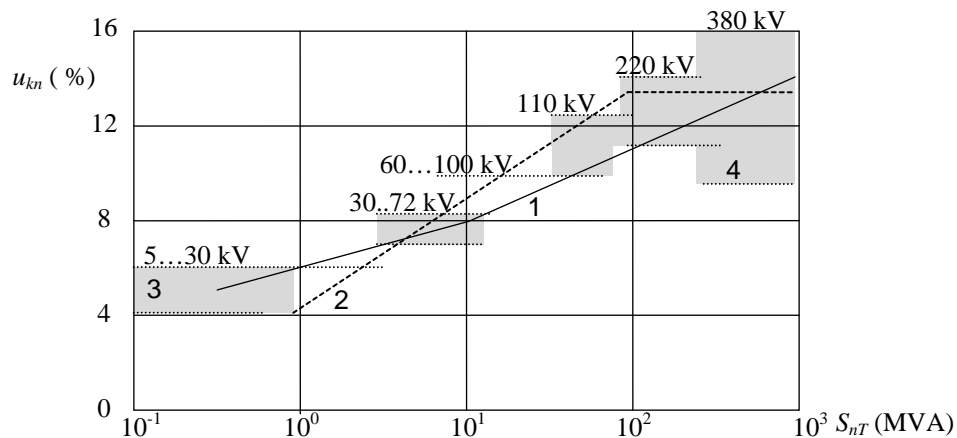
$$Z_0 = U_{nV} / \sqrt{3} \cdot I_0 = U_{nV}^2 / i_0 \cdot S_{nT} \quad (5.3)$$

gdje je i_0 (p.u.) struja praznog hoda I_0 svedena na nazivnu struju visokonaponske strane transformatora I_{nV} . Djelatni otpor R_{Fe} i reaktancija magnetiziranja X_μ u sl. 5.5c računaju se prema relacijama

$$R_{Fe} = U_{nV}^2 / P_0; \quad X_\mu = R_{Fe} \cdot Z_0 / \sqrt{R_{Fe}^2 - Z_0^2} \quad (5.4)$$

Kod velikih transformatora može se struja praznog hoda I_0 zanemariti jer ima vrijednost manju od 1% nazivne struje transformatora. Tako se dobije pojednostavljena shema u sl. 5.4e. Impedancija transformatora \dot{Z}_T može se odrediti polazeći od nazivnog napona kratkog spoja u_{kn} i omskog pada napona u_{Rn} odnosno gubitaka kratkog spoja P_k . Svedeno na stranu višeg napona imamo za impedanciju, djelatni otpor i reaktanciju kako slijedi:

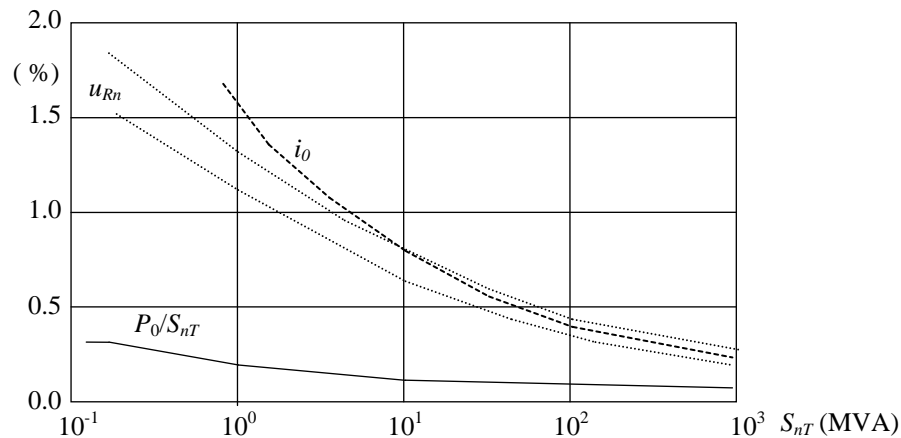
$$\begin{aligned} Z_T &= u_{kn} \cdot U_{nV}^2 / S_{nT}; \quad R_T = u_{Rn} \cdot U_{nV}^2 / S_{nT} = P_k / 3 \cdot I_{nV}^2; \\ X_T &= \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{u_{kn}^2 - u_{Rn}^2} \cdot U_{nV}^2 / S_{nT} = u_{Xn} \cdot U_{nV}^2 / S_{nT} \end{aligned} \quad (5.5)$$



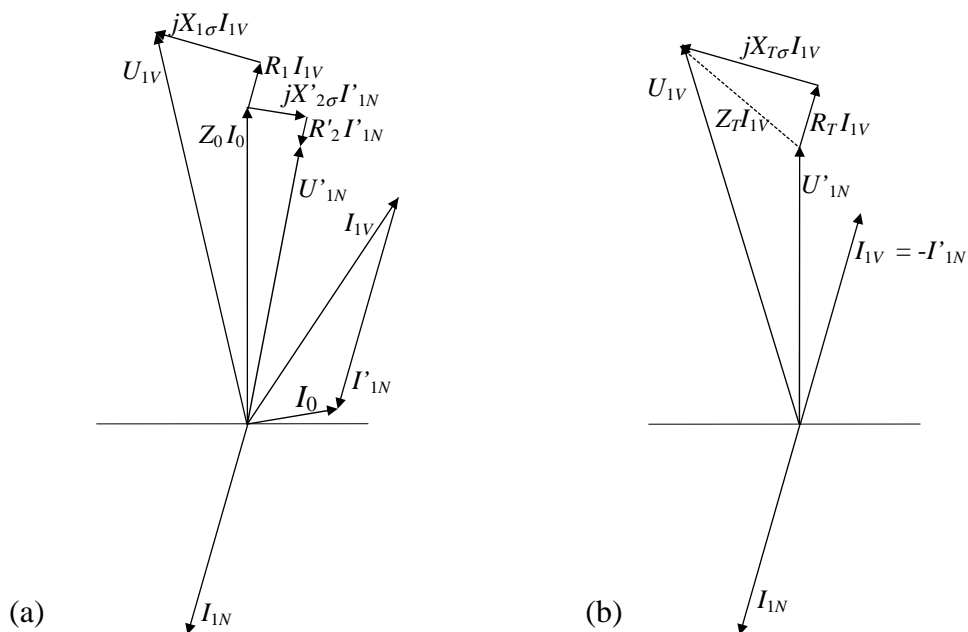
Sl. 5.5 - Tipične vrijednosti nazivnih napona kratkog spoja

Na sl. 5.5 su tipične vrijednosti za nazivni napon kratkog spoja u_{kn} kod dvonamotnih transformatora i s dodatnim namotom za izjednačavanje u ovisnosti o nazivnim vrijednostima napona U_{nV} i prividne snage S_{nT} : (1) srednje vrijednosti, (2) srednje vrijednosti za pune transformatore, (3) za niskonaponske transformatore i (4) za štedne transformatore. Na sl. 5.6

su orijentacione vrijednosti za relativnu struju praznog hoda i_0 , relativnu snagu praznog hoda P_0 / S_{nT} i relativni napon na djelatnom otporu u_{Rn} za dvonamotne transformatore (područje između crtanih linija).



Sl. 5.6 - Orijentacione vrijednosti za dvonamotne transformatore



Sl. 5.7 - Fazorski dijagram dvonamotnog transformatora grupe Yy0

Za nadomjesne sheme u sl. 5.4d i 5.4e vrijede vektorski dijagrami u sl. 5.7a odnosno 5.7b za grupu spoja Yy0. Otuda imamo relacije za sl. 5.7a :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1V} + \dot{I}'_{1N} &= \dot{I}_0 \\ \dot{U}_{1V} &= (R_1 + j X_{1\sigma}) \cdot \dot{I}_{1V} + \dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_0 \\ \dot{U}'_{1N} &= (R'_2 + j X'_{2\sigma}) \cdot \dot{I}'_{1N} + \dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

odnosno za sl. 5.7b gdje je $I_0 = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1V} + \dot{I}'_{1N} &= 0 \\ \dot{U}_{1V} &= (R_T + j X_T) \cdot \dot{I}_{1V} + \dot{U}'_{1N} \\ \dot{U}'_{1N} &= (R'_T + j X'_T) \cdot \dot{I}'_{1N} + \dot{U}_{1V} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Druga i treća jednažba (5.6) daju zajedno drugu odnosno treću jednažbu (5.7).

5.3.2 Preuzimanje opterećenja i promjena napona

Kod izračuna snage koju transformator uzima iz mreže i promjene napona s opterećenjem transformatora, polazi se općenito od pojednostavljene nadomjesne sheme u sl. 5.4e . Za snagu koju transformator uzima na strani višeg napona i snagu koju predaje na strani nižeg napona kod simetričnog opterećenja (direktni sustav, sl. 5.8a) vrijedi:

$$\begin{aligned}\dot{S}_V &= 3 \cdot \dot{U}_{IV} \cdot \dot{I}_{IV} = 3 \cdot U_{IV} \cdot I_{IV} \cdot (\cos\varphi_v + j \cdot \sin\varphi_v) \\ \dot{S}_N &= \dot{S}_t = -3 \cdot \dot{U}'_{1N} \cdot \dot{I}'_{1N} = 3 \cdot \dot{U}'_{1N} \cdot \dot{I}'_{1t} \\ \dot{S}_N &= -3 \cdot \dot{U}'_{1N} \cdot \dot{I}'_{1N} = -3 \cdot U'_{1N} \cdot I'_{1N} \cdot (\cos\varphi_t + j \cdot \sin\varphi_t)\end{aligned}\tag{5.8}$$

Ako se treća jedn.(5.7) uvrsti u drugu jedn. (5.8) dobijemo:

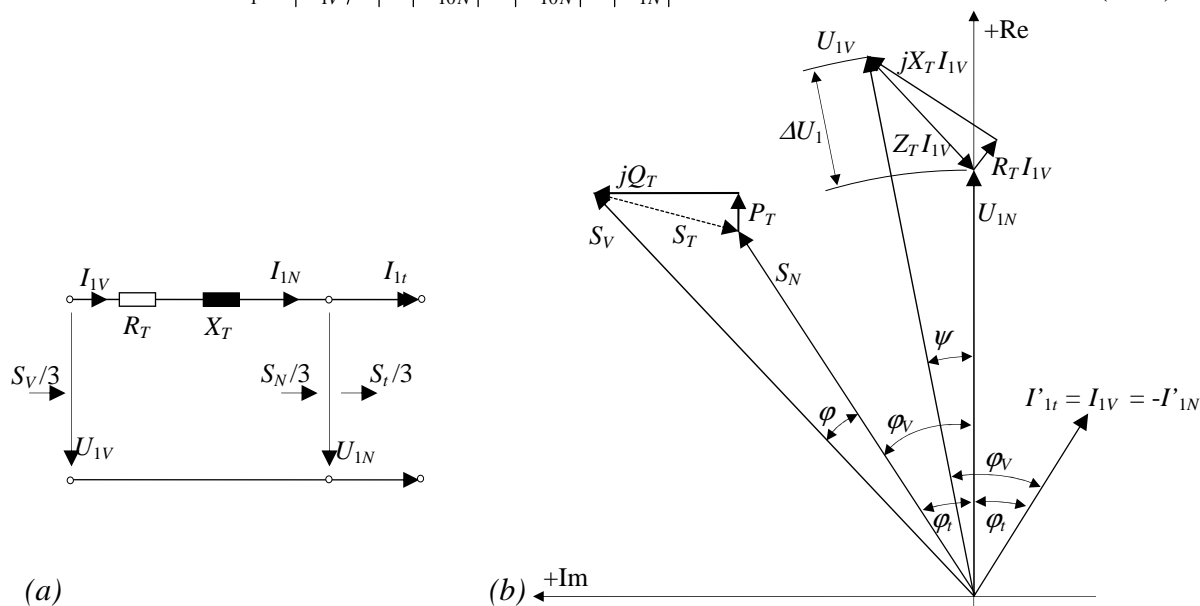
$$\dot{S}_N = 3 \cdot [\dot{U}_{IV} - (R_T + jX_T) \cdot \dot{I}_{IV}] \cdot \bar{I}_{IV} = 3 \cdot \dot{U}_{IV} \cdot \dot{I}_{IV} - 3 \cdot (R_T + jX_T) \cdot I_{IV}^2 \quad (5.9)$$

Razlika između preuzete prividne snage S_V i predane prividne snage S_N je snaga gubitaka transformatora P_T i potrebna jalova snaga transformatora Q_T . Otuda slijedi :

$$\dot{S}_T = P_T + j \cdot Q_T = \dot{S}_V - \dot{S}_N = 3 \cdot (R_T + jX_T) \cdot I_V^2 = 3 \cdot (R_T + jX_T) \cdot I_{1N}^2 / k_n^2 \quad (5.10)$$

Promjena napona ΔU_1 na strani nižeg napona kod transformatora opterećenog strujom tereta I_{1t} određuje se iz razlike napona praznog hoda U_{10} i napona pod opterećenjem na strani nižeg napona transformatora koji je napajan na strani višeg napona kod U_{1V} :

$$\Delta U_1 = |\dot{U}_{1V}/k| - |\dot{U}_{10N}| = |\dot{U}_{10N}| - |\dot{U}_{1N}| \quad (5.12)$$



Sl. 5.8 - (a) Nadomjesna shema i (b) fazorski dijagram napona i snaga

Na sl. 5.8a su prikazani (a) nadomjesna shema simetrično opterećenog dvonamotnog transformatora i (b) vektorski dijagram za određivanje prenesene snage i razlike napona usljed opterećenja. Ako se uvede parametre transformatora svedene na stranu nižeg napona :

$$R_{TN} = u_{Rn} \cdot U_{nN}^2 / S_{nT} \text{ , } X_{TN} = u_{Xn} \cdot U_{nN}^2 / S_{nT} \quad (5.13)$$

kod struje opterećenja :

$$\dot{I}_{1t} = I_{1t} \cdot (\cos \varphi_t - j \cdot \sin \varphi_t) \quad (5.14)$$

za $\dot{U}_{1N} = U_{1N}$ se dobije iz sl. 5.8b :

$$\Delta U_1 = \sqrt{[U_{1N} + (R_{TN} \cdot \cos \varphi_t + X_{TN} \cdot \sin \varphi_t) \cdot I_{1t}]^2 + [(R_{TN} \cdot \sin \varphi_t - X_{TN} \cdot \cos \varphi_t) \cdot I_{1t}]^2} - U_{1N} \quad (5.15)$$

Često se izračun provodi u relativnim jedinicama (p.u.):

$$\Delta u = \Delta U / U_{nN} = \Delta U_1 / U_{1nN} ; u_{1N} = U_{1N} / U_{1nN} ; i_{1t} = I_{1t} / I_{1nN} \quad (5.16)$$

i uz skraćenje :

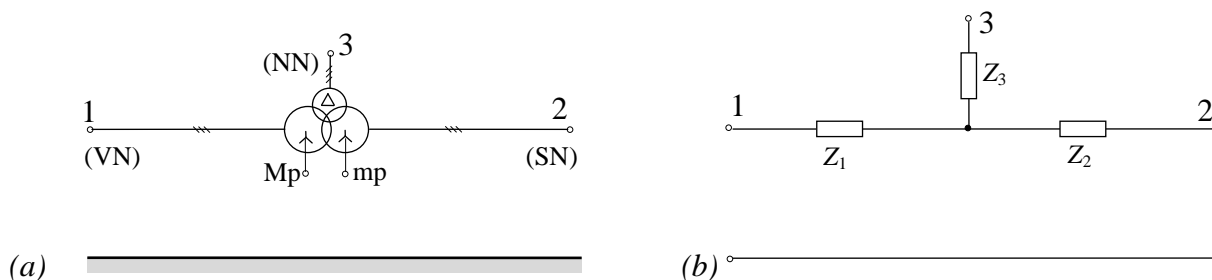
$$u' = u_{Rn} \cdot \cos \varphi_t + u_{Xn} \cdot \sin \varphi_t ; u'' = u_{Rn} \cdot \sin \varphi_t - u_{Xn} \cdot \cos \varphi_t \quad (5.17)$$

Ako vrijedi $(u_{1N} + u' \cdot i_{1t})^2 \gg (u'' \cdot i_{1t})^2$, onda imamo s dobrom točnošću kod $u_{kn} < 0,20$ kada je $u_{1N} + u' \cdot i_{1t} \approx 1$ p.u. da vrijedi :

$$\Delta u \approx u' \cdot i_{1t} + \frac{(u'' \cdot i_{1t})^2}{2} \quad (5.18)$$

5.3.3 Tronamotni transformatori

Tronamotni transformatori se pojavljuju kao transformatori vlastite potrošnje u termoelektranama ili kao mrežni transformatori. U prvom slučaju treći namot služi za pokrivanje opterećenja trošila, a u drugom slučaju za izravnjanje kod tražene opteretivosti zvjezdista, bilo da se radi o punim ili štednim transformatorima. Sl. 5.9 prikazuje spoj i nadomjesnu shemu u direktnom (inverznom) sustavu za grupu spoja Yyn0+d5, gdje je 1 viši napon, 2 srednji, a 3 niži napon.



Sl. 5.9 - (a) Spoj i (b) nadomjesna shema (direktna komponenta) za grupu spoja Yy0d5

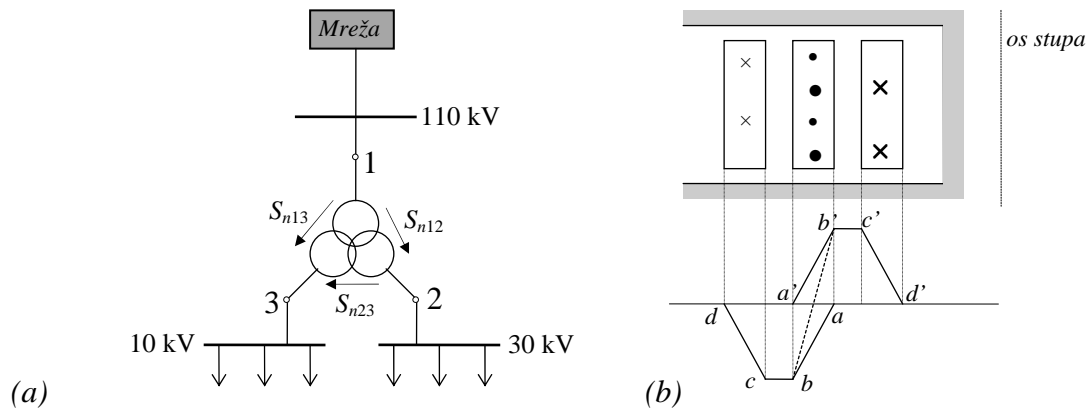
Dok se kod dvonamotnih transformatora radio jedan pokus kratkog spoja da se odredi napon kratkog spoja, kod tronamotnog transformatora su potrebna tri mjerenja da bi se iz rezultata mogle izračunati impedancije nadomjesne sheme u sl. 5.9. Općenito vrijedi da se kod transformatora s n namota mora u tu svrhu provesti $n \cdot (n-1)/2$ pokusa kratkog spoja. Za određivanje tri nazivna napona kratkog spoja u_{kn12} , u_{kn23} , u_{kn13} napaja se svaki put prvi namot iz simetričnog (direktnog) sustava, uz drugi namot kratko spojen, dok je treći namot ostavljen otvoren (i ne pojavljuje se u indeksu oznake). Napon napajanja se svaki put podešava tako da struja koja teče odgovara manjoj prividnoj snazi jednog od prva dva namota u pokusu kratkog spoja (napajani i kratko spojeni namot). Naponi kratkog spoja su dakle vezani sa prolaznom snagom između odgovarajućih namota S_{n12} , S_{n23} , S_{n13} . Ako se sve vrijednosti svedu na napon U_{n1} , dobijemo za impedancije kratkog spoja:

$$\begin{aligned} |\dot{Z}_{12}| &= |\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2| = u_{kn12} \cdot (U_{n1}^2 / S_{n12}) \\ |\dot{Z}_{13}| &= |\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3| = u_{kn13} \cdot (U_{n1}^2 / S_{n13}) \\ |\dot{Z}_{23}| &= |\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3| = u_{kn32} \cdot (U_{n1}^2 / S_{n32}) \end{aligned} \quad (5.19)$$

Prikladnim mjerenjem gubitaka kratkog spoja između pojedinih parova namota (mjerenje se vrši na glavnim otcjepima) određuju se otpori R_{12} , R_{23} , R_{13} i tada se mogu odrediti impedancije Z_{12} , Z_{23} , Z_{13} . Polazeći od jedn. (5.19) dobije se za impedancije spoja prema sl. 5.10b :

$$\begin{aligned}\dot{Z}_1 &= \frac{\dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{13} - \dot{Z}_{23}}{2} = \frac{U_{n1}^2}{2} \left(\frac{u_{Rn12} + ju_{Xn12}}{S_{n12}} + \frac{u_{Rn13} + ju_{Xn13}}{S_{n13}} - \frac{u_{Rn32} + ju_{Xn32}}{S_{n32}} \right) \\ \dot{Z}_2 &= \frac{\dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{23} - \dot{Z}_{13}}{2} = \frac{U_{n1}^2}{2} \left(\frac{u_{Rn12} + ju_{Xn12}}{S_{n12}} + \frac{u_{Rn23} + ju_{Xn23}}{S_{n23}} - \frac{u_{Rn31} + ju_{Xn31}}{S_{n31}} \right) \\ \dot{Z}_3 &= \frac{\dot{Z}_{32} + \dot{Z}_{13} - \dot{Z}_{21}}{2} = \frac{U_{n1}^2}{2} \left(\frac{u_{Rn32} + ju_{Xn32}}{S_{n32}} + \frac{u_{Rn13} + ju_{Xn13}}{S_{n13}} - \frac{u_{Rn12} + ju_{Xn12}}{S_{n12}} \right)\end{aligned}\quad (5.20)$$

Lako je vidjeti koliko se ove relacije pojednostavne ako se uzmu u račun samo reaktancije kratkog spoja. Ukoliko se želi računati na strani napona različitog od U_{n1} , treba impedancije preračunati s kvadratom odgovarajućeg prijenosnog omjera.



Sl. 5.10 - (a) Spoj i (b) raspored namota tronamotnog transformatora

Na sl. 5.10a je primjer primjene tronamotnog transformatora za napajanje sa 110 kV mreže (1). Napajaju se 10 kV mreža (3) koja ima malo promjenljivo opterećenje i 30 kV mreža (2) s vrlo promjenljivim opterećenjem.

Prema sl. 5.10b namot 1 je smješten između namota 2 i 3 da se smanji povratno djelovanje promjene napona u 30 kV mreži na 10 kV mrežu. Ako su strujno protjecani (u pogonu) samo namoti 1 i 2, rasipno polje je principijelno određeno trapezoidnom raspodjelom $abcd$, dok kod pogona namota 1 i 3 razdioba rasipnog polja odgovara trapezu $a'b'c'd'$. Kada se općenito u pogonu energetske napajaju namoti 2 i 3 preko primarnog namota 1, rezultirajuće rasipno polje ima oblik označen točkama $d'c'b'b'c'd'$. Rasipno polje između namota 1 i 2 odnosno 1 i 3 smanjuje se samo malo, a induktivna veza između namota 2 i 3 je također mala.

Neka transformator prema sl. 5.10 ima sljedeće podatke:

$$\begin{aligned}S_{n12} &= 20 \text{ MVA} & u_{kn12} &= 10 \% \\ S_{n13} &= 10 \text{ MVA} & u_{kn13} &= 4,6 \% \\ S_{n32} &= 10 \text{ MVA} & u_{kn32} &= 10,3 \%\end{aligned}$$

Ako podatke svodimo na primarni napon $U = 110 \text{ kV}$, dobijemo za reaktancije vrijednosti prema jedn.(5.19):

$$\begin{aligned}X_{12} &= 0,100 \cdot (110 \text{ kV})^2 / 20 \text{ MVA} = 60,50 \Omega \\ X_{13} &= 0,046 \cdot (110 \text{ kV})^2 / 10 \text{ MVA} = 55,66 \Omega\end{aligned}$$

$$X_{32} = 0,103 \cdot (110 \text{ kV})^2 / 10 \text{ MVA} = 124,63 \, \Omega$$

Ako se promijeni jedn. (5.20) uz zanemarenje djelatnih padova napona, dobiju se za nadomjesnu shemu u zvijezda spoju (sl. 5.9b) vrijednosti reaktancija:

$$X_1 = (60,5 + 55,66 - 124,63) / 2 = -4,235 \, \Omega$$

$$X_2 = (124,63 + 60,5 - 55,66) / 2 = 64,735 \, \Omega$$

$$X_3 = (55,66 + 124,63 - 60,5) / 2 = 59,895 \, \Omega$$

Vidi se da jedna reaktancija može poprimiti malu negativnu vrijednost (ovdje je to reaktancija namota 1 koji leži između unutarnjeg namota 3 i vanjskog namota 2). Reaktancije koje pripadaju vanjskom (2) odnosno unutarnjem (3) namotu su grubo približno jednake reaktancijama kratkog spoja između njih i srednjeg namota (1) prema sl. 5.10b. Dakle vrijedi $X_2 \approx X_{12}$ i $X_3 \approx X_{13}$. Kada bi se radikalno proširenje namotâ moglo zanemariti, bila bi reaktancija srednje postavljenog namota $X_1 \approx 0$.

5.3.4 Reaktancije nulte komponente sistema i opteretivost zvjezdišta

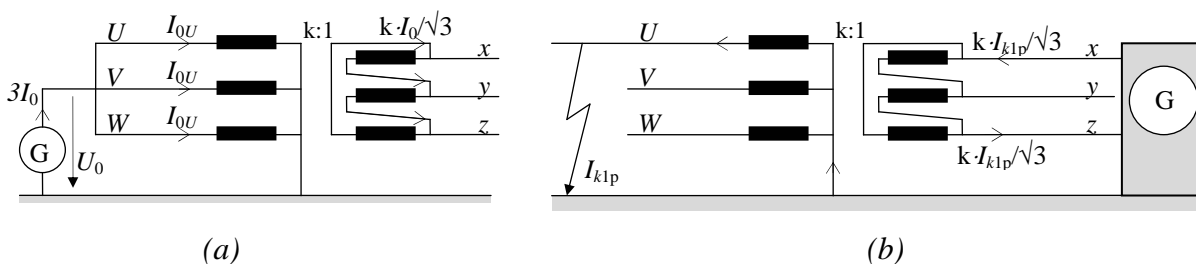
Kod transformatora se traži opteretivost zvjezdišta kada primjerice treba priključiti prigušnicu ili kada se transformator direktno uzemljuje u mrežama s niskoomskim uzemljenjem zvjezdišta. Transformatori grupe spoja Yd, Dy i Yy s namotom za izjednačenje u trokut spoju kao i Yz imaju u punom iznosu opteretivo zvjezdište. To znači da zvjezdište može trajno voditi nazivnu struju pripadnog namota. Kod transformatora grupe spoja Yy s namotom za izjednačenje za jednu trećinu nazivnog opterećenja smije pak samo jedno od zvjezdišta biti opterećeno bilo kada. Kod transformatora grupe spoja Yz vrijedi ova puna opteretivost za cik-cak namot ali ne i za namot u zvijezda spoju.

Transformatori s punom opteretivošću zvjezdišta imaju nul-impedanciju koja je otprilike jednaka direktnoj impedanciji (Yd ili Dy) ili značajno manja (Yz za impedanciju nulte komponente na cik-cak strani), ili pak u području između 1 i 2,4 puta veća od direktne impedancije (Yd s trokut namotom za izjednačenje). Orientacione vrijednosti omjera nulte i direktne impedancije X_{0T}/X_{1T} mogu se sistematizirati ovisno o izvedbi jezgre, grupi spoja i uzemljenju zvjezdišta transformatora:

<u>Izvedba jezgre:</u>	<u>Grupa spoja:</u>			
	Yzn	Ynd ili Dyn	Ynyd ili Yynd	Yny ⁽³⁾ ili Ynz
trostupna	-	0,7÷1,0 ⁽¹⁾	-	3÷10 ⁽²⁾
peterostupna	0,10÷0,15	1,0	1,0÷2,4	10÷100 ⁽²⁾
tri jednofazna transformatora		1,0		10÷100 ⁽²⁾

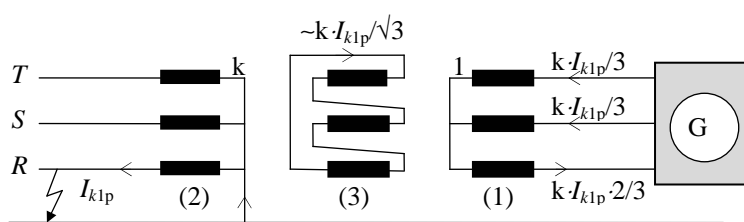
Pri tome treba uzeti u obzir da imamo kod ⁽¹⁾ za transformatore male snage $X_{0T}/X_{1T} \approx 1,0$ (niskonaponski transformatori), kod ⁽²⁾ jaku ovisnost o konstrukciji transformatora i udjelu rasipnog toka u odnosu na glavni magnetski tok, a za ⁽³⁾ neprikladno rješenje za mreže sa zaštitnim sustavom nulovanja.

Sl. 5.11a pokazuje primjer mjerenja nulte impedancije $\dot{Z}_{0T} = \dot{U}_0 / \dot{I}_0$ transformatora grupe spoja Ynd5 uz jednake struje u faznim namotima. Na sl. 5.11b je prikazana raspodjela struja i opterećenje zvjezdišta kod jednopolnog kratkog spoja u mreži. Napajanje je sa strane nižeg napona, a zvjezdište višeg napona je direktno uzemljeno. Ukoliko zvjezdište nije uzemljeno direktno nego preko impedancije Z_S , onda naravno treba nultoj reaktanciji direktnog uzemljenja dodati u seriju vrijednost $3 \cdot Z_S$.

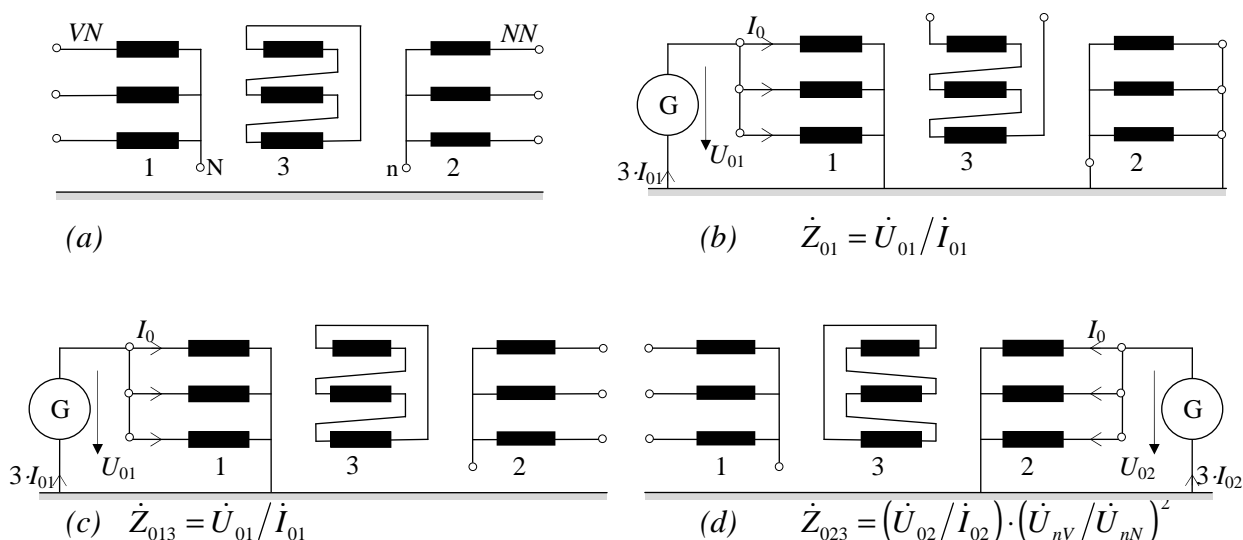


Sl. 5.11 - Impedancija kratkog spoja i raspodjela struja transformatora

Kod blok-transformatora grupe spoja Ynd5 koji prenosi snagu jednog bloka elektrane u mrežu s niskoomskim uzemljenjem zvjezdišta, dobije se kod zemljospoja u mreži dvofazna kratkospojna struja generatora kako je prikazano u sl. 5.11b. Za generator ovo znači neravnomjernost opterećenja od $(k/3) \cdot (I''_{k1p}/I_{nG})$.



Sl. 5.12 - Raspodjela struja i opterećenja zvjezdišta tronamotnog transformatora



Sl. 5.13 - Spoj i raspored namota tronamotnog transformatora

Kod mrežnog transformatora grupe spoja Yy0 s dodanim tercijarnim namotom (3) za izjednačenje u trokut spoju dobije se kod uzemljenog zvjezdišta i jednopolnog kratkog spoja raspodjela struja prema sl. 5.12. U trokut spoju se može pojaviti takva struja izjednačenja koja će postići ravnotežu strujnog protjecanja u amperzavojima. Kod jednakog prijenosnog omjera k između namota višeg i nižeg napona odnosno namota višeg napona i namota za izjednačenje, teče u ovom zadnjem struja $(k/3) \cdot I''_{k1p}$.

Na sl. 5.13a je primjer određivanja potpune nadomjesne sheme u nultom sistemu na temelju mjerenja nulte komponente impedancije za jedan transformator snage 25 MVA, napona $108 \pm 22\% / 10,5$ kV, grupe spoja Yyn0 s tercijarnim namotom (3) u trokut za jednu trećinu nazivne snage. Na sl. 5.13b+d je pokazano određivanje impedancija kratkog spoja preračunatih na stranu višeg napona. Uzimajući glavni odcjep i zanemarujući djelatne otpore (

$Z \approx X$), mjerenjem bi dobili: $X_{012} = 52,5 \, \Omega$, $X_{013} = 76,5 \, \Omega$, $X_{023} = 0,193 \cdot (108/10,5)^2 = 20,42 \, \Omega$. Prema jedn. (5.20) računa se dalje sa strane višeg napona $U_{nV} = 108 \, \text{kV}$ elemente nadomjesne sheme: $X_{01} = 54,29 \, \Omega$, $X_{02} = -1,79 \, \Omega$, $X_{03} = 22,21 \, \Omega$.

Nadomjesne sheme transformatora, također uključujući i impedanciju zvjezdišta, izvede se analognom prosudbom. Potpune nadomjesne sheme u nultom sustavu omogućuju izračun prenesenih nultih napona kada se oba zvjezdišta (strane višeg i nižeg napona) transformatora uzemljuju direktno ili preko impedancije.

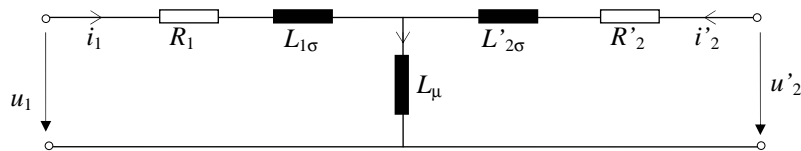
Broj prim.	Spoj namota 1 2 3	Nadomjesna shema ($Z \approx X$) komponente	
		direktne (inverzne)	nulte
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

Sl. 5.14 - Neki spojevi i nadomjesne sheme transformatora

U sl. 5.14 pokazano je sedam primjera spojeva transformatora s pripadnim nadomjesnim shemama u direktnom (inverznom) i nultom sustavu. Reaktancije se naravno mogu zamijeniti pojedinim impedancijama radi točnijeg izračuna. Potpuna nadomjesna shema direktnog sustava jednog transformatora grupe spoja Yy0 s namotom za izjednačenje (zadnja tri primjera u sl. 5.14) sastoji se od tri reaktancije (točnije impedancije).

5.3.5 Prijelazne struje kod uklapanja neopterećenog transformatora

Kod uklapanja neopterećenog transformatora pojavljuju se prijelazne struje koje mogu imati 10 do 15 puta veću tjemenu vrijednost u odnosu na nazivnu struju. S porastom prividnog opterećenja transformatora smanjuje se odnos između struje uklapanja i nazivne struje. Prijelazne struje su od značaja radi izbora i podešavanja diferencijalne zaštite transformatora, radi pada napona u mreži kod uklapanja većih transformatora i radi sklopnih prenapona kod isklapanja u prijelaznom stanju.



Sl. 5.15 - Nadomjesna shema za izračun struje uklapanja transformatora

Visina prijelazne struje može se odrediti bilo mjerenjem kod pokusa uklapanja, bilo ekstrapolacijskim izračunima. Polazna točka za izračun je pojednostavljena nadomjesna shema dvonamotnog transformatora prema sl. 5.15 (pretpostavimo da je prijenosni omjer $k \geq 1$, te je $u'_2 = k u_2$, $i'_2 = i_2/k$, $R'_2 = k^2 R_2$, $L'_{2\sigma} = k^2 L_{2\sigma}$). Priključimo li na stezaljke neopterećenog transformatora napon:

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (5.21)$$

dobijemo za vremenske promjene magnetskog toka:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{N_1} \cdot \cos(\omega t + \varphi) - \frac{R_1}{N_1} i_1 \quad (5.22)$$

Integriranjem slijedi da je magnetski tok:

$$\Phi = \Phi_r + \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\omega \cdot N_1} [\sin(\omega t + \varphi) - \sin \varphi] - \frac{R_1}{N_1} \int i_1 dt \quad (5.23)$$

gdje je Φ_r remanentni magnetski tok koji ostaje u magnetskom krugu nakon isključenja transformatora. Maksimalni tok Φ_{\max} se pojavljuje ako je pozitivan Φ_r a fazni kut $\varphi = -\pi/2$. Srednja vrijednost trajnog magnetskog toka u stacionarnom stanju (nazivni tok) je određena kao $\Phi_n = \sqrt{2} \cdot U_1 / (\omega \cdot N_1)$. Uvodeći to u jedn. (5.23) dobijemo za maksimalni tok:

$$\Phi_{\max} = \Phi_r + \Phi_n \cdot [\sin(\omega t - \pi/2) + 1] - \frac{R_1}{N_1} \int i_1 dt \quad (5.24)$$

Kod hladno valjanih limova može remanentni tok dosegnuti približno 65÷85% nazivnog toka, a kod toplo valjanih limova samo 40÷50%.

Magnetska indukcija zasićenja B_z je kod približno 2,1 T. Ako uzmemo prema jedn. (5.24) u kutnoj zagradi vrijednost 2 i zanemarimo djelatni otpor, onda iznosi maksimalni tok $\Phi_{\max} \approx 2,85 \cdot \Phi_n$. Kako je ovime zasićenje željeza daleko premašeno, dio ukupnog magnetskog toka mora se zatvoriti izvan željeza. Taj dio toka kroz neferomagnetske materijale (po svojstvima odgovaraju zraku) Φ_0 dobijemo kao:

$$\Phi_0 = \Phi_{\max} - B_z \cdot S_{Fe} = \Phi_r + 2 \cdot \Phi_n - B_z \cdot S_{Fe} \quad (5.25)$$

pri čemu je S_{Fe} poprečni presjek stupa jezgre transformatora. Nadalje imamo:

$$\Phi_0 = (B_r + 2 \cdot B_n) \cdot S_{Fe} - B_z \cdot S_{Fe} = B_n \cdot S_{Fe} \cdot \left(2 - \frac{B_z - B_r}{B_n} \right) \quad (5.26)$$

Magnetski tok u zraku može se također računati kao kada ne bi bilo željezne jezgre u stvarnosti:

$$\Phi_0 = B_0 \cdot S_{Fe} = \mu_0 \cdot \frac{i_l \cdot N_l}{l} \cdot S_0 \quad (5.26a)$$

gdje je B_0 srednja indukcija u zraku unutar namota, $S_0 = \pi \cdot (D_s / 2)^2$ površina poprečnog presjeka magnetskog toka u zraku, D_s srednji promjer primarnog namota, N_l broj zavoja primarnog namota i l (aksijalna) duljina namota. Slijedi da je tjemena vrijednost prijelazne struje:

$$i_1 = \frac{l}{\mu_0 \cdot N_l \cdot S_0} \cdot B_n \cdot S_{Fe} \cdot \left(2 - \frac{B_z - B_r}{B_n} \right) \quad (5.27)$$

Ako se uvede za nazivni tok:

$$\Phi_n = B_n \cdot S_{Fe} = \frac{u_l}{\omega \cdot N_l} \quad (5.28)$$

i reaktanciju primarnog namota bez željeza:

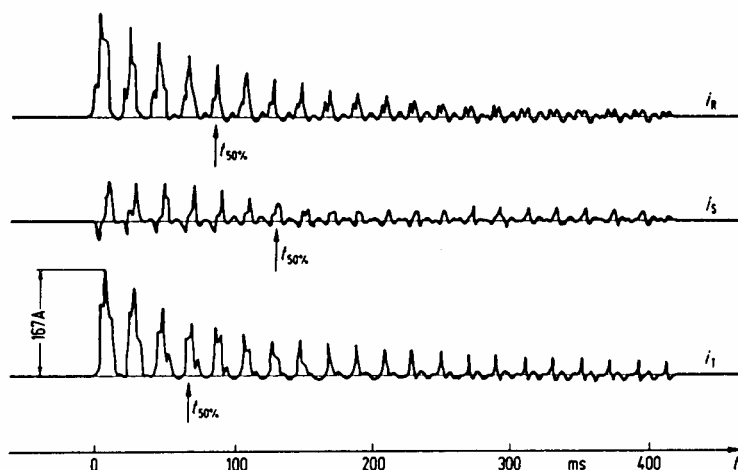
$$X_0 = \omega \cdot L_0 = \omega \cdot \mu_0 \cdot N_l^2 \cdot \frac{S_0}{l} \quad (5.29)$$

dobijemo iz prethodne jednadžbe za struju:

$$i_1 = \frac{u_1}{X_0} \cdot \left(2 - \frac{B_z - B_r}{B_n} \right) = \frac{u_1}{X_0} \cdot (2 - \beta) \quad (5.30)$$

Relacija vrijedi za jednofazne transformatore, a za trofazne transformatore treba u analognom izvodu uzeti u račun također grupu spoja. Kod zvijezda spoja na primaru je napon $u_1 = \sqrt{2} \cdot U / \sqrt{3}$, a kod trokut spoja je $u_1 = \sqrt{2} \cdot U$. Prigušenje usljed djelatnog otpora R_1 je izraženije kod manjih transformatora (ispod 0,5 MVA) i ne može se zanemariti, pa je tada potpunija relacija za struju:

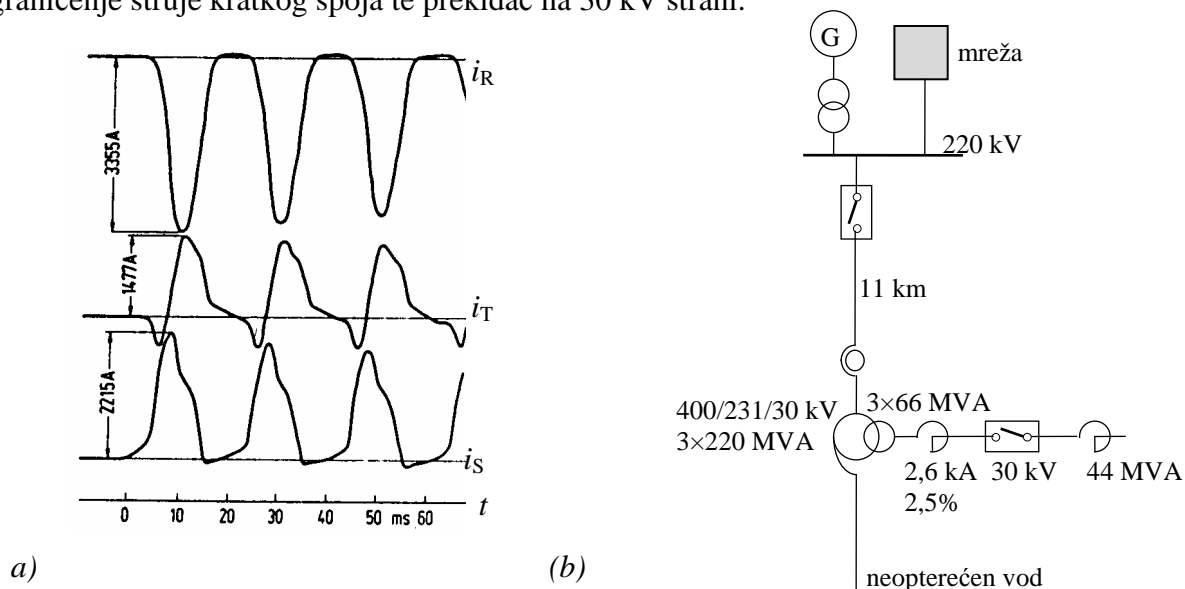
$$i_1 = \frac{u_1}{X_0} \cdot \left\{ 2 - \beta - \frac{R_1}{X_0} \cdot \left[\sqrt{\beta \cdot (2 - \beta)} + [\pi - \arccos(1 - \beta)] \cdot (1 - \beta) \right] \right\} \quad (5.31)$$



Sl. 5.16 - Struja uklapanja transformatora u praznom hodu

Na sl. 5.16 prikazan je oscilogram s najvećim prijelaznim strujama iz provedenih 200 mjerenja na transformatoru 125 kVA, grupe spoja Yz11, prijenosnog omjera 8100/396 V, napona kratkog spoja $u_k = 4,4\%$, nazivne struje na strani višeg napona $I_{nV} = 8,91$ A, a $R_1 = 4,99 \Omega$, $X_0 = 51 \Omega$, $\beta = 0,45$. Iz prethodne jednadžbe se dobije za $u_1 = \sqrt{2} \cdot 8100 / \sqrt{3}$ da je prijelazna struja $i_1 = 174$ A, odnosno svedeno na relevantnu tjemenu vrijednost nazivne struje $i_1 / (\sqrt{2} \cdot I_{nV}) = 13,9$ (najveća izmjerena struja je bila 167 A prema oscilogramu, što daje pogrešku oko 4% u odnosu na račun).

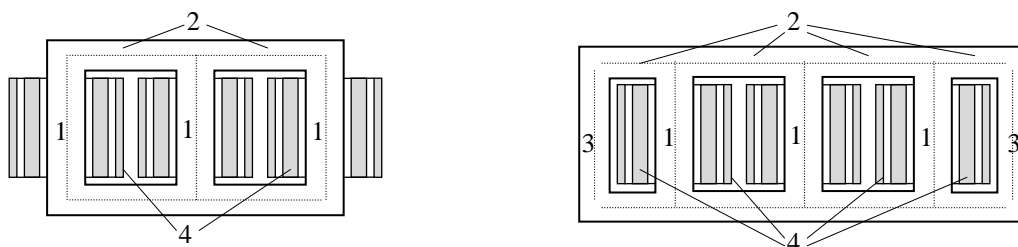
Sasvim drugačiji su odnosi kod velikih jednofaznih transformatora u štednom spoju, gdje su prijelazne struje znatno niže. Usto se prijelazna pojava odvija znatno polaganije i može trajati više sekundi. Na sl. 5.17b je primjer uklapanja štednih transformatora 3 x 220 + 3 x 66 MVA, 400 / 231 / 30 kV, pomoću 220 kV prekidača, pri čemu je uključena prigušnica (reaktor) 44 MVA na tercijaru. Nazivna struja prema oscilogramu u sl. 5.17a je $I_n = 1650$ A na 220 kV strani, a najveće mjerene vrijednosti su dosežale $i_1 / (\sqrt{2} \cdot I_{nV}) = 1,56$. Prigušenje prijelazne struje je vrlo sporo i na 10% početne vrijednosti se spusti nakon 1÷1,5 sekundi. Vrijeme smanjenja na veličinu reda stacionarne struje praznog hoda (struje magnetiziranja), koja iznosi oko 0,2% nazivne struje, mjeri se minutama. Tu su također prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja te prekidač na 30 kV strani.



Sl. 5.17 - Struja uklapanja štednog transformatora i shema mreže

5.4 Namoti transformatora i stupnjevanje prijenosa

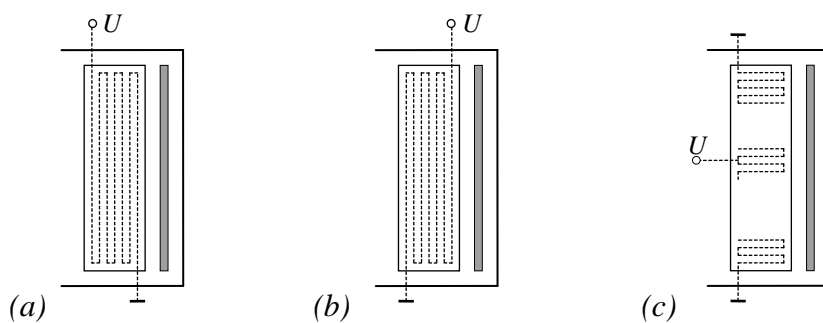
Namoti primara i sekundara transformatora postavljaju se na zajedničku željeznu jezgru. Sl. 5.18 pokazuje dvije tipične mogućnosti izvedbe oblika jezgre trofaznih transformatora: (1) stup, (2) jaram, (3) stup povratnog magnetskog toka, (4) namot. Crticama označeni tok u jezgri magnetski povezuje namote stupova. Kod transformatora veće snage može se petorostupnom jezgrom smanjiti visina jarma radi pogodnijeg transporta.



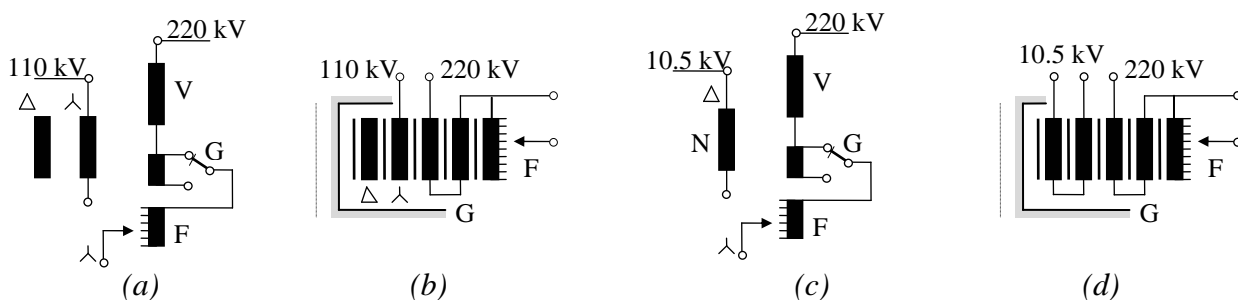
Sl. 5.19 - Izvedbe trofaznih transformatora

Kod jednofaznih transformatora, primjerice štednih, moraju se uzeti četvorostupne jezgre kod čega su dva stupa s namotima. Izvedba cilindričnih namota kod kružnog presjeka stupa jezgre, njihova izolacija i smještaj jednog naspram drugog i naspram jezgre određeni su nazivnom strujom, odvodom topline, nazivnim naponom i traženom dielektričnom čvrstoćom kod ispitivanja izmjeničnim i udarnim naponom propisanih nivoa, kao i zahtjevima na naprezanje u slučajevima kratkog spoja. Na raspored namota također utječe i traženo područje regulacije napona i s time povezani smještaj dodatnih namota između otcjepa za grubo i fino reguliranje napona.

Kod dvonamotnih transformatora se obično smješta namot višeg napona bliže jezgri. Namot višeg napona se izvodi kao slojni (po cijeloj duljini) ili prstenasti, kako je ilustrirano u sl. 5.19 (a odnosno c). Kod izvedbe namota prema sl. 5.19a (uzemljen unutarnji kraj namota) treba ispitati glavnu izolaciju kod ispitnih napona za niži napon između namota višeg i nižeg napona. Kod izvedbe namota prema sl. 5.19b (uzemljen vanjski kraj namota) potrebno je mjerenje glavne izolacije kod ispitnih napona za viši napon. Ovaj raspored namota ima prednost kod postavljanja stupnjevanog sklopke zvjezdišta radi podešavanja napona transformatora. Raspored priključaka na visokom naponu u sredini namota (sl. 5.19c, uzemljeni krajevi namota) ima prednost da su ovdje smanjeni ispitni naponi namota prema jarmu. Primjenu ovakve izvedbe namota imamo primjerce kod štednih transformatora 735 / 315 kV bez stupnjevanog sklopke.

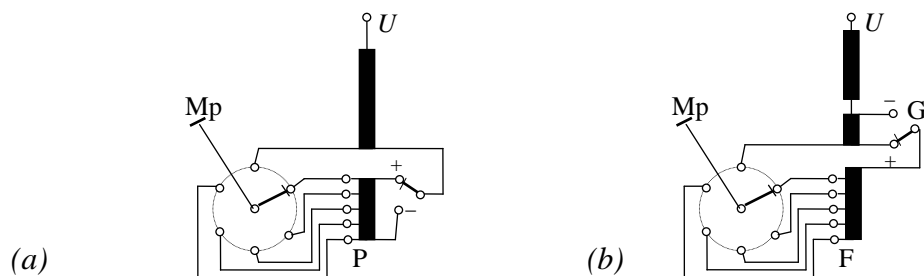


Sl. 5.19 - Izvedba namota višeg napona VN transformatora



Sl. 5.20 - Transformatori sa zvjezdišnom stupnjevanom sklopkom

Kod mrežnih transformatora i transformatora u elektranama sa stupnjevanim sklopkama predviđaju se uz namot višeg napona odcjepi za grubo podešavanje napona i odcjepi za fino podešavanje napona. Na sl. 5.20 je primjer mrežnog transformatora napona 220 / 110 kV, snage 200 MVA, grupe spoja YNyn+d5 sa stupnjevanom sklopkom u zvjezdištu: (a) spojevi namota, (b) raspored namota na stupu (namot za grubo G i fino F regulaciju). Na sl. 5.21c ÷ d prikazan je analogan primjer blok-transformatora napona 10,5(21)/220 kV, grupe spoja Ynd5, gdje su oba dijela namota nižeg napona postavljena koncentrično obzirom na osnovni namot višeg napona.



Sl. 5.21 - Podešavanje prijenosnog omjera transformatora stupnjevanom sklopkom

Na sl. 5.21 pokazane su shematski dvije osnovne mogućnosti podešavanja prijenosnog omjera transformatora na višem naponu pomoću odcjepa: (a) jedinstven namot za podešavanje, (b) namoti za grubo G i fino F podešavanje. Kod većeg opsega podešavanja, primjerice $\pm(16\% - 22\%)$ uzima se rješenje s grubim i finim podešavanjem (sl. 5.21b). Grubim podešavanjem se uključuje direktno ili inverzno zavoje za grubu regulaciju, čime se postiže veći raspon regulacije s istim brojem zavoja. Fina regulacija se postiže stupnjevanom sklopkom i finijim koracima (s manjim brojem zavoja). Prijelaz s jednog stupnja na susjedni mora se provoditi bez prekidanja struje, te se koriste preklopni otpornici kako dijelovi namota ne bi ostali u kratkom spoju samo s vlastitim djelatnim otporom i kroz njih protekla prevelika struja. Ovo istodobno omogućava vrlo dobru stupnjevanost regulacije bez neugodnih prijelaznih pojava.

Izolacija transformatora (namota, provoda, stupnjevanih sklopki) morabit tako dimenzionirana da može izdržati ne samo trajno priključeni pogonski napon nego također povišenje napona (kod blok-transformatora pri naglom rasterećenju generatora) i kratkotrajne udarne i sklopne prenapone. Treba istaknuti da odvodnici prenapona na stezaljkama transformatora imaju odlučujući utjecaj na traženi nivo izolacije. Nivo izolacije transformatora se određuje na temelju najvećeg dopuštenog trajnog pogonskog napona, faktora kratkog spoja, mogućnosti odziva kod sklopnih i udarnih prenapona i zaštitnog nivoa odvodnika prenapona. Za standardizirane napone su ove veličine određene IEC normama. Uzme li se primjerice visoke izmjenične ispitne napone, 1-minutno ispitivanje je općenito relevantna veličina za izolaciju transformatora.

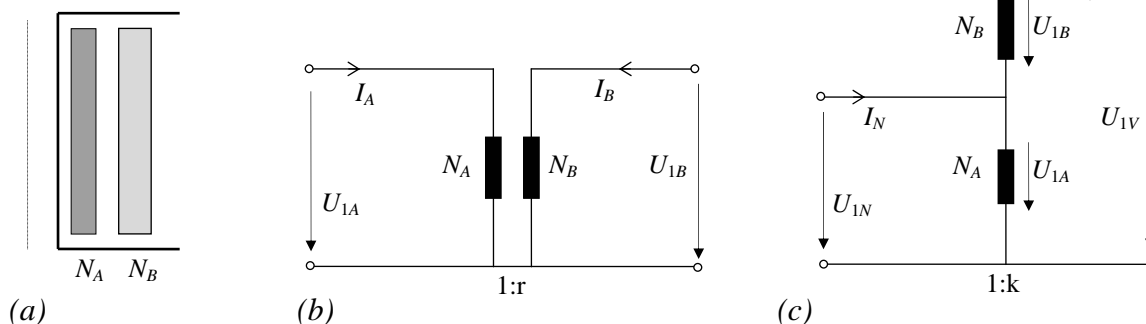
Udarni prenaponi sa strmim čelom kod dolaženja u transformator postavljaju značajne zahtjeve na ulazne zavoje, ali u daljem tijeku također na sve dijelove namota i izolaciju stupnjevane sklopke. Mjerenja su pokazala da raspored izolacije s barijerom u ulju transformatora podižu probojnu čvrstoću na sklopne prenapone (250/2500 μ s) koja je tek malo ispod čvrstoće na udarne prenapone (1,2/50 μ s). Obično se može uzeti da je oko 80% nazivnog udarnog napona. S druge strane se smije uzeti da je čvrstoća na sklopne prenapone približno kod 1,4 puta tjemena vrijednost nazivnog trajnog izmjeničnog napona.

5.5 Štedni transformatori

Ako se naponi u mrežama s niskoomskim uzemljenjem zvjezdista, koje želimo povezati, ne razlikuju više od faktora $2 \div 3$, koriste se štedni transformatori bilo kao trofazni, bilo sastavljeni iz tri jednofazne jedinice. U odnosu na pune transformatore, štedni transformatori omogućuju uštedu u materijalu, težini i gubicima tijekom rada. Kod transportnih ograničenja, mogu se izvesti jedinice veće snage nego kod punih transformatora.

Na sl. 5.22a pokazana su dva koncentrična namota na željeznoj jezgri s N_A i N_B zavoja. Nadomjesna shema za puni transformator je u sl. 5.22b, a za štedni transformator na sl. 5.22c

uz odgovarajuće vezanje dva namota. Polazeći od nadomjesnih shema u sl. 5.22, može se za tipsku snagu S_{n0} i prenesenu snagu S_{np} pisati:

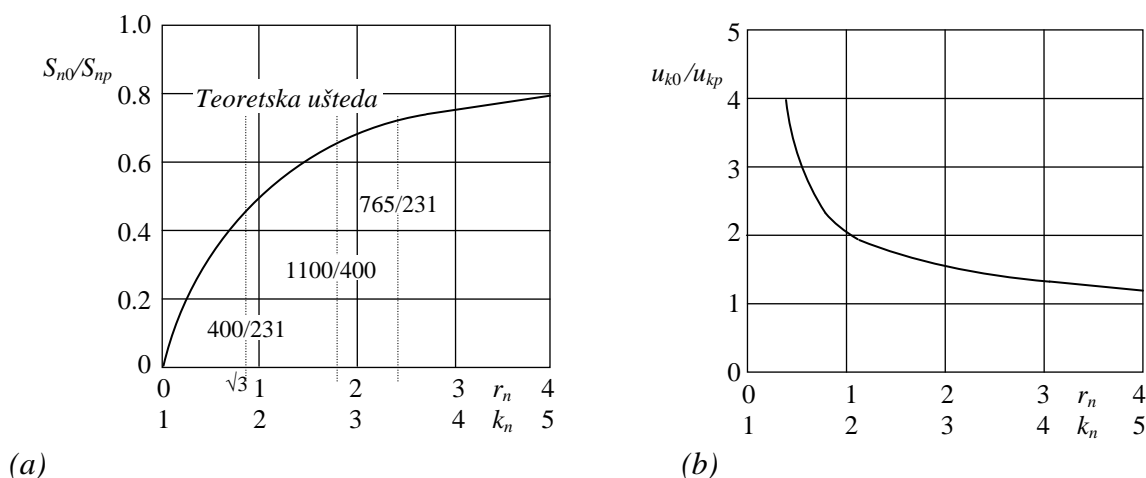


Sl. 5.22 - Namoti i sheme punog i štednog transformatora

$$\begin{aligned} S_{n0} &= 3 \cdot U_{1nA} \cdot I_{nA} = 3 \cdot U_{1nB} \cdot I_{nB} \\ S_{np} &= 3 \cdot U_{1nN} \cdot I_{nN} = 3 \cdot U_{1nV} \cdot I_{nV} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Prema slici (uvodimo indeks nazivne vrijednosti n) vrijedi nadalje da je $U_{1nA} = U_{1nN}$, $I_{nB} = I_{nV}$ kao i $U_{1nV} = U_{1nA} + U_{1nB}$, $I_{nN} = I_{nA} + I_{nB}$. Za omjer tipske i prenesene snage štednog transformatora dobije se tada:

$$s = \frac{S_{n0}}{S_{np}} = \frac{I_{nA}}{I_{nN}} = \frac{U_{nB}}{U_{nV}} = \frac{U_{nB}/U_{nA}}{1 + U_{nB}/U_{nA}} = \frac{r_n}{1 + r_n} = \frac{U_{nV} - U_{nN}}{U_{nV}} = \frac{k_n - 1}{k_n} \quad (5.33)$$



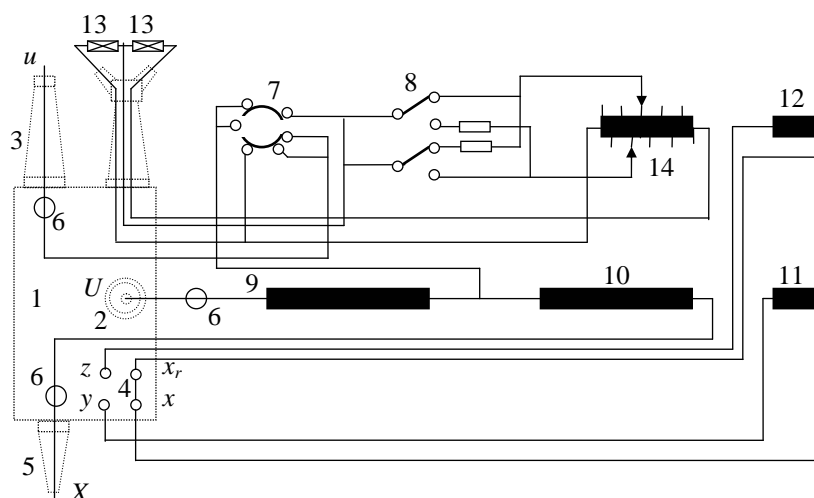
Sl. 5.23 - Ovisnosti snage i napona kratkog spoja o prijenosnom omjeru

gdje je $r_n = N_B / N_A = U_{nB} / U_{nA}$ i $k_n = U_{nV} / U_{nN}$. Primjerice za štedni transformator s prijenosnim omjerom $k_n = 400 / 231 = \sqrt{3}$ vrijedi $s = S_{n0} / S_{np} = (\sqrt{3} - 1) / \sqrt{3} = 0,423$ i $r_n = k_n - 1 = \sqrt{3} - 1 = 0,732$. Trošak za gradnju štednog transformatora u ovom slučaju bi teoretski iznosio samo 42% troška za gradnju punog transformatora jednake tipske snage. Relativni troškovi izrade štednog transformatora su ipak nešto veći od teoretske vrijednosti obzirom da se općenito predviđa i namot za izjednačenje u trokut spoju, te da promjena cijene s veličinom transformatora nije linearna.

Sl.5.23 pokazuje (a) ovisnost omjera snage $s = S_{n0}/S_{np}$ i (b) napona kratkog spoja u_{k0}/u_{kp} o prijenosnom omjeru k_n odnosno omjeru brojeva zavoja $r_n = N_B/N_A$ serijskog i paralelnog namota kod konstantne prenesene snage. Ušteda u materijalu štednog transformatora povezana je dakle sa smanjenjem napona kratkog spoja. Naponi kratkog spoja kod štednih transformatora s prijenosnim omjerom $k_n \approx 400 \text{ kV} / 231 \text{ kV}$ nalaze se između 7% i 10,5% ,

dakle značajno niže u odnosu na napone kratkog spoja kod punih transformatora 400 kV (sl. 5.5).

Štedni transformatori u zvijezda spoju za primarni i sekundarni namot (paralelni ili serijski namot) imaju većinom također namot za izjednačenje u trokut spoju (tercijarni namot) predviđen za skoro trećinu prenesene snage. Na njega mogu biti priključeni reaktori ili kondenzatori za kompenzaciju kapacitivnih odnosno induktivnih jalovih snaga u mreži. Djelomice se također priključuju generatori ili sinkroni kompenzatori. Za podešavanje napona (u uzdužnom ili poprečnom smjeru) može se u istom kotlu smjestiti dodatni transformator sa stupnjevanim namotom. Na sl. 5.24 je shematski primjer jednog pola štednog transformatora s uzdužnim podešavanjem napona ili pod kutem $\pm 60^\circ$, napona $(400/\sqrt{3}) / (231/\sqrt{3}) / 30$ kV. Na kotlu (1) su priključak višeg napona (2), priključak srednjeg napona (3), priključci strane nižeg napona (4), zvijzdište (5), strujni transformator (6), sklopka za direktno ili inverzno spajanje stupnjevanog namota (8) za regulaciju, stupnjevana sklopka s preklopnim otporima (7), serijski namot (9), paralelni namot (10), tercijarni namot (11), uzbudni namot za stupnjevanje namot (12), odvodnici prenapona (13) i otcjepi za finu regulaciju (14).



Sl. 5.24 - Shema namota jedne faze štednog transformatora s podešavanjem

Štedni transformatori sastavljeni iz tri jednofazne jedinice s jednim namotom za izjednačenje u trokut spoju su tronamotni transformatori s odgovarajućom nadomjesnom shemom (vidi 5.3.3). za direktni i nulti sistem. Ove nadomjesne sheme nalaze se u sl. 5.14. Treba obratiti pažnju na posebnu nadomjesnu shemu u nultom sistemu kod štednog transformatora s izoliranim zvijzdištem. Tri nulte reaktancije sačinjavaju u ovom slučaju rezonantni trokut, tako da nije moguća pretvorba u jedan ekvivalentni zvijezda spoj.

6. **Vlastita potrošnja elektrane**

6.1 ***Zadaća vlastite potrošnje***

U termoelektranama su potrebna brojna električna postrojenja koja omogućavaju niz funkcija u njihovom tehničkom procesu, primjerice dovode goriva, zraka i vode, odvođe ostataka izgaranja, mjerenje, upravljanje, kontrolu i regulaciju, rasvjetu, ventilaciju i dr. Električna energija za ove potrebe koje osiguravaju nesmetan rad kompletne elektrane definira se kao vlastita potrošnja. Njena veličina mora biti prilagođena potrebama energetske blokove i sa visokim stupnjem sigurnosti napajanja. Kod velikih blokova elektrana imamo u osnovi sljedeća postrojenja:

1. Postrojenje 6 kV ili 10 kV za napajanje pogona (asinkroni motori snaga od 100 kW do reda MW);
2. Postrojenja 380, 500 ili 660 V za niskonaponske elektromotorne pogone, rasvjetu i druge uređaje;
3. Postrojenja istosmjernog i izmjeničnog napona za napajanje brojnih uređaja za upravljanje, regulaciju, zaštitu, mjerenja i automatiku.

Veličina vlastite potrošnje ovisi bitno o vrsti goriva koje se koristi. Kod elektrana snage 300 do 600 MW na plin, mazut, ugljen ili kombinirano loženje iznosi snaga transformatora vlastite potrošnje od 10 do 15% nazivne snage elektrane. Kod nuklearnih elektrana sa reaktorima hlađenim lakom vodom može se računati sa sličnim procentima. Potrebna snaga za vlastitu potrošnju elektrane u trajnom pogonu bez poremećaja iznosi međutim samo 5 do 7% od nazivne snage elektrane.

Napojne pumpe parnog kotla imaju općenito najveću potrošnju i njihova snaga doseže oko 4% nazivne snage generatora. Mogu se koristiti pumpe sa turbinskim (parnim) pogonom, ali kao rezerva svakako dolaze dvije pumpe sa elektromotornim pogonom, od kojih svaka ima po pola potrebne snage. Inače se bez parnog pogona kod velikih blokova, radi velikih struja zaleta elektromotora, mora pogon napojnih pumpi dijeliti na manje jedinice (dvije po 50%, tri po 33,3% ili četiri po 25% od potrebne ukupne snage), kod čega se kao rezerva predviđa još

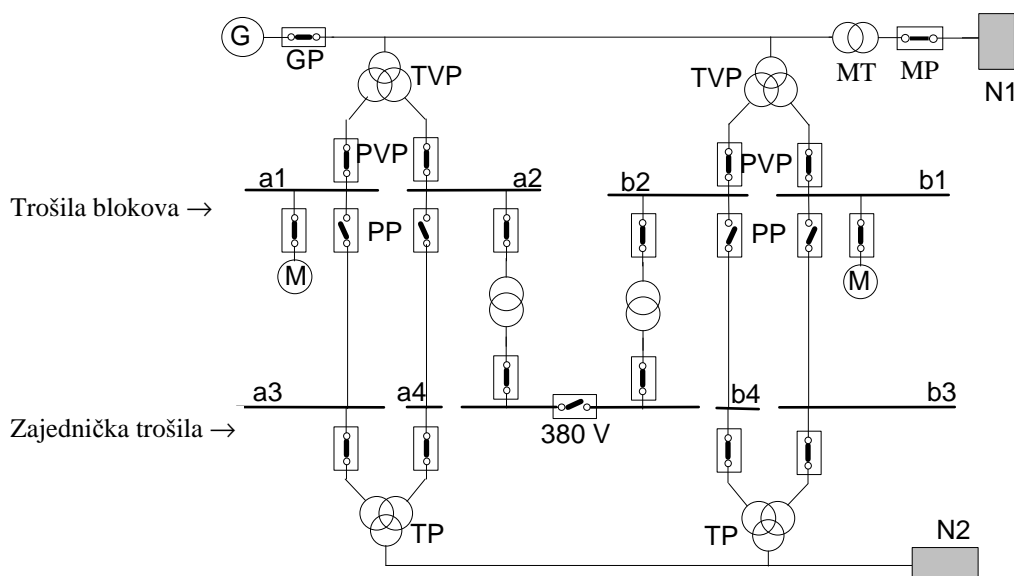
jedna jedinica. Treba napomenuti da ovdje imaju prednost motori napajani iz ispravljačkih postrojenja radi bolje regulacije broja obrtaja napojne pumpe i manje struje zaleta.

Kod termoelektrane je instalirana snaga elektromotora vlastite potrošnje između 80 i 90% na visokom naponu, a 10 do 20% na niskom naponu. Pri tome su niskonaponski motori daleko brojniji i njihova ukupna snaga raste približno proporcionalno s veličinom bloka, dok se snaga visokonaponskih motora tek malo povećava sa porastom snage bloka.

6.2 Mreža vlastite potrošnje

U normalnom pogonu se mreža vlastite potrošnje većih blokova napaja sa stezaljki generatora preko jednog ili dva pripadna transformatora. Radi sigurnosti napajanja koriste se obično posebne sabirnice. Na sl. 6.1 prikazana je jednopolno osnovna shema napajanja vlastite potrošnje jedne termoelektrane 600 MW sa podacima: G generator 21 kV, 750 MVA, $\cos \varphi = 0,8$; BT blok-transformator 750 MVA; TVP transformator za napajanje sa bloka 36/18/18 MVA; TP transformator za puštanje u rad elektrane; PP prekidač za puštanje u rad elektrane; N1 spojna mreža; N2 pomoćna mreža za puštanje u rad elektrane; a1, a2, b1, b2 visokonaponsko postrojenje za napajanje bloka; a3, a4, b3, b4 visokonaponsko postrojenje opće potrošnje; GP generatorski prekidač; MP mrežni prekidač; PVP prekidač za napajanje vlastite potrošnje sa bloka.

Potrebna snaga transformatora za puštanje u rad elektrane je veća nego snaga transformatora za napajanje sa bloka, ali se nerijetko ovi transformatori uzimaju jednake snage. U normalnom pogonu su (PP) prekidači otvoreni, a napajanje ide preko dva tronamotna transformatora sa bloka. Kod puštanja elektrane u rad napajanje ide sa mreže N2, prekidači PP su zatvoreni, a MP i PVP otvoreni.



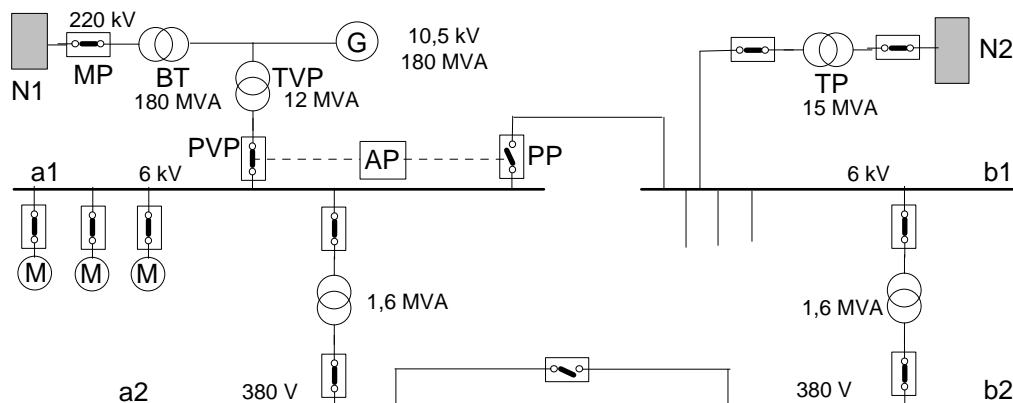
Sl. 6.1 - Principijelna shema napajanja vlastite potrošnje TE 600 MW

Svrha napajanja preko dva transformatora sa po dva namota na nižem naponu i četiri sistema sabirnica jeste smanjenje snaga kratkog spoja u ovom visokonaponskom postrojenju i povećanje pouzdanosti napajanja. Trošila na niskom naponu se takođe napajaju sa dva sistema sabirnica koji se mogu povezati za slučaj ispada jednog transformatora. Pojedine niskonaponske sabirnice mogu biti predviđene za sasvim određene dijelove tehničkog procesa u elektrani. Možemo predvidjeti primjerice sabirnice za parni kotao, za pomoćni pogon kotla, za turbinsku jedinicu i dr. Preko sabirnica (a3, b3) za opću potrošnju napajaju se trošila koja

po funkciji ne pripadaju blokovima, kao primjerice ona u dopremi ugljena i izdvajanju prašine. Rješenje mreže vlastite potrošnje za nuklearne elektrane uzima se slično onome na sl. 6.1 . Bitna razlika je u napajanju za slučaj izvanrednih stanja u režimu rada elektrane.

6.2.1 Izbor transformatora vlastite potrošnje

Prema veličini bloka elektrane odabire se jedan ili dva transformatora vlastite potrošnje. Na sl. 6.2 prikazana je shema primjera sa jednim 150 MW blokom, gdje je dovoljno odabrati 6 kV rasklopno postrojenje za snagu isklapanja 250 MVA i nazivnu struju 1250 A. Automatika za preklapanje napajanja sa bloka G na pomoćnu mrežu N2 i obrnuto označena je sa AP, a ostale oznake su kao na sl. 6.1 .



Sl. 6.2 - Principijelna shema napajanja vlastite potrošnje TE 150 MW

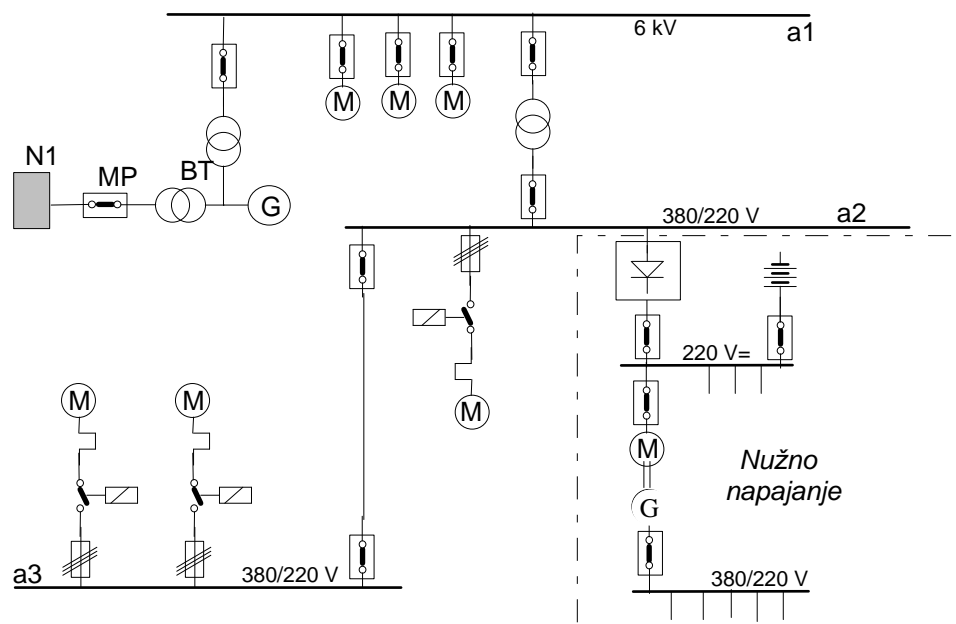
Kod velikih blokova nije više moguće napajanje vlastite potrošnje sa samo jednim transformatorom radi previsokih nazivnih i kratkospojnih struja na 6 ili 10 kV. Zato se odabiru dva transformatora ili čak dva transformatora sa po dva namota na strani nižeg napona (sl. 6.1).

Podjela napajanja uzima u obzir prostorni razmještaj trošila i dozvoljeni pad napona na sabirnicama sa kojih se napajaju, što posebice vrijedi za direktno uključivanje velikih asinkronih motora ili preklapanje napajanja kompletne vlastite potrošnje na pomoćnu mrežu za puštanje elektrane u rad.

Grupe spojeva blok-transformatora, transformatora vlastite potrošnje i transformatora za puštanje elektrane u rad moraju biti međusobno usklađene. Također treba paziti na redoslijed faza prijenosne i pomoćne mreže. Za blok-transformatore se obično uzima grupa spoja YNd5, a za transformatore vlastite potrošnje grupa spoja Yy0. Za transformatore za napajanje trošila na niskom naponu uzima se najčešće grupa spoja Dyn5 kako bi se mogle osigurati zaštitne mjere sistemom nulovanja.

6.2.2 Napajanje na niskom naponu

Postrojenja niskog napona dijele se obično na grupe trošila i postavljaju na težišnim mjestima potrošnje ili skupa s postrojenjima drugih grupa kao centralno izvedeno postrojenje. U principijelnoj jednopolnoj shemi na sl. 6.3 izvedena je ova podjela na niskonaponske glavne sabirnice a2 i niskonaponske podsabirnice a3, a uokvireno označeno je napajanje za slučaj nužde. U konvencionalnim termoelektranama je snaga vlastite potrošnje u slučaju kvara mala u poređenju sa onom u normalnom pogonu. Kod nuklearnih elektrana je ona jako ovisna o tipu reaktora i veća nego kod konvencionalnih elektrana.



Sl. 6.3 - Principijelna shema NN napajanja vlastite potrošnje TE

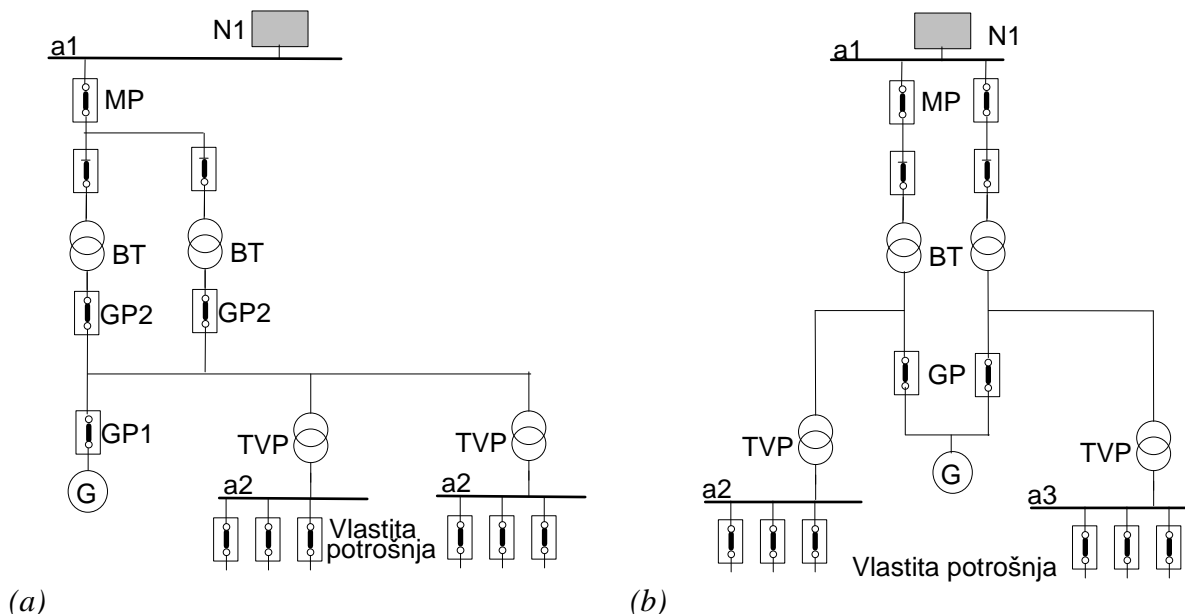
Na sl. 6.3 je jednopolna shema vlastite potrošnje konvencionalne termoelektrane za niskonaponska postrojenja, sabirnica istosmjernog napona i sabirnica za slučaj kvara odnosno nužde (naravno da se uzimaju najmanje dvije paralelne grane, kako je pokazano i u slikama 6.1 i 6.2). Sabirnice istosmjernog napona napajane su za slučaj nužde iz baterije akumulatora čiji kapacitet mora omogućiti napajanje trošila u trajanju između 2 i 4 sata. Inače se ove sabirnice napajaju preko ispravljača. Nužno napajanje izmjeničnih trošila ide sa ovih sabirnica preko trofaznog pretvarača (motor - generator u sl. 6.3). Detalji automatske regulacije napona ovdje nisu prikazani.

Kada u slučaju kvara pomoćni pogon ne može biti napajan ni sa strane bloka niti sa strane pomoćne mreže, mora se blok zaustaviti, t.j. turbina i generator dovesti u stanje mirovanja i to pomoću napajanja za slučaj nužde.

6.3 Sigurnost napajanja vlastite potrošnje

Rješenje vlastite potrošnje i mjere osiguranja napajanja imaju odlučujući utjecaj na raspoloživost termoelektrane kao i na stvarnu raspoloživost spojne mreže. Da bi napajanje vlastite potrošnje učinili neovisnim o vanjskim utjecajima, treba predvidjeti sljedeće mogućnosti napajanja:

1. Napajanje vlastite potrošnje sa bloka izvodi se pomoću odvoda sa stezaljki generatora. Kod velikih blokova su ovi odvodi u oklopljenoj izvedbi, čime se izvanredno smanjuje vjerojatnost višepolnog kratkog spoja na kritičnim mjestima.
2. Rezervno napajanje vlastite potrošnje preko transformatora za puštanje elektrane u rad sa pomoćne mreže bilo kod mirovanja turbo-jedinice, bilo kod kvara (brzo preklapanje). Kod mirovanja turbo-jedinice može se za napajanje vlastite potrošnje koristiti blok-transformator ako se postavi generatorski prekidač između stezaljki generatora i odvoda za vlastitu potrošnju.
3. Napajanje za slučaj nužde iz autonomnog postrojenja, čija raspoloživost ne ovisi o bloku ili mreži (automatsko uključenje stacionarne akumulatorske baterije ili diesel-agregata s trenutnim startanjem).



Sl. 6.6 - Napajanje velikog bloka bez pomoćne mreže

Kod kvarova na mreži koji dovode do smanjenja frekvencije ispod 47,6 Hz ili do potpunog sloma napona, ne može se više računati na sigurnost napajanja vlastite potrošnje prema sl. 6.4b, jer ostaje samo nužna obustava rada bloka. Nedostatak spoja može se izbjeći uključivanjem još jednog generatorskog prekidača GP prema shemi na sl. 6.6b. Ovakvo rješenje izgleda ispravno kada nije na raspolaganju pomoćna mreža zadovoljavajuće sigurnosti i opteretivosti. Isto vrijedi kada su struje zaleta kod ponovnog ukapčanja motora vlastite potrošnje vrlo velikih blokova prilikom automatskog prekapčanja tako velike da zahtijevaju preskupa rješenja.

Da li ćemo koristiti generatorski prekidač ili prekidni rastavljač ovisi o odabranoj koncepciji zaštite bloka (sl. 6.6a). Jeftiniji prekidni rastavljač će zadovoljiti na mjestu (GP1) ako se koristi samo kod puštanja u rad, obustave rada i sinkroniziranja na mrežu. Na mjestu GP2 moramo pak imati generatorski prekidač radi zaštite primjerice od kvarova unutar blok-transformatora ili na vezi blok - transformatora s rasklopnim postrojenjem prijenosne mreže (kod udaljenosti do cca 20 km) kada u krugu elektrane nije predviđeno rasklopno postrojenje (primjerice 220 ili 380 kV).

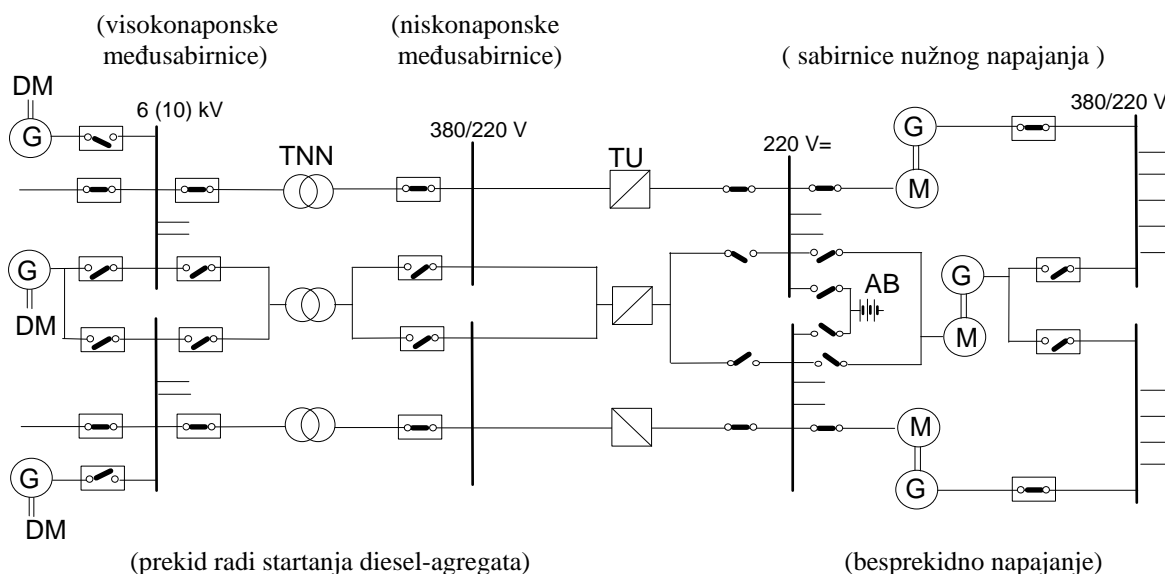
Kod vrlo velikih blokova (1200 MW i više) pojavljuju se ograničenja u mogućnostima transporta blok - transformatora, te se znaju odabrati dvije jedinice po pola snage (veća ukupna cijena se kompenzira i manjom štetom za slučaj ispada jedne jedinice). U takvim prilikama se shema iz sl. 6.5b logično proširuje kako je prikazano na slikama 6.6a (veliki blok bez pomoćne mreže, s dva blok-transformatora i tri generatorska prekidača) ili 6.6b (veliki blok bez pomoćne mreže, s dva blok-transformatora i dva generatorska prekidača).

6.3.2 Obustava rada bloka i napajanje za nuždu

Kada uslijed kvara prestrane funkcionirati napajanje vlastite potrošnje sa bloka i rezervno napajanje, mora blok obustaviti rad. Kod konvencionalnih termoelektrana mora biti osigurano napajanje za nuždu slijedećih pomoćnih pogona:

- uljna pumpa za podmazivanje ležaja (za obustavni režim),
- pumpa za rasterećenje ležaja kod većih blokova,
- uljna pumpa za brtvljenje na osovinama kod vodikom hlađenih generatora,
- pogon produženog hlađenja u postupku obustave rada,

- nužna rasvjeta u pogonu i na prometnim pravcima,
- nužno napajanje sigurnosnih uređaja (posebno u visokotlačnom dijelu), uređaja za mjerenje, regulaciju, upravljanje, zaštitu i automatiku, kao i povratnog javljanja i alarma.



Sl. 6.7 - Nužno napajanje pomoću diesel - agregata

Ova trošila se napajaju iz akumulatorske baterije direktno ili preko pretvarača odnosno ispravljača (sl. 6.3). Radi visokog zahtjeva na pouzdanost, u elektrani se obično predviđaju dvije ovakve baterije sa pripadnim uređajem za automatsko punjenje. U nuklearnim elektranama je potrebna snaga za slučaj nužde previsoka za rješenje sa baterijom, pa se za takva napajanja koriste diesel - agregati. Predviđaju se agregati sa trenutnim startanjem ili jedinice u besprekidnom radu s rezervom.

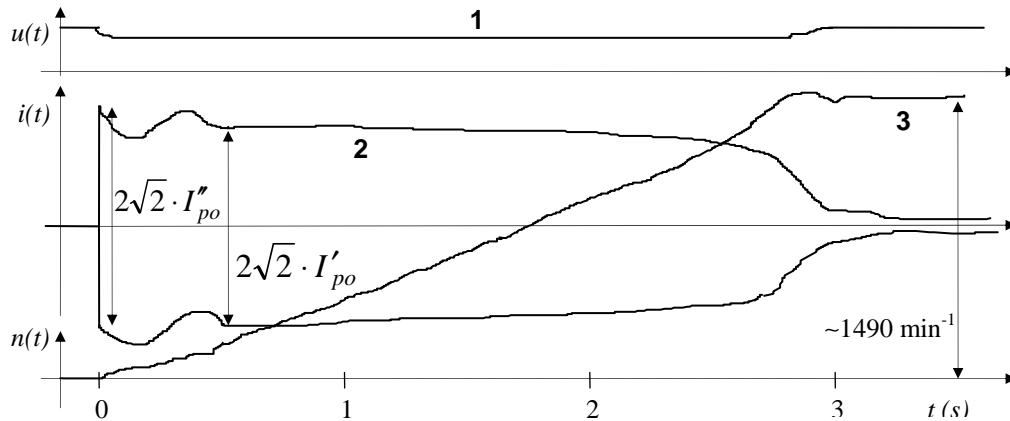
Na sl. 6.7 prikazan je primjer nužnog napajanja pomoću diesel-agregata (motora DM s generatorom G) koji starta tek u slučaju kvara, ali može imati snagu od više MW. Generator G agregata ima samouzbudu ili napajanje uzbude sa mreže za nuždu. Sabirnice za nužno napajanje (niski i istosmjerni napon) napajaju se sa odgovarajućih ispravljača 3~/= (označenih sa TU), odnosno sa akumulatorskih baterija AB. Kao alternativa pretvarača motor-generator, za napajanje niskonaponskih sabirnica koriste se usmjerivači. Većinom se odabire napon 3~380 V. Baterije napajaju sabirnice istosmjernog napona (većinom 220 V) i osiguravaju besprekidan rad uređaja za mjerenje, regulaciju i upravljanje. Ovo je od posebnog značaja kod nuklearnih elektrana. Slijedom tehničkih i zakonskih zahtjeva odabiru se rješenja koja osiguravaju visoku rezervu, primjerice 4×50% ili 3×100% potrošnje u slučaju nužde.

6.4 Održavanje napona vlastite potrošnje

Problem održavanja napona u mreži vlastite potrošnje ima posebnu važnost u upuštanju i radu elektrane. Kod uključivanja velikih visokonaponskih asinkronih motora sa kaveznim rotorima dolazi do znatnih padova napona u mreži. Struje zaleta takvih motora su 4 do 6 puta veće od nazivne struje motora.

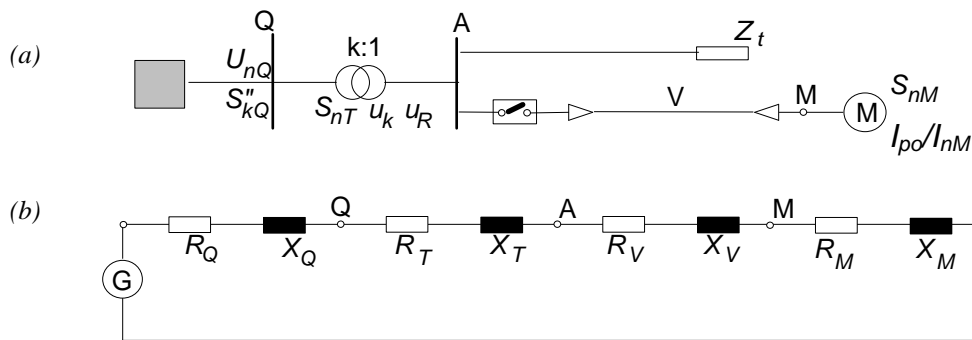
Na sl. 6.8 prikazan je oscilogram zaleta asinkronog motora koji pogoni pumpu kondenzata u kotlovnici. Nazivni podaci za motor su: napon $U_{nM} = 6 \text{ kV}$, struja $I_{nM} = 635 \text{ A}$, snaga $P_{nM} = 5,8 \text{ MW}$, faktor snage $\cos \varphi_{nM} = 0,90$, nazivna brzina vrtnje $n = 1490 \text{ o/min}$, frekvencija $f = 50 \text{ Hz}$, omjer početne struje zaleta i nazivne struje kod 6 kV je $I_{po}/I_{nM} \approx 6$. Iz krivulje I se vidi da je pad napona $\Delta U = U_n - U = 6,0 - 4,8 = 1,2 \text{ kV}$, odnosno $\Delta u = 20\%$. Prema krivulji 2

je početna struja zaleta $I''_{po} \approx 3300 \text{ A} = 5,2 \cdot I_{nM}$, a prijelazna struja zaleta $I'_{po} \approx 3050 = 4,8 \cdot I_{nM}$. Krivulja 3 prikazuje promjenu brzine vrtnje n tijekom zaleta.



Sl. 6.8 - Zalet 6 kV asinkronog motora pumpe kondenzata

Na sl. 6.9 je primjer za proračun pada napona u prvom trenutku nakon uključivanja jednog kaveznog motora na sabirnice A. Sabirnice su napajane iz mreže (točka Q) preko transformatora čiji je prijenosni omjer $k \geq 1$, snaga S_{nT} , napon kratkog spoja u_k , a njegova djelatna komponenta se računa kao $u_r = \Delta P / S_{nT}$ (ΔP su djelatni gubici transformatora). Sabirnice A mogu kroz cijelo vrijeme zaleta napajati i neki teret predopterećenja Z_t . Za napojnu točku Q zadani su obično samo napon U_{nQ} i početna snaga trolnog kratkog spoja S''_{kQ} .



Sl. 6.9 - Uklapanje kaveznog motora: (a) jednopolna shema, (b) direktni sustav bez predopterećenja

Kada točne vrijednosti nisu poznate, pretpostavlja se reaktancija mreže $X_Q = 1,1 \cdot U_{nQ}^2 / S''_{kQ}$, gdje je snaga kratkog spoja (uobičajeno je koristiti struju trolnog kratkog spoja) $S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I''_{k,3p}$, dok je djelatni otpor mreže $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$. Tada preračunavanje na stranu nižeg napona transformatora daje za impedanciju napojne mreže:

$$\dot{Z}_Q = R_Q + jX_Q = \frac{1,1 \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQ} \cdot k^2} \cdot (0,1 + j0,953) \quad (6.1)$$

Kako vrijedi da je $u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}$, dobijemo za impedanciju transformatora:

$$\dot{Z}_T = R_T + jX_T = \frac{U_{nN}^2}{S_{nT}} \cdot (u_r + j \cdot u_x) \quad (6.2)$$

gdje je U_{nN} nazivna vrijednost na strani nižeg napona. Pomoću omjera struje zaleta i nazivne struje može se odrediti impedancija motora:

$$Z_M = \frac{1}{I_{po}/I_{nM}} \frac{U_{nM}}{\sqrt{3} \cdot I_{nM}} = \frac{1}{I_{po}/I_{nM}} \frac{U_{nM}^2}{S_{nM}} \quad (6.3)$$

Ako se za trenutak ukapčanja uvede da je $\vec{Z}_M = Z_M (\cos \varphi_{po} + j \sin \varphi_{po})$, može se polaziti od jedn.(6.3) odrediti R_M i X_M . Većinom se može kod visokonaponskih motora zanemariti djelatni otpor i uzeti da je $Z_M = X_M$.

Ukoliko je impedancija transformatora Z_T vrlo mala u odnosu na impedanciju predopterećenja Z_t sabirnica A, može se zanemariti utjecaj tog predopterećenja na visinu napona kod ukapčanja (sl. 6.12). U praksi vrijedi većinom da je Z_t veće od $10 \times Z_T$. Dakle, pod pretpostavkom da je odnos impedancija $Z_Q \ll Z_T$, može se kod ukapčanja motora računati napon na sabirnicama A:

$$\vec{U}_{1A} = \frac{\vec{U}_{1Q}}{k} \frac{\vec{Z}_M + \vec{Z}_V}{\vec{Z}_T + \vec{Z}_M + \vec{Z}_V}; \quad U_{1A} \approx \frac{U_{1Q}}{k} \frac{X_M + X_V}{X_T + X_M + X_V} \quad (6.4)$$

gdje je impedancija voda Z_V , a na stezaljkama motora M je napon određen sa:

$$\vec{U}_{1M} = \frac{\vec{U}_{1Q}}{k} \frac{\vec{Z}_M}{\vec{Z}_T + \vec{Z}_M + \vec{Z}_V}; \quad U_{1M} \approx \frac{U_{1Q}}{k} \frac{X_M}{X_T + X_M + X_V} \quad (6.5)$$

Približne relacije su dobijene zanemarenjem djelatnih otpora, što se kod visokonaponskih motora smije primijeniti u prvoj aproksimaciji. Ako je prije uklapanja motora na sabirnicama A napon bio $U_{1A}^o = U_{1Q}/k$, dobije se za pad napona kod uklapanja:

$$\Delta U_{1A} = U_{1A}^o - U_{1A} = \frac{U_{1Q}}{k} \cdot \frac{X_T}{X_T + X_M + X_V} \quad (6.6)$$

Ako se desna strana jedn.(6.6) pomnoži sa X_M u brojniku i nazivniku, pa u nazivniku uvede $X_M = U_{nM}/(\sqrt{3} \cdot I_{po})$, dobijemo za linijski pad napona:

$$\Delta U_A = \sqrt{3} \cdot U_{1A} = \frac{U_Q}{k U_{nM}} \cdot \frac{I_{po}}{I_{nM}} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{nM} \cdot \frac{X_T X_M}{X_T + X_M + X_V} \quad (6.7)$$

Ako se uvede da je u trenutku ukapčanja vrijednost početne (zaletne) jalove snage motora $Q_{po} \approx S_{nM} \cdot (I_{po} / I_{nM})$, te relativne vrijednosti napona i reaktancija (svedene na U_{nM}), dobijemo:

$$\Delta u_A = \frac{U_Q}{k U_{nM}} \cdot Q_{po} \cdot x_T \cdot \left(1 - \frac{x_T + x_V}{x_T + x_M + x_V} \right) \quad (6.8)$$

Ova jednadžba dozvoljava brzu procjenu promjene napona u procentima. Obično je dozvoljeno da se za pogonski napon uzme vrijednost $1,05 \cdot U_{nM}$ i tada određuje reaktancija x_Q u napojnoj točki. Pretpostavlja se pri tome da nazivni napon mreže sa sabirnicama A odgovara naponu motora. Iz jedn.(6.8) tada slijedi:

$$\Delta u_A \approx 1,05 \cdot Q_{po} \cdot (x_Q + x_T) \cdot \left(1 - \frac{x_Q + x_T + x_V}{x_Q + x_T + x_M + x_V} \right) \quad (6.9)$$

Vrijednost Δu_A dobije se u % kada se uvrste vrijednosti Q_{po} u MVar i sve reaktancije x u %/MVA.

6.5 Preklapanje napajanja vlastite potrošnje

Kako je pokazano u slikama 6.2 i 6.4, za osiguranje napajanja vlastite potrošnje predviđa se preklapanje napajanja sa bloka napona U_{N1} na pomoćnu mrežu napona U_{N2} . Obično se koristi automatsko preklapanje koje se inicira u trenutku nestanka napona na izvodu sa bloka. Pri tome razlikujemo:

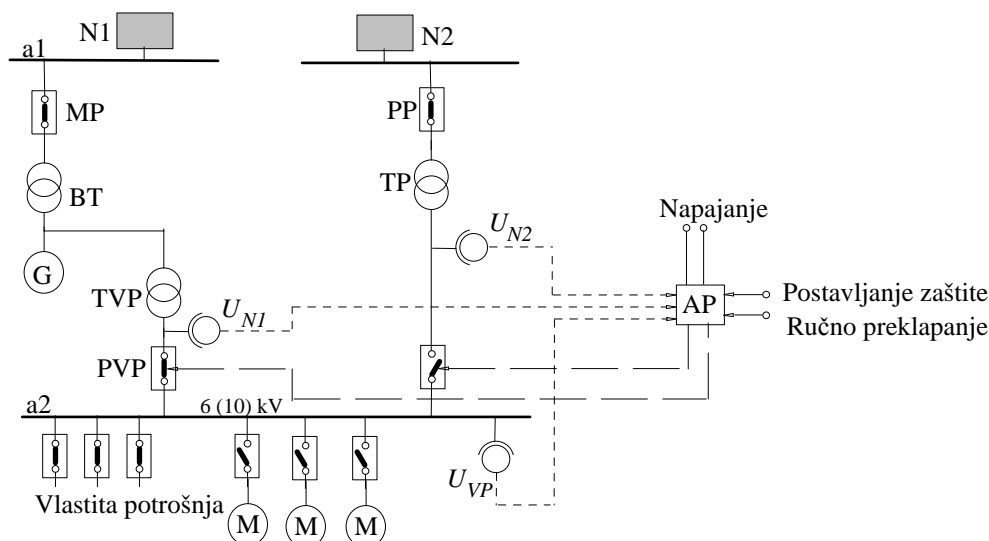
1. Trenutno preklapanje između sinkroniziranih mreža sa malom faznom razlikom napona i kratkim trajanjem preklapanja (ispod 50 ms). Za struju zaleta dobijamo tada $I_{zM} \approx (1 \div 1,5) \cdot I_{nM}$.
2. Brzo preklapanje trajanja između 50 i 150 (200) milisekunda. Uklopni prekidač djeluje tek kada je isklonni otvoren, ali tako brzo da razlika napona ostaje ispod određene vrijednosti (primjerice $1,4 \times U_{IN}$). Za struju zaleta tada dobijemo $I_{zM} \approx (1 \div 3) \cdot I_{nM}$.
3. Podnaponsko preklapanje je inicirano kada napon stezaljki motora (ili grupe motora sa drugim trošilima vlastite potrošnje) padne na $0,40 \times U_{IN}$ ili niže. Tako je uklapanje na pomoćnu mrežu neovisno o faznom kutu napona, jer diferencijalni napon ne može biti veći od 140% nazivnog napona motora. Trajanje preklapanja u ovom slučaju iznosi oko jedne sekunde ili malo više, a za struju zaleta dobijemo $I_{zM} \approx (3 \div 5) \cdot I_{nM}$.
4. Kasno preklapanje sa tako odabranom vremenskom razlikom isklopa i uklopa da diferencijalni napon ostane ispod 40% nazivnog napona motora. Ovakvo preklapanje je slično zaletu motora iz stanja mirovanja i za struju dobijemo $I_{zM} \approx (4 \div 6) \cdot I_{nM}$. Sa ovim može biti povezano odvajanje pogonjenog tereta radi lakšeg zaleta motora. Trenutno i brzo preklapanje zahtijevaju prekidač sa kratkim vremenima uklopa i ukupnog isklopa. Ako je vrijeme uklopa veće od ukupnog vremena isklopa, daje se kod trenutnog preklapanja istovremeno naredba isklapanja i uklapanja, kada je prethodnim poređenjem napona U_{N1} i U_{N2} (na sl. 6.10) utvrđeno da su blizu sinkronizma, t.j. da se fazni vektori dovoljno točno podudaraju (U_M je napon sabirница na koje je motor priključen).

Kod izbora transformatora za vlastitu potrošnju treba uzeti u obzir pored veličine snage kratkog spoja također veličinu pada napona kod uklapanja i preklapanja motora. Na jednoj strani želimo da snaga kratkog spoja na sabirnicama vlastite potrošnje bude čim manja, kako bi postigli što nižu cijenu postrojenja. Na drugoj strani je povoljna visoka snaga kratkog spoja da se održi što je moguće manji pad napona. Rješenje je u traženju optimuma u tehničko - ekonomskom smislu, ali treba paziti da kod niskonaponskih motora imamo pri preklapanju punu struju zaleta. U praksi se obično koristi procjena početne (subtranzientne) snage $S_k'' = S_{kN}'' + S_{kM}''$ kod trolnog kratkog spoja u njoj paralelnoj grani kada se impedancija napojne mreže može zanemariti ($x_Q \ll x_T$):

$$S_k'' = S_{kN}'' + S_{kM}'' = \frac{I, I \cdot S_{nT}}{u_k} \left(1 + \frac{\Sigma S_{nM}}{S_{nT}} \frac{I_{po}}{I_{nM}} u_k \right) \quad (6.10)$$

Ako se u ovu relaciju unesu vrijednosti u_k u (%) i S_{nT} u (MVA), dobije se S_k'' u (MVA). Za određivanje pada napona Δu_A na sabirnicama a2 može se iscrtati familija krivulja sa parametrom Q_{po} odnosno Q_z (Q_z je vrijednost jalove snage kod zaleta).

Prema prethodnom odjeljku, Δu_A u (%) može se odrediti iz približne relacije $\Delta u_A \approx x_T \cdot Q_{po}$ odnosno $\Delta u_A \approx x_T \cdot Q_z$. Nasuprot relacijama u jedn. (6.8) odnosno (6.9), ova relacija daje rezultate sa boljom rezervom, posebno za veće vrijednosti Δu_A , što se čini sasvim zadovoljavajuće za prvu aproksimaciju.



Sl. 6.10 - Princip automatskog preklapanja vlastite potrošnje

Pogledajmo sada slučaj preklapanja ili isklapanja sa ponovnim uklapanjem jednog pogona. Ako se sa motorskih sabirnica a2 na sl. 6.10 isključi jedan asinkroni motor koji je do tada radio pod punim opterećenjem, opada njegov napon stezaljki \dot{u}_{1M} (relativna vrijednost prema naponu prije isklapanja \dot{U}_{1M}^o) i brzina se smanjuje do zaustavljanja (u sl. 6.11 prikazana je samo početna faza usporavanja). Za simbolički rotirajući vektor (fazor) \tilde{u}_{1M} vrijedi poslije isklapanja:

$$\tilde{u}_{1M} = (1-s) \cdot |\dot{e}_M^o| \cdot e^{-t/T_0} \cdot e^{-j\alpha} \quad (6.12)$$

gdje je \dot{e}_{1M}^o unutarnji napon asinkronog motora (relativna vrijednost prema naponu prije isklapanja \dot{U}_{1M}^o), T_0 konstanta opadanja napona motora, α kut između $\dot{u}_{1M}^o = \dot{U}_{1M}^o$ i \dot{u}_{1M} prema sl. 6.11, te s klizanje. Kut $\alpha = \alpha^o + \alpha_z$ se sastoji od kuta prije isklapanja i kuta zbog tijeka zaustavljanja, a analogno tome i klizanje $s = s^o + s_z$ kao suma klizanja prije isklapanja i povećanja klizanja poslije isklapanja, kada motor još odaje djelatnu snagu. Približno točno se može zanemariti klizanje nakon isklapanja, tako da imamo $(1-s) \approx (1-s^o) \approx 1$. Također sa dobrom približnošću vrijedi kod velikih motora:

$$\dot{e}_M^o \approx \dot{u}_{1M}^o - \dot{i}_{1M}^o \cdot (r_M + j \cdot x_M) \approx \dot{u}_{1M}^o - j \cdot x_M \cdot \dot{i}_{1M}^o \quad (6.13)$$

Kod jednolikog usporavanja ($\varepsilon = \text{konst.}$) nakon isklapanja imamo kružnu frekvenciju $\omega_M = \omega^o \cdot \varepsilon \cdot t$, gdje je $\omega_0 = (1-s_0) \cdot \omega \cdot N_1$. Tada dobijemo za kut:

$$\alpha = \alpha^o + [\omega_{N2} - (1-s^o) \cdot \omega_{N1}] \cdot t + \varepsilon \cdot t^2 / 2 \quad (6.14)$$

Ako su obje mreže N1 i N2 sinkronizirane, također vrijedi $\omega_{N1} = \omega_{N2} = 314 \text{ Hz}$ kod frekvencije $f_{N1} = f_{N2} = 50 \text{ Hz}$, pa je sada kut:

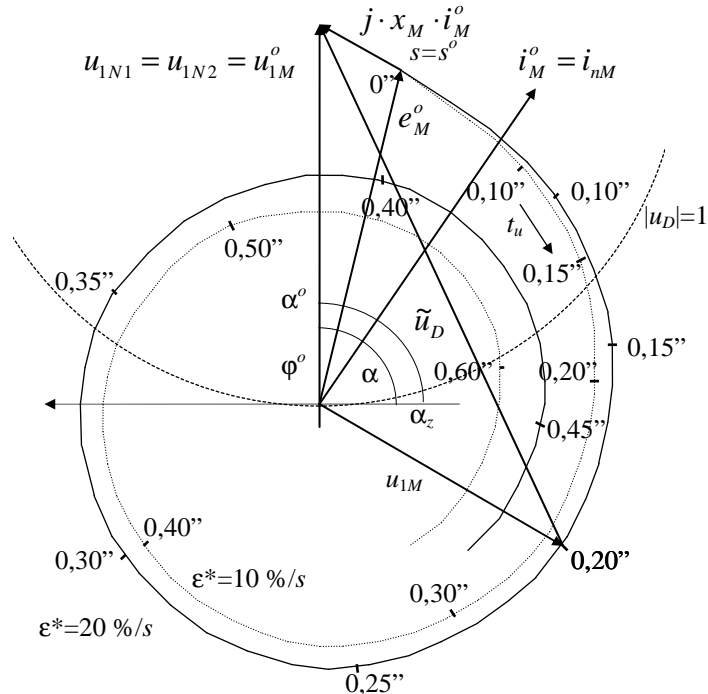
$$\alpha = \alpha^o + s^o \cdot \omega_{N1} \cdot t + \varepsilon \cdot t^2 / 2 \quad (6.15)$$

Ako podijelimo ovu jednadžbu sa $2 \cdot \pi$, dobijamo kut α u dijelovima jednog punog okretaja motora (za 360°):

$$\alpha^* = \alpha^{o*} + s^o \cdot f_{N1} \cdot t + \varepsilon \cdot f_{N1} \cdot t^2 / 2 = \alpha^{o*} + \alpha_d^* \quad (6.16)$$

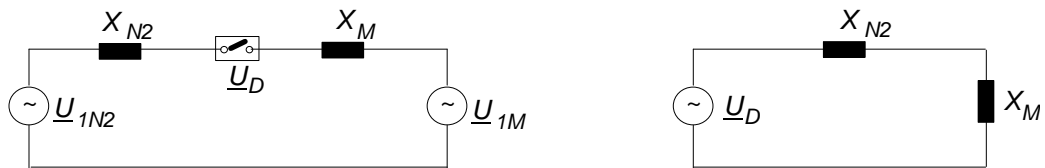
Pri tome je $\varepsilon^* = \varepsilon / (2 \cdot \pi) \approx 1/T_Z$, gdje je T_Z vrijeme zalijetanja motora sa uključenim teretom (ventilator, mlin ili neki drugi stroj). Vrijednost ε^* se obično daje u procentima po klizanju, pri čemu veće vrijednosti dolaze kod velikih motora visoko iskorištenih brzohodnih

pogona kondenzatskih pumpi u kotlovnici. Naravno da je ova vrijednost ovisna o opterećenju pred isklapanje i prosječno je relativno značajnija ako je to opterećenje veće. Na sl. 6.11 pokazana je prostorna i vremenska promjena napona na stezaljkama motora \tilde{u}_{1M} i diferencijalnog napona \tilde{u}_D za vrijednosti $\varepsilon^* = 10\%/s$ i $\varepsilon^* = 20\%/s$. Odabrane vrijednosti u slici su: $x_M = 20\%$, $\alpha^o = 11^o$, $s^o = 1\%$, $T_0 = 1$ sekunda, $\cos \varphi^o = 0,85$, $i_M^o = i_{nM}$.



Sl. 6.11 - Promjena napona stezaljki motora i diferencijalnog napona

Ovisnost između vremena (proteklog od trenutka) isklapanja t_u i kuta α_z uzima se prema jedn.(6.16). Iz sl. 6.11 može se odrediti tada diferencijalni napon u_D u relativnom iznosu prema u_{1N1} (jedinične vrijednosti). Primjerice, kod $\varepsilon^* = 10\%/s$ biti će diferencijalni napon $u_D = 1,00$ p.u. dostignut nakon $t_u \approx 0,175$ sekunda kod kuta $\alpha_z \approx 60^o$. Za odabrane vrijednosti reaktancije motora x_M , klizanja s^o i kuta α^o u trenutku isključenja, te vremenske konstante opadanja napona motora T_0 , može se također prikazati i relativna (jedinična) struja zaleta (prema nazivnoj struji motora) $i_{zM} = I_{zM} / I_{nM}$, koja ovisi o reaktancijama motora i mreže $x_M + x_{N2}$.



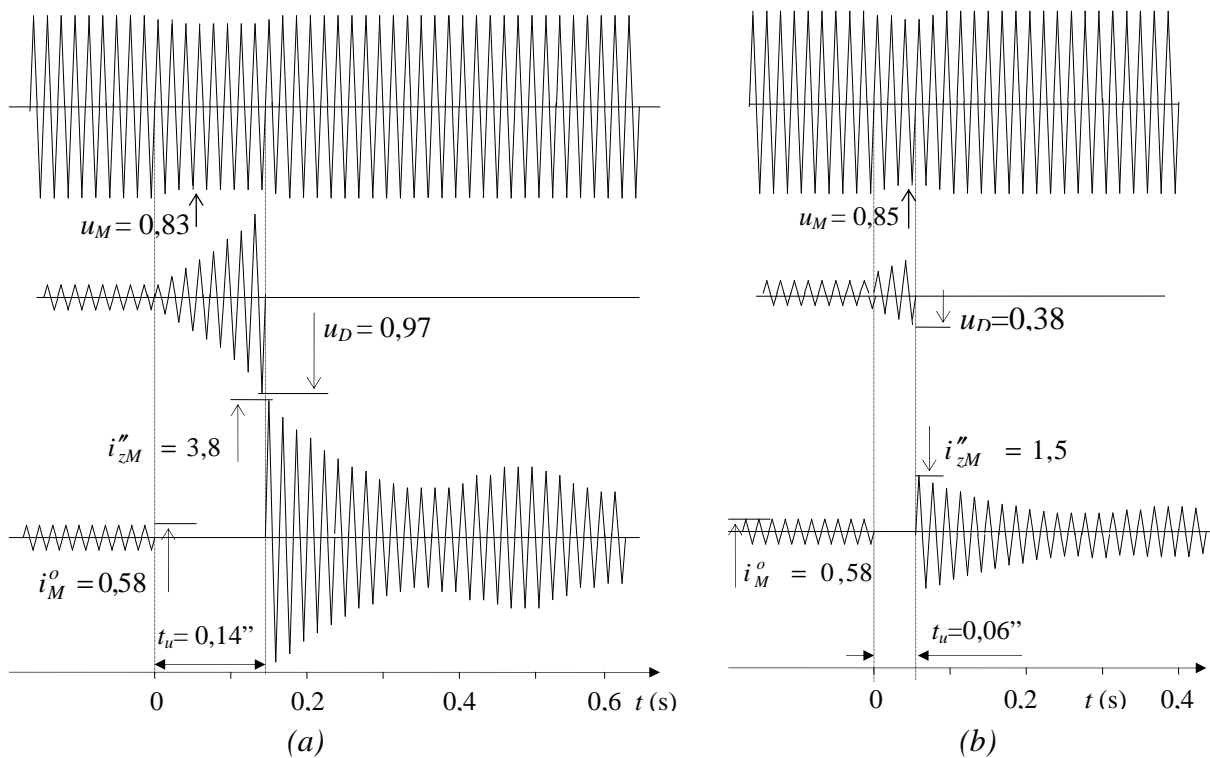
Sl. 6.12 - Nadomjesna shema struje zaleta motora (grupe) kod preklapanja na mrežu N2

Nakon uklapanja na novu mrežu N2, struja zaleta motora I_{zM} određuje se polazeći od nadomjesne sheme na sl. 6.12 prema relaciji:

$$\vec{I}_{zM} = \frac{\vec{U}_{1N2} - \vec{U}_{1M}}{j\sqrt{3}(X_{N2} + X_M)} \rightarrow i_{zM} = \frac{I_{zM}}{I_{nM}} = \frac{U_D}{I_{nM}(X_{N2} + X_M)} = \frac{u_D}{x_{N2} + x_M} \quad (6.17)$$

U jedn.(6.17) može se za računanje relativne struje zaleta i_{zM} koristiti približna relacija $x_{N2} \approx \Sigma S_{nM} / S''_{kN2}$. Kod preklapanja jedne grupe motornog pogona u vlastitoj potrošnji elektrane uzimaju se srednje vrijednosti za i_{zM} i ε^* . Na sl. 6.13 prikazani su oscilogrami (a) brzog ($t_u \approx 0,14$ s, $I_{nM} = 484$ A) i (b) trenutnog ($t_u \approx 0,06$ s, $I_{nM} = 1200$ A) preklapanja jednog

asinkronog 6 kV motora. Vidi se da struja zaleta i_{zM} bitno ovisi o diferencijalnom naponu u_D i zato se on nastoji maksimalno ograničiti. Primjerice, kod istovremene komande za isklup i uklop može se postići vrijeme prekida $t_u \approx 0,01$ s, pa se struja zaleta vrlo malo razlikuje od struje motora u stacionarnom pogonu.



Sl. 6.13 – Oscilogrami (a) brzog i (b) trenutnog preklapanja visokonaponskog motora