

OSNOVE ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA PSI

Januar 2022.

1. ČETIRI VRSTE DELOVANJA U PRIRODI

Četiri vrste delovanja: gravitaciono, elektromagnetno, slabo i jako.

Delovanje	Domet
1. GRAVITACIONO	Nivo makro mase i prostora; dublje u materiji je zanemarljivo zbog malih masa. (MEHANIKA)
2. ELEKTRO-MAGNETNO	Nivo atoma; integralni efekti zahvataju makro prostor. (ELEKTROMAGNETIKA ³¹)
3. SLABO	Na „dubinama“ reda 10^{-10} m (nivo osnovnih konstituenata jezgra atoma).
4. JAKO	(FIZIKA VISOKIH ENERGIJA)

Gravitaciono delovanje je prvo formulisano, ali je najmanje objašnjeno. Elektromagnetno delovanje jeste na nivou atoma i molekula, ali se njegovi integralni efekti osećaju u makro prostoru. Jako delovanje je najjače od četiri osnovna delovanja u prirodi i najkraćeg je dometa. Ono drži na okupu kvarkove u protonima i neutronima, kao i protone i neutrone, obrazujući jezgra atoma. Slabo delovanje je sasvim kratkog dometa i na njemu se zasniva radioaktivnost i nuklearna fuzija. Deluje izmenu fermiona i to posredstvom famoznog Higsovog bozona.

2. NEDOSTACI PRIMARNIH OBLIKA ENERGIJE

Dva osnovna nedostatka:

- 1) Po pravilu, primarni oblici energije nisu locirani uz velike potrošače.
- 2) Te oblike je uglavnom teško neposredno koristiti.

Prvi nedostatak nameće potrebu za prenosom energije s lokacija gde je ona raspoloživa do centara potrošnje, pa njenom distribucijom korisniku.

Drugi nedostatak nameće potrebu za transformacijom primarnih oblika energije u oblike pogodnije za prenos i korišćenje.

Obe potrebe vezane za energiju najjednostavnije i najefikasnije se mogu zadovoljiti električnom energijom. Ona se jednostavno prenosi, distribuira i transformiše u sve upotrebne oblike,

jednostavno se dobija iz svih primarnih oblika energije. To su razlozi zbog kojih je električna energija najvažniji oblik energije danas.

Osnovne pogodnosti električne energije su :

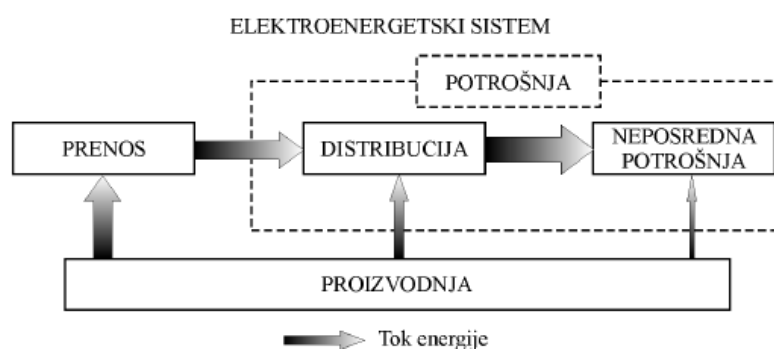
- 1) jednostavna proizvodnja (transformacija iz primarnih oblika)
- 2) jednostavan prenos
- 3) jednostavna distribucija (raspodela)
- 4) jednostavna transformacija u upotrebne oblike.

3. OSNOVNI PODSISTEMI EES

Četiri podsistema elektroenergetskog sistema:

- 1) proizvodnja
- 2) prenos
- 3) distribucija
- 4) neposredna potrošnja.

Oni su ustanovljeni prilikom isticanja suštinskih prednosti : široke mogućnosti za njenu relativno jeftinu proizvodnju, prenos i distribuciju, kao i široke mogućnosti za njenu transformaciju u upotrebne oblike, kada se čovek okorišćuje.



Podsistemi neposredne potrošnje i distribucije električne energije čine podsystem potrošnje u širem smislu te reči. U podsystemu neposredne potrošnje vrši se transformacija električne energije, kada se čovek okorišćuje. Taj podsystem čine individualni potrošači. Individualni potrošač predstavlja skup uređaja za transformaciju električne energije u upotrebne oblike, s brojiлом električne energije. Individualni potrošači su relativno male potrošačke celine. Oni se teritorijalno koncentrišu u veće celine – **potrošačka područja**. Potrošači mogu biti van pogona ili u pogonu – u stanju potrošnje. Stanje potrošnje nastupa u trenutku stavljanja ispravnog potrošača pod napon, kada se uspostavlja struja i transformiše energija.

U podsystemu proizvodnje se vrši transformacija različitih oblika u električnu energiju. U okviru ovog podsystema nema direktnog okorišćavanja čoveka. Električna energija koja se u njemu proizvodi, predstavlja oblik energije koji postaje i te kako atraktivan za prenos i distribuciju i za transformaciju u upotrebne oblike. Podsystem proizvodnje čine individualni proizvođači – električni generatori – mašine za transformaciju u električnu energiju. Generatori su apsolutno minimalne proizvodne celine. Oni su koncentrisani (jedan, ili više njih) u veće celine – elektrane. Više elektrana, ako su na istoj lokaciji čine lanac.

Za **podsystem proizvodnje** ističu se sledeće dve karakteristike:

- Energetski oblici pogodni za transformaciju u električnu energiju uglavnom su dislocirani od potrošača.
- Proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama i elektranama na uglj, naftu i gas mora se dislocirati u odnosu na potrošače radi zaštite od direktnog ugrožavanja i zaganjenja Životne sredine.

Za **podsystem proizvodnje** vezuju se sledeće dve činjenice:

- 1) njihova dislokacija, tj. udaljenost proizvodnje od potrošnje
- 2) proizvodnja po jedinici proizvoda je jeftina samo kada se odvija u velikim blokovima.

Bitno je naglasiti da se proizvodnja energije isplati (je jeftina) samo ako se proizvodi u velikim količinama.

Podsystem prenos: Jasno je da bi bilo neekonomično povezivati svakog potrošača sa posebnim izvorom. Zato je ekonomičnije da se grupi potrošača (potrošačkom području) pridruži elektrana određenog kapaciteta. Da bi se svaki individualni potrošač mogao staviti u stanje potrošnje, do njega je potrebno dovesti napon elektroenergetskim vezama (električnim provodnicima).

Elektroenergetske veze svih individualnih potrošača razmatranog potrošačkog područja se koncentrišu u jednu tačku **sabirnice S** (takođe provodnici). Potrošači su udaljeni od izvora, iz čega sledi da se mora uvesti podsystem prenosa.

Da bi sistem bio sigurnosti $(n-1)$ mora se imati više veza koje povezuju potrošače sa izvorima. Dupliranje svake veze je veoma neekonomično pa se uvodi pojam petljastog prenosa tj. (petljaste) prenosne mreže. Ona omogućava neposrednu ili posrednu povezanost svake elektrane sa svakim potrošačem. U praksi se pokazalo kao i više nego dovoljno imati dvostruki broj veza u odnosu na ukupan broj sabirnica (i generatorskih i potrošačkih). Takođe ovim je rezerva proizvodnje električne energije svedena na minimum, a da bi ta rezerva bila na raspolaganju celom EE sistemu, taj sistem mora da predstavlja jedinstvenu prenosnu mrežu (npr. jedne države). Interna povezanost se danas proširuje na nivo interkonektivnih EE sistema (nekoliko država povezanih), koji su sa tehničkog aspekta identični svakom svom članu (tj. da imaju sva 4 podsystema itd).

Podsystem potrošnje: sastoji se od dva podsystema: podsystem distribucije i podsystem neposredne potrošnje.

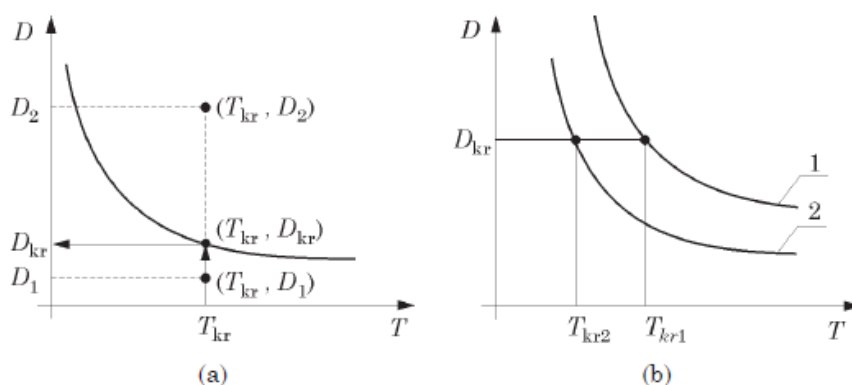
Podsystem distribucije se izvodi na osnovu razmatranja elektroenergetskog spoja podsystema prenosa i podsystema potrošnje. Distribucija električne energije se zasniva na koncepciji izvoda. Oni predstavljaju dovoljno jake elektroenergetske veze kojima se mogu pridružiti veći delovi jednog potrošačkog područja. Praktično, izvod prolazi pored individualnih potrošača koji se na njega priključuju, umesto da se za svaki od njih uspostavlja sopstvena elektroenergetska veza sa sabirnicama. Očigledna je mogućnost grananja izvoda na izvode nižih nivoa, odnosno uspostavljanje elektroenergetskih veza tipa stabla. Na ovaj način je omogućeno da se na najekonomičniji način, iz

sabirnica, elektroenergetskim vezama priđe dovoljno blizu svakom od individualnih potrošača, koji su locirani na razmatranom potrošačkom području.

Dakle, izvodi sa svojim grananjem, sve do mesta priključka individualnih potrošača, čine podsistem distribucije, odnosno distributivnu mrežu elektroenergetskog sistema. Tačka u kojoj je distributivna mreža priključena na prenosnu mrežu naziva se **izvor (koren) distributivne mreže**. Skup svih distribucija jednog elektroenergetskog sistema predstavlja **podsistem distribucije**.

Distributivna mreža, po pravilu, nije upetljana – ona je **radijalna**. U radijalnoj distributivnoj mreži svaki individualni potrošač se napaja samo s jednog izvora (korena) distributivne mreže i to samo jednim putem. Distributivna mreža je jeftinija od upetljane, ali je i manje pouzdana i sigurna od nje.

4. NAČELNA KARAKTERISTIKA RELACIJE: VELIČINA POTROŠAČKOG PODRUČJA – TOLERANTNO VREME OSTANKA PODRUČJA BEZ NAPAJANJA



- a) Sa D je označen neki od kvantitativnih pokazatelja veličine potrošačkog, a tolerantno vreme ostanka područja bez napajanja označeno je sa T . Sa ove slike se može uočiti sledeće načelo: **što je potrošačko područje veće, to je tolerantno vreme ostanka područja bez napajanja manje.**

Neka je potrošačko područje veličine D_{kr} ostalo bez napajanja usled kvara u distributivnoj mreži.

Značenje vrednosti D_{kr} glasi: što je veličina najvećeg potrošačkog područja – kritična veličina područja, za koje je T_{kr} još uvek tolerantno vreme ostanka bez napajanja. Ako se prihvati prethodno navedeno kvalitativno značenje karakteristike na slici, bez obzira na njen kvantitativni značaj, a imajući u vidu vrednost D_{kr} , kvalitativno mogu razmotriti sledeće dve situacije:

$$D_1 < D_{kr} \quad \text{ i } \quad D_2 \geq D_{kr}$$

pri čemu D_1 i D_2 označavaju veličine područja koja su ostala bez napajanja. U obe situacije napajanje se može ponovo uspostaviti za isto vreme T_{kr} .

U **prvoj situaciji**, vreme potrebno da se napajanje ponovo uspostavi (T_{kr}), **tolerantno je** – razmatrana tačka se nalazi ispod krive.

U **drugoj situaciji** ono **nije tolerantno**, područje je suviše veliko da bi se tolerisalo da ono tako dugo (T_{kr}) bude bez napajanja – razmatrana tačka je iznad krive.

Zbog toga distributivne mreže treba graditi tako da se vremena potrebna za saniranje kvarova u njima smanjuju s približavanjem njenom izvoru!

Za kvarove u izvoru distributivne mreže, broj potrošača koji bi ostajali bez napajanja posle kvara tako je veliki da bi se ti kvarovi morali sanirati praktično odmah što je ekvivalentno sa obezbeđenjem **sigurnosti tipa (n-1)**. To znači da jednostruki kvar u prenosnoj mreži, koja je sigurna saglasno s tim kriterijumom, ne remeti normalno napajanje potrošača sistema.

Činjenica da realizacija svakog sistema, mora biti ekonomski zasnovana. Odnosno, karakteristika za razmatrano potrošačko područje mora se ustanoviti na osnovu ekonomskih kategorija.

b) Tolerantno vreme da potrošačko područje D_{kr} ostane bez napajanja iznosi T_{kr1} . Za to vreme (vreme sanacije kvara), potrošači trpe materijalnu i nematerijalnu štetu. Otud potreba da se vreme ostajanja bez napajanja (T_{kr1}) smanji. To se formalno može učiniti spuštanjem karakteristike iz pozicije 1 u poziciju 2.

Suštinski se to može učiniti boljom, dakle i skupljom opremom za identifikaciju i otklanjanje kvarova, povećanjem ekipa montera koji otklanjaju kvarove itd. Time se kritično vreme ostanka područja bez napajanja D_{kr} smanjuje na T_{kr2} . Pri tome, smanjenje štete koja se trpi usled ostanka bez napajanja, praćeno je povećanjem cene distributivne mreže.

5. JEDNOSMERNNA ILI NAIZMENIČNA ELEKTROENERGETIKA

Naizmenična zbog dva razloga:

- **Transformatori**
- **Teslino obrtno magnetsko polje**

Pošto postoji konstantna snaga koja se mora dopremiti potrošačima, a pošto je snaga proizvod napona i struje ($P=UI$), javlja se pitanje kojim naponom i strujom realizovati tu snagu.

Ukoliko se izaberu veliki naponi (male struje) uštedeće se količina materijala za provodnike za prenos, ali će biti potrebna velika ulaganja u izolaciju električnih uređaja.

S druge strane ako se izaberu mali naponi (velike struje) smanjiće se izolacija, ali će se povećati materijal za provodnike tj. poprečni presek provodnika (jer za npr. 20kW bila bi potrebna struja od par hiljada A ako se uzme da je napon par desetina V).

Postoji optimalna situacija (gde su aparati dovoljno bezbedni a cena im je prihvatljiva) koja je u opsegu napona 110, 240 ili 480 V za domaćinstva, zanatske radnje... Tako da se javlja ideja da se tim naponom prenosi električna energija naravno uz što manje gubitke iste.

Na osnovu relacije vidi se da gubici opadaju sa povećanjem poprečnog preseka provodnika, ali i sa kvadratom napona. Dok rastu sa povećanjem snage, i dužine prenosa.

Iz toga sledi da je potrebno transformisati električnu energiju jednog proizvedenu u generatoru u električnu energiju drugog napona (visok da bi se smanjili gubici) za prenos, i

isto to uraditi za napon kod potrošača (nizak, zbog sigurnosti). Odatle se javlja potreba za transformatorom, uređaj koji transformiše električnu energiju jednog napona u drugi, što je moguće ostvariti samo naizmeničnom elektroenergetikom.

6. JEDNOFAZNA ILI VIŠE (TRO)FAZNA ELEKTROENERGETIKA

Osnovni argument za izbor više (tro)faznog EES je **Teslino obrtno magnetno polje**, koje je temelj jeftinim i pouzdanim potrošačima električne energije: **asinhronim motorima**. Pored toga cena materijala utrošenog za trofazan prenos električne energije je prepolovljena u odnosu na jednofazan.

Teslino obrtno magnetno polje

Magnetno polje potkovičastog magneta jeste obrtno magnetno polje. Ono je izazvano obrtanjem potkovičastog magneta. Uzrok tom obrtanju je obrtanje turbine, koja je vratilom povezana s potkovičastim magnetom. Veliki nedostatak ovakve mašine za transformaciju energije jeste taj da se osnovni oblik i transformisani oblik energije nalaze na istoj lokaciji.

Dakle, nema slobode u smislu da se energija proizvodi tamo gde je ima i gde je jeftina, a da se koristi tamo gde je potrebna. Taj nedostatak opstaje sve dok se ne nađe dovoljno dugačko vratilo kojim bi se sila sa štapnog magneta prenosila na dovoljno velika rastojanja. Upravo taj nedostatak mašine otklonio je Tesla, ustanovljavajući Teslino obrtno magnetno polje.

Efekat obrtnog magnetnog polja potkovičastog magneta može se u potpunosti postići sa tri jednaka namotaja a, b i c, prostorno smeštena simetrično po obimu kruga i zakrenuta jedan u odnosu na drugi sukcesivno za 120° tj. $2\pi/3$.

Ta tri namotaja predstavljaju **stator** razmatrane mašine. Za razliku od potkovičastog magneta u prethodnoj varijanti mašine, **stator se ne obrće**.

Kroz tri namotaja uspostavljene su naizmenične prostoperiodične struje, jednakih amplituda i fazno pomerene. Takve struje mogu da se uspostave na osnovu napona tri naizmenična generatora, čija je učestalost jednaka željenoj učestalosti struja.

Ta tri napona imaju međusobno jednake amplitude. Razlike njihovih faznih stavova jednake su razlikama faznih stavova odgovarajućih struja namotaja.

Takve tri naizmenične prostoperiodične veličine jednakih modula i jednakih sukcesivnih razlika faznih stavova čine trojku simetričnih veličina.

Neka je za početni trenutak razmatranja situacije usvojen momenat kada je struja namotaja a maksimalna. Rezultantno polje se dobija kao vektorski zbir polja koja se generišu strujama sva tri namotaja. Intenzitet polja biće isti u svakom trenutku. Time je obrtno magnetno polje koje je generisano mehaničkim putem saglasno sa u mašini generisanoj električnim strujama. To je Teslino obrtno magnetno polje.

Neka se štapni magnet zameni odgovarajućim elektromagnetom – **rotorom**. Da bi rotor bio elektromagnet, on se izvodi od gvožđa s namotajem kroz koji se uspostavlja jednosmerna struja izazvana priključenim jednosmernim sistemom.

Sistem ima tri kalema sa zamenjenim štapnim magnetom namotanim rotorom, predstavlja Teslinu ideju motora naizmeničnog napona i struje. Taj motor, u nešto pojednostavljenoj formi, bez pobudnog sistema, predstavlja fundament potrošnje električne energije danas. S njim je definitivno skinuta sa scene masovna primena skupih i prilično nepouzdanih jednosmernih motora.

Time je definitivno naizmenični elektroenergetski sistem ustanovljen kao osnovna varijanta današnje elektroenergetike. Relativno retke primene jednosmernih motora, kao i retke primene prenosa električne energije jednosmernog napona i struje, samo su izuzeci koji potvrđuju pravilo

7. UČESTALOST NAIZMENIČNIH EE SISTEMA

Transformator je prvi ključni element za ustanovljavanje naizmenične elektroenergetike.

Zato se razmatranje učestalosti započinje upravo tim elementom. Njime se električna energija naizmeničnog prostoperiodičnog napona $u_{1(t)}$ i struje $i_{1(t)}$ transformiše u električnu energiju drugog naizmeničnog prostoperiodičnog napona $u_{2(t)}$ i struje $i_{2(t)}$. On se sastoji od dva namotaja sa po N_1 i N_2 navojaka, respektivno.

Integritet transformatora, odnosno ta dva namotaja, fizički je obezbeđen magnetnim kolom.

S obzirom na to da se razmatra ideja transformatora, pa se otpornosti oba namotaja zanemaruju. Transformator je elektromagnetni uređaj.

Električni režimi oba namotaja se sastoje od:

1. naizmeničnih napona $u_{1(t)}$ i $u_{2(t)}$ i
2. struja $i_{1(t)}$ i $i_{2(t)}$

Magnetni režim transformatora sastoji se od sledećih naizmeničnih flukseva vektora magnetne indukcije:

- 1) zajednički fluks
- 2) fluksevi rasipanja prvog i drugog namotaja

Zajedničkim fluksom se realizuje elektromagnetna sprega oba namotaja.

Ideja transformatora se sastoji od toga da su naponi $u_{1(t)}$ i $u_{2(t)}$ u relaciji preko brojeva navojaka N_1 i N_2 . Naime, kada bi fluksevi rasipanja oba namotaja bili jednaki nuli tada bi za napone na oba kraja transformatora važila relacija:

$$u_{1(t)} / u_{2(t)} = N_1 / N_2$$

Time bi se realizovala ideja transformatora da se električna energija transformiše po naponu i struji. Naravno, ovo razmatranje je onoliko validno koliko su rasipni fluksevi namotaja bliski nuli. Ti fluksevi se mogu učiniti bliskim nuli, ako se magnetno kolo transformatora iskoristi i za obezbeđenje jake elektromagnetne sprege namotaja. To se može učiniti ako se ono izgradi od feromagnetnog materijala koji je kvalitetan u smislu velike magnetne provodnosti.

Najjeftiniji **feromagnetik** pogodan za transformatore jeste **gvožđe**. U slučaju magnetnog kola transformatora od gvožđa, praktično celokupni fluks transformatora obuhvata oba namotaja, a fluksevi rasipanja su onoliko puta manji od zajedničkog fluksa, koliko je puta gvožne bolji feromagnetni materijal od okoline transformatora.

Matematički model kojim se opisuje transformator sa **zanemarenim otpornostima** R_1 i R_2 , kao i **zanemarenim rasipnim fluksevima** $\Phi_{1(t)}$ i $\Phi_{2(t)}$, sastoji se od dve relacije saglasne s naponskim Kirhofovom zakonom za dve električne konture, kao i od jedne relacije za jednu magnetnu konturu:

$$\begin{aligned}u_1(t) - N_1 d\phi_m(t)/dt &= 0, \\u_2(t) - N_2 d\phi_m(t)/dt &= 0, \\N_1 i_1(t) + N_2 i_2(t) &= \mathcal{R}_m \phi_m(t).\end{aligned}$$

Naizmenični prostoperiodični naponi, struje i fluksevi mogu se prikazati funkcijama vremena sledećeg oblika:

$$x(t) = X_{\max} \cos(2\pi ft + \theta_x)$$

pri čemu je sa f označena **učestalost**, sa t **vreme**, sa θ_x **fazni stav**, a sa X_{\max} amplituda naizmenične prostoperiodične veličine $x(t)$.

Sa \mathcal{R}_m označen je magnetni otpor (reluktansa) magnetnog kola transformatora.

Kada se na stranu 1 transformatora dovede napon $u_{1(t)}$, tada se na njegovom kraju 2 uspostavlja napon $u_{2(t)}$, odnosno transformator će se opteretiti strujama $i_{1(t)}$ i $i_{2(t)}$.

Ravnotežu tim naponima drži izvod zajedničkog fluksa transformatora jednom pomnožen s brojem navojaka N_1 a drugi put sa N_2 . Taj fluks je posledica struja $i_{1(t)}$ i $i_{2(t)}$ ili **magnetopobudnih sila** $N_1 i_{1(t)}$ i $N_2 i_{2(t)}$.

Matematički model transformatora može se protumačiti i na sledeći način: za doveden napon $u_{1(t)}$, naizmenični prostoperiodični fluks prvog namotaja mora biti toliki da njegov izvod pomnožen s brojem navojaka prvog namotaja bude jednak upravo tom naponu.

Isto važi i za drugi namotaj. S obzirom na to da su fluksevi rasipanja zanemareni, fluksevi oba namotaja su jednaki zajedničkom fluksu. Struje oba namotaja moraju biti tolike da bi se generisao upravo taj fluks.

Prostoperiodični napon i zajednički fluks mogu se izraziti na sledeći način:

$$\begin{aligned}u_1(t) &= U_1 \cos(2\pi ft + \theta_{u_1}), \\ \phi_m(t) &= \Phi_m \cos(2\pi ft + \theta_\phi).\end{aligned}$$

Sada se prvoj relaciji matematičkog modela (2.2.2.3.2) može dati oblik:

$$U_1 \cos(2\pi ft + \theta_{u_1}) = -N_1 \Phi_m 2\pi f \sin(2\pi ft + \theta_\phi), \quad (2.2.2.3.5)$$

odnosno:

$$U_1 \cos(2\pi ft + \theta_{u_1}) = N_1 \Phi_m 2\pi f \cos(2\pi ft + \theta_\phi + \frac{\pi}{2}). \quad (2.2.2.3.6)$$

Da bi dve prostoperiodične funkcije specificirane učestalosti f , s vremenom kao nezavisno promenljivom veličinom, bile međusobno jednake, potrebno je da su im međusobno jednaki fazni stavovi i amplitude:

$$\theta_{u_1} = \theta_\phi + \frac{\pi}{2}, \quad (2.2.2.3.7)$$

$$U_1 = 2\pi N_1 \Phi_m f. \quad (2.2.2.3.8)$$

U transformatoru koji je priključen na napon amplitude U_1 , specificirane učestalosti f , uspostaviće se **fluks amplitude** Φ_m . Ako se učestalost povećava, onda se relacija može realizovati s fluksom manje amplitude.

Na osnovu tog razmatranja je očigledno da se s porastom učestalosti, veličina gvođenog magnetnog kola, potrebnog da se uspostavi zajednički fluks, smanjuje. Time se smanjuje i cena transformatora. Povećanjem učestalosti, magnetno kolo transformatora može se smanjivati po želji.

Pri tome, količina utrošenog bakra za namotaje transformatora ostaje ista. Ona je određena strujama na oba kraja transformatora.

Obrnuto, za male učestalosti, za uspostavljanje velikih flukseva treba obezbediti veće magnetno kolo. Svođenjem učestalosti na nulu, razmatrana unutrašnja transformacija električne energije prestaje da bude moguća.

Kada se problemu učestalosti električne energije priđe sa aspekta transformatora tada ona treba da je što veća. Sada je problem učestalosti elektroenergetskog sistema potrebno sagledati i sa aspekta proizvodnje i potrošnje.

Može se definitivno konstatovati da opredeljenje za veličinu učestalosti mora biti zasnovano na kompromisu između težnje ka velikim učestalostima - ka jeftinom transformatoru, s jedne strane, i ka mogućnosti da se električna energija ekonomično proizvodi i troši, imajući u vidu današnje materijale za konstrukciju generatora i motora.

8. NAPON NAIZMENIČNIH EES

Radni naponi potrošača su izmenu 110 i 240 V, pa i 480 V, uz retke izuzetke napona industrijskih pogona, koji iznose nekoliko kilovolti.

Radni naponi generatora nalaze se izmenu 10 i 30 kV.

Prenos i distribuciju električne energije treba realizovati sa što većim naponima, koji su optimalni za potrebna rastojanja i količine energije koje se prenose i distribuiraju.

Ovde je reč o traženju kompromisa izmenu troškova u sledeće dve krajnosti:

- 1) vrlo veliki troškovi za bakar ili aluminijum, odnosno za konstrukciju vodova i transformatora, koji bi bili posledica prenosa i distribucije suviše malim naponima

2) veliki troškovi za izolaciju, odnosno za konstrukciju odgovarajući vodova i transformatora, koji bi bili posledica suviše velikih napona.

Niski napon 0.380 (0.220) kV potrošački je napon.

Napon od 6 kV se ponegde koristi za napajanje većih industrijskih potrošača, a naponi 10, 20 i 35 kV spadaju u **distributivne napone**. To su srednji naponi.

Visoki napon 110 kV je napon subprenosa, tj. mreže tog naponskog nivoa negde pripadaju preduzećima za prenos, a negde preduzećima za distribuciju električne energije.

One su nekad petljaste, a nekad radijalne strukture. Kada je 110 kV mreža radijalna, tada ona tehnički pripada distribuciji, mada ne nužno i administrativno. Kada je ta mreža upetljana, tada ona tehnički pripada prenosu.

Naponi 220 i 400 kV, kao i veći naponi jesu **prenosni**. To su vrlo visoki naponi. Postoje vodovi za prenos još višim naizmeničnim naponima – 500 i 750 kV, a eksperimentiše se naponima od 1000 kV i više. Zbog sve većih potreba za energijom, mreža 110 kV postaje subprenosna i potiskuje se prema distribuciji.

Još jedna osnovna uloga transformatora: to je povezivanje – interkonekcija dve mreže različitih naponskih nivoa istog sistema ili različitih sistema. To su **interkonektivni transformatori**.

Jedna distributivna radijalna mreža s neposrednim potrošačima:

- **visoko-naponskim vodovima** (110 kV) se obilazi potrošačko područje, sa njih se energija preuzima napojnim transformatorima (110 kV/20(10) kV) za veća potrošačka područja,
- **srednje-naponskim izvodima** (fiderima) 20(10) kV se sa tih transformatora preuzima energija i distribuira na manja područja, a sa njih se pomoću distributivnih transformatora (20(10) kV/0.380 kV) i sa njih se izvodima ide do individualnog potrošača.

9. IZRAZ, SKICA I SVI PODACI ZA PROSTOPERIODIČNU VELIČINU

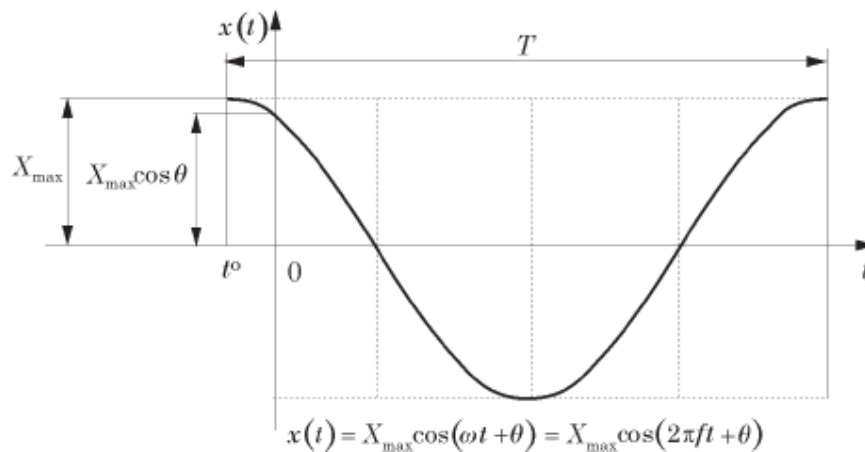
$$x(t) = X_{\max} \cos(\omega t + \theta) = X_{\max} \cos(2\pi f t + \theta), \quad (2.2.3.1.1)$$

pri čemu su korišćene sledeće oznake:

t – vreme [s];

X_{\max} – amplituda (maksimalna vrednost), u odgovarajućim jedinicama [V, A, T, Wb¹¹⁵]; ona je nenegativan realan broj;

- ω – kružna učestalost [$\text{rad} \times \text{s}^{-1}$], $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$, gde je T perioda [s], a f učestalost [$\text{s}^{-1} = \text{Hz}$];
- θ – početni fazni stav ili početna faza, a u daljem tekstu *ugao* naizmenične veličine u radijanima¹¹⁶;
- t^0 – vreme kada je funkcija (veličina) $x(t)$ bila u svom maksimumu; za primer sa slike 2.2.3.1.1, t^0 je negativno ($t^0 < 0$); s obzirom na to da se radi o prostoperiodičnoj funkciji, ona će biti u svom maksimumu za svako vreme $t = t^0 + kT$, pri čemu je sa k označen ceo broj.

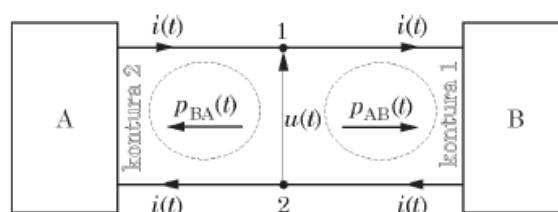


Za $t = t^0$ ima se $x(t^0) = X_{\max}$. Odavde sledi da je $\theta = -\omega t^0$. Pošto je $t^0 < 0$, sledi da je $\theta > 0$. Pozitivna vrednost ugla θ tumači se tako da naizmenična veličina $x(t)$ prednjači za ugao θ , ili vreme $|t^0|$, ispred svih naizmeničnih veličina koje svoj maksimum dostižu u trenutku $t = 0$ odnosno ispred svih veličina sa uglovima manjim od θ .

Pri tome važi i obrnuto, za $\theta < 0$ ($t^0 > 0$), veličina $x(t)$ kasni iza svih veličina tipa $y(t) = Y_{\max} \cos(\omega t)$, za ugao θ ili vreme t^0 , odnosno iza svih veličina sa uglovima većim od θ .

Za dve naizmenične veličine različitih uglova kaže se da su fazno pomerene.

10. TRENUTNA VREDNOST SNAGE (SREDNJA VREDNOST SNAGE)



Pošto su referentni smerovi napona i struje usaglašeni s obzirom na uočenu konturu koja obuhvata deo kola prema kojem je usmerena trenutna snaga, ta snaga se definiše na sledeći način:

$$p_{AB}(t) \triangleq +u(t)i(t).$$

Ako se usvoji suprotan referentan smer za snagu, snaga kojom se električna energija iz dela kola predaje delu kola A definiše se na sledeći način:

$$p_{BA}(t) \triangleq -u(t)i(t).$$

Predznak minus u definiciji je posledica neusaglašenosti smerova napona i struje kroz konturu 2, koju čine napon $u(t)$ i deo kola A, ka kojem je usmerena trenutna snaga $p_{BA}(t)$.

Tako se za snagu može pisati:

$$p(t) = U_{\max} I_{\max} \cos(\omega t + \theta_u) \cos(\omega t + \theta_i), \quad (2.2.3.2.6)$$

odnosno:

$$p(t) = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(\theta_u - \theta_i) + \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos[2\omega t + (\theta_u + \theta_i)]. \quad (2.2.3.2.7)$$

Oдавде se vidi da se snaga naizmenične električne energije sastoji od dva člana: konstantnog i naizmeničnog dvostruke učestalosti: $p(t) = p_1 + p_{2(t)}$

$$p_1 = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(\theta_u - \theta_i),$$

$$p_{2(t)} = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos[2\omega t + (\theta_u + \theta_i)],$$

Iz izraza (2.2.3.2.7) je očigledno da trenutna snaga naizmenične električne energije jeste **periodična**, ali, u opštem slučaju, **nije prostoperiodična veličina**. Samo u specijalnom slučaju **trenutna snaga** jeste prostoperiodična funkcija učestalosti koja je dvostruko veća od učestalosti prostoperiodičnog napona i struje kojima se ta snaga realizuje.

Snaga kojom se realizuje električna energija njenim osnovnim nosiocem $e_{1(t)}$, naziva se **srednjom snagom**:

$$P_{sr} = p_1 = \frac{de_1(t)}{dt} = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(\theta_u - \theta_i),$$

odnosno:

$$P_{sr} = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos\varphi,$$

za:

$$\varphi = \theta_u - \theta_i,$$

pri čemu se $\cos\varphi$ naziva *faktorom snage*.

Alternativna definicija srednje snage P_{sr} može se iskazati na sledeći način: to je konstantna snaga kojom bi se realizovala električna energija koja bi bila jednaka električnoj energiji koja se realizuje snagom $p(t)$, u jednoj periodu.

$$P_{sr} = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(\theta_u - \theta_i),$$

$$\phi = (\theta_u - \theta_i)$$

11. DEFINICIJA KOMPLEKSNE SNAGE

Pošto snaga u vremenskom domenu – trenutna snaga $p(t)$ nije prostoperiodična veličina, to se njoj spontano ne može pridružiti kompleksni predstavnik \hat{P} .

Definiciju snage u kompleksnom domenu nije moguće ustanoviti analogno s njenom definicijom u vremenskom domenu.

Međutim ukoliko se pomnože napon i struja dobija se izraz:

$$\hat{U}\hat{I} = U e^{j\theta_u} I e^{j\theta_i} = UI e^{j(\theta_u + \theta_i)} = UI \cos(\theta_u + \theta_i) + jUI \sin(\theta_u + \theta_i) .$$

Uočljivo je da realni deo podseća na izraz za trenutnu snagu samo je plus umesto minusa. Pa se taj problem može prevazići konjugovanjem jedne od vrednosti U^* ili I^* .

$$\begin{aligned}\hat{U}\hat{I}^* &= U e^{j\theta_u} I e^{-j\theta_i} = UI e^{j(\theta_u - \theta_i)} \\ &= UI \cos(\theta_u - \theta_i) + jUI \sin(\theta_u - \theta_i) \\ &= UI \cos\varphi + jUI \sin\varphi,\end{aligned}$$

Realni deo naziva se **aktivna snaga P**, dok se imaginarni naziva **kompleksna snaga Q**.

Za predznak u definiciji aktivne snage, važi isto razmatranje o usaglašenosti smerova napona i struje kao u definiciji trenutne snage. Razlika uglova se obeležava grčkim slovom φ , dok se kosinus tog ugla naziva **faktor snage**.

Dok se celokupni gornji izraz naziva **kompleksna snaga**, a njen **modul prividna snaga**. Veličine su iste, ali se drugačije obeležavaju da bi se znalo o kojoj snazi se priča, za aktivnu je W (vat), reaktivnu VAR (Volt-Amper reaktivni), za kompleksnu VA (Volt-Amper).

Definicija D1: $\hat{S} \triangleq \hat{U}\hat{I}^* \triangleq P + jQ = UI \cos\varphi + jUI \sin\varphi$,
dakle, kao na slici 2.2.3.5.1c:

$$P = \operatorname{Re}\{\hat{S}\} = UI \cos\varphi \quad \text{ i } \quad Q = \operatorname{Im}\{\hat{S}\} = +UI \sin\varphi .$$

Definicija D2: $\hat{S} \triangleq \hat{U}^*\hat{I} \triangleq P - jQ = UI \cos\varphi - jUI \sin\varphi$,
dakle, ponovo isto, ali kao na slici 2.2.3.5.1d:

$$P = \operatorname{Re}\{\hat{S}\} = UI \cos\varphi \quad \text{ i } \quad Q = -\operatorname{Im}\{\hat{S}\} = +UI \sin\varphi .$$

Veličina \hat{S} naziva se **kompleksna snaga**.

Za predznak u definiciji kompleksne snage, važi isto razmatranje o usaglašenosti smerova napona i struje kao u definiciji trenutne snage, odnosno aktivne snage.

Referentni smerovi aktivne i reaktivne snage se uvek poklapaju s referentnim smerom za kompleksnu snagu.

Modul kompleksne snage \hat{S} naziva se **prividna snaga**. Očigledno je da je prividna snaga jednaka prema obe definicije:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Dimenzije ovih snaga (aktivne, reaktivne i kompleksne odnosno prividne) međusobno su iste. One se formalno drugačije zapisuju da bi se napravila razlika snaga na koje se odnose.

12. POTROŠAČ I PROIZVOĐAČ REAKTIVNE SNAGE

a) Impedansa je **pretežno induktivna**.

- Prijemnik je potrošač i aktivne, i reaktivne snage (energije).
- Struja prema prijemniku kasni za naponom.

b) Impedansa je **pretežno kapacitivna**.

- Prijemnik je potrošač aktivne, ali generator reaktivne snage (energije)
- Struja prema prijemniku prednjači naponu.

c) Impedansa je **čisto rezistivna**.

- Prijemnik je potrošač samo aktivne snage (energije).
- Struja je u fazi s naponom.

d) Impedansa je **induktivna** (reaktivna).

- Prijemnik je potrošač samo reaktivne snage (energije).
- Struja prema prijemniku kasni za naponom za $\pi/2$.

e) Impedansa je **kapacitivna** (reaktivna).

- Prijemnik je generator reaktivne snage (energije).
- Struja prema prijemniku prednjači naponu za $\pi/2$.

f) i g) Ove dve situacije predstavljaju kratak spoj i prazan hod, respektivno.

- Aktivna i reaktivna snaga u oba slučaja jednake su nuli.
- To je posledica nultog napona u prvom slučaju, odnosno nulte struje u drugom slučaju.

Na osnovu prethodnih izlaganja očigledno je da je institucija reaktivne snage (energije), uz aktivnu snagu (energiju), kvalitativna i kvantitativna zamena za ugao ϕ ($\cos\phi$ i $\sin\phi$) izmenu naizmeničnog napona i struje kojima se električna energija realizuje.

Osim toga, očigledna je sledeća uobičajena terminologija:

- 1) induktivnost je potrošač reaktivne snage i
- 2) kapacitivnost je generator reaktivne snage.

13. SIMetriJA TROFAZNIH REŽIMA I URAVNOTEŽENOST EES

SIMETRIJA

Osnovni argument za ustanovljavanje trofaznih umesto jednofaznih elektroenergetskih sistema jeste **Teslino obrtno magnetno polje**. Ono se generiše sa tri naizmenične (prostoperiodične) vremenski pomerene struje u tri prostorno pomerena namotaja.

Za takve tri fazne struje, odnosno za odgovarajuće fazore i kompleksne predstavnike uvodi se sledeća definicija.

Tri kompleksne (naizmjenične) veličine simetrične su ako su im moduli (amplitude) međusobno jednaki i ako su oni sukcesivno (fazno) zakrenuti u kompleksnoj ravni za isti ugao (vreme).

Za kompleksne veličine \hat{X}_a , \hat{X}_b i \hat{X}_c , prikazane na slici 2.3.2.1.1, važi:

$$\hat{a}\hat{X}_b = \hat{X}_a, \quad \text{ i } \quad \hat{a}^2\hat{X}_c = \hat{X}_a, \quad (2.3.2.1.1)$$

gde operator \hat{a} iznosi:

$$\hat{a} = e^{j2\pi/3} \quad (2.3.2.1.2)$$

ili:

$$\begin{aligned} X_a = X_b = X_c = X; \quad \hat{X}_a + \hat{X}_b + \hat{X}_c = 0; \\ \theta_b = \theta_a - 2\pi/3; \quad \theta_c = \theta_a - 2 \times 2\pi/3. \end{aligned} \quad (2.3.2.1.3)$$

Za elektroenergetski sistem se kaže da je u **simetričnom režimu** ako su sve trofazne veličine u njemu (naponi, struje i fluksevi) simetrične.

Takav režim, sa N trofaznih veličina, može se opisati sledećim skupom:

$$\hat{\mathbf{X}}_R = \left\{ \left(\hat{X}_{ka}, \hat{X}_{kb}, \hat{X}_{kc} \right) \middle| k = 1, 2, \dots, N, \theta_{ra} = 0 \right\},$$

Očigledno je da u opisu, koji se odnosi na simetrične režime, za razliku od opisa koji se odnosi na trofazne režime koji ne moraju biti simetrični, nema četvrte veličine \mathbf{X}_{kn} – ona je **jednaka nuli**.

Jedan važan stav vezan za simetriju glasi: Ako su fazni naponi trofaznog čvora simetrični, tada su i odgovarajući linijski (međufazni) naponi simetrični.

Međusobna jednakost modula linijskih napona, kao i njihova zakrenutost sukcesivno za isti ugao. Uz to treba primetiti da je njihov modul $\sqrt{3}$ puta veći od modula faznih napona. Inverzan stav ne važi. Odnosno, simetrični linijski naponi ne impliciraju nužno simetrične fazne napone.

URAVNOTEŽENOST

Pojam uravnoteženosti se odnosi na konstrukciju trofaznih elemenata elektroenergetskih sistema: generatora, vodova, transformatora, potrošača...

Trofazni element elektroenergetskog sistema (generator, vod, transformator, potrošač...), koji svojim priključenjem u elektroenergetski sistem u simetričnom režimu ne poremeti simetriju režima jeste **uravnotežen element elektroenergetskog sistema**.

U slučaju trofaznog elementa koji ne bi bio uravnotežen, njegovim priključenjem na sistem poremetila bi se simetrija režima (po definiciji), čime bi se odstupilo od osnovne ideje simetrije potrebne za generisanje Teslinog obrtnog magnetnog polja. Zato se pri izgradnji trofaznih elektroenergetskih sistema teži da svi njegovi elementi budu uravnoteženi.

Trofazni generatori, kao osnovni izvori Teslinog obrtnog magnetnog polja, po definiciji se moraju konstruisati kao uravnoteženi. To načelo (uravnoteženost) ispoštovano je i u konstrukciji najzastupljenijih potrošača – trofaznih asinhronih motora.

Ako se između uravnoteženog generatora i uravnoteženog potrošača umetne vod i/ili transformator, onda oni neće poremetiti simetričan režim razmatranog sistema samo ako su uravnoteženi (po definiciji uravnoteženosti).

Ako je svaki (trofazni) element (trofaznog) elektroenergetskog sistema uravnotežen, onda je elektroenergetski sistem uravnotežen.

Samo uravnotežen elektroenergetski sistem može se dovesti u simetričan režim.

Simetrija napona svih trofaznih generatora potreban je uslov za simetriju režima elektroenergetskog sistema.

14. POGONSKI PARAMETRI TROFAZNOG ELEMENTA ZA POFAZAN TRETMAN EES

Ovde se dokazuje da se simetrični režimi trofaznih uravnoteženih elektroenergetskih sistema mogu tretirati pojednostavljeno – kao jednofazni tj. po jednoj fazi.

S obzirom na to da je $\hat{I}_n = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c = 0$, struja neutralnog provodnika jednaka je nuli. Ako su faze trofaznog elementa elektromagnetno spregnute ($\hat{Z}_{ab} \neq 0$, $\hat{Z}_{bc} \neq 0$, $\hat{Z}_{ca} \neq 0$, $\hat{Z}_{ac} \neq 0$, $\hat{Z}_{cb} \neq 0$, $\hat{Z}_{ba} \neq 0$)¹²⁵, onda matematički model elementa glasi:

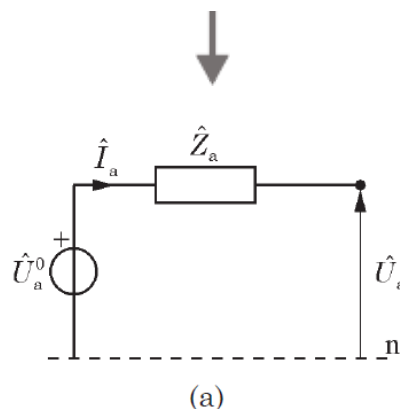
$$\begin{aligned}\hat{U}_a^0 - \hat{U}_a &= \hat{Z}_{aa}\hat{I}_a + \hat{Z}_{ba}\hat{I}_b + \hat{Z}_{ca}\hat{I}_c, \\ \hat{U}_b^0 - \hat{U}_b &= \hat{Z}_{ab}\hat{I}_a + \hat{Z}_{bb}\hat{I}_b + \hat{Z}_{cb}\hat{I}_c, \\ \hat{U}_c^0 - \hat{U}_c &= \hat{Z}_{ac}\hat{I}_a + \hat{Z}_{bc}\hat{I}_b + \hat{Z}_{cc}\hat{I}_c.\end{aligned}\quad (2.3.3.3)$$

Dakle, očigledno je da režim u bilo kojoj fazi zavisi i od režima u ostale dve faze (b i c).

Razmatrani element biće uravnotežen ako su sopstveni parametri faza međusobno jednaki ako svaka faza utiče na narednu fazu isto kao što naredna faza utiče na svoju narednu fazu i obrnuto. Ovaj se uticaj naziva **cirkularnim**. Drugim rečima, razmatrani element biće uravnotežen kada je njegov matrični reprezent cirkularna matrica.

Dakle, ako je razmatrani element uravnotežen i ako se nalazi u simetričnom režimu, na osnovu relacija:

$$\begin{aligned}\hat{U}_a^0 - \hat{U}_a &= \hat{Z}_a \hat{I}_a, \\ \hat{U}_b^0 - \hat{U}_b &= \hat{Z}_b \hat{I}_b, \\ \hat{U}_c^0 - \hat{U}_c &= \hat{Z}_c \hat{I}_c, \quad \hat{Z}_a = \hat{Z}_b = \hat{Z}_c.\end{aligned}$$

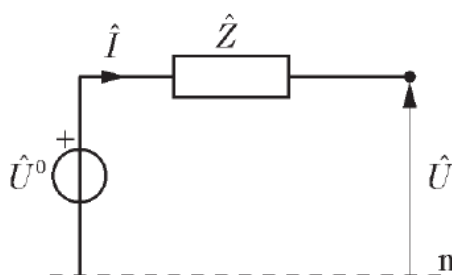


Međusobno jednaki parametri $\hat{Z}_a = \hat{Z}_b = \hat{Z}_c$ (2.3.3.9) predstavljaju jedinstven parametar razmatranog trofaznog elementa – *pogonski parametar trofaznog elementa* \hat{Z} . Dakle, ako se razmatrani element prikaže svojim pogonskim parametrom, a ne originalnim sopstvenim i međusobnim parametrima

pofaznom prikazu elementa sa slike 2.3.3.2a može se dati forma kao na slici 2.3.3.2b, bez isticanja faze o kojoj je reč. Ovo kolo se naziva *pogonsko kolo trofaznog elementa* s njegovom *pogonskom impedansom* $\hat{Z} = \hat{Z}_a = \hat{Z}_b = \hat{Z}_c$.

15. NAPONSKI NIVOI

- 1) **Elementarni** nivoa) predstavljaju električne energije. aparati. Njima se energije u prilikom čovek biti jednofazni.



potrošači (potrošači prvog najnižinivo potrošnje To su sami uređaji – električni vrši transformacija električne upotrebne oblike, kojom se okorišćuje. Ti potrošači mogu

Jednofazni (b) potrošači se stavljaju u stanje potrošnje njihovim dovođenjem pod napon jedne u odnosu na neutralni provodnik n (zemlju). Do njih se, dakle, stiže sa dva provodnika: fazni i neutralni (nula), koji je najčešće na potencijalu zemlje. Inherentno trofazni potrošači se stavljaju u stanje potrošnje njihovim dovođenjem pod napon sve tri faze u odnosu na neutralni provodnik. Do njih se stiže sa četiri provodnika.

Tipičan primer takvih potrošača su trofazni asinhroni motori. Elementarni potrošači se napajaju električnom energijom iz kućnog priključka. Izmenu kućnog priključka i elementarnih potrošača se nalazi brojilo električne energije. Razvodna table je razvodno postrojenje minimalnih dimenzija, sa osiguračima vodova kojima se napajaju elementarni potrošači. Brojilo električne energije i razvodna tabla su direktno povezani.

- 2) Integracijom elementarnih potrošača (jednofaznih i trofaznih) u okviru individualnog potrošača, koji se napajaju električnom energijom preko električnog brojila dobija se potrošač drugog nivoa. Brojila mogu biti jednofazna ili trofazna.

Skup elementarnih potrošača integrisanih u potrošač drugog nivoa ne čine trofazan uravnotežen potrošač. S ciljem da potrošači drugog nivoa budu što bliži trofaznim uravnoteženim potrošačima, prilikom izvođenja njihovih električnih instalacija se teži da se jednofazna potrošnja što ravnomernije raspodeli na sve tri faze.

- 3) Integracijom svih potrošača drugog nivoa, koji se napajaju sa istog, dobija se potrošač trećeg nivoa. Dakle, trofazni vod 3×0.380 (3×0.400) kV treći je nivo potrošača. On nije uravnotežen trofazni potrošač. Njega čine elementarni potrošači (prvi nivo) integrisani u individualne potrošače (drugi nivo), koji se napajaju električnom energijom s tog voda.

- 4) Integracijom svih vodova 3×0.380 kV, koji se napajaju sa iste TS 20(10)/0.400 kV/kV sa obuhvaćenom TS, dobija se potrošač četvrtog nivoa. On se napaja sa odgovarajućeg voda 3×20 ili 3×10 kV. Potrošač četvrtog nivoa se sastoji od tako mnogo elementarnih potrošača, sa slučajnim rasporedom po fazama i slučajnim biranjem u stanje potrošnje, tako da je na višenaponskoj strani TS 20(10)/0.400 kV/kV opterećenje po fazama praktično jednako.

Tako, potrošač četvrtog nivoa predstavlja trofazni uravnotežen potrošač. Kada se taj potrošač priključi na trofaznu mrežu koja je bila u simetričnom režimu, on neće poremetiti simetriju režima mreže.

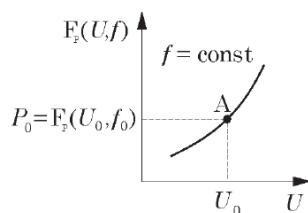
- 5) Integracijom svih TS 20(10)/0.400 kV/kV na jednom vodu dobija se potrošač petog nivoa. To je sam vod $3 \times 20(10)$ kV. Taj vod se sastoji od tri provodnika. On se napaja iz napojne TS 110/21(10.5) kV/kV.
- 6) Integracijom svih vodova $3 \times 20(10)$ kV (potrošača petog nivoa), sa obuhvaćenom TS 110/21(10.5) kV/kV, dobija se potrošač šestog nivoa. On se napaja vodom 3×110 kV.
- 7) Integracijom svih TS 110/21(10.5) kV/kV (potrošača šestog nivoa), koji se napajaju sa istog voda 3×110 kV, dobija se potrošač sedmog nivoa. To je sam vod 3×110 kV. On je najčešće golih provodnika, a izuzetno kablovski.
- 8) Integracijom svih vodova 3×110 kV (potrošača sedmog nivoa), koji se napajaju sa iste TS 400(220)/115 kV/kV128, sa obuhvaćenom TS, dobija se potrošač osmog (najvišeg) nivoa. Taj se potrošač priključuje na prenosnu mrežu.

ZAKLJUČAK

- Integracijom potrošača k-tog nivoa dobija se potrošač (k+1)-og nivoa ($k = 1, 2, \dots, 7$).
- Tačka (k+1) je izvor električne energije za sve potrošače k-tog nivoa ($k = 1, 2, \dots, 7$).
- Potrošač osmog nivoa (potrošač najvišeg nivoa, $k = 8$), napaja se direktno s podsistema prenosa, tj. s prenosne mreže. Tako je prenosna mreža izvor električne energije za potrošače osmog nivoa.
- Kada se razmatra distributivna mreža, ona se najčešće tretira po nivoima: izvor – tačka (k+1), s potrošačima k-tog nivoa ($k = 1, 2, \dots, 7$).

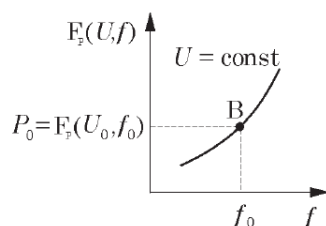
16. ZAVISNOST POTROŠNJE AKTIVNE/REAKTIVNE SNAGE ZA KONSTANTAN NAPON/UČESTALOST

Oblik karakteristike aktivna snaga – napon, prihvatljiv je jednostavno. S porastom napona snaga potrošnje svih uređaja zasnovanih na pretvaranju električne energije u toplotu raste. Slično je i sa asinhronim motorima kada se povećanjem napona poveća momenat, pa i brzina obrtanja motora.



I oblik karakteristike aktivna snaga – učestalost, prilično je jasan. Iako prethodno pomenuti uređaji za pretvaranje električne energije u toplotu nisu osetljivi na promenu učestalosti, to nije

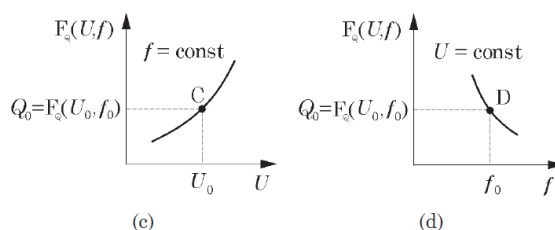
slučaj sa asinhronim motorima. S povećanjem učestalosti, njihove brzine za ista opterećenja rastu, pa rastu i njihove snage potrošnje električne energije.



Obrazložena karakteristika prikazanih na slikama 3.1.1.2c i d (reaktivna snaga – napon i reaktivna snaga – učestalost) nešto su složenija. Radi toga se polazi od jednog potrošača induktivnog karaktera, kao što je namotaj – slika 3.1.1.3.

Neka je njegova otpornost jednaka nuli. Neka je on priključen na naizmenični napon \hat{U} i neka se u njemu uspostavi naizmenična struja \hat{I} .

Potrošač troši isključivo reaktivnu snagu Q :



$$\begin{aligned}\hat{S} &= \hat{U}^* \hat{I} = P - jQ = (\hat{Z}\hat{I})^* \hat{I} = \hat{Z}^* I^2 = (0 - j\omega L) I^2 \\ &= 0 - j\omega L I^2 = 0 - jQ = -j\omega L I^2 \Rightarrow Q = \omega L I^2 \Rightarrow I = \sqrt{\frac{Q}{\omega L}}.\end{aligned}$$

Prethodno opisane četiri karakteristike potrošnje nazivaju se karakteristike samoregulacije potrošača po naponu i učestalosti. Te karakteristike su svojstvene samim potrošačima. Najvažnija među njima je ona prikazana na slici b – **samoregulacija aktivne snage po učestalosti**.

17. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE POTROŠAČA (VPQF REPRESENT)

Potpuno poznavanje režima potrošača znači poznavanje svih njegovih električnih veličina. Učestalost f je karakteristika celog elektroenergetskog sistema u razmatranom naizmeničnom režimu. Ona je konstantna i obično je jednaka nominalnoj.

U vezi s režimom potrošača otvara se sledeće pitanje: koji je to minimalan broj veličina koje je potrebno poznavati da bi se mogao rekonstruisati celokupan režim potrošača? Te veličine (minimalne po broju) čine stanje potrošača. Radi utvrđivanja stanja razmatranog potrošača, počinje se od uvedene pretpostavke o simetriji njegovog režima.

Na osnovu toga, umesto podataka za sve tri faze, dovoljno je raspolagati podacima samo za jednu od njih:

$$\begin{aligned}
\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c &\xrightarrow{\text{iz simetrije}} \hat{U} \text{ (podrazumeva se faza a),} \\
\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c &\xrightarrow{\text{iz simetrije}} \hat{I} \text{ (podrazumeva se faza a),} \\
\hat{S}_a, \hat{S}_b, \hat{S}_c &\xrightarrow{\text{iz simetrije}} \hat{S}_a = \hat{S}_b = \hat{S}_c = \hat{S} \text{ (po svakoj fazi),} \\
P_a, P_b, P_c &\xrightarrow{\text{iz simetrije}} P_a = P_b = P_c = P \text{ (po svakoj fazi),} \\
Q_a, Q_b, Q_c &\xrightarrow{\text{iz simetrije}} Q_a = Q_b = Q_c = Q \text{ (po svakoj fazi),} \\
\cos \varphi_a, \cos \varphi_b, \cos \varphi_c &\xrightarrow{\text{iz simetrije}} \cos \varphi_a = \cos \varphi_b = \cos \varphi_c = \cos \varphi \text{ (po svakoj fazi).}
\end{aligned} \tag{3.1.1.1}$$

Tako se sada potrošač može opisati sledećim faznim veličinama i učestalošću:

$$\hat{U}, \hat{I}, \cos \varphi, \hat{S}, P, Q, f. \tag{3.1.1.2}$$

Režim potrošača može opisati sa sledeće četiri veličine (jedna kompleksna i tri realne):

$$\hat{U}, P, Q, f$$

Četiri veličine mogu se predstaviti i na drugi način, izražavanjem kompleksnog napona njegovim modulom i uglom: U, θ, P, Q, f .

Ugao θ se odnosi na trenutak kada se započelo razmatranje naizmeničnog režima potrošača.

Dovođenjem potrošača pod napon određenog modula U i ugla θ_u (zadate učestalosti f), njegova aktivna i reaktivna snaga su određene nezavisno od ugla napona. Taj ugao zavisi od trenutka početka razmatranja režima celog elektroenergetskog sistema, čiji je razmatrani potrošač samo jedan element. Tako, reprezentacija potrošača se svodi na sledeće četiri veličine:

$$P, Q, U, f$$

Kada se potrošač razmatra u okviru elektroenergetskog sistema, s više potrošača (i ostalih čvorova), tada se uglovi napona ne mogu eliminisati iz predstave potrošača, pa se on mora predstaviti sa pet veličina.

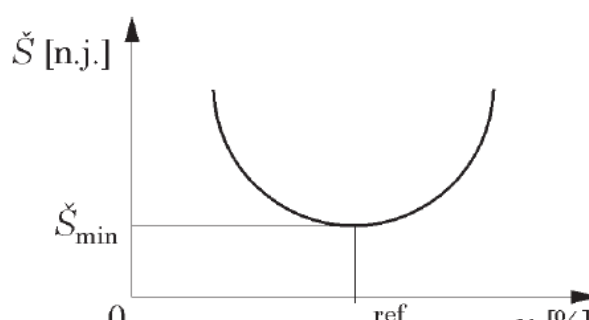
Aktivna i reaktivna snaga, s jedne strane, kao i napon i učestalost, s druge strane, nisu međusobno nezavisne veličine. Obe snage jednih te istih potrošača se menjaju s promenom modula napona i učestalosti. Njih diktira elektroenergetski sistem.

18. REGULACIJA NAPONA (NOMINALNI I REFERENTNI NAPON)

Referentni napon potrošača bilo kog nivoa jeste napon koji bi trebalo dovesti na njega da bi se minimizirala sumarna šteta koju bi svi elementarni potrošači (električni aparati), koji su integrisani u taj potrošač trpeli usled odstupanja njihovih radnih napona od nominalnih vrednosti.

Nominalni napon je napon za koji je element pravljen, jer su svi elementi prilagodjeni za unapred izabrane uslove rada. Ti uslovi su: da je saglasno sa nominalnim naponom izabrana izolacija elementa, saglasno sa nominalnim strujama su izabrani preseki provodnika, i učestalost koja odgovara brzini obrtanja Teslinog magnetnog polja.

19. Zavisnost štete potrošača od odstupanja napona



Za napon veći ili manji od referentne vrednosti, šteta koju trpe električni aparati koji čine razmatrani potrošač veća je od minimalne.

Analitički oblik funkcije štete prikazane na slici glasi:

$$\check{S} = C(u - u^{\text{ref}})^2 E + \check{S}_{\text{min}}.$$

pri čemu je sa E označena energija isporučena potrošaču u apsolutnim jedinicama [kWh]. Relativne (procentualne) vrednosti napona iznose:

$$u = (U/U_{\text{nom}}) \times 100, \quad u^{\text{ref}} = (U^{\text{ref}}/U_{\text{nom}}) \times 100,$$

pri čemu su sa U i U^{ref} označene vrednosti aktuelnog i referentnog napona potrošača u [kV], a sa U_{nom} nominalni napon mreže s koje se taj potrošač napaja, takođe u [kV].

Sa \check{S}_{min} je označena minimalna šteta koju trpe razmatrani potrošači kada se napajaju referentnim naponom. Referentni napon je jednak nominalnom (100%) kada su u pitanju elementarni potrošači (električni aparati), odnosno veći je od nominalnog, kada su u pitanju potrošači viših nivoa. To znači da je za elementarne potrošače $\check{S}_{\text{min}} = 0$.

Konstanta C u relaciji predstavlja karakteristiku štete potrošača. Razlika $(u - u^{\text{ref}})$ pod kvadratom naziva se odstupanje napona. Proizvod kvadrata odstupanja napona i energije je nosilac štete koju potrošač trpi usled odstupanja napona. Njegova dimenzija je $[(\%)^2 \text{kWh}]$.

Taj kvantitativni pokazatelj štete u literaturi je poznat kao princip $(\%)^2 \text{kWh}$. Mogućnost kontrole (minimizacije) kvantitativnog pokazatelja štete $(\%)^2 \text{kWh}$ predstavlja osnovni kriterijum za regulaciju napona potrošača. Održavanje tog pokazatelja na tolerantnom nivou zahteva održavanje napona na elementarnim potrošačima u okviru tolerantnih granica.

Te granice su obično od -5% ili -10% (donja) do $+5 \%$ (gornja), u odnosu na nominalnu vrednost napona potrošača. Da bi se omogućila realizacija takvih vrednosti napona na elementarnim potrošačima, potrebno je i u ostalim delovima distributivnih mreža održavati napone na odgovarajućim vrednostima.

20. TRI NAČINA DA SE MODELUJE POTROŠAČ

Za razmatranja koja slede od interesa su statički modeli potrošnje koji mogu da se podele na sledeće tipove :

- **model konstantne impedanse** (admitanse), gde su vrednosti aktivne i reaktivne snage proporcionalne kvadratu vrednosti modula napona
- **model konstantne struje**, gde su vrednosti aktivne i reaktivne snage direktno proporcionalne vrednosti modula napona
- **model konstantne snage**, gde vrednosti aktivne i reaktivne snage ne zavise od vrednosti modula napona

21. VRSTA VODOVA

Postoje dve vrste vodova:

- vodovi golih provodnika i
- kablovski vodovi (kablovi).

Prvi se isključivo postavljaju iznad zemlje, a drugi se najčešće ukopavanjem postavljaju u zemlju. U mrežama niskog napona, kablovi se postavljaju i iznad zemlje.

Provodnici služe za neposredni prenos napona i električne energije. Oni se izrađuju u vidu užadi. Dakle, njih čini veći broj upredenih provodnika punog, ali znatno manjeg preseka od preseka užeta provodnika voda. Sredinu užadi provodnika čine upredeni puni provodnici od čelika, a oko njih su upredeni puni provodnici od aluminijuma. Deo užeta voda od čelika služi za nošenje provodnika. Deo užeta voda od aluminijuma služi za provonenje. Takva užad se naziva alučel užad.

Oni se preko izolatora vešaju na stubove od metala, betona ili drveta. Stubovi su noseća konstrukcija voda. Izolatori su od dielektričnog materijala. Oni služe za električno odvajanje provodnika međusobno i od zemlje.

Na vrhove stubova se postavljaju zaštitna – zemljovodna užad od čelika. Tim užadima zemlja se podiže iznad voda, pa se tako znatno smanjuje verovatnoća direktnog atmosferskog pražnjenja (groma) kroz provodnike.

Uravnoteženost je poželjna karakteristika vodova kao elemenata elektroenergetskih sistema. Ona se postiže na osnovu sledećih globalnih zahteva:

- Svaki fazni provodnik treba da je isto konstruisan
- Svaki fazni provodnik treba da je geometrijski raspoređen na isti način prema provodnicima svake od preostale dve faze, kao i prema zemlji.

Ako se takav (uravnotežen) vod priključi na oba kraja na simetrične napone, u njemu će se uspostaviti simetrične struje. Odnosno, neće se poremetiti simetrija režima. Drugi zahtev se rešava **transpozicijom**.

Pod transpozicijom se podrazumeva da se faznim provodnicima, na svakoj trećini deonice voda, cirkularno menjaju položaji. Tako, na celoj deonici voda, svaki provodnik ima položaj koji je isti s položajima ostala dva, ali i isti u odnosu na neutralni provodnik i/ili zemlju.

Isto kao i vodovi golih provodnika, kablovski vodovi (kablovi) namenjeni su prenosu i distribuciji električne energije. Oni se uglavnom koriste kada suprenos i distribucija vodovima golih provodnika teško izvodljivi.

Osnovni elementi kablova su:

- 1) provodnici od bakra ili aluminijuma
- 2) izolacija i
- 3) mehanička zaštita.

Fazni provodnici su smešteni u temena jednakokraničnog trougla. Dovođenjem mehaničke zaštite na potencijal zemlje, svi provodnici se stavljaju u istu situaciju, kako međusobno, tako i prema mehaničkoj zaštiti – zemlji. To čini kablove uravnoteženim elementima. Sva četiri makro efekta vodova golih provodnika – R, L, G i C, zastupljena su i ovde.

22. MAKRO EFEKTI VODA

Vod predstavlja kontinuitet mikro-struktura. Globalni efekti tih mikro struktura čine makro efekte voda.

Četiri pogonska makro efekta voda jesu:

1. redna otpornost
2. redna induktivnost
3. otočna provodnost
4. otočna kapacitivnost.

- 1) **Redna otpornost R** – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada postoji struja kroz fazne provodnike voda. Toj struji se suprotstavlja otpornost provodnika R. Ona je srazmerna sa odnosom dužine voda (provodnika) l i površine poprečnog preseka provodnika S:

$$R: l/S$$

- 2) **Redna induktivnost L** – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada postoji naizmenična struja kroz fazne provodnike voda. On se javlja zbog toga što se svakoj konturi koju čini par faznih provodnika ili par fazni provodnik i zemlja, mogu pridružiti odgovarajuće sopstvene induktivnosti, kao i odgovarajuće međusobne induktivnosti sa ostalim konturama trofaznog voda. Induktivnost L je srazmerna logaritmu odnosa međusobnog rastojanja provodnika d, koji čine konturu i poluprečnika provodnika r:

$$L: \ln(d/r)$$

- 3) **Otočna provodnost G** – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada su fazni provodnici pod naponom. On se, pre svega, javlja usled nesavršenosti izolatora. Preko njihove, uglavnom zaprljane površine, odvede se struje s faznih provodnika koji su pod naponom (otočne struje) u druge fazne provodnike i u zemlju. To je efekat **puzajućih struja**. Pored toga, na površinama golih provodnika vodova postoji još jedan otočni efekat – **efekat korone**.

On se javlja na svakom naelektrisanom telu ako je električno polje koje to telo izaziva u njegovoj okolini veće od dielektrične čvrstine okolnog medijuma. Efekat korone se ne može izbeći na vodovima golih provodnika vrlo visokih napona. Otočnu provodnost G je teško analitički iskazati pošto varira sa zaprljanošću izolatora (puzajuće struje), vremenskim uslovima. U svakom slučaju,

oba efekta su izraženija što je potencijal (napon) provodnika veći.

- 4) **Otočna kapacitivnost C** – Ovaj makro efekat dolazi do izražaja samo kada su fazni provodnici pod naizmeničnim naponom. On se javlja zbog toga što se svaki provodnik karakteriše nekom kapacitivnošću, tj. što svaki par faznih provodnika i svaki par fazni provodnik – zemlja (neutralni provodnik) predstavljaju kondenzatore. Tako se u vodu, njegovim stavljanjem pod napone, uspostavljaju otočne – kapacitivne struje kroz dielektrik – vazduh, od provodnika ka provodniku i od provodnika ka zemlji. Kapacitivnost C je obrnuto srazmerna logaritmu odnosa međusobnog rastojanja provodnika d i njihovog poluprečnika r:

$$C: \ln(d/r)^{-1}$$

23. E1: EKSPERIMENT KRATKOG SPOJA

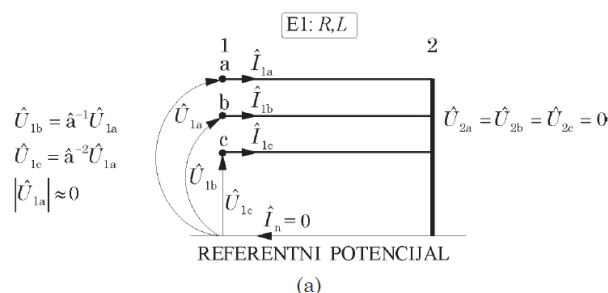
Ovaj eksperiment se odnosi na pogonsku rednu otpornost R i induktivnost L trofaznog uravnoteženog voda. Oba parametra dolaze do izražaja samo kada u vodu ima struje. Da bi se potisnuli efekti otočne provodnosti G i kapacitivnosti C, napone voda treba minimizovati.

Zato se faze voda na jednom kraju kratko spajaju s čvorom nultog potencijala (zemljom) – čvor 2 na slici. Na tri faze čvora 1 dovode se simetrični naponi malih vrednosti da bi se uspostavile merljive struje faza, a da se struje otočnih parametara voda mogu zanemariti. Priroda vodova je takva da ako vrednosti dovedenih napona iznose svega nekoliko procenata od nominalnih vrednosti, onda će struje voda, koji je kratkospojen u čvoru 2, biti bliske nominalnim. S obzirom na simetriju eksitacije voda kao i na uravnoteženost voda, fazne struje voda će biti takone simetrične.

Iz toga sledi da su odnosi faznih napona i odgovarajućih struja sve tri faze međusobno isti. S obzirom na razmatranja ti odnosi ne predstavljaju ništa drugo do rednu pogonsku impedansu voda:

$$\hat{Z}[\Omega/\text{fazi}] = R + j\omega L = R + jX = \frac{\hat{U}_{1a}}{\hat{I}_{1a}} = \frac{\hat{U}_{1b}}{\hat{I}_{1b}} = \frac{\hat{U}_{1c}}{\hat{I}_{1c}}.$$

Rezistansa te impedanse je redna otpornost R, a reaktansa X je redna induktivnost L pomnožena s kružnom učestalošću ω .



24. E2: EKSPERIMENT PRAZNOG HODA

Ovaj eksperiment se odnosi na pogonsku otočnu provodnost G i kapacitivnost C trofaznog uravnoteženog voda. Ovi parametri dolaze do izražaja samo kada je vod pod naponom. Da bi se isključili efekti redne otpornosti R i induktivnosti L, struje voda treba minimizovati. Zato se faze voda

na jednom kraju ostavljaju u praznom hodu – čvor 2 na slici.

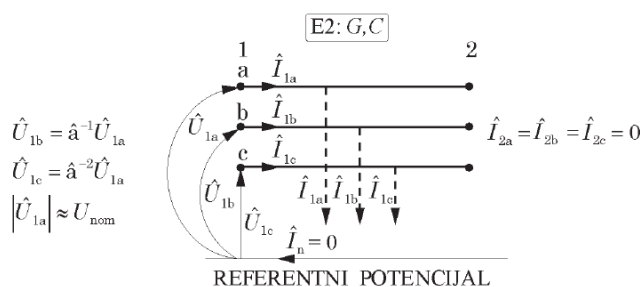
Na tri faze čvora 1 dovode se simetrični naponi dovoljno velikih vrednosti, da bi se uspostavile merljive otočne struje faza, a da se redne struje voda mogu zanemariti. Priroda vodova je takva da naponi bliski nominalnim vrednostima čvora 1 voda u praznom hodu, izazivaju vrlo male struje u odnosu na nominalne vrednosti struja voda. S obzirom na simetriju eksitacije voda, kao i na uravnoteženost voda, fazne (otočne) struje voda će biti tako nesimetrične. S obzirom na razmatranja, ti odnosi ne predstavljaju ništa drugo do **otočnu pogonsku admitansu voda**:

$$\hat{Y}[S/fazi] = G + j\omega C = G + jB = \frac{\hat{I}_{1a}}{\hat{U}_{1a}} = \frac{\hat{I}_{1b}}{\hat{U}_{1b}} = \frac{\hat{I}_{1c}}{\hat{U}_{1c}}.$$

Konduktansa te admitanse je otočna provodnost G , a **susceptansa** B je otočna kapacitivnost C pomnožena s kružnom učestalošću ω .

25. Γ, T I Π ŠEME

Prve dve varijante pogonskih kola trofaznog voda su Γ pogonska kola – slike 3.2.1.5a i b.

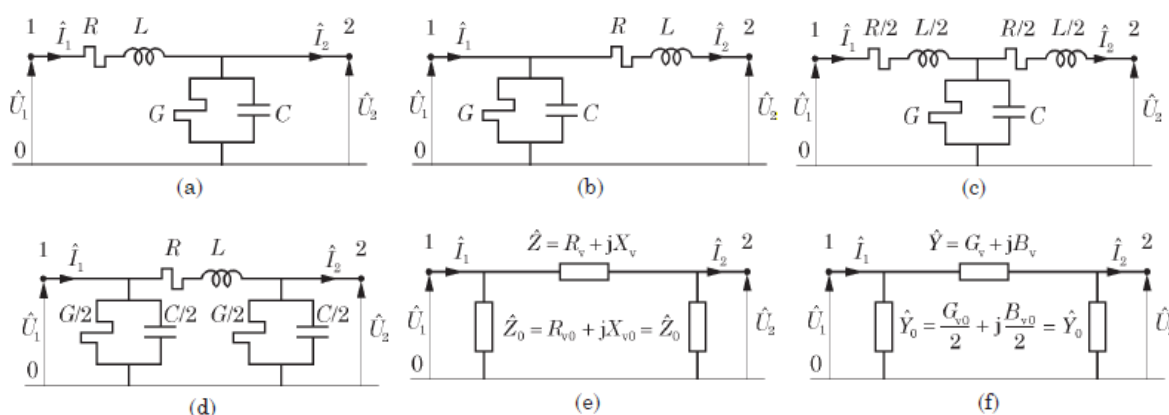


One imaju zajednički nedostatak: prema njima, vod nije isti kada se tretira sa svakog od njegova dva kraja. To svakako nije svojstveno već datom opisu trofaznog voda.

Druga varijanta pogonskog kola trofaznog voda je T pogonsko kolo – slika 3.2.1.5c. Ono nema opisani nedostatak Γ kola.

Γ i T pogonska kola nisu međusobno ekvivalentna. Ali, njihovo međusobno odstupanje, kada su tretirana kao četvorokrajnici, nije od praktičnog značaja. U oba Γ kolo i u T kolu, koja su utvrđena za isti trofazni vod, uspostaviće se praktično iste struje kada se priključe isti naponi na njihovim krajevima.

Π pogonskim kolima voda – slika 3.2.1.5d. Ona se mogu iskazati u **impedantnoj varijanti** – slika 3.2.1.5e, odnosno u **admitantnoj varijanti** – slika 3.2.1.5f.



Veze impedansi \hat{Z} i \hat{Z}_0 , odnosno admitansi \hat{Y} i \hat{Y}_0 , s kvantitativnim pokazateljima sva četiri makro efekta voda R, L, G i C, glase:

$$\begin{aligned}\hat{Z} &\triangleq R + j\omega L = R_v + jX_v; \\ \hat{Z}_0 &= \frac{1}{G/2 + j\omega C/2} = \frac{2(G - j\omega C)}{G^2 + (\omega C)^2} \\ &= \frac{2G}{G^2 + (\omega C)^2} + j\left(-\frac{2\omega C}{G^2 + (\omega C)^2}\right) \triangleq R_{v0} + jX_{v0}.\end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned}\hat{Y} &= \frac{1}{R + j\omega L} = \frac{R - j\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} \\ &= \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} + j\left(-\frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}\right) \triangleq G_v + jB_v; \\ \hat{Y}_0 &= \frac{G}{2} + j\frac{\omega C}{2} \triangleq \frac{G_{v0}}{2} + j\frac{B_{v0}}{2}.\end{aligned}$$

Najčešće korišćena varijanta Π kola voda je ona data na slici 3.2.1.5g. Na njoj su iskazani redni parametri R i X, kao i otočni parametric G i B. Parametri R i X čine rednu impedansu voda

$$\hat{Z} = R + jX, \text{ a parametri } G/2 \text{ i } B/2 \text{ čine dve jednake otočne admitanse voda } 1/2\hat{Y} = 1/2G + j1/2B.$$

26. KONSTITUTIVNE RELACIJE IDEALNOG TRANSFORMATORA

Idealni transformator može predstaviti sa sledeće tri relacije:

$$\begin{aligned}\hat{U}_1 / \hat{U}_2 &= a, \\ \hat{S}_1 &= \hat{S}_2, \\ \hat{I}_1 / \hat{I}_2 &= 1/a.\end{aligned}$$

Prve dve relacije se nazivaju **konstitutivne relacije idealnog transformatora**, a treća od njih se zove **konstitutivna posledica idealnog transformatora**.

27. KONSTRUKCIJSKE PRETPOSTAVKE I POSLEDICA

Izolacija namotaja transformatora određena je nominalnim naponima njegove više i niže naponske strane \mathbf{U}_{1nom} (\mathbf{V}_{1nom}) i \mathbf{U}_{2nom} (\mathbf{V}_{2nom}). Poprečni preseki namotaja obe strane transformatora (količina bakra) određeni su njihovim nominalnim strujama \mathbf{I}_{1nom} i \mathbf{I}_{2nom} . Nije racionalno slobodno birati ove četiri nominalne vrednosti, odnosno nije racionalno konstruisati transformator sa slobodno izabranim vrednostima tih veličina.

Kada bi se takav napon doveo na višenaponsku stranu, napon na njegovoj niženaponskoj strani bi bio veći od odgovarajuće nominalne vrednosti \mathbf{U}_{2nom} :

$$(\mathbf{U}_1 / \mathbf{U}_2 = \mathbf{N}_1 / \mathbf{N}_2) \text{ i } (\mathbf{U}_{1nom} / \mathbf{U}_{2nom} > \mathbf{N}_1 / \mathbf{N}_2) \Rightarrow \mathbf{U}_2 > \mathbf{U}_{2nom}$$

a to bi destruktivno delovalo na njegovu izolaciju. Dakle, namotaj višenaponske strane je predimenzionisan.

Istom logikom bi se došlo do činjenice da bi niženaponski namotaj bio predimenzionisan kada bi transformator bio konstruisan tako da važi relacija:

$$U_{1nom} / U_{2nom} < N_1 / N_2$$

Na osnovu tih razmatranja očigledno je da (trofazne) transformatore treba konstruisati saglasno sa sledećom – prvom konstrukcijskom pretpostavkom:

$$\frac{U_{1nom}}{U_{2nom}} \left(= \frac{V_{1nom}}{V_{2nom}} \right) = \frac{N_1}{N_2}.$$

Logički sličnim razmatranjem, ali sada vezanim za **nominalne struje transformatora**, kojima je određena količina bakra ugrađenog u namotaje (njihov poprečni presek), može se izvesti i druga konstrukcijska pretpostavka transformatora:

$$\frac{I_{1nom}}{I_{2nom}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{2nom}}{U_{1nom}}$$

Nominalna (prividna) snaga jednog namotaja transformatora definiše se kao proizvod odgovarajućeg nominalnog napona i nominalne struje namotaja. Tada dve konstrukcijske pretpostavke impliciraju jednakost nominalnih snaga oba namotaja transformatora – konstrukcijsku posledicu:

$$U_{1nom} I_{1nom} = U_{2nom} I_{2nom} \Rightarrow S_{1nom} = S_{2nom} = S_{nom}.$$

To znači da je namotaje transformatora racionalno graditi samo za iste snage. Za trofazne transformatore se definiše i uglavnom koristi trofazna nominalna (prividna) snaga namotaja:

$$S_{nom(3)} = 3S_{nom}.$$

S obzirom na to da su nominalne snage oba namotaja transformatora međusobno jednake, njima su definisane i nominalna fazna i trofazna snaga transformatora.

matematičkom modelu transformatora (3.3.10) može se dati sledeća aproksimativna forma:

$$\begin{aligned}\hat{U}_1 &= jX_{\gamma 1}\hat{I}_1 + N_1\hat{E}, \\ \hat{U}_2 &= jX_{\gamma 2}\hat{I}_2 + N_2\hat{E}, \\ \hat{I}_1 + (N_2/N_1)\hat{I}_2 &= 0.\end{aligned}\quad (3.3.1.8)$$

Ovom modelu odgovara ekvivalentno kolo prikazano na slici 3.3.2d. Ono se može prikazati u više varijanti. Npr. parametri transformatora se mogu koncentrisati na istu stranu njegovog ekvivalentnog kola, npr. na njegovu višenaponsku stranu (slika 3.3.2e). Da bi se to realizovalo, potrebno je drugu jednačinu matematičkog modela (3.3.1.8) pomnožiti sa odnosom transformacije transformatora N_1/N_2 . Ako se zatim uvedu sledeće smene:

$$\begin{aligned}\hat{U}_2^1 &= (N_1/N_2)\hat{U}_2, \\ \hat{I}_2^1 &= (N_2/N_1)\hat{I}_2, \\ X_{\gamma 2}^1 &= (N_1/N_2)^2 X_{\gamma 2},\end{aligned}\quad (3.3.1.9)$$

onda se matematički model, s veličinama svedenim na višenaponsku stranu, može napisati u obliku:

$$\begin{aligned}\hat{U}_1 &= jX_{\gamma 1}\hat{I}_1 + N_1\hat{E}, \\ \hat{U}_2^1 &= jX_{\gamma 2}^1\hat{I}_2^1 + N_1\hat{E}, \\ \hat{I}_1 + \hat{I}_2^1 &= 0,\end{aligned}\quad (3.3.1.10)$$

28. EKSPERIMENT KRATKOG SPOJA TRANSFORMATORA

Pogonski parametri pojednostavljenog ekvivalentnog kola transformatora mogu se odrediti na osnovu eksperimenata.

Napon kratkog spoja transformatora jeste napon koji treba dovesti na jednu stranu transformatora, pri kratkospojenoj drugoj strani transformatora, da bi se u namotaju na koji je doveden napon uspostavila nominalna struja.

PRVI EKSPERIMENT KRATKOG SPOJA

3.3.2.1a. Po definiciji, za to kolo važi:

$$\hat{U}_2 = 0, \quad I_{1k} = I_{1nom}. \quad (3.3.2.1)$$

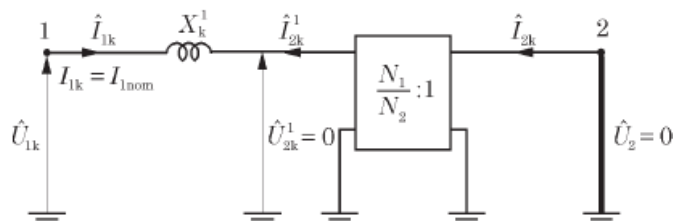
Ako struja na višenaponskoj strani transformatora ima nominalnu vrednost, onda i struja na niženaponskoj strani ima odgovarajuću nominalnu vrednost. Ovaj stav se može dokazati na sledeći način:

$$\hat{I}_{2k} = (N_1/N_2)\hat{I}_{2k}^1 = -(N_1/N_2)\hat{I}_{1k} \Rightarrow I_{2k} = (N_1/N_2)I_{1k}. \quad (3.3.2.2)$$

Na osnovu definicije kratkog spoja, $I_{1k} = I_{1nom}$, kao i druge konstrukcijske pretpostavke (3.3.1.3), sledi:

$$I_{2k} = (N_1/N_2)I_{1nom} = I_{2nom}. \quad (3.3.2.3)$$

Time je dokaz stava završen.



$$\begin{aligned}
u_{1k} [\%] &= \frac{U_{1k}}{U_{1nom}} \times 100 = \frac{X_k^1 I_{1nom}}{U_{1nom}} \times 100 = \frac{X_k^1 U_{1nom} I_{1nom}}{U_{1nom}^2} \times 100 \\
&= \frac{X_k^1 \times 3U_{1nom} I_{1nom}}{(\sqrt{3}U_{1nom})^2} \times 100 \left(= \frac{X_k^1 S_{nom(3)}}{V_{1nom}^2} \times 100 \right).
\end{aligned}$$

Za napon kratkog spoja transformatora, saglasno sa (3.3.2.1), kao i sa $(\hat{U}_{2k}^1 / \hat{U}_2 = N_1 / N_2 \wedge \hat{U}_2 = 0) \Rightarrow \hat{U}_{2k}^1 = 0$, važi:

$$\hat{U}_{1k} = jX_k^1 \hat{I}_{1k} \Rightarrow U_{1k} = X_k^1 I_{1nom}. \quad (3.3.2.4)$$

Napon kratkog spoja uobičajeno se izražava u procentima nominalnog napona:

DRUGI EKSPERIMENT KRATKOG SPOJA

Ovaj eksperiment je prikazan na slici 3.3.2.1b. Po definiciji, za njega važi:

$$\hat{U}_1 = 0, \quad I_{2k} = I_{2nom}, \quad (3.3.2.6)$$

Za napon kratkog spoja može se napisati:

$$\begin{aligned}
\hat{U}_{2k} &= (N_2 / N_1) \hat{U}_{2k}^1 = (N_2 / N_1) jX_k^1 \hat{I}_{2k}^1 \\
&= (N_2 / N_1) jX_k^1 (N_2 / N_1) \hat{I}_{2k},
\end{aligned} \quad (3.3.2.7)$$

odnosno, ako se njegov modul izrazi u procentima sopstvenog nominalnog napona, dobija se:

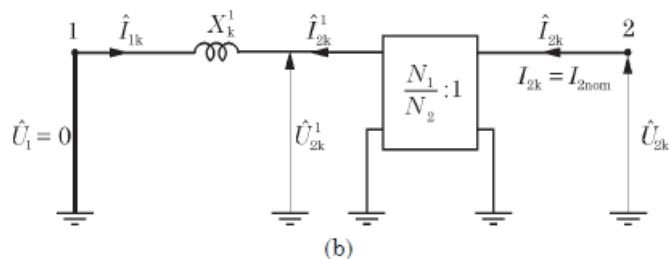
$$\begin{aligned}
u_{2k} [\%] &= \frac{U_{2k}}{U_{2nom}} \times 100 = \frac{X_k^1 (N_2 / N_1) I_{2nom}}{(N_1 / N_2) U_{2nom}} \times 100 \\
&= \frac{X_k^1 I_{1nom}}{U_{1nom}} \times 100 = u_{1k} [\%].
\end{aligned} \quad (3.3.2.8)$$

Pri ovom eksperimentu takođe važi da su struje jednake njihovim nominalnim vrednostima na obe strane transformatora, što nije teško pokazati:

$$I_{2k} = I_{2nom} \Rightarrow I_{1k} = I_{1nom}. \quad (3.3.2.9)$$

Dakle, u oba eksperimenta kratkog spoja, naponi kratkog spoja transformatora međusobno su jednaki kada su iskazani u procentima. Zato se, kao podatak o transformatoru, daje jedan napon kratkog spoja u procentima bez naznake na koji se eksperiment on odnosi (prvi ili drugi):

$$u_{1k} [\%] = u_{2k} [\%] = u_k [\%]. \quad (3.3.2.10)$$



Kada bi se radilo sa složenijim ekvivalentnim kolima transformatora, u kojem nije zanemarena impedansa magnetisanja, tada se za njeno izračunavanje vrše eksperimenti praznog hoda transformatora.

29. REGULACIONI TRANSFORMATORI

Pored izvora napona – generatora, vrlo važni resursi za kontrolu napona elektroenergetskih sistema, jesu **regulacioni transformatori**. Kod regulacionog transformatora jedan od njegovih namotaja se konstruiše s više regulacionih otcepa.

Zahvatanjem različitog broja navojaka N_1 , pri nepromenljivom broju navojaka N_2 , menja se odnos transformacije transformatora.

Odnos transformacije N_1^0/N_2 je nominalni. Pod brojem navojaka N_1^0 podrazumeva se broj navojaka obično određen srednjim od neparnog broja otcepa – nominalnim otcepom. Oko tog otcepa obično ima još po isti broj otcepa. Ukupan broj navojaka između svaka dva susedna otcepa obično je isti. Tada je i ukupan broj navojaka između nominalnog otcepa i prvog, odnosno poslednjeg otcepa isti.

Tako se odnos transformacije regulacionog transformatora može menjati u diskretnim vrednostima, izmenu sledećih granica:

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)_{\min} = \frac{N_1^0 - \Delta N_1}{N_2}, \quad \left(\frac{N_1}{N_2}\right)_{\max} = \frac{N_1^0 + \Delta N_1}{N_2}.$$

Regulacioni prekidači, odnosno odgovarajući regulacioni otcepi, konstruišu se na onim krajevima namotaja koji su priključeni na neutralni provodnik, da bi ti uređaji bili jeftiniji – konstruisani za male napone.

Regulacioni transformatori se izvedu u dve osnovne varijante:

1. mogućnost promene odnosa transformacije pod opterećenjem (skuplja varijanta)
2. s promenom odnosa transformacije u beznaponskom stanju (jeftinija varijanta)

U drugoj, jeftinijoj varijanti, transformator se mora isključiti iz sistema, promeniti odnos transformacije, pa ponovo uključiti u sistem. Dakle, za vreme te manipulacije, potrošači koji se napajaju električnom energijom s tog transformatora, ostaju bez napona (napajanja).

Kada je u pitanju transformator s promenom odnosa transformacije pod opterećenjem, tada se otcepi izvode na višenaponskim stranama transformatora, pošto su tamo manje struje koje se prekidaju/uspostavljaju prilikom promene pozicije regulacionog prekidača.

30. POJAM PRIMARA I SEKUNDARA

Oni se definišu saglasno s tokom aktivne snage u transformatoru. Ona je usmerena od primara ka sekundaru. Tako je kod generatorskog blok-transformatora niženaponska strana **primar**, a višenaponska strana **sekundar**.

Kod distributivnih transformatora je obrnuto. Kod transformatora kojima su povezane prenosne mreže različitih nominalnih napona, zavisno od režima, moguće su obe navedene varijante, tj. njihove niženaponske, odnosno višenaponske strane mogu u nekim režimima biti primari, a u drugim sekundari.

31. RADNI REŽIM SINHRONE MAŠINE

Sinhrona mašine predstavljaju uređaje za transformaciju mehaničke u električnu energiju i obrnuto. Kao i sve ostale naizmjenične električne mašine one su reverzibilne. To znači da se ista mašina može koristiti i kao motor, i kao generator.

Zavisno od smerova energije (snage), sinhrona mašina menja svoj status:

1. Sinhrona mašina se u elektroenergetskom sistemu najčešće sreće u statusu generatora – sinhroni generator. U statusu generatora, sinhrona mašina najčešće se sreće u natpobuđenom režimu, tj. njome se proizvodi reaktivna energija (snaga) potrebna potrošačima.

U periodima malih potrošnji (noću), kada se na rasterećenim vodovima uglavnom generiše reaktivna energija, pa u elektroenergetskom sistemu ima viška te energije, sinhrona mašina se nalazi u potpobuđenom režimu, tj. njome se apsorbuje višak reaktivne energije u sistemu. U specijalnim slučajevima pogona, sinhronom mašinom se niti generiše, niti apsorbuje reaktivna energija.

2. U industrijskim pogonima s velikim mašinama za njihov pogon se ponekad koriste sinhroni motori. Na tim motorima, isto kao i na sinhronim generatorima, može se menjati snaga proizvodnje (potrošnje) reaktivne energije, odnosno proizvoditi napon, pa se tako njihovim pogonom može pomagati sistemu u smislu isporuke reaktivne energije potrošačima.

3. Sinhroni kompenzatori su sinhroni motori u praznom. Oni su namenjeni proizvodnji samo reaktivne energije kada ona nedostaje sistemu, odnosno njenoj apsorpciji kada u sistemu ima viška reaktivne energije. Dakle, oni kompenzuju pozitivnu ili negativnu razliku proizvodnje i potrošnje reaktivne energije (s gubicima) elektroenergetskog sistema. Tako, na isti način kao i sinhroni motori, njima se potpomaže sinhronim generatorima sistemu. Često se sinhroni kompenzatori ugranjaju na pogodnim mestima u podsistemu prenosa, blizu potrošačkih područja. Tada služe za proizvodnju reaktivne energije za potrebe potrošača. Time se rasterećuju generatori proizvodnje, a prenosna mreža se rasterećuje prenosom reaktivne energije.

P_{PM}	P_{SM}	Q_{SM}	STATUS	NAPOMENE	
> 0	> 0	> 0	Natpobuđen generator	GENERATOR	<ul style="list-style-type: none"> • PM = turbina • $P_{PM} > 0$, $P_{SM} > 0$ • $P_{PM} > P_{SM}$ (gubici u generatoru)
		= 0	Specijalan režim generatora		
		< 0	Potpobuđen generator		
< 0	< 0	> 0	Natpobuđen Motor	MOTOR	<ul style="list-style-type: none"> • PM = radna mašina • $P_{PM} < 0$, $P_{SM} < 0$ • $P_{PM} < P_{SM}$ (gubici u motoru)
		= 0	Specijalan režim motora		
		< 0	Potpobuđen motor		
= 0	< 0	> 0	Natpobuđen motor	SINHRONI KOMPENZATOR (motor u praznom hodu)	<ul style="list-style-type: none"> • $P_{PM} = 0$ (nema pogonjene mašine), $P_{SM} < 0$ • $P_{SM} > 0$ (gubici u sinhronom kompenzatoru)
		= 0	Specijalan režim motora		
		< 0	Potpobuđen motor		

32. PREKIDAČI I RASTAVLJAČI

PREKIDAČI: DRUGI PROBLEM TROFAZNOG ČVORA

Da bi se pojedini elementi elektroenergetskih sistema mogli isključiti sa sabirnice i priključiti na sabirnice razvodnih postrojenja, sabirnice bi se morale ostaviti bez napona. To znači da bi se prilikom priključenja, odnosno isključenja jednog elementa, svi ostali elementi koji su priključeni na iste sabirnice morali ostaviti bez napona. To znači da bi bez napona morao ostati ceo elektroenergetski sistem.

Rešenje drugog problema trofaznog čvora:

Svaki trofazni element elektroenergetskog sistema, otočni sa svojim jednim krajem, a redni sa svoja dva kraja, priključuje se na odgovarajuće sabirnice preko prekidača P.

Prekidač je uređaj koji je konstruisan tako da se njime element elektroenergetskog sistema koji je u pogonu može isključiti sa sabirnice. I obrnuto, element koji je van pogona prekidačem se može priključiti na sabirnice – staviti u pogon.

Zbog toga se prekidač konstruiše sa odgovarajućim kućištem. U kućištu se nalazi ulje ili neki drugi materijal, sa odgovarajućim komorama za gašenje električnog luka. Luk nastaje u toku prekidanja. Zato se prekidač konstruiše tako da se njime, bez oštećenja na njemu, više puta može prekinuti ili uspostaviti maksimalna radna struja elementa kojem je pridružen. Raspolažući sa po jednim prekidačem uz svaki otočni element, odnosno dva prekidača, svaki na po jednom kraju rednog elementa, nije teško bilo koji element izolovati iz ostatka elektroenergetskog sistema, pa mu fizički prići, npr. radi remonta ili opravke.

Koristeći se istim prekidačima, već isključeni element može se uključiti na sistem.

Napomena: Po dva prekidača na jednom rednom elementu se postavljaju kada se taj element može dovesti pod napon sa obe njegove strane. Ako to nije slučaj, onda je dovoljno postaviti samo jedan prekidač na strani s koje se elementu dovodi napon.

Pored manipulativne uloge, kada se njime prekidaju/uspostavljaju radne struje elemenata sistema, prekidač ima još jednu vrlo značajnu ulogu. To je prekidanje struje elementa elektroenergetskog sistema u kojem se dogodio kratak spoj.

Time se element s kratkim spojem izdvaja iz ostatka elektroenergetskog sistema. Kratki spojevi su događaji koji izlaze iz okvira uobičajenih režima elektroenergetskih sistema. To su nepoželjne situacije, praćene vrlo velikim strujama. Kada bi bile tolerisane duže vreme, te struje bi destruktivno delovale na sistem.

Za razliku od prethodno opisane manipulativne uloge prekidača, sada opisana uloga je zaštitna. U toj ulozi, prekidačem se prekidaju struje kvara, koje su i desetine puta veće od maksimalnih radnih struja odgovarajućih elemenata.

Dakle, prekidač je uređaj kojim se može uspostaviti i prekinuti maksimalna radna struja i prekinuti maksimalna struja kvara elemenata.

Za **niže napone**, ulogu prekidača igraju **osigurači**. Ako su automatski, njihova ideja je slična sa idejom prekidača. Jedan od njihovih (jeftinih) delova se istopi usled delovanja struje kvara, pa se tako odgovarajući element eliminiše iz sistema.

RASTAVLJAČI TJ. TREĆI PROBLEM TROFAZNOG ČVORA

Da bi se elementu elektroenergetskog sistema moglo bezbedno prići, potrebna je apsolutna sigurnost da je prekidačem korektno obavljena funkcija prekidanja. Ako se aktiviranjem odgovarajućeg prekidača, element isključi iz elektroenergetskog sistema radi njegovog remonta, sa elementom u direktni kontakt dolazi osoblje za remont. Osim zaštite njihovih života, sigurnost da je prekidač izvršio svoju ulogu je potrebna i iz psiholoških razloga.

Rešenje trećeg problema trofaznog čvora:

Sigurnost da je element elektroenergetskog sistema ostao bez napona obezbeđuje se korišćenjem rastavljača R. Oni se ugrađuju između prekidača i sabirnice. S obzirom na to da je svrha rastavljača da se njime obezbedi vidni prekid već prekinutog strujnog kola, on se konstruiše bez kućišta, sa očiglednim (vidljivim) statusom polova. On je znatno jeftiniji od prekidača s obzirom na to da nije namenjen prekidanju i uspostavljanju ikakvih struja ili napona. Manipulišući rastavljačima, uz delovanje prekidača, njima se definitivno i očigledno elementi ostavljaju bez napona ili stavljaju pod napon. Njima se manipuliše uglavnom ručno. U slučaju da je prekidač zatajio, manipulacija rastavljačem destruktivno će delovati na sam rastavljač. Prekidanje, odnosno uspostavljanje radne struje elementa pomoću rastavljača prouzrokuje njegovo uništenje.

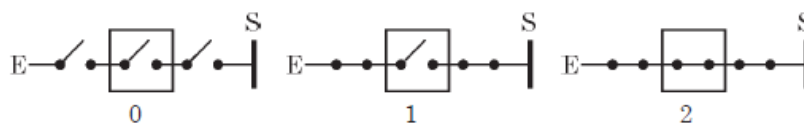
33. OSNOVNA PRAVILA PRILIKOM MANIPULACIJA PREKIDAČIMA I RASTAVLJAČIMA (STAVLJANJA/ISKLUČIVANJE ELEMENTA U/IZ POGONA)

Redosled kojim se moraju vršiti manipulacije prekidačima i rastavljačima za priključenje elementa na sabirnice, odnosno njegovo isključenje, može se jednostavno utvrditi. Priključenja jednog kraja neopterećenog elementa E na sabirnice S.

To se izvodi u sledeća dva koraka:

1. Uključenje oba rastavljača – nema uspostavljanja struje i napona pošto je prekidač isključen

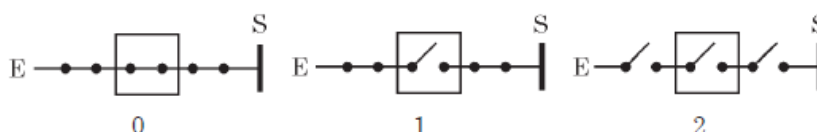
2. Uključenje prekidača – uspostavlja se struja kroz prekidač i rastavljače.



Isključenje jednog kraja opterećenog elementa E sa sabirnice S.

Isključenje se izvodi u sledeća dva koraka:

1. Isključenje prekidača – prekid struje prekidačem
2. Vidno prekidanje strujnog kola sa obe strane prekidača otvaranjem oba rastavljača – njima se ne prekida struja, pošto je ona već prekinuta prekidačem (osim ako je on zatajio).



Sada se može zaključiti da se razvodno postrojenje logički ustanovljava u sledeća četiri koraka:

1. Razvlačenje idealnog trofaznog čvora u sabirnice – šine (užad) odgovarajućih dimenzija.
2. Ugradnja jednog prekidača na svakom kraju elementa koji se priključuje na sabirnice.
3. Ugradnja para rastavljača oko svakog prekidača.
4. Instalacija pomoćne opreme za merenje, zaštitu, signalizaciju itd.

34. KAKO RADE SABIRNICE

Da bi se svaki individualni potrošač mogao staviti u stanje potrošnje, do njega je potrebno dovesti napon elektroenergetskim vezama (električnim provodnicima).

Elektroenergetske veze svih individualnih potrošača razmatranog potrošačkog područja se koncentrišu – sabiraju u jednu tačku – sabirnice S (takođe provodnici).

Trofazni čvor (tri idealna čvora) razvlači se u trofazne sabirnice u vidu trostrukih šina punog preseka ili užadi određene dužine, izrađenih od bakra ili alučela.

Njihovi poprečni preseki su dovoljnih dimenzija da se otpornost sabirnica može smatrati nulom. Odnosno, potencijal sabirnica je praktično isti po celoj njihovoj dužini. Na taj način, sabirnice su prilično bliske njihovoj ideji – čvoru.

S je mesto (sabirnice) gde potrošač preuzima električnu energiju od proizvodnje.