

1. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

1.1 Općenito o stabilnosti EES-a

EES je viševerelićinski nelinearni regulacijski sustav kod kojeg se neprestano mijenja pogonsko stanje jer se stalno mijenja potrošnja, uvrštenost strojeva i topologija mreže, što dovodi do promjena ključnih parametara. Kad je EES podvrgnut poremećaju, stabilnost sustava ovisi od početnog pogonskog stanja i od same prirode poremećaja.

Općenito se poremećaji dijele na male i velike. U slučaju malih poremećaja poput kontinuirane promjene potrošnje, EES se mora neprekidno prilagođavati i imati zadovoljavajući odziv u odnosu na parametre sustava. Jednako tako, sustav se mora održati i prilikom brojnih značajnih poremećaja različite prirode, poput kratkih spojeva na prijenosnomvodu ili prilikom gubitka neke proizvodne jedinice. Veliki poremećaj može prouzrokovati strukturalne promjene nakon izdvajanja elemenata mreže u kvaru.

U nekom skupu neravnotežnih stanja, EES može biti stabilan u odnosu na neki veliki poremećaj, i nestabilan u odnosu na neki drugi. Nepraktično i neekonomično je projektirati EES obzirom na stabilnost za svaki mogući ispad nekog elementa u mreži. Projektiranje sustava prema ispadima (kriterij $n-1$) temelji se na izboru najvjerojatnijeg mogućeg ispada. Iz toga slijedi da se stabilnost sustava pri velikim poremećajima uvijek istražuje s obzirom na određene pretpostavljene scenarije poremećaja. Veliki poremećaj djeluje na stabilnost sustava uzrokujući nelinearne učinke što onemogućuje linearizaciju sustava jednadžbi prilikom njegovog istraživanja.

Ako se sustav prateći prijelazne poremećaje, zadržava u novom ravnotežnom stanju bez oštećenja preostalog dijela sustava, tj., sa svim preostalim generatorima i potrošačima uz zadovoljenje kriterija sigurnosti ($n-1$), kaže se da je sustav stabilan. Djelovanje automatskih regulatora i operatora sustava može sustav vratiti u normalno pogonsko stanje. U protivnom, ako je sustav nakon poremećaja nestabilan može doći do pojave različitih brzina rotora strojeva, što u krajnjem slučaju može izazvati raspad sustava zbog povećavanja kutne razlike rotora proizvodnih jedinica u odnosu na kut rotora stroja u referentnom čvoru, ili dovesti do progresivnog pada napona u čvorovima mreže. Nestabilno stanje sustava može nadalje dovesti do kaskadnih ispada što može izazvati ispad iz pogona važnih elemenata sustava i konačno uzrokovati njegov potpuni raspad.

Na stabilnost općenito utječu električne i mehaničke konstante generatora i pripadnih pogonskih strojeva, kao i regulatori uzbude generatora i turbinski regulatori. Osim toga, na stabilnost utječu i veze između generatora, koji rade paralelno u sustavu, što konkretno znači konstante dalekovoda i njihova dužina.

Iz teorije, kao i iz praktičnog iskustva, poznato je da je električni spoj dva paralelna sinkrona stroja elastične prirode i da se tim sustavom ne mogu prenositi po volji velike snage; analiza veze vodi k problemu računanja granične snage koja se tim sustavom može prenositi, a da sustav ostane stabilan. Uslijed elastičnosti spoja može doći do njihanja stroja i do gubitka stabilnosti.

Razvojem i rastom elektroenergetskih sustava u razdoblju nakon drugog svjetskog rata, naročito na početku šezdesetih godina, u praksi su se počele češće uočavati pojave nestabilnog ponašanja elektroenergetskog sustava. Problem se pokušao riješiti:

- Smanjenjem broja sinkronih strojeva koji rade sinkrono izgradnjom istosmjernih veza među sustavima ili unutar samog sustava;
- Izgradnjom dodatnih trofaznih vodova između sustava ili unutar pojedinog elektroenergetskog sustava (skupo ali temeljito rješenje);
- Visokim stupnjem automatizacije elektroenergetskog sustava uz daljnje usavršavanje regulacijskih i zaštitnih uređaja. To obuhvaća automatsko podfrekvencijsko i podnaponsko rasterećenje elektroenergetskog sustava, sinkrono i nesinkrono automatsko ponovno uključivanje, automatsko reguliranje uzbude (posebno primjena tehnika forsiranja uzbude), primjena asinkronog rada, osiguranje uvjeta rezultantne stabilnosti, dijeljenje sustava na dijelove koji ne rade u sinkronizmu itd.;
- Uvođenjem dodatne povratne veze u regulatore napona nekih sinkronih generatora u sustavu. S uvođenjem dopunskih regulacijskih signala u regulator napona sinkronog generatora na umjetan se način mogu stvoriti prigušni momenti koji eliminiraju ili prigušuju oscilacije među sustavima i među strojevima

Treba naglasiti da se povišenjem naponskih razina prijenosa, općenito može povećati i prijenosna moć i granica stabilnosti.

1.2 Definicija stabilnosti EES-a

Stabilnost nekog EES-a je sposobnost, uz dane početne uvjete, ponovnog vraćanja u pogonsku ravnotežnu točku nakon pojave fizičkog poremećaja, a da pri tome varijable stanja sustava ostanu unutar granica koje osiguravaju potpuni integritet EES-a.

Integritet sustava je praktično očuvan ako preostali dio EES-a ostane cjelovit bez daljnjih ispada proizvodnih jedinica ili potrošnje, izuzimajući ispale elemente u mreži, a s ciljem izolacije ili namjernog isključenja pojedinih elemenata sustava, radi očuvanja pogona preostalog dijela EES-a.

Analogno pod stabilnošću jednog generatora, koji radi na veliki sustav, misli se na sposobnost toga generatora da unatoč smetnji drži korak (ostane u sinkronizmu) sa sustavom. Gubitak stabilnosti, tj. ispad iz sinkronog pogona s EES, jednog generatora znači veće opterećenje ostalih generatora, koji zbog preopterećenosti mogu također ispasti iz sinkronizma, što može u konačnoj fazi dovesti do totalnog raspada sustava. Raspad sustava je najteži kvar koji je u svakom slučaju potrebno izbjegavati.

1.3 Proces gubitka stabilnosti EES-a

Općenito je poznato da se proces gubitka stabilnosti odvija u elektroenergetskom sustavu tako da pojedini generatori postupno gube sinkronizam, a pojedini se vodovi redom djelovanjem zaštite isključuju iz mreže. Poremećaj bi se dalje lančano proširio na cijeli sustav, u kojem bi konačno došlo do potpunog raspada ako se ne bi pravodobno odvojio dio sustava, odakle se poremećaj počeo širiti, od preostalog dijela sustava. Posljedica je, dakle, takvog tijeka zbivanja da elektroenergetski sustav prestane u cijelosti funkcionirati ako se pravodobno to ne spriječi, ili pak ostane u pogonu samo djelomično, ali je tada obično pogon poremećen i u dijelu koji i dalje radi. Takvo stanje, s potpunim prekidom

opskrbe potrošača u jednom dijelu sustava i s nezadovoljavajućom kvalitetom električne energije u preostalom dijelu često potraje više sati, pa i više desetaka sati.

Nije nepoznato kako se u načelu može spriječiti sama pojava ili pak kako se mogu ublažiti posljedice ovakvih neželjenih zbivanja u elektroenergetskom sustavu, ako se žele izbjeći nepopularne redukcije potrošnje, što je po ekonomskim posljedicama slično raspadu sustava. Povoljnije stanje u tom pogledu je kada je prijenosna mreža što izdašnije dimenzionirana i sa što više uzamčenih vodova (povoljno djeluje što više paralelnih prijenosnih veza, ali je ograničavajući faktor povećanje jakosti struja kratkog spoja u sustavu), ako je kvaliteta elektroenergetske opreme bolja (naročito kvaliteta njezine električne izolacije, jer će tada biti manje kratkih spojeva), ako je ugrađena odgovarajuća zaštita od poremećaja i kratkih spojeva, što se odnosi i na regulacijske naprave u sustavu, te ako se uvijek raspolaze s dovoljno energije i snage u elektranama s obzirom na zahtjeve potrošnje.

1.4 Podjela stabilnosti

Stabilnost se može podijeliti na:

- kutnu stabilnost,
- naponsku stabilnost te
- frekvencijsku stabilnost.

S obzirom da se u ovoj studiji istražuje kutna stabilnost u tekstu koji slijedi ona je detaljnije opisana.

1.4.1 Kutna stabilnost

Kutna stabilnost se odnosi na sposobnost sustava održavanja sinkronih strojeva u sinkronom radu nakon poremećaja za dano početno pogonsko stanje sustava. Ona ovisi od sposobnosti održavanja/povratka ravnoteže između električnog i mehaničkog momenta svakog sinkronog stroja u sustavu. Nestabilnost sustava može rezultirati povećanjem kutne razlike nekih generatora što može izazvati njihov ispad iz sinkronizma u odnosu na ostale generatore.

Općenito gubitak stabilnosti sustava može se dogoditi na dva načina:

- Moguć je aperiodički ispad iz sinkronizma, tj. prilikom gubitka stabilnosti povećanje kuta rotora s vremenom je aperiodičko;
- Proces gubitka stabilnosti je oscilatoran, uz s vremenom rastuće amplitude oscilacija kuta rotora sinkronih generatora.

Rješavanje problema kutne stabilnosti sustava zahtjeva studiju elektromehaničkih oscilacija sustava što je i istraženo u poglavlju 5. Temeljni čimbenik ovog problema je promjena izlazne snage na priključcima generatora u ovisnosti promjene kuta. Unutar kvazi-stacionarnog stanja postoji ravnoteža između ulaznog i izlaznog električkog momenta za svaki generator uz uvjet konstantne brzine vrtnje. Ako je sustav izložen poremećaju, ova ravnoteža se narušava, rezultirajući ubrzanjem ili usporanjem rotora strojeva u skladu sa zakonom kretanja rotirajućih tijela. Ako se jedan generator trenutno vrti brže od drugog, relativni kutni položaj njegovog rotora je ispred sporijeg stroja. Rezultat kutne razlike jeste prebacivanje tereta sa sporijeg stroja na brži stroj, ovisno o

relaciji između snage i kuta. Ova tendencija smanjuje kutnu razliku i uslijed toga kutno odstupanje. Relacija između snage i kuta je izrazito nelinearna. Iznad određene granice, neko povećanje kutne razlike rezultira smanjenjem prijenosne moći, što dovodi do daljnjeg povećanja kutne razlike te dovodi do nestabilnosti sustava koju uzrokuje neravnoteža momenata.

Promjena električkog momenta sinkronog stroja uslijed praćenja poremećaja može se razlučiti na dvije komponente:

- sinkronizirajući moment koji je u fazi s rotorskim kutnim poremećajem i
- prigušni moment koji je u fazi s promjenom brzine.

Stabilnost sustava ovisi od obiju komponenti momenata kod svakog sinkronog stroja. Manjak ili višak sinkronizirajućeg momenta rezultira aperiodičkom ili oscilacijskom nestabilnošću, dok manjak potrebnog prigušnog momenta rezultira oscilacijskom nestabilnošću.

Da bi uopće mogli analizirati kutnu stabilnost potrebno je poznavati odzive agregata prilikom promjena opterećenja u elektroenergetskom sustavu.

1.4.2 Odziv generatora na promjene opterećenja

Svaka promjena opterećenja, trenutno se očituje u promjeni električnog momenta M_e generatora što uzrokuje neravnotežu između istog i mehaničkog momenta turbine M_m . Posljedice ove neravnoteže su promjene brzine vrtnje prema drugom Newton-ovom zakonu (uz zanemarenje mehaničkih gubitaka uslijed rotacije):

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_m - M_e \quad (1.1)$$

gdje je J ukupni moment tromosti agregata (kgm^2), a ω_r mehanička brzina vrtnje rotora (rad/s).

Mehanički moment turbine M_m mijenja se relativno sporo zbog dugotrajnih termičkih vremenskih konstanti vezanih za procese u generatoru pare i turbini u slučaju turboagregata, kao i zbog vremenskih konstanti servomehanizama u slučaju hidroagregata, a promjene električnog momenta generatora M_e su relativno brze.

Brzina vrtnje rotora može se izraziti jednadžbom (1.2)

$$\omega_r = \omega_o + \Delta\omega_r \quad (1.2)$$

gdje je ω_o sinkrona brzina rotora, a $\Delta\omega_r$ promjena brzine vrtnje uzrokovana neravnotežom mehaničkog i električkog momenta.

Promjena brzine vrtnje rotora može se izraziti i preko vremenske promjene kuta opterećenja rotora δ_r .

$$\Delta\omega_r = \frac{d\delta_r}{dt} \quad (1.3)$$

Uvrštavanjem izraza (1.2) i (1.3) u jednadžbu (1.1) te sređivanjem dobiva se izraz:

$$J \frac{d\left(\omega_o + \frac{d\delta_r}{dt}\right)}{dt} = J \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = M_m - M_e \quad (1.4)$$

Ako se izraz (1.4) pomnoži sa sinkronom brzinom rotora ω_o jednadžba (1.4) postaje:

$$J\omega_o \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = \omega_o M_m - \omega_o M_e \quad (1.5)$$

Pri istraživanju odnosa opterećenja i frekvencije daje se prednost izražavanju ovisnosti brzine vrtnje o mehaničkoj i električkoj snazi, umjesto ovisnosti brzine o odgovarajućim momentima. Prema osnovnoj jednadžbi rotacije mehanička snaga na vratilu turbine je

$$P = \omega_r M \quad (1.6)$$

Uvrštavanjem (1.6) u (1.5) dobiva se:

$$J\omega_o \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = \frac{\omega_o}{\omega_r} P_m - \frac{\omega_o}{\omega_r} P_e \quad (1.7)$$

gdje su P_m snaga koju turbina predaje generatoru, P_e električna djelatna snaga generatora (uz zanemarene gubitke). Tijekom poremećaja brzina sinkronog stroja je približno jednaka sinkronoj brzini $\omega_r \approx \omega_o$ pa se može pisati

$$J\omega_o \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = P_m - P_e = M_i \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = P_a \quad (1.8)$$

Jednadžba (1.8) naziva se jednadžba njihanja i temeljna je jednadžba s kojom se opisuje dinamika rotora. Umnožak momenta tromosti agregata i sinkrone brzine ($M_i = J\omega_o$) naziva se kutni moment. Uvaži li se utjecaj prigušnog mehaničkog momenta, tada je diferencijalna jednadžba njihanja:

$$M_i \frac{d^2\delta_r}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_r}{dt} + P_e - P_m = 0 \quad (1.9)$$

Utjecaj prigušnog mehaničkog momenta najčešće se zanemaruje. Uobičajeno je umjesto kutnog momenta koristiti normaliziranu konstantu tromosti H definiranu kao kinetičku energiju agregata pri sinkronoj brzini podijeljenu s njegovom nazivnom snagom S_n .

$$H = \frac{J\omega_o^2}{2S_n} = \frac{W_R}{S_n} \quad (1.10)$$

Gdje W_R predstavlja kinetičku energiju rotora.

Da bi se mehanički (prostorni) radijani izrazili preko električnih radijana koriste se supstitucije:

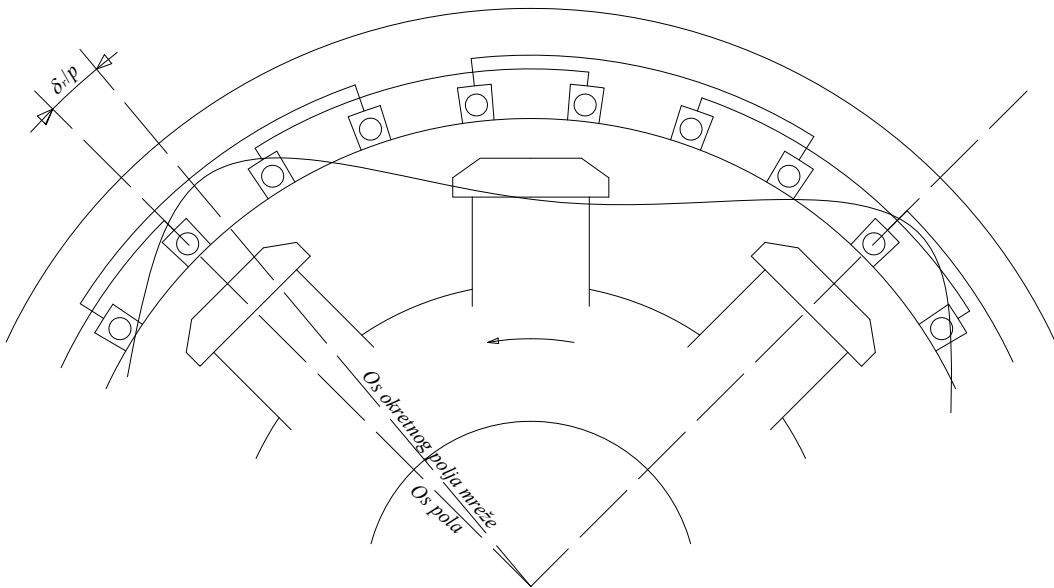
$$\delta = \frac{\delta_r}{p} \quad \text{i} \quad \omega_n = \frac{\omega_o}{p} \quad (1.11)$$

gdje je p broj pari polova sinkronog generatora (slika 1-1). Uvrštenjem (1.10) i (1.11) u (1.8) dobiva se:

$$\frac{2HS_n}{\omega_n} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1.12)$$

Uobičajeno je jednadžbu njihanja izražavati korištenjem relativnih jedinica. To znači normalizaciju jednadžbe (1.12) na zajedničku baznu snagu S_B . U ovom slučaju $S_B = S_n$, a nazivna brzina vrtnje u relativnim jedinicama iznosi $\omega_n = 1$ pa se jednadžba njihanja može pisati kao:

$$2H \frac{d^2\delta}{dt^2} = p_m - p_e \quad (1.13)$$



Slika 1-1 Geometrijski kut opterećenja sinkronog generatora

Često je prikladnije diferencijalnu jednadžbu drugog reda (1.13) zamijeniti s dvije diferencijalne jednadžbe prvog reda, koristeći izraze (1.2) i (1.3) u električnim radijanima:

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = p_m - p_e \quad \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (1.14)$$

Da bi se olakšali proračuni kutne stabilnosti elektroenergetskog sustava, uspostavljena je umjetna podjela na stabilnost pri malim poremećajima (eng. steady-state stability) i na “prijelaznu stabilnost” (eng. transient stability).

1.5 Kutna stabilnost pri malim poremećajima

Svaka neuravnoteženost između proizvedene snage u elektranama i opterećenja potiče pojavu mehaničkih i električnih prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu. Ta se neravnoteža najprije očituje u “njihanju” rotora sinkronih strojeva, a daljnja je posljedica toga pojava oscilacija snaga u vodovima prijenosne mreže. Riječ je ovdje o oscilacijama što su izazvane malenim promjenama pogonskog stanja. Dok u velikoj većini slučajeva neće maleni poremećaji imati štetne posljedice po stabilnost, oni ipak mogu u nekim sustavima i pod određenim okolnostima prouzročiti pojavu nestabilnog stanja. U većini slučajeva će se oscilacije što ih izazivaju mali poremećaji u sustavu vrlo naglo prigušiti. Ima, međutim, sustava koji su podložni stvaranju tzv. spontanijih oscilacija. Riječ je o slučajevima kad se oscilacije što su počele malim poremećajima trajno održavaju. U ovim se slučajevima radi o pojavi ili slabo prigušenih oscilacija ili čak neprigušenih oscilacija, koje se s vremenom mogu i raspirivati.

Jedan karakterističan slučaj pojave takvih oscilacija kada oscilira je jedan ili skupina generatora s obzirom na ostali dio sustava koji se može smatrati krutom vezom. Ove se oscilacije mogu primijeniti na osnovi promjenjivosti kuta opterećenja generatora ili npr. promjenjive brzine ili izlazne snage. U ovim se slučajevima govori o oscilacijama pojedinog generatora (eng. single generator oscillations) ili o lokaliziranim oscilacijama.

Mnogo češće su oscilacije snaga što se javljaju u posebnom tipu prijenosnih vodova, što ih nazivamo interkonekcijskim vodovima. Radi se o prijenosnim vodovima što međusobno spajaju pojedine veće skupine sinkronih strojeva na međusobno razdvojenim područjima, kao što je to npr. slučaj kad su s visokonaponskim vodovima spojeni razni elektroenergetski sustavi ili dijelovi jednog sustava, a prijenosna je moć tih vodova razmjerno mala prema snagama sustava ili podsustava koje spajaju. U tom slučaju ne samo što generatori pojedine skupine strojeva osciliraju jedan u odnosu na drugi, već kao cjelina oscilira jedna skupina strojeva prema drugoj skupini. To se odražava u oscilacijama tokova snaga u interkonekcijskim vodovima (eng. tie-line oscillations), pa se upotrebljavaju i posebni pojmovi: “Oscilacije interkonekcijskog voda” ili ponekad “Stabilnost interkonekcijskog voda”. Naime, ove oscilacije mogu izazvati pojavu nestabilnosti u sustavima. Kako se one mogu tolerirati samo do izvjesne granice, to može nakon ispada interkonekcijske veze doći i u pitanje stabilnost zajedničkog rada unutar samih pojedinih podsustava. Sličan se problem javlja i u sustavima s tzv. longitudinalnom strukturom (poput sustava Hrvatske). U jednom i drugom slučaju se govori o oscilacijama više strojeva (eng. multimachine oscillations).

Poput velikih poremećaja i mali će poremećaji u sustavu izazvati promjenu brzine vrtnje sinkronih strojeva s odgovarajućim promjenama u kutnim pomacima među rotorima strojeva i uz promjenu opterećenja generatora. Vlananje sustava opisuje se istim nelinearnim jednadžbama kao i pri velikim poremećajima. Razlika je u tome što se u slučaju malih poremećaja dovoljno točni odzivi sustava na istraživani poremećaj mogu dobiti i korištenjem lineariziranih nelinearnih diferencijalnih jednadžbi. Pri tome nije nužno tražiti ni rješenje sustava linearnih diferencijalnih jednadžbi u vremenskoj domeni da bi se provjerila stabilnost sustava (o stabilnosti sustava se ne zaključuje iz vremenske ovisnosti nekih od promjenjivih parametara pogonskog stanja (npr. kuta “delta”). Odgovor nam mogu dati i neki kriteriji do kojih se ne dolazi rješavanjem sustava diferencijalnih jednadžbi. Kad se radi o ispitivanju stabilnosti današnjih velikih automatiziranih elektroenergetskih sustava obično se na vladanje sustava nakon malih poremećaja

zaključuje na temelju karaktera korijena karakteristične jednadžbe, jer se tako mogu izvući najtočniji zaključci. Pri ispitivanju stabilnosti malih sustava ili samih regulacijskih sustava, koriste se obično tzv. algebarski kriteriji stabilnosti, koji također daju odgovor na pitanje je li neko stanje stabilno ili ne, ali ne i o stupnju stabilnosti; prednost im je što ne zahtijevaju određivanje korijena karakteristične jednadžbe, što je kod velikih sustava dugotrajan postupak.

Općenito se može zaključiti da je granica između malenog i velikog poremećaja (o čemu ovisi izbor metode koja će se koristiti prilikom istraživanja stabilnosti) određena time, da li se nelinearne diferencijalne jednadžbe, kojima se opisuje vladanje sustava nakon poremećaja, smiju linearizirati ili ne (s obzirom na točnost rješenja).

Kao što je već napomenuto stabilnost pri malim poremećajima odnosi se na ispitivanje stabilnosti nekog stacionarnog pogonskog stanja uvažavajući postojanje malih promjena opterećenja što se neprekidno dešavaju tijekom rada sustava. Pri tome se mogućnost pojave nestabilnosti utvrđuje pomoću krivulja snaga – kut, a kriterij za stabilnost je kutni pomak među polovima rotora susjednih sinkronih strojeva (u idealiziranom sustavu s dva stroja je kriterij za granicu stabilnosti kut od 90° (el. stupnjevi).

Stabilnost pri malim poremećajima odnosi se na slučajeve kada se opterećenje tako polagano mijenja da ne postoji utjecaj tromosti zamašnih masa agregata i tromosti magnetskih polja. To znači da promjena pogonskog stanja teži k nuli pa se može prikazati izrazom:

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta t} \rightarrow 0 \quad (1.15)$$

gdje je ΔP_s funkcija pogonskog stanja, a t vrijeme.

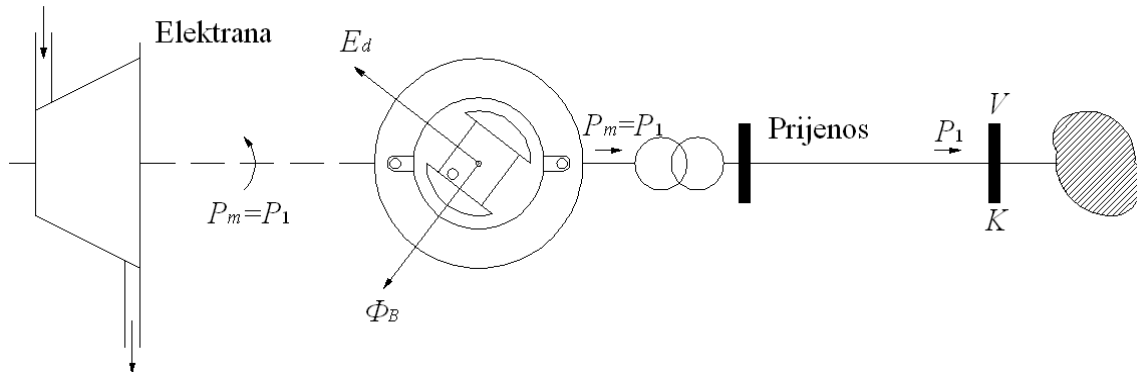
Izraz (1.15) može se realizirati na dva načina:

- promjena pogonskog stanja događa se u konačno dugom vremenu, ali je vrlo mala,
- promjena pogonskog stanja ima konačnu veličinu, ali prijelaz iz jednog u drugo stanje traje dosta dugo.

Spora promjena pogonskog stanja može dovesti do prekoračenja granične snage stabilnog prijenosa i time do gubitka stabilnosti pri malim poremećajima. Za stabilnost pri malim poremećajima od posebnog je značaja način regulacije napona te prilikom njenog istraživanja posebnu pozornost treba posvetiti činjenicama da li je uzbuda konstantna, da li je regulator napona spor (uobičajeni elektromehanički brzi regulator u ovom slučaju je spori regulator) ili se radi o posebno brzom elektroničkom regulatoru.

Važno je istaći da su u slučaju istraživanja stabilnosti pri malim poremećajima razmatrani poremećaji dovoljno mali tako da je moguća linearizacija jednadžbi sustava matematičkog modela sustava. Pritom se mogućnost pojave nestabilnosti istražuje korištenjem krivulja snaga-kut, pri čemu je kriterij za stabilnost kutni pomak između polova rotora susjednih sinkronih strojeva. U idealiziranom sustavu s dva agregata kriterij za granicu stabilnosti je kut 90°.

Na slici 1-2 predočena je shema sinkronog generatora u radu na krutu mrežu. Povećava li se, neizmjenjano polako, dovod radnog medija u pogonski stroj, tj. povećava li se mehanička snaga P_m na osovini slijedi da će se povećati električna djelatna snaga P_e koju generator predaje elektroenergetskom sustavu.



Slika 1-2 Pojednostavljena shema spoja generatora preko transformatora i voda na krutu mrežu, te veza između prostornog položaja rotora i vektorskog dijagrama

Ako se zbog jednostavnosti pretpostavi da se radi o sustavu bez gubitaka snage, te da je riječ o turbogeneratoru, djelatna električna snaga koju on predaje elektroenergetskom sustavu može se izračunati korištenjem izraza (1.16):

$$P_e = \frac{E \cdot V}{X} \sin \delta \quad (1.16)$$

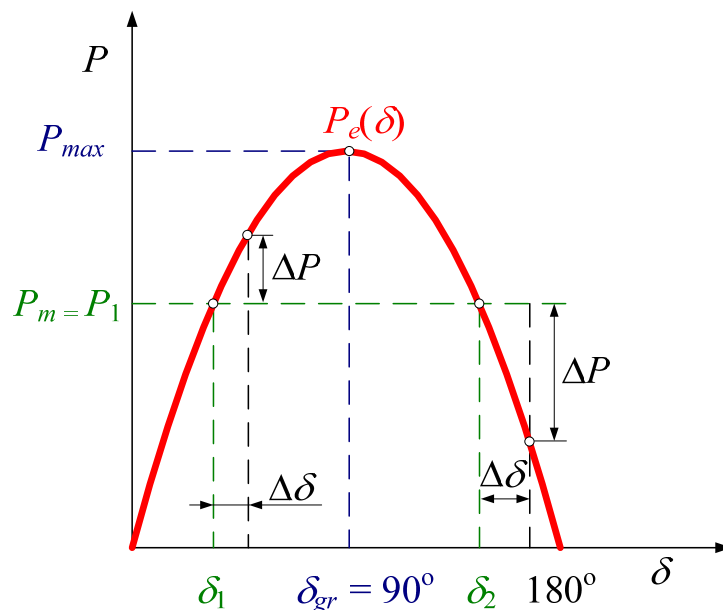
gdje su E elektromotorna sila, V napon elektroenergetskog sustava u točki K , X ukupna reaktancija prijenosnog sustava, a δ kut opterećenja generatora (kut između vektora E i V).

U slučaju hidrogeneratora razmatranje bi bilo znatno složenije, jer bi u tom slučaju prethodni izraz glasio:

$$P_e = \frac{E \cdot V}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \sin 2\delta \quad (1.17)$$

Pri konstantnoj uzbuđi generatora i naponu elektroenergetskog sustava u točki K , te konstantnoj reaktanciji, električna djelatna snaga mijenjat će se prema izrazu (1.16) samo u ovisnosti o promjeni kuta δ . Ako se ta promjena snage prikaže u ovisnosti o kutu opterećenja δ , dobiva se krivulju snaga – kut (slika 1-3).

Na promjenu kuta utječe povećanje mehaničke snage na osovini što rezultira povećanjem kuta opterećenja δ . Posljedica toga bit će povećanje predane snage P_e elektroenergetskom sustavu, čime će se uspostaviti statička ravnoteža. Kada kut δ prijeđe vrijednost 90° , snaga P_e početi će se smanjivati pa će se mehanička snaga P_m trošiti na ubrzanje zamašnih masa agregata (dinamička ravnoteža), što će dovesti do nadsinkrone brzine vrtnje i time do ispada iz sinkronizma, dakle, i gubitka stabilnosti.



Slika 1-3 Krivulja snaga - kut za sustav na slici 1-1

Iz izraza (1.16) slijedi da će pogon biti statički stabilan sve dok kut δ ne postigne vrijednost 90° . Kod ovog kuta je snaga prijenosa maksimalna i ona s daljnjim porastom kuta opada. Ova snaga naziva se prekretna snaga P_{pr} , a njoj pripadajući moment naziva se prekretni moment M_{pr} .

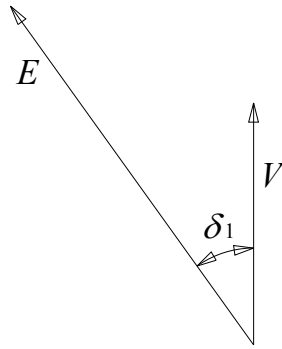
U normalnom pogonu prenosi se djelatna snaga P_1 , pri čemu je kut opterećenja δ_1 . Pogonska točka (δ_1, P_1) označena je na krivulji snaga – kut (slika 1-3).

Generator daje električnu snagu P_1 , a uzima jednak iznos mehaničke snage, $P_m = P_1$ od pogonskog stroja. Između dane električne i primljene mehaničke snage postoji ravnoteža.

Ako se pretpostavi da je frekvencija krute mreže konstantna, vektor V će rotirati konstantnom kutnom brzinom ω_o . Istom kutnom brzinom rotirat će i vektor elektromotorne sile E generatora, samo što će položaj tog vektora biti vezan s prostornim položajem kuta rotora generatora iz čega slijedi neposredna veza između trenutnog prostornog položaja rotora generatora i trenutnog položaja vektora napona mreže V .

Ako se napon krute mreže V nacрта okomito, dobiva se naponski dijagram (slika 1-4) u kojem vektor E u istom trenutku pokazuje relativni položaj rotora. Kut opterećenja je u normalnom pogonskom stanju konstantan i iznosi δ_1 . To vrijedi za dvopolne generatore. U slučaju višepolnih generatora postoji razlika između električnog i prostornog kuta prema izrazu (1.11).

Ako se iz bilo kojih razloga pojavi mala promjena kuta opterećenja za $\Delta\delta$ snaga generatora povećava se na vrijednost $P_1 + \Delta P$, dok je, zbog tromosti turbinskog regulatora, mehanička snaga pogonskog stroja ostala nepromijenjena: $P_m = P_1$. Ravnoteža između primljene i predane snage bit će narušena te nastupa usporavanje rotora jer je električki moment veći od mehaničkog odnosno snaga akceleracije je negativna, izraz (1.8).



Slika 1-4 Vektorski dijagram napona generatora

Uslijed toga smanjivat će se kut $\delta_1 + \Delta\delta$ sve dok ne postane jednak početnom kutu δ_1 kada će se ponovno uspostaviti ravnoteža između primljene mehaničke i predane električke snage.

Ako bi se kut δ_1 smanjio na vrijednost $\delta_1 - \Delta\delta$, snaga akceleracije P_a , izraz (1.8), postala bi pozitivna, došlo bi do ubrzanja rotora generatora i istovremeno do vraćanja na početni kut δ_1 .

Može se zaključiti da male promjene kuta opterećenja δ_1 uzrokuju promjene snage koju generator daje u mrežu i vraćanje u stanje početne ravnoteže iz čega slijedi da je pogonsko stanje oko radne točke s kutom opterećenja δ_1 statički stabilno.

U slučaju promjena u blizini kuta δ_2 koji je definiran drugim presjecištem vodoravne crte $P_m = P_1$ s krivuljom snaga – kut slijede sasvim drugi odnosi. Npr., poveća li se kut opterećenja za $\Delta\delta$ smanjit će se predana električna snaga, ali će pritom snaga akceleracije P_a biti pozitivna pa će doći do ubrzavanja agregata i do daljnjeg povećanja kuta opterećenja. Opisane promjene rezultirat će povećanjem kutne brzine rotora i gubitkom sinkronizma.

Iz opisanog se može zaključiti da pogon je na padajućem dijelu krivulje snaga – kut, zbog labilne ravnoteže, praktički nije moguć.

Kut koji odvaja stabilno područje od nestabilnog naziva se granični kut (δ_{gr}) odnosno prekretni kut (δ_{pr}), a iznos mu je 90° (el. stupnjevi) za pojednostavljeni slučaj sa slike 1-1.

Slijedi uvjet statičke stabilnosti (kriterij stabilnosti pri malim poremećajima) koji glasi: pogonsko je stanje statički stabilno ako leži na uzlaznom dijelu krivulje snaga – kut, u području gdje je $dP/d\delta > 0$. Matematička formulacija uvjeta statičke stabilnosti prikazana je izrazom (1.16):

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0 \quad (1.18)$$

Deriviranjem jednadžbe (1.16) po δ dobiva se izraz (1.19):

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EV}{X} \cos \delta \quad (1.19)$$

Izraz (1.19) predstavlja tzv. sinkronizirajuću snagu. Prethodna razmatranja vrijede za sustav u kojem se nalazi samo jedan stroj. U višestrojnom sustavu snaga svakog pojedinog stroja ovisi o kutovima svih strojeva međusobno i prema nekom referentnom generatoru (generatoru čiji se vektor napona uzima referentnim). Ako se pretpostavi da je pri maloj promjeni opterećenja samo kod stroja čija se stabilnost istražuje došlo do male pozitivne promjene kuta može se zaključiti da je promatrani stroj stabilan pri malim poremećajima ako je predmetna promjena izazvala povećanje njegove snage. Opisano razmatranje može se provesti za svaki stroj u promatranom sustavu, pa je kriterij stabilnosti taj da se kod svakog stroja pogonsko stanje mora nalaziti na uzlaznom dijelu krivulje snaga - kut:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} > 0 \quad (1.20)$$

gdje je $i=1, 2, \dots, n$ broj strojeva.

Rad generatora na krutu mrežu, u pogledu stabilnosti, ne smije se zamijeniti s radom generatora na vlastitu mrežu. Opterećenje generatora u tom slučaju određeno je snagom potrošača u mreži koju napaja. Pogonski stroj ima automatsku regulaciju brzine vrtnje, kako bi je održavao konstantnom. Mogućnosti ispada iz sinkronizma nema kada radi samo jedan generator, dakle, kada nema paralelnog pogona. Povećanjem opterećenja u mreži sve se više generator opterećuje, čime dolazi do preopterećenja generatora i opadanja napona ako je mogućnost regulacija uzbude iskorištena. Obično pogonski stroj ne može izdržati preopterećenje, pa dolazi do smanjenja brzine vrtnje i pada frekvencije u mreži odnosno do prorade jedne od zaštita generatora.

Općenito vrijedi da stabilnost sustava pri malim poremećajima prije svega ovisi od početnog pogonskog stanja sustava. Rezultirajuća nestabilnost sustava može se pojaviti u dva oblika:

- porast kutne razlike rotora uz neoscilacijski ili aperiodički mod, ili
- oscilacije rotora ili porast amplitude zbog nedovoljnog prigušnog momenta.

U današnjim elektroenergetskim sustavima, problem kutne stabilnosti pri malim poremećajima obično se očituje s oscilacijama uslijed nedovoljnog prigušnog momenta. Vremenski period od interesa pri malim poremećajima sustava je između 10 i 20 sekundi nakon pojave poremećaja. Problem aperiodičke nestabilnosti se u većini slučajeva eliminira kontinuiranim djelovanjem automatskih regulatora napona generatora. Ponekad se pojavljuje problem u slučaju dosezanja ograničenja regulatora napona kad generator praktično prelazi u rad s konstantnom uzbudom.

Metode s kojima se ispituje dinamičko vladanje sustava pri malom poremećaju temelje se na teoriji stabilnosti Ljapunova iz 1892. godine.

Kao što je već opisano u tradicionalnim studijama stabilnost pri malim poremećajima najčešće se istražuje primjenom kriterija koeficijenata sinkronizirajućih snaga izraz (1.20),

a zatim i na temelju kriterija $\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} < 0$ ako se istražuje naponska stabilnost pri malim poremećajima. Iz čega slijedi da će se u najjednostavnijem pretpostavljenom sustavu s dva stroja gubitak sinkronizma zbiti ako se pokuša raditi s kutnim pomakom među rotorima strojeva od 90° . U suvremenim elektroenergetskim sustavima s mnogo sinkronih strojeva ne mogu se (istraživanje realnog, a ne idealiziranog stanja) formulirati granice stabilnosti pri malim poremećajima, pomoću kutnih razlika. Zna se, doduše, da velike kutne razlike vode nestabilnosti pri malim poremećajima, ali kolike su njihove granične vrijednosti, općenito je neodređeno. Tako, primjerice, u velikim sustavima s jako razmaknutim sinkronim strojevima kutne razlike mogu znatno prijeći 90° , a da se pritom još ne ugrozi stabilnost pri malim poremećajima, dok se u nekim slučajevima, ovisno o značajkama i smještaju opterećenja u sustavu, može pojaviti nestabilnost pri malim poremećajima i pri kutnim razlikama manjim od 90° .

1.6 Kutna stabilnost pri velikim poremećajima ili prijelazna stabilnost

Prijelazna stabilnost odnosi se na ispitivanje vladanja sustava u kratkotrajnom razdoblju početka prijelazne pojave izazvane naglim i velikim promjenama pogonskog stanja, odnosno naglom i velikom preraspodjelom tokova snaga u prijenosnoj mreži. Rezultirajući odziv sustava manifestira se velikom kutnom razlikom između sinkronih strojeva i izravno utječe na nelinearnost odnosa snage i kuta. Općenito je poznato, da elektroenergetski sustav čini određeni broj međusobno povezanih elektromehaničkih elemenata čije se vladanje u pogonu može opisati određenim diferencijalnim jednadžbama. Istraživanje stabilnosti obavlja se korištenjem kriterija jednakih površina ili numeričkim rješavanjem diferencijalnih jednadžbi njihovanja korištenjem iteracijskih metoda.

Prijelazna stabilnost ovisi prije svega o početnom pogonskom stanju te vrsti, iznosu i trajanju poremećaja. Nestabilnost sustava očituje se u formi periodičkog stanja uslijed nedovoljnog sinkronizirajućeg momenta, i odnosi se na prvi njihaj rotora strojeva. U velikim sustavima prijelazna nestabilnost ne mora biti uvijek izazvana oscilacijama u prvom periodu njihaja djelovanjem pojedinačnog moda, već može biti rezultat superpozicije sporog unutarnjeg kutnog moda neke lokalne elektrane izazvanog prvim njihajem.

O prijelaznoj stabilnosti pogona govori se u slučajevima kada je promjena opterećenja brza, što znači da brzina promjene teži k neizmjeru (1.21):

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta t} \rightarrow \infty \quad (1.21)$$

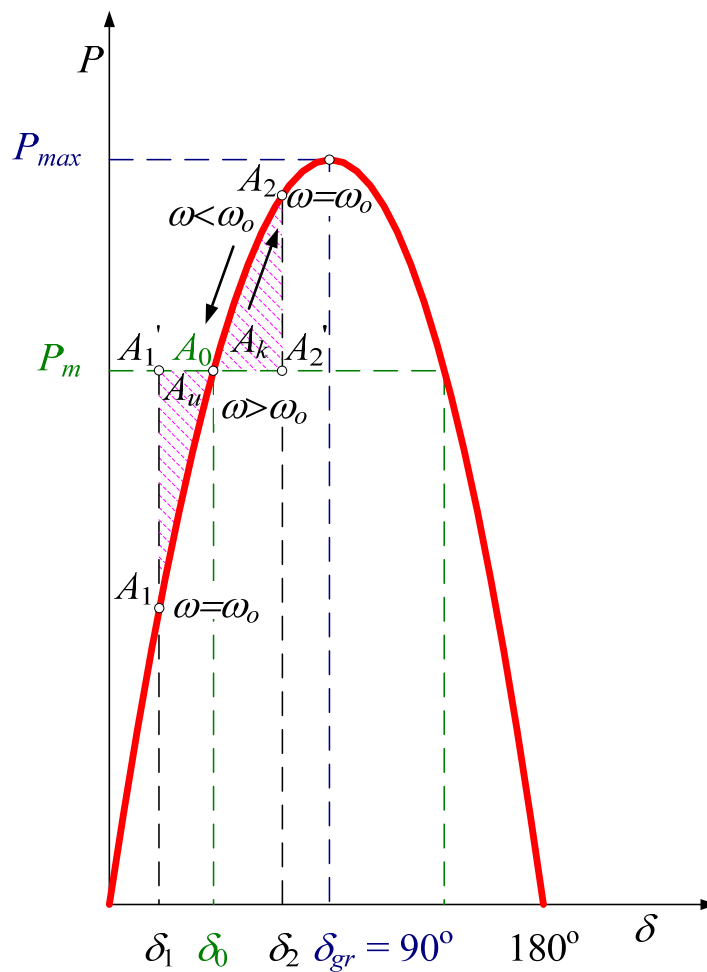
Relacija (1.21) može se ostvariti na dva načina:

1. promjena je neizmjeru velika i događa se u konačnom vremenu (ovakav slučaj se ne pojavljuje u praksi) te
2. promjena je konačno velika i događa se u veoma kratkom vremenu čije trajanje teži k nuli.

Za prijelaznu stabilnost važne su brze promjene opterećenja sinkronih strojeva, u vidu udaraca, od kojih su najopasniji kratki spojevi te nepredviđena isklapanja i ispadi značajnijih elemenata sustava. Brze promjene opterećenja izazivaju njihanje strojeva

Uz izvjesna zanemarenja krivulja snaga - kut za ovaj sustav predstavljena je sinusoidom, a snaga pogonskog stroja vodoravnim pravcem. Električna snaga koju generator daje krutoj mreži određena je izrazom (1.22), a koji sadrži unutrašnju elektromotornu silu E' , napon krute mreže V , reaktanciju između stezaljki generatora i sabirnice krute mreže te sinus kuta između vektora napona mreže i unutrašnje elektromotorne sile. Dakako da je u ukupnoj reaktanciji prijenosnog sustava uzeta u obzir prijelazna reaktancija generatora.

U određenom trenutku postoji neka određena snaga pogonskog stroja P_m i u svim je razmatranjima pretpostavljeno da u trenutku udarnog poremećaja regulator pogonskog stroja ne djeluje. Neka je pogonsko stanje prije nastanka udara određeno točkom A_0 na slici 1-7 i kutom δ_0 .



Slika 1-7 Krivulja snaga – kut za sustav sa slike 1-6

Ako je udarni poremećaj uzrokovao smanjenje električne snage, a time i kuta opterećenja od δ_0 na δ_1 , postoji razlika mehaničke i električne snage (1.8), koja je pozitivnog predznaka i koja će utjecati na ubrzanje rotora generatora. Kutna akceleracija bit će proporcionalna P_a odnosno dužini A_1A_1' na slici 1-7.

Ubrzanjem rotora kut opterećenja se povećava (od δ_1 na δ_0), a time i snaga koju generator daje u mrežu. Snaga akceleracije postaje sve manja i u točki A_0 jednaka je nuli. U točki A_0 kutna akceleracija je nula, ali je kutna brzina veća od sinkrone ($\omega > \omega_o$) i rotor se i dalje

ubrzava, odnosno, u tom slučaju je $\delta > \delta_0$. Snaga akceleracije postaje negativna i utječe na usporavanje rotora generatora. Rad koji je izvršila pozitivna snaga akceleracije ($P_a > 0$) ekvivalentan je kinetičkoj energiji sakupljenoj u zamašnim masama agregata i proporcionalan je površini A_u . Sakupljenu kinetičku energiju rotor troši pri usporavanju i u točki A_2 je potrošena sva kinetička energija i postignuto stanje pri kojem je kutna brzina rotora jednaka sinkronoj brzini ($\omega = \omega_0$). Rotor je zanjihao do kuta δ_2 . Površina A_k proporcionalna je energiji koju je rotor odao pri usporavanju. Kut δ_2 do kojeg je rotor generatora zanjihao određuje se iz poznatog uvjeta jednakih površina:

$$A_u = A_k \quad (1.23)$$

U točki A_2 kutna brzina rotora jednaka je sinkronoj brzini i obzirom na predznak snage akceleracije u toj točki dolazi do usporavanja i smanjenja kuta opterećenja prema δ_0 . U točki A_0 postignuta je ravnoteža između mehaničke i električne snage, ali je kutna brzina manja od sinkrone ($\omega = \omega_0$) i radi tromosti rotor se i dalje usporava do točke A_1 , naravno, ako je sustav bez gubitaka.

Za sustav bez gubitaka, rotor generatora njiše se između točaka A_1 i A_2 . Obzirom da ni jedan sustav nije bez gubitaka, doći će nakon izvjesnog vremena do umirivanja rotora u točki A_0 . Vremenska ovisnost kuta opterećenja u grafičkom prikazu zove se krivulja njihanja stroja. Današnji moderni strojevi opremljeni su uređajima koji mjere i istovremeno registriraju promjene kuta opterećenja i u skladu s tim djeluju na automatske regulatore koji dalje reagiraju u svrhu poduzimanja odgovarajućih mjera da stabilnost pogona generatora bude sačuvana (stabilizatori elektroenergetskog sustava PSS – eng. Power System Stabilizer). Analitički proračun krivulje njihanja za prijenosni sustav s jednim generatorom i krutom mrežom vrlo je složen i vodi k rješavanju diferencijalne jednačine njihanja (1.9).

Kvantitativno rješavanje problema prijelazne stabilnosti sustava s više strojeva vodi na rješavanje sustava diferencijalnih jednačini i ostvaruje se modeliranjem na dinamičkom modelu ili pomoću elektroničkih računala. S praktičnog stanovišta dosta su pogodne metode rješavanja: direktna metoda Ljapunova koja se zasniva na postojanju samo jedne skalarne funkcije, tzv. funkcije Ljapunova te iteracijska metoda. Za očuvanje stabilnosti pogona nije bitno koju vrijednost će postići kut δ niti kako će se vremenski mijenjati. Dovoljno je da se analizira ranije spomenuti uvjet jednakih površina, po kojemu će granica prijelazne stabilnosti biti postignuta ako je površina koja odgovara ubrzanju jednaka površini pri usporavanju. Ako je površina proporcionalna ubrzanju manja od površine proporcionalne usporavanju prijelazna stabilnost će biti očuvana, u protivnom doći će do gubitka sinkronizma odnosno prijelazne stabilnosti.

Prijelazna stabilnost odnosi se na istraživanje vladanja sustava u kratkotrajnom razdoblju početka elektromehaničke prijelazne pojave (za vrijeme prvog njihanja rotora sinkronih strojeva) što je izazovu nagle i velike promjene pogonskog stanja u sustavu, odnosno nagle i velike preraspodjele tokova snaga u prijenosnoj mreži. Utvrđivanje stabilnosti provodilo se na temelju kriterija jednakih površina ili, točnije, numeričkim rješavanjem diferencijalnih jednačini njihanja, s pomoću iteracijskih metoda.

Ako se pak, nakon poremećaja u sustavu, sinkronizam održi, svi će se kutovi rotora sinkronih generatora također približavati novom ravnotežnom položaju ili aperiodički ili uz oscilaciju. Razlučuje se zato pojmovi aperiodička i oscilirajuća nestabilnost,

aperiodička i oscilirajuća stabilnost. Za oba načina prigušenja elektromehaničke prijelazne pojave se upotrebljava i zajednički naziv "asimptotska stabilnost". Prvobitna definicija stabilnosti odnosila se na asimptotsku stabilnost, a nije uključivala slabo prigušene ili neprigušene oscilacije, koje su doduše stabilne u matematičkom smislu, ali nepoželjne sa stajališta rada sustava.

Vremenski period od interesa za studije prijelazne stabilnosti je obično u rasponu od 3 do 5 sekundi nakon početka poremećaja. Može se produžiti i do 10 sekundi za vrlo velike sustave s dominantnim unutarnjim kutnim odstupanjem.

Prijelazna nestabilnost u nekom sustavu nastaje pod utjecajem velikog poremećaja od kojih su najznačajniji kvarovi na jako opterećenim vodovima što najčešće uzrokuje njihovo isključenje zbog odstranjenja kvara. Ispad značajno opterećenog generatora ili naglo isključenje ili ispad velikog opterećenja mogu također uzrokovati nestabilnost.

Poremećaji, barem privremeno, unose promjenu u sustavu, tako da se sljedeće pogonsko stanje razlikuje od onog prije poremećaja. Nužno je, dakle, da novo ustaljeno stanje promijenjenog sustava bude također stabilno. Postoji također mogućnost da promijenjeni sustav bude dinamički nestabilan, pa da se oscilacije nakon poremećaja podržavaju, ili čak im amplitude rastu do točke kad nastupi raspad sustava. Najčešće je međutim, nestabilnost nakon poremećaja izazvana relativno velikim prijelaznim promjenama brzine, kutnim razlikama rotora i promjenama snage što počinju s poremećajem. Gubitak sinkronizma može se zbiti vrlo brzo, unutar jedne sekunde nakon što je generator osjetio kvar na prijenosnomvodu.

1.7 Ispitivanje prijelazne stabilnosti metodom jednakih površina

U svrhu objašnjavanja i procjene stabilnosti sustava najčešće se koristi kriterij jednakih površina. Ova metoda je formalizirana korištenjem metoda Ljapunova i energetske funkcije Ljapunova. U ovome odjeljku bit će opisani temeljni koncepti na kojima se zasniva metoda Ljapunova, te će biti primijenjeni na jednostavni sustav sabirnica krute mreže. Metoda Ljapunova je također poznata i kao druga metoda Ljapunova.

Zbog velikih mogućnosti u ocjenjivanju stabilnosti elektroenergetskog sustava bez potrebe za rješavanjem diferencijalnih jednadžbi sustava, metoda Ljapunova predmet je mnogih intenzivnih istraživanja. Ipak, praktična primjena izravne metode za ocjenu sigurnosti u realnom vremenu još nije česta zbog ograničenja modela i nepouzdatih računskih tehnika. Kada se primjenjuje na višestrojne sustave, posebno one koji rade na rubu svojih ograničenja stabilnosti, izravna metoda je podložna numeričkim problemima i može dati nepouzdate rezultate.

Važno je shvatiti da su uvjeti stabilnosti prema teoremu Ljapunova opravdani samo za ocjenu stabilnosti. Ako neka funkcija ne zadovoljava uvjete stabilnosti, to ne znači da ravnotežna točka nije stabilna. Nadalje, za svaki zadani dinamički sustav obično postoji više mogućih funkcija Ljapunova koje daju veće ili manje područje početnih uvjeta koje zadovoljava teoreme stabilnosti. To znači da pojedina funkcija Ljapunova obično daje pesimističnu ocjenu stabilnosti jer pokriva samo dio stvarnog stabilnog područja. Funkcija koja daje najveće područje, te je najbliža stvarnom području stabilnosti, se zove funkcija Ljapunova. Obično dobre funkcije Ljapunova imaju fizikalno značenje.

1.7.1 Energetska funkcija Ljapunova

Ako se u jednadžbu (1.9) uvrsti jednadžba (1.16) dobiva se:

$$M_i \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - b \sin \delta - D \frac{d\delta}{dt} \quad (1.24)$$

gdje je $b = E'V / X'_d$ amplituda prijelazne krivulje snaga-kut $P_e(\delta)$ i $\Delta\omega$ odstupanje brzine.

Množenjem jednadžbe (1.24) s $\Delta\omega$, zanemarenjem prigušnog člana i prebacivanjem svega na lijevu stranu dobije se

$$M_i \Delta\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} - (P_m - b \sin \delta) \frac{d\delta}{dt} = 0 \quad (1.25)$$

Budući da je izraz s lijeve strane jednak nuli, njegov integral mora biti konstantan. Integriranjem funkcije od prve ravnotežne točke ($\delta_0, \Delta\omega = 0$), do bilo koje točke prijelazne trajektorije sustava daje

$$W = \int_0^{\Delta\omega} (M_i \Delta\omega) d\Delta\omega - \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - b \sin \delta) d\delta = \text{konst.} \quad (1.26)$$

Računanjem integrala dobiva se sljedeći oblik funkcije

$$W = \frac{1}{2} M_i \Delta\omega^2 - [P_m (\delta - \delta_0) + b(\cos \delta - \cos \delta_0)] \quad (1.27)$$

tj. dobiva se energetska funkcija Ljapunova (1.28).

$$W = E_k + E_p \quad (1.28)$$

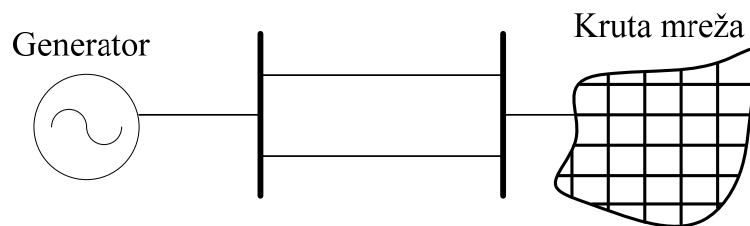
gdje su

$$E_k = \frac{1}{2} M_i \Delta\omega^2 \quad \text{i} \quad E_p = -[P_m (\delta - \delta_0) + b(\cos \delta - \cos \delta_0)] \quad (1.29)$$

E_k je mjera kinetičke energije sustava, a E_p je mjera potencijalne energije sustava, a oboje se uzimaju u odnosu na prvu ravnotežnu točku ($\delta_0, \Delta\omega = 0$). Druga ravnotežna točka sustava je $(\pi - \delta_0, \Delta\omega = 0)$ što je vidljivo sa slike 1-7. Zanemarenjem prigušenja, jednadžba (1.26) prikazuje da je zbroj potencijalne i kinetičke energije $W = E_k + E_p$ konstantan.

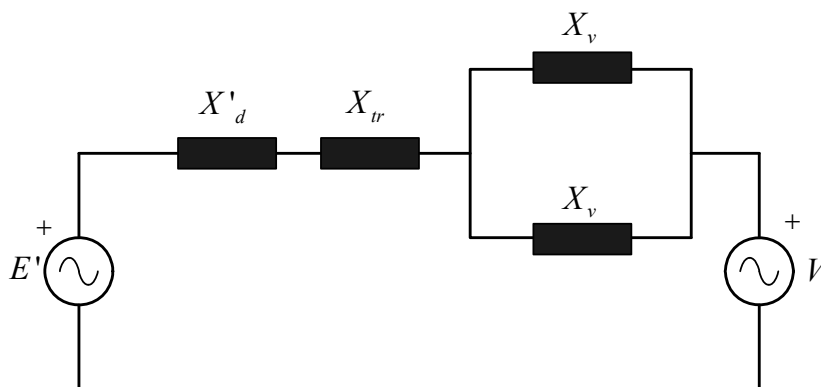
1.7.2 Metoda jednakih površina

U svrhu dobivanja fizikalne slike o problematici prijelazne stabilnosti razmotrit će se jednostavni slučaj kada se jedan generator preko prijenosnog sustava, sastavljenog od transformatora i dvostrukog dalekovoda (planirani normalni pogon jednog agregata u HE Varaždin nakon rekonstrukcije rasklopnog postrojenja), priključuje na sabirnice mreže krutog napona V (slika 1-8), pri čemu se djelatni otpori i poprečne grane zanemaruju.



Slika 1-8 *Jednopolna shema generatora koji je preko transformatora i dvostrukog dalekovoda priključen na sabirnice krute mreže*

Kao što je već napomenuto kada se razmatranju prijelazne pojave, sinkroni generator se nadomješta prijelaznom reaktancijom X_d' i elektromotornom silom E' iza prijelazne reaktancije, a ne sinkronom reaktancijom X_d i unutarnjom elektromotornom silom E . Shema spoja mreže u direktnom sustavu komponentata prikazana je na slici 1-9.



Slika 1-9 *Nadomjesna shema mreže sa slike 1-8*

U ovom slučaju jednačba snage sinkronog stroja koja vrijedi za prijelazno stanje glasi:

$$P_{el}(\delta) = \frac{E'V}{X_{12(1)}} \sin \delta \quad (1.30)$$

gdje je

$$X_{12(1)} = X_d' + X_{tr} + \frac{X_v}{2} \quad (1.31)$$

nadomjesna reaktancija prijenosa, a δ kut između napona E' i V (koji nije jednak kutu između E i V , prema slici 1-5).

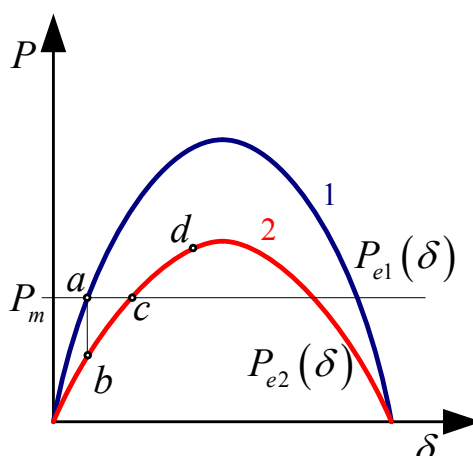
Ako se isključi jedan od paralelnih dalekovoda, uz pretpostavku nepromijenjenih napona E' i V , snaga generatora kao funkcija kuta između vektora napona može opisati jednačbom:

$$P_{e2}(\delta) = \frac{E'V}{X_{12(2)}} \sin \delta \quad (1.32)$$

gdje vrijedi $X_{12(2)} > X_{12(1)}$, jer je:

$$X_{12(2)} = X_d + X_{tr} + X_v \quad (1.33)$$

Promjena električne snage generatora P_e određena je sinusoidom prema izrazu (1.32), pri čemu se krivulja 1 na slici 1-10 odnosi na slučaj dvaju paralelno spojenih vodova, a krivulja 2 na slučaj kada se jedan od vodova isključuje.



Slika 1-10 Krivulje snaga - kut za prijenos prema slici 1-8

Vodoravna crta označena s P_m na slici 1-10 predstavlja mehaničku snagu koju daje turbina. Ako je pogonsko stanje prije isključenja dalekovoda bilo određeno točkom a , može se pratiti tijek promjene električne snage P_e , odnosno kuta δ . U trenutku isklapanja električna se snaga skokovito smanjuje na vrijednost zadanu točkom b na krivulji 2. Točkama a i b pripada ista vrijednost kuta, jer se zbog tromosti mehanički spojenih rotora generatora i turbine, relativna kutna brzina rotora ne može trenutačno promijeniti. Snaga turbine ostaje na nepromijenjenoj vrijednosti P_m , jer regulator turbine djeluje samo na promjenu brzine vrtnje, koja u početku ostaje nepromijenjena. Kasnije se brzina vrtnje agregata mijenja, ali je unatoč tome, prilikom ispitivanja prijelazne stabilnosti, pretpostavljena konstantnost snage turbine. Turbinski regulator počinje djelovati samo ako je promjena brzine vrtnje veća od oko 0,1% nazivne vrijednosti, tj. ako ta promjena postaje veća od osjetljivosti regulatora. Zbog tromosti mase samog regulatora, do stvarnog će djelovanja doći još kasnije, nakon oko 0,3 – 0,4 s.

Turbinski regulatori suvremenih velikih blokova opremljeni su uređajima za brzo zatvaranje dotoka pare ili vode, koji djeluju na poticaj senzora koji reagiraju na ubrzavanje agregata (tzv. Senzor ubrzanja). Ako iznos nagle promjene snage prekorači polovicu nazivne snage agregata, na poticaj senzora ubrzanja, snaga turbine će se regulirati na nižu vrijednost. Do brzog zatvaranja dotoka radnog medija dolazi 0,1 – 0,2 s nakon detektiranja opisane promjene snage. Ako je period u kojem se istražuje prijelazna stabilnost dulji od spomenutih 200 ms, zanemarivanje vremena u kojem djeluje turbinski regulator prouzrokovat će grešku u proračunima, ali je ona na strani sigurnosti.

U točki b električna je snaga generatora manja od mehaničke snage turbine, te je i kočioni moment generatora manji od zakretnog momenta turbine, uz brzinu vrtnje jednaku sinkronoj brzini. Zbog težnje za ponovnim uspostavljanjem ravnotežnog stanja, rotor agregata se ubrzava, raste kut δ , a s njime i električna snaga P_e . Električna i mehanička snaga dolaze u ravnotežu u točki c , ali proces ne završava u toj točki, gdje je brzina rotora veća od sinkrone. Uslijed tromosti rotirajućih masa dolazi do daljnjeg relativnog kretanja rotora u odnosu na rotirajuće magnetsko polje statora, te će električna snaga generatora postati veća od mehaničke snage turbine. Uočava se da iznos razlike momenata mijenja predznak i da dolazi do usporavanja rotora. Kut δ i dalje raste sve do točke d , u kojoj rotor ponovno ima sinkronu brzinu. Kako je u toj točki električna snaga veća od mehaničke, na osovinu stroja djeluje kočioni moment, zbog kojeg će se rotor i dalje usporavati uz smanjivanje kuta δ , a s njime i električne snage. Kao i u prethodnom slučaju, uslijed tromosti rotirajućih masa, u točki c dolazi do daljnjeg relativnog kretanja rotora u odnosu na rotirajuće magnetsko polje statora (ali sada u suprotnom smjeru), te kut δ postiže svoju najmanju vrijednost u točki b , poslije čega opet raste. Nakon više prigušenih njihanja uspostavlja se novo ravnotežno stanje u točki c u kojoj generator daje istu električnu snagu kao prije njihanja, ali sukladno povećanoj ukupnoj reaktanciji sustava i nepromijenjenim naponima, pri većem kutu δ nego u početnom stanju.

Ako se prigušenje zanemari te ako sustav očuva stabilnost, njihanja će se stabilizirati uz konstantnu amplitudu oko novog stanja ravnoteže u točki c , dok se u slučaju gubitka stabilnosti, amplitude njihanja povećavaju, te sustav neće uspostaviti novo ravnotežno stanje.

Rad A_u koji prilikom ubrzavanja izvrši rotor turbine i generatora pri relativnom kretanju u odnosu na sinkrono rotirajuće polje statora iznosi:

$$A_u = \int_{\delta_0}^{\delta_0'} \Delta M(\delta) d\delta \quad (1.34)$$

gdje je δ_0 vrijednost kuta u početnom stacionarnom stanju, a δ_0' vrijednost kuta kada je električna snaga generatora (P_e) jednaka mehaničkoj snazi turbine (P_m).

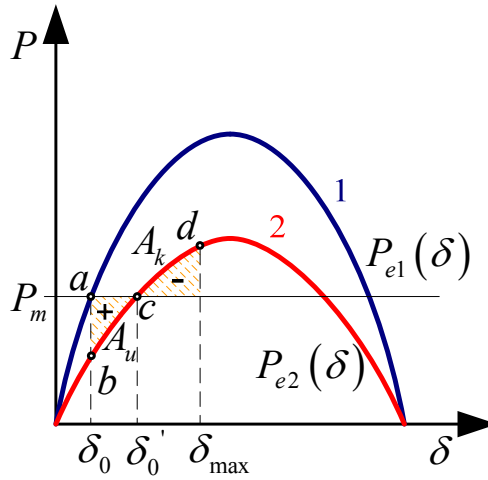
Rad A_u jednak je promjeni kinetičke energije rotirajućih masa. Predmetna energija nagomilava se u tromosti rotora kao spremniku energije. Za rad A_u vrijedi izraz (1.35) s obzirom da je snaga jednaka umnošku momenta i kutne brzine ω , a kutna se brzina tijekom njihanja vrlo malo mijenja ($\omega = \omega_o = \text{konst.}$).

$$A_u = \omega_o \int_{\delta_0}^{\delta_0'} \Delta P(\delta) d\delta = \omega_o \int_{\delta_0}^{\delta_0'} [P_m - P_{e,2}(\delta)] d\delta \quad (1.35)$$

Ovaj integral odgovara površini određenoj točkama $a-b-c$ (slika 1-11), koja se zbog proporcionalnosti s radom izvršenim tijekom ubrzavanja rotora, naziva površinom ubrzavanja.

Pri kutu δ_{\max} (točka d) kutna brzina rotora mora biti jednaka sinkronoj kutnoj brzini. U toj se točki kinetička energija, nagomilana tijekom ubrzavanja, za vrijeme usporavanja u

rotoru pretvara u potencijalnu energiju, a u periodu daljnjeg usporavanja potrebno je osigurati dodatnu snagu.



Slika 1-11 Površine ubrzanja (a-b-c) i usporavanja (c-d-e) omeđene krivuljama snaga – kut za prijelazno stanje

Rad koji rotor u periodu usporavanja izvrši iznosi:

$$A_k = \omega_o \int_{\delta'_0}^{\delta_{\max}} \Delta P(\delta) d\delta = \omega_o \int_{\delta'_0}^{\delta_{\max}} [P_{e,2}(\delta) - P_m] d\delta \quad (1.36)$$

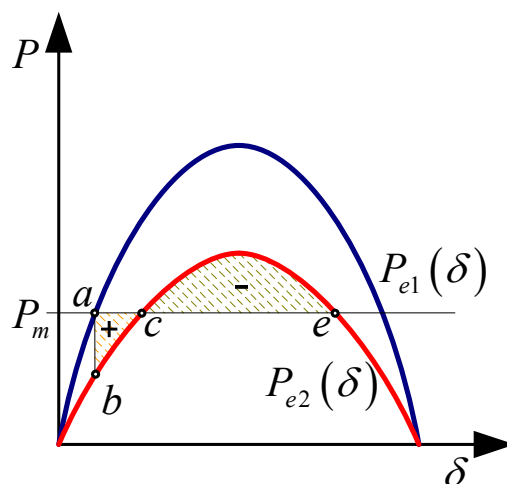
Na slici 1-11 radu A_k odgovara površina određena točkama c-d-e (površina usporavanja). Pri tome se ne izgubi višak energije tijekom usporavanja (ne pretvara se u toplinu), već se kao i u slučaju klatna, kinetička energija pretvara u potencijalnu energiju.

Uvjet za očuvanje prijelazne stabilnosti je da površina usporavanja bude jednaka ili veća od površine ubrzanja, odnosno da kinetička energija potrošena prilikom usporavanja bude najmanje jednaka kinetičkoj energiji koja nastaje prilikom ubrzanja ($A_k \geq A_u$).

Ako je energija ubrzanja veća od one koja se prilikom usporavanja potroši, rotor će - uslijed viška energije - tijekom njihovanja prijeći točku e (slika 1-12), te će zakretni moment prevladati nad kočionim momentom i stroj će ispasti iz sinkronizma.

Metoda jednakih površina predstavlja zoran kriterij za prijelaznu stabilnost. Metoda je jednostavna i brza: u dijagramu $P = f(\delta)$ osim vodoravnog pravca mehaničke snage turbine P_m treba ucrtati i dvije krivulje $P_e = f(\delta)$ za električnu snagu generatora, jednu za stanje mreže prije sklapanja (prijelazne pojave), a drugu za stanje nakon sklapanja. Ako je površina ubrzanja manja ili jednaka najvećoj površini usporavanja, stabilnost će biti očuvana.

Sa stajališta stabilnosti pri malim poremećajima dozvoljen je trajni pogon generatora samo na uzlaznom dijelu sinusoide $P_e = f(\delta)$.

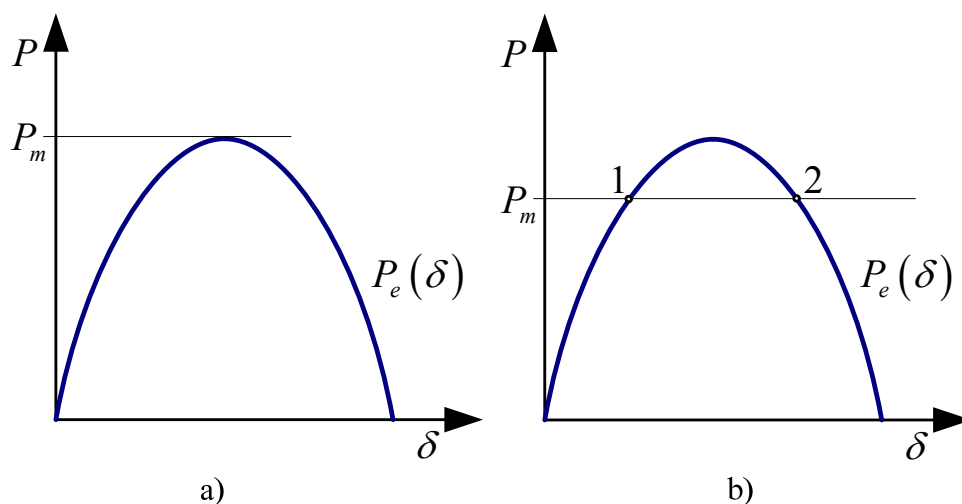


Slika 1-12 Granica maksimalne raspoložive površine za usporavanje je točka e

Za vrijeme prijelaznog stanja, tijekom njihanja, generator može prijeći i na silaznu stranu sinusoide $P_e = f(\delta)$, ukoliko pri tome njegova električna snaga stalno ostaje iznad pravca mehaničke snage turbine P_m , jer u tom slučaju postoji dovoljan kočioni moment, koji će rotor generatora vratiti u stabilnu radnu točku.

Na slici 1-13 prikazana je suštinska razlika između stabilnosti pri malim poremećajima i prijelazne stabilnosti. Sa stajališta stabilnosti pri malim poremećajima, povećavajući mehaničku snagu turbine veoma polagano, dostiže se maksimum sinusoide $P_e = f(\delta)$ i snaga se dalje ne može povećavati, te na silaznoj strani nije moguća stabilna radna točka (slika 1-13a). U slučaju prijelazne stabilnosti rotor generatora prilikom njihanja može dospjeti čak u točku 2 bez gubitka stabilnosti, jer sve do te točke na njega djeluje kočioni moment (slika 1-13b).

Metodom jednakih površina – osim same stabilnosti – može se odrediti i maksimalni kut njihanja δ_{\max} . Međutim ne može se odrediti vremenska promjena kuta δ .

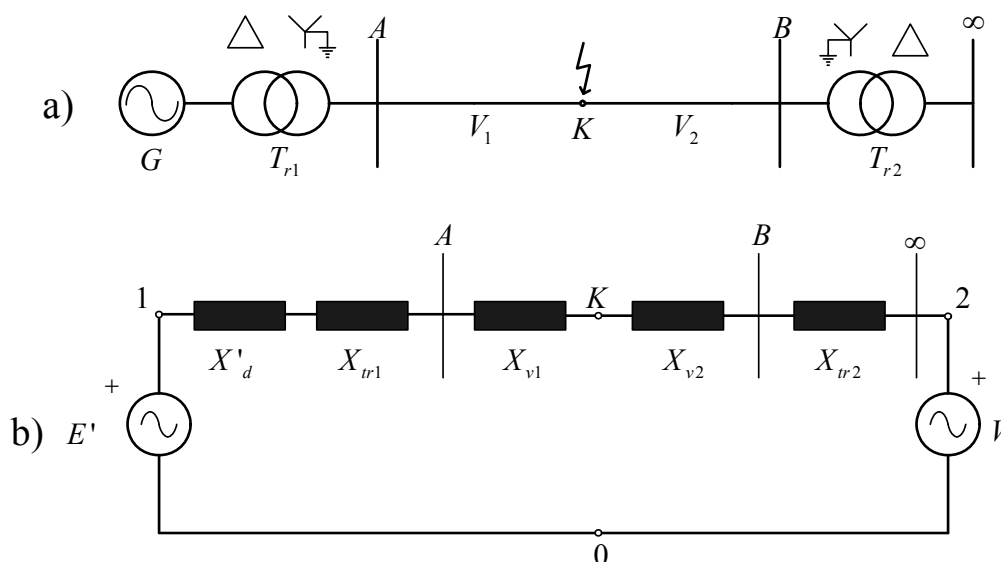


Slika 1-13 Usporedba granica stabilnosti pri malim poremećajima i prijelazne stabilnosti

1.8 Utjecaj različitih vrsta kratkih spojeva na prijelaznu stabilnost u slučaju kada je generator povezan s krutom mrežom preko jednog voda

Iako se metoda jednakih površina može primijeniti samo na slučaj dva stroja ili na slučaj jednog stroja i krute mreže koji su povezani prijenosnim sustavom, ona predstavlja koristan alat za analizu pojava u svezi sa stabilnošću sustava pri nastupanju kratkih spojeva. S obzirom na radijalni pogon agregata u HE Varaždin predmetna metoda je u potpunosti primjenjiva.

Ako se razmatra slučaj jednog generatora i krute mreže povezanih transformatorima i jednostrukim vodom. Generator je s EES-om povezan uzdužno samo preko reaktancija elemenata sustava (zanemareni su djelatni otpori i poprečne grane), a pretpostavljaju se različite vrste kratkih spojeva u nekoj točki K duž voda, između prekidača na početku i kraju voda, prema slici 1-14.



Slika 1-14 Jednopolna a) i nadomjesna b) shema generatora koji je jednostrukim vodom priključen na krutu mrežu

Snaga koju u stacionarnom stanju (prije nastupanja kratkog spoja) daje generator iznosi:

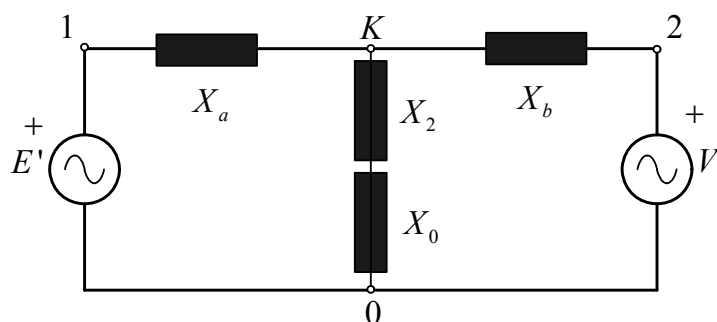
$$P_e = \frac{E'V}{X_{12}} \sin \delta \quad (1.37)$$

gdje X_{12} nadomjesna reaktancija koja uključuje prijelaznu reaktanciju generatoru X'_d , reaktancije oba transformatora X_{r1} i X_{r2} i reaktanciju voda X_v (pri čemu je nadomjesna reaktancija krute mreže jednaka nuli u direktnom sustavu komponenata).

Za različite vrste kratkih spojeva potrebno odrediti iznos ukupne reaktancije koja ima najznačajniji utjecaj na snagu prijenosa u prijelaznom stanju tijekom kratkog spoja.

1.8.1 Jednopolni izravni kratki spoj

Korištenjem metode simetričnih komponenata slijedi, da nadomjesna shema sustava u slučaju jednopolnog izravnog kratkog spoja izgleda kao na slici 1-15. U direktnom sustavu na mjestu kvara uvode se inverzna (X_2) i nulta ekvivalentna reaktancija (X_0) reducirane na mjesto kvara. Pri tome je nadomjesna reaktancija (prema slici 1-14b) prijelazne reaktancije generatora (X_d), reaktancije transformatora 1 (X_{tr1}) i reaktancije voda lijevo od mjesta kvara (X_{v1}) označena s X_a , a s X_b je označena nadomjesna reaktancija sastavljena od reaktancije voda desno od mjesta kvara (X_{v2}) i reaktancije transformatora 2 (X_{tr2}).



Slika 1-15 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-14 a) za jednopolni izravni kratki spoj

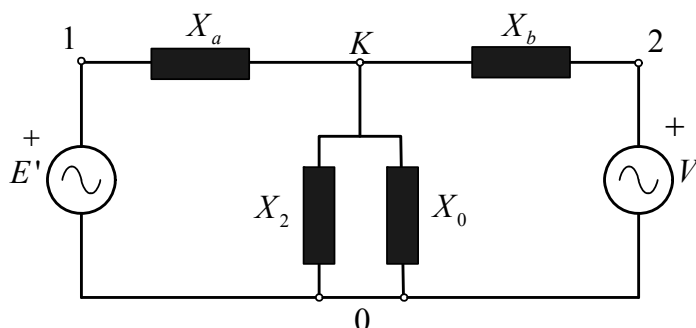
Na mjestu kvara potrebno je uvrstiti reaktanciju $X_k = X_2 + X_0$, te se pretvorbom zvijezde u trokut, dobiva izraz za nadomjesnu reaktanciju koja predstavlja kvar X_{12} :

$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{X_2 + X_0} \quad (1.38)$$

Korištenjem navedenih oznaka potrebno je naglasiti da je prijelazna reaktancija prije kvara bila $X_{12} = X_a + X_b$.

1.8.2 Dvopolni izravni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom

Na jednaki način korištenjem metode simetričnih komponenata, za ovaj slučaj kratkog spoja dobiva se nadomjesna shema predložena na slici 1-16.



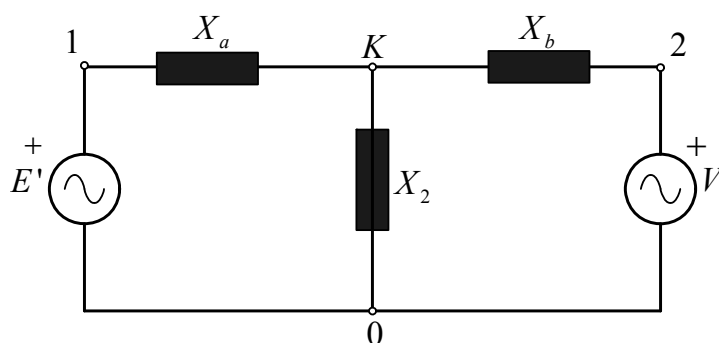
Slika 1-16 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-14 a) za dvopolni izravni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom

U ovom slučaju nadomjesna reaktancija koja predstavlja kvar je:

$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{\frac{X_1 X_0}{X_2 + X_0}} \quad (1.39)$$

1.8.3 Dvopolni izravni kratki spoj

U ovom slučaju nadomjesna shema dana je na slici 1-17.



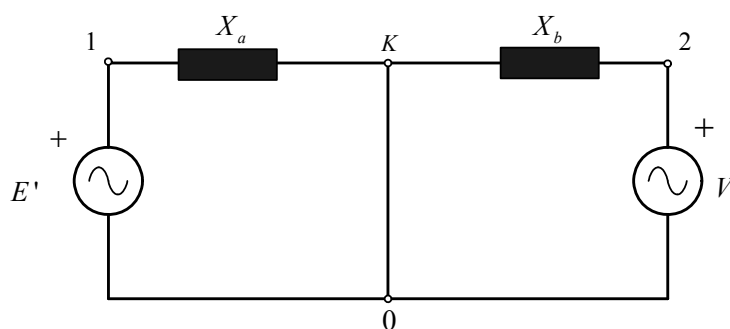
Slika 1-17 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-14 a) za dvopolni izravni kratki spoj

Za nadomjesnu reaktanciju koja predstavlja kvar vrijedi:

$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{X_2} \quad (1.40)$$

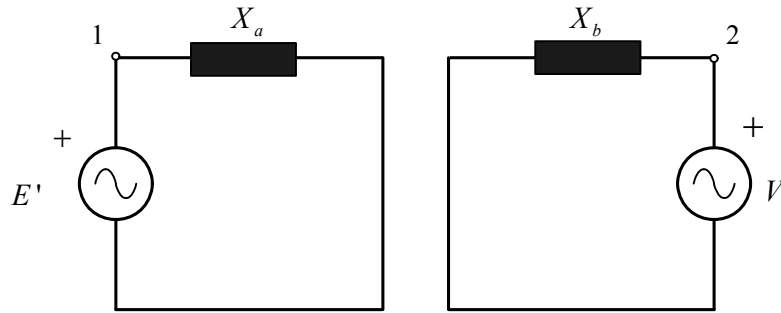
1.8.4 Tropolni izravni kratki spoj

Nadomjesna shema prikazana je na slikama 1-18 i 1-19 (rastavljeno).



Slika 1-18 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-14 a) za tropolni izravni kratki spoj

Dakle, kao što se to sa slike 1-19 vidi, u slučaju trolnog izravnog kratkog spoja prekida se veza između generatora i krute mreže, što znači da je nadomjesna reaktancija koja predstavlja kvar neizmjenno velika. Prema tome razmjena snage između generatora i sustava je potpuno blokirana kvarom, dok je struja kratkog spoja čisto induktivna.



Slika 1-19 Rastavljanje nadomjesne sheme sa slike 1-19

Tijekom trajanja kvara, električna snaga pada od vrijednosti koju je imala prije nastanka kvara do nule, kao što je ilustrirano linijom 1-2 na slici 1-20 i ostaje na vrijednosti nula dok se kvar ne eliminira otvaranjem prekidača. Odgovarajuća kutna akceleracija rotora ε može se dobiti iz jednadžbe njihanja (1.8) dijeljenjem obje strane jednadžbe s M_i te uvrštenjem $P_e=0$ slijedi:

$$\varepsilon = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{M_i} = \text{konst.} \quad (1.41)$$

Dvostrukim integriranjem jednadžbe (1.41) uz početne uvjete $\delta(t=0)=\delta_0$ i $\Delta\omega(t=0)=0$ dobije se krivulja snaga-kut u ovisnosti o vremenu kao:

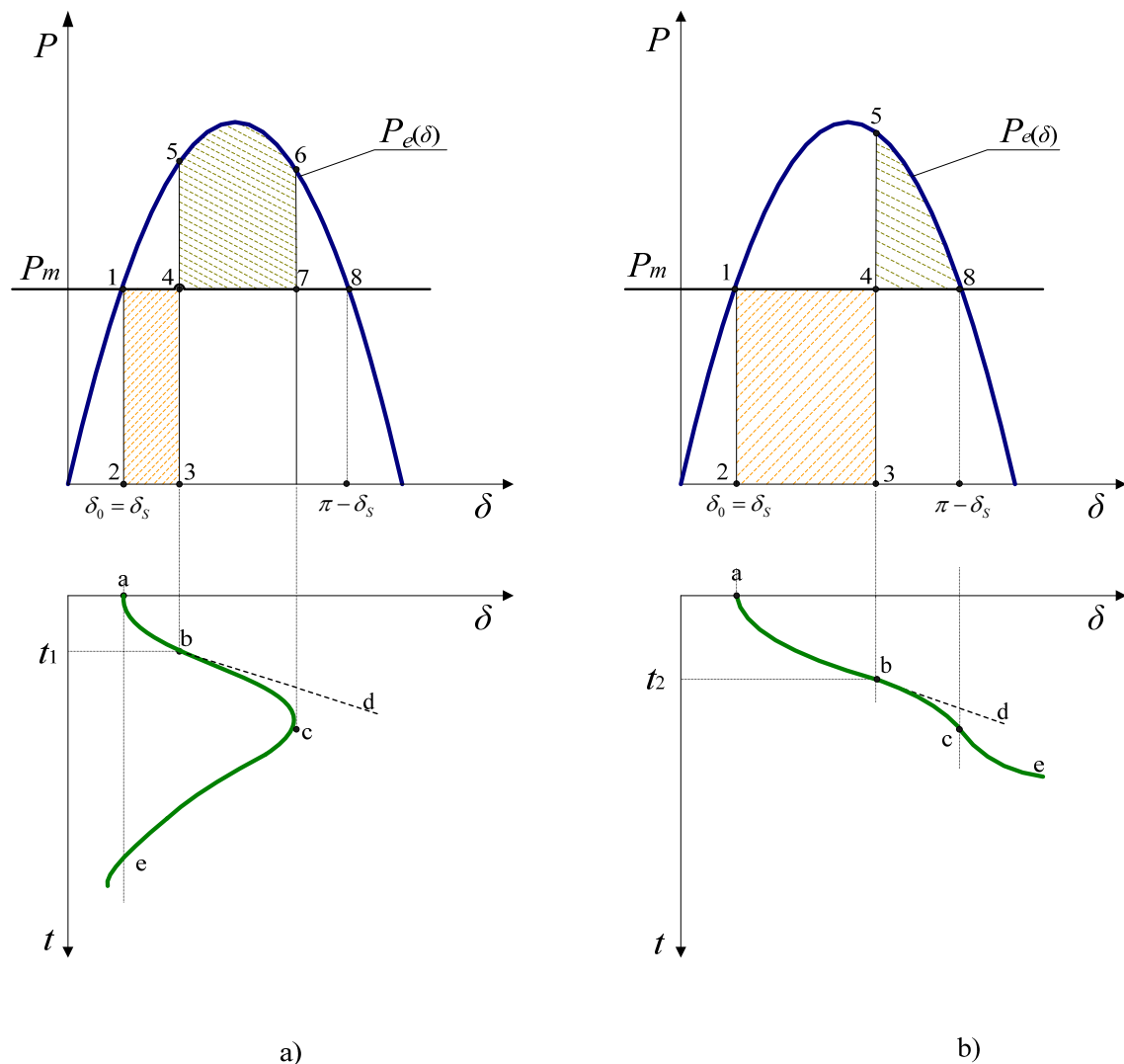
$$\delta = \delta_0 + \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{ili} \quad \Delta\delta = \delta - \delta_0 = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad (1.42)$$

Krivulja snaga-kut u ovisnosti o vremenu odgovara paraboli $a-b-d$ na slici 1-20 a). Prije otklanjanja kvara kut opterećenja rotora pomiče se iz točke 2 u točku 3 i dobiva kinetičku energiju koja je proporcionalna osjenčanom području 1-2-3-4.

Kad je kvar eliminiran otvaranjem prekidača u vremenu $t=t_1$, rotor opet slijedi karakteristiku snaga-kut $P_e(\delta)$ (reaktancija je jednaka onoj prije kvara), tako da radna točka skače iz točke 3 u točku 5. Na rotor djeluje kočioni moment, veličine proporcionalne duljini linije 4-5, pa počinje usporavati. Međutim uslijed svoje tromosti, rotor nastavlja povećavati svoj kut opterećenja dok se rad koji je obavljen za vrijeme usporavanja, površina 4-5-6-7, ne izjednači sa kinetičkom energijom koja je dobivena za vrijeme ubrzavanja, površina 1-2-3-4. Rotor opet postiže sinkronu brzinu u točki 6 i tada vrijedi jednakost površina omeđenih točkama 4-5-6-7 i 1-2-3-4.

Ako se izostavi prigušenje proces se ponavlja tako da rotor titra oko točke 1 radeći tako sinkrone njihaje. Generator neće ispasti iz sinkronizma i sustav ostaje stabilan.

Slika 1-20 b) pokazuje sličnu situaciju ali sa značajnije dužim vremenom eliminacije kvara $t=t_2$ kada je kinetička energija koja je utrošena za vrijeme ubrzavanja, proporcionalna površini 1-2-3-4 mnogo veća nego na slici 1-20 a). Rezultat toga je da rad koji je obavljen za vrijeme usporavanja, proporcionalan površini 4-5-8, ne može apsorbirati kinetičku energiju tijekom ubrzavanja i odstupanje brzine vrtnje rotora ne postaje jednako nuli prije nego rotor dostigne točku 8.



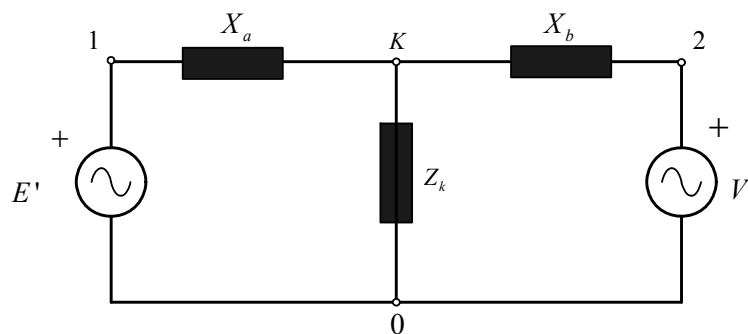
Slika 1-20 Područja ubrzavanja i usporavanja rotora: a) Ukoliko je vrijeme eliminacije kratkog spoja kratko; b) Ukoliko je vrijeme eliminacije kratkog spoja dugo

Kada rotor prijeđe točku 8 električna snaga $P_e(\delta)$ je manja od mehaničke snage P_m i rotor osjeća novi akcelerijski moment koji dodatno povećava njegov kut opterećenja. Rotor se počinje vrtjeti asinkrono i gubi sinkronizam sa sustavom.

1.8.5 Tropolni neizravni kratki spoj preko impedancije

Ako do trofaznog kratkog spoja dođe preko impedancije Z_k , (npr. impedancija luka na mjestu kvara) nadomjesna će se shema u odnosu na slučaj izravnog trofaznog kratkog spoja promijeniti (slika 1-21).

Nadomjesna reaktancija koja predstavlja kvar u ovom slučaju nije neizmjenno velika.



Slika 1-21 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-14a) za trolpolni neizravni kratki spoj

U svrhu kvalitativne analize, u prvom, dosta grubom približenju, zamjenjujući kompleksnu impedanciju Z_k s apsolutnom vrijednošću te impedancije $|Z_k|$, X_{12} ima vrijednost:

$$X_{12} = X_a + X_b + \frac{X_a X_b}{|Z_k|} \quad (1.43)$$

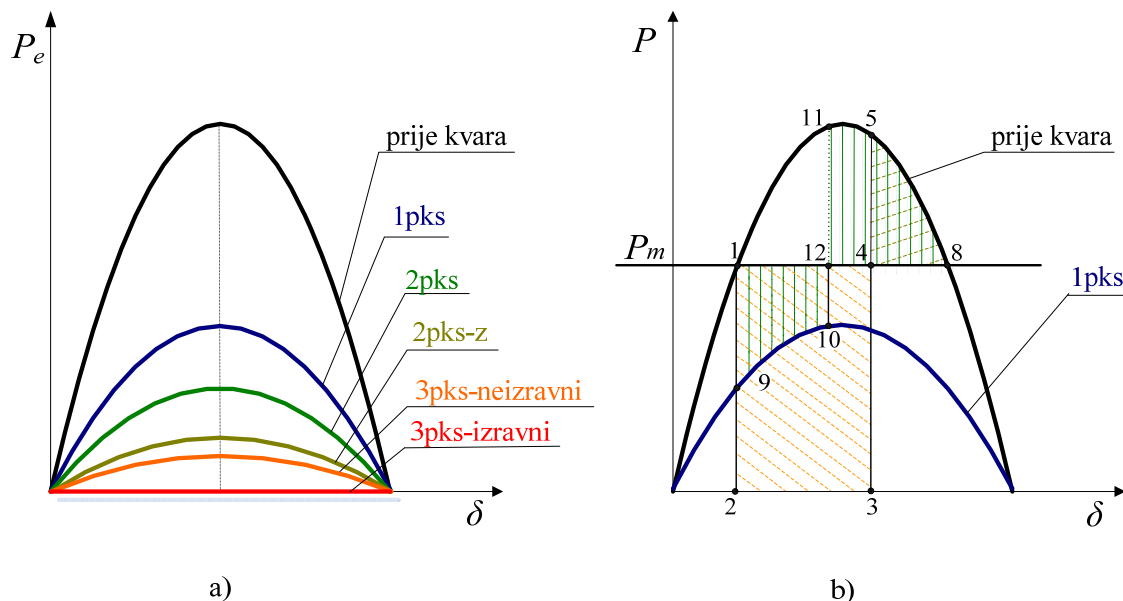
Pri razmjerno maloj vrijednosti impedancije $|Z_k|$, kao što je to slučaj kod električnog luka, nadomjesna reaktancija koja predstavlja kvar postaje velika, pa je moguć prijenos samo male snage.

1.8.6 Utjecaj pojedinih vrsta kratkoga spoja na stabilnost

Uz pomoć navedenih nadomjesnih shema može se procijeniti utjecaj pojedinih vrsta kratkoga spoja, nastalih na određenom mjestu u mreži, na stabilnost prijenosnog sustava. Pretpostavljajući u svim slučajevima jednake polazne podatke (jednake elektromotorne sile iza prijelazne reaktancije, jednaki naponi sabirnica krute mreže, jednake impedancije), iznos snage koja se može prenijeti ovisi o veličini nadomjesna reaktancije koja predstavlja kvar, s kojom je maksimalna snaga obrnuto proporcionalna. Ukoliko dođe do nesimetričnog kratkog spoja barem jedna od faza ostaje zdrava i preko nje se nekakva snaga može prenijeti u sustav. Nadomjesna reaktancija koja predstavlja kvar sada ne raste do beskonačnosti, kao u slučaju trolpnog kratkog spoja, već ima konačnu vrijednost definiranu jednadžbom (1.68).

$$(X_a + X_0) > X_2 > \frac{X_2 X_0}{X_2 + X_0} > |Z_k| \quad (1.44)$$

Iz jednadžbe (1.36) slijedi da je s gledišta prijelazne stabilnosti relativno najpovoljniji jednopolni izravni kratki spoj. Od toga su nepovoljniji dvopolni izravni kratki spoj, te dvopolni izravni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom. Najnepovoljniji je naravno trolpolni kratki spoj, koji ako je neizravni, omogućuje prijenos tek neznatne snage, a ako je izravni, prekida svaku vezu između generatora i krute mreže (slika 1-19). Odgovarajuće karakteristike snaga-kut tijekom nesimetričnih kvarova su prikazane na slici 1-22.



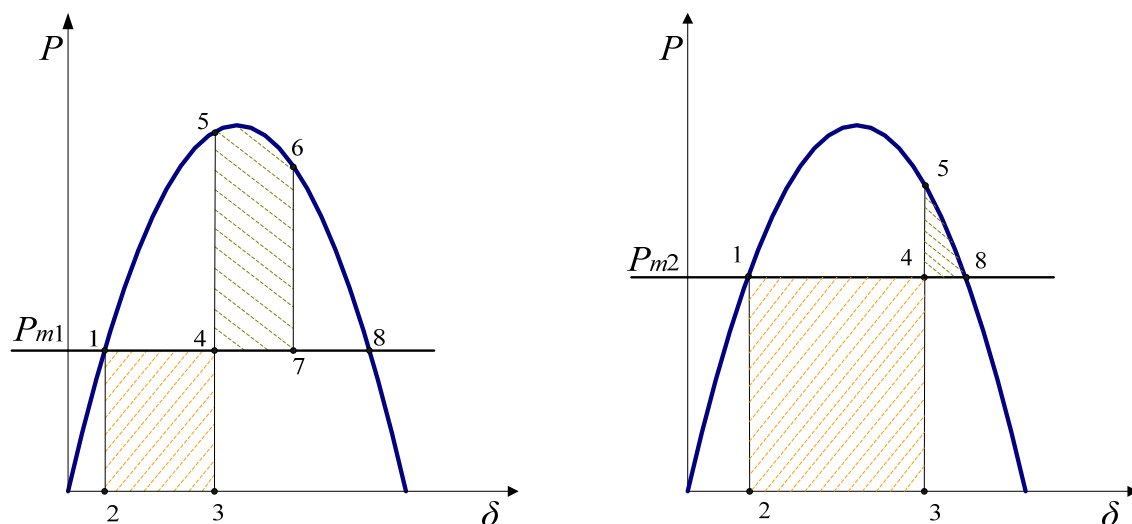
Slika 1-22 a) Usporedba karakteristika snaga-kut za različite tipove kvara
 b) Površine koje odgovaraju ubrzavanju i usporavanju tijekom trofaznog i jednofaznog kratkog spoja

Utjecaj nesimetričnog kratkog spoja na stabilnost sustava je istražena uzimajući u obzir, najmanje opasan jednofazni kratki spoj. Pretpostavljeno je da je vrijeme uklanjanja kvara neznatno dulje od kritičnog vremena uklanjanja trofaznog kratkog spoja. Površine koje odgovaraju ubrzavanju i usporavanju rotora prikazane su na slici 1-22 b). U slučaju trofaznog kratkog spoja površina 1-2-3-4 koja odgovara ubrzavanju veća je od površine koja odgovara usporavanju 4-5-8 te sustav nije stabilan (slika 1-20 a).

U slučaju jednofaznog kratkog spoja prijenos snage nije potpuno blokiran tako da postoji propad snage od točke 1 na karakteristici prije kvara na točku 9 na karakteristici za vrijeme kvara (plava krivulja). Moment ubrzanja, koji odgovara liniji 1-9, manji je nego u slučaju trofaznog kratkog spoja (linija 1-2), rotor se ubrzava, ali sporije, i do isteka vremena kada je kvar eliminiran, rotor je već dostigao točku 10. U toj točki kut opterećenja rotora je manji nego u slučaju trofaznog kratkog spoja. Površina koja odgovara ubrzavanju 1-9-10-12 sada je mnogo manja od maksimalne površine koja odgovara usporavanju 11-8-12 i sustav je stabilan sa velikim faktorom sigurnosti. Očito je da bi dulje vrijeme eliminacije kvara uzrokovalo gubitak stabilnosti generatora, ali vrijedi da je kritično vrijeme eliminacije kvara mnogo dulje kada se radi o jednofaznom kratkom spoju u odnosu na trofazni.

1.8.7 Utjecaj opterećenja prije nastanka kratkog spoja

Slika 1-23 prikazuje karakteristiku generatora koji je opterećen snagom P_{m1} prije nastanka trofaznog kratkog spoja. Kvar je eliminiran kad je površina koja odgovara ubrzavanju rotora 1-2-3-4 manja od dostupne površine koja odgovara usporavanju 4-5-8. Sustav je stabilan sa granicom stabilnosti 6-7-8. Povećanjem opterećenja prije nastanka kvara za 50% $P_{m2}=1.5 P_{m1}$ povećava se snaga akceleracije $P_a=P_m-P_e(\delta) = P_m$ za faktor 1.5, pa se prema jednadžbama (1.35) i (1.36) promjena kuta opterećenja $\Delta\delta$ također povećava za faktor 1.5.



Slika 1-23 Površine koje odgovaraju ubrzavanju i usporavanju rotora za dva različita opterećenja generatora prije nastanka kvara P_{m1} i $P_{m2} = 1.5 P_{m1}$. Vrijeme uklanjanja kvara je isto u oba slučaja.

S obzirom da se svaka stranica pravokutnika koja odgovara ubrzavanju povećala 1.5 puta površina pravokutnika 1-2-3-4 je puno veća od dozvoljene površine za usporavanje 4-5-8 i sustav je nestabilan.

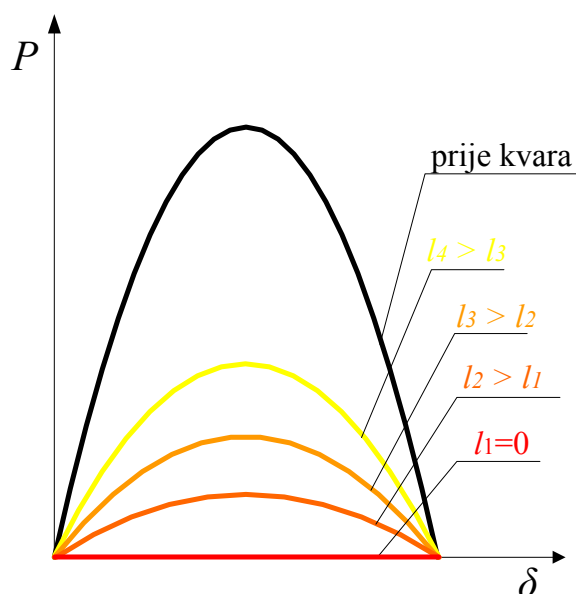
Opterećenje prije nastanka kvara važan je čimbenik za određivanje kritičnog vremena eliminacije kvara i stabilnosti generatora. Što je veće opterećenje generatora kritično vrijeme je kraće.

1.8.8 Utjecaj udaljenosti mjesta kvara

Ako je mjesto nastanka kvara na vodu na nekoj udaljenosti od sabirnica, impedancija voda u kvaru proporcionalna udaljenosti mjesta kvara i reaktanciji po jedinici duljine tog voda.

Slika 1-24 prikazuje karakteristike snaga-kut za trolni kratki spoj (nadmjesna reaktancija koja predstavlja kvar je neizmjereno velika) uz povećavanje udaljenosti mjesta kvara duž voda. Ako se to usporedi s nesimetričnim kratkim spojevima može se vidjeti da što je veća udaljenost kratkog spoja od generatora kratki spoj manje djeluje na njega te se može dopustiti dulje vrijeme za eliminaciju kvara.

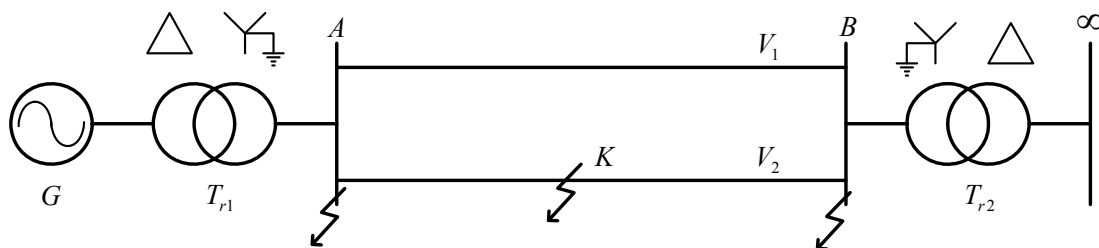
U slučaju nesimetričnih kratkih spojeva (nadmjesna reaktancija koja predstavlja kvar nije neizmjereno velika) iznos karakteristike snaga-kut tijekom kvara raste u usporedbi sa trolnim kratkim spojem. Rezultat toga je manji utjecaj kratkog spoja na stabilnost. Ukoliko se radi o udaljenom jednopolnom kratkom spoju utjecaj na generator može biti jako malen.



Slika 1-24 Utjecaj udaljenosti mjesta kvara: karakteristike snaga-kut prije nastanka kvara i za različite udaljenosti mjesta nastanka kvara

1.9 Utjecaj različitih vrsta kratkih spojeva na prijelaznu stabilnost u slučaju generatora spojenog s dva voda

Provest će se razmatranja u slučaju kada je jedan generator povezan s krutom mrežom preko dva paralelna voda (slika 1-25). To je pogon koji će biti moguć u HE Varaždin nakon rekonstrukcije rasklopnog postrojenja.

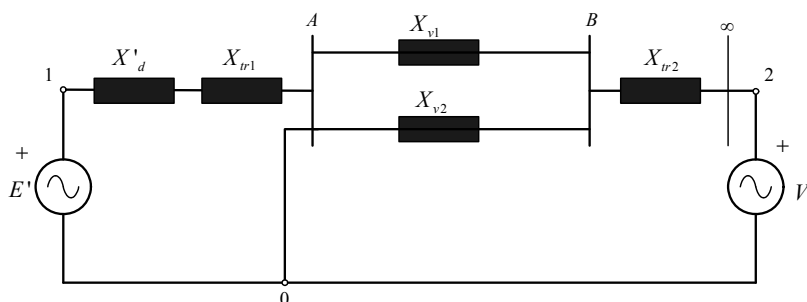


Slika 1-25 Jednopolna shema prijenosa od jednog generator do krute mreže preko dvostrukog voda

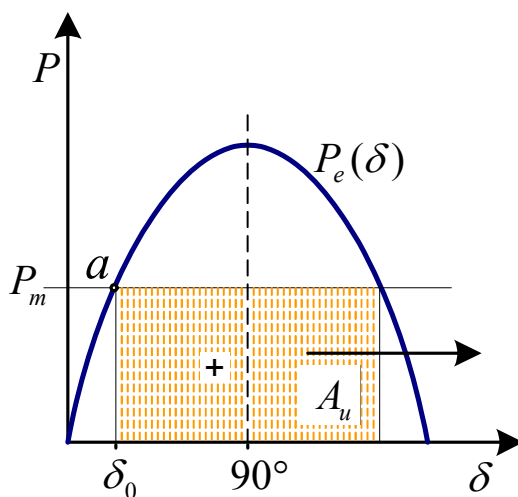
Iskapčanje jednog od paralelnih vodova može uzrokovati gubitak sinkronizma generatora čak i u slučaju kada bi se u stacionarnom stanju opterećenje moglo napojiti i preostalim vodom.

Ako na sabirnicama elektrane dođe do trolnog kratkog spoja, vodovima se ne može prenositi snaga, pa se generator naglo rasterećuje djelatnih struja opterećenja uz istovremeno pojavljivanje velikih induktivnih struja kratkog spoja. To rasterećenje od prijenosa djelatne snage regulacija pogonskog stroja ne može slijediti, pa dolazi do ubrzanja rotora i do gubitka sinkronizma. Nadomjesna shema opisanog slučaja prikazana

je na slici 1-26, a odgovarajuću krivulju snaga – kut na slici 1-27. (Sve ovo vrijedi i za slučaj spoja elektrane i sustava preko jednog voda ako do trolnog kratkog spoja dođe na sabirnicama elektrane.)

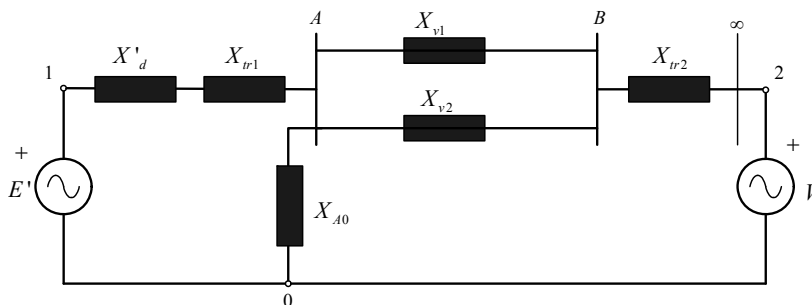


Slika 1-26 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za trolni kratki spoj na sabirnicama elektrane



Slika 1-27 Krivulja snaga – kut za trolni kratki spoj na sabirnicama elektrane za slučaj prijenosa prema slici 1-22

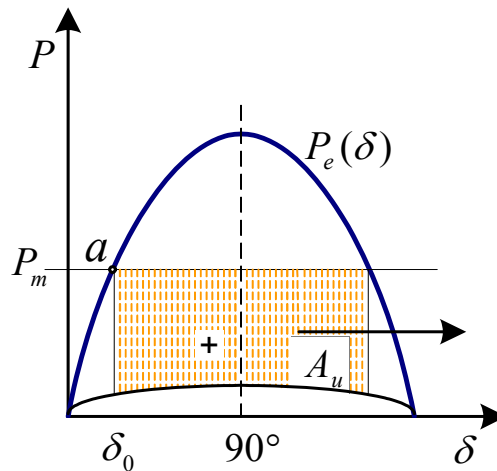
Promatra li se slučaj nesimetričnog kratkog spoja na sabirnicama elektrane, vrijedi nadomjesna shema prema slici 1-28.



Slika 1-28 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za nesimetrični kratki spoj na sabirnicama elektrane

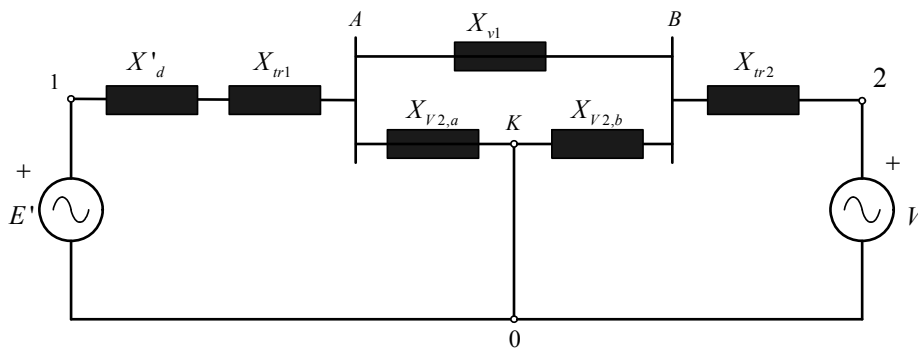
Reaktancija X_{A0} , koja se za pojedine vrste nesimetričnih kratkih spojeva u ekvivalentnu shemu direktnog sustava komponenata spaja između točaka A i 0 , određuje se na jednaki način kao i u slučaju jednostrukog voda (u slučaju jednopolnog kratkog spoja između točaka A i 0 spaja se serijska kombinacija inverzne i nulte ekvivalentne reaktancije mreže, obje računate upravo u odnosu na te točke, itd.). Nesimetrični kratki spoj na sabirnicama elektrane dozvoljava određeni prijenos djelatne snage zdravom fazom ili fazama.

Dijagram snaga – kut prikazan je na slici 1-29, gdje se vidi da se sinkronizam ni u ovom slučaju ne može održati, iz istog razloga kao pri trolnom kratkom spoju na sabirnicama elektrane.



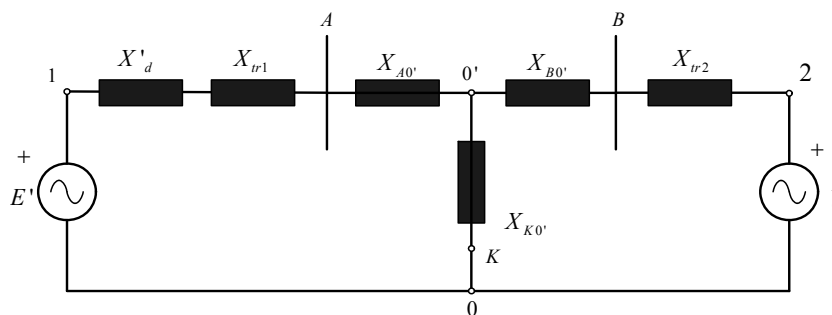
Slika 1-29 Krivulja snaga – kut za nesimetrični kratki spoj na sabirnicama elektrane za slučaj prijenosa prema slici 1-25

Ako izravni trolni kratki spoj nastupi na jednomvodu na mjestu K između prekidača na krajevima voda. Nadomjesna je shema vidljiva na slici 1-30.



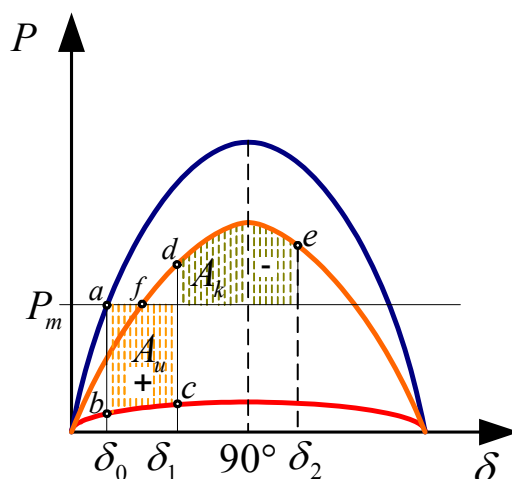
Slika 1-30 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za trolni kratki spoj na jednom od paralelnih vodova

Nakon pretvorbe trokuta reaktancija vodova u zvijezdu, u kraku zvijezde spojenom na neutralnu točku (različito nego u slučaju prijenosnog sustava s jednostrukim vodom) postoji reaktancija različita od nule (slika 1-31). Posljedica je uspostavljanje značajne, ali ne neizmjerne, nadomjesne reaktancije X_{12} između generatora i krute mreže, odnosno (zbog postojanja paralelnog zdravog voda) postoji mogućnost prijenosa djelatne snage, iako relativno male u odnosu na snagu prijenosa u normalnom pogonu.



Slika 1-31 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za tropolni kratki spoj na jednom od paralelnih vodova

Za ovaj slučaj na slici 1-32 predložene su krivulje snaga – kut (crna krivulja vrijedi za stanje prije kratkog spoja, crvena za vrijeme trajanja kratkog spoja, a narančasta nakon djelovanja zaštite, odnosno isključenja voda u kratkom spoju).

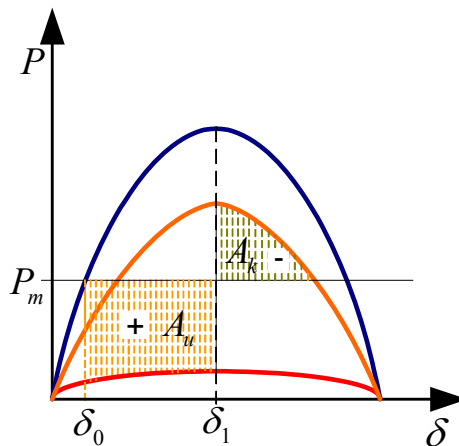


Slika 1-32 Krivulja snaga – kut pri tropolnom kratkom spoju na jednom od paralelnih vodova prema slici 1-25 (prijelazna stabilnost je održana)

Uslijed kratkoga spoja u radnoj točki a kut rotora generatora δ trenutno se ne može promijeniti, tako da u prvom trenutku zadržava početnu vrijednost δ_0 i u privremenoj radnoj točki b na krivulji snage pri kratkom spoju. Tu se javlja višak mehaničke snage proporcionalan duljini $a - b$, tako da rotor generatora ubrzava (brzinom većom od sinkrone) do nekog kuta δ_1 u točki c kada je pretpostavljeno da relejna zaštita na oba kraja isključuje sve tri faze voda u kvaru, pa se snaga prenosi samo preko voda koji nije u kvaru. Radna točka uz nepromijenjeni kut δ_1 skače u točku d (krivulja prijenosa preko jednog voda), gdje je električna snaga veća od mehaničke. Uslijed manjka mehaničke snage rotor usporava do točke e gdje je brzina vrtnje ponovno sinkrona. Nakon toga, uslijed viška električne snage (opterećenja) u točki e , rotor se i dalje usporava i radna točka se vraća unazad po narančastoj krivulji. Zapravo nastupa proces prigušenih njihanja koji će se smiriti u novoj radnoj točki f uz sinkronu brzinu.

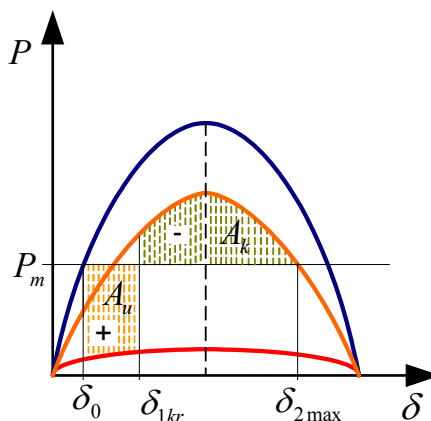
Na slici 1-32 naznačene su i površina ubrzavanja A_u i površina kočenja A_k . Zorno se vidi da su u ovom slučaju te dvije površine jednake, što znači da je unatoč trolnom kratkom spoju na jednom od vodova, stabilnost održana. To se može očekivati ako je trolni kratki spoj dovoljno daleko od sabirnica elektrane i ako je zaštita dovoljno brza da se kvarom pogođeni vod selektivno isključi.

Suprotno opisanom, ako otklanjanje kvara nije dovoljno brzo (slika 1-33) površina ubrzavanja veća je od površine kočenja (vrijednost kuta δ_1 je prevelika), te se stabilnost generatora neće očuvati unatoč isključenju voda u kvaru.



Slika 1-33 Krivulja snaga – kut pri trolnom kratkom spoju na jednom od paralelnih vodova prema slici 1-25 (prijelazna stabilnost nije očuvana)

U graničnom slučaju, uz dani početni kut δ_0 , kratki se spoj mora otkloniti kod kritičnog kuta δ_{1kr} pri kojem se još mogu izjednačiti površina ubrzavanja i površina kočenja uz kut δ_{2max} koji odgovara sjecištu horizontale mehaničke snage turbine s krivuljom prvobitne električne snage generatora (slika 1-34).



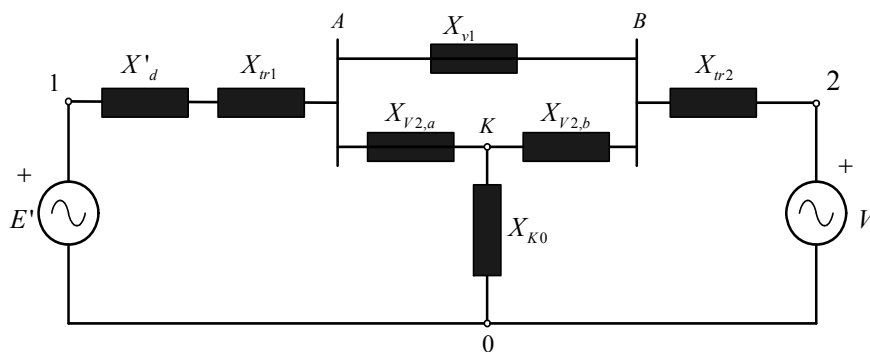
Slika 1-34 Krivulja snaga – kut pri trolnom kratkom spoju na jednom od paralelnih vodova prema slici 1-25 (granica prijelazne stabilnosti)

Za prijelaz rotora sinkronog stroja iz jednog kutnog položaja u drugi potrebno je određeno vrijeme, pa zbog toga potrebno što brže otkloniti kvar. To se osigurava ugradnjom suvremenih brzih uređaja relejne zaštite kao i prekidača s kratkim vlastitim vremenom djelovanja.

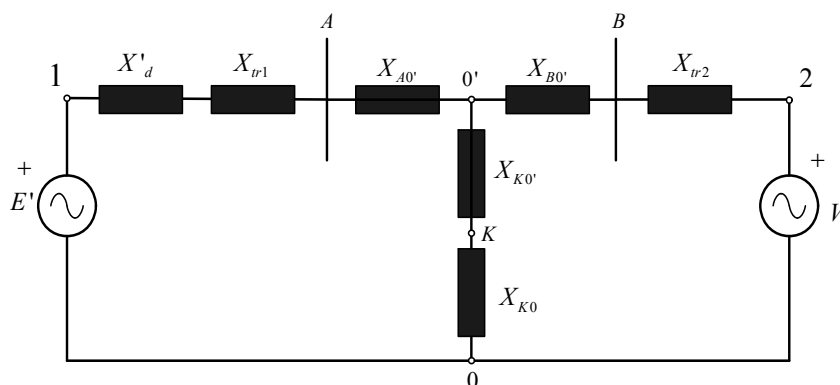
Snaga prijenosa ovisi o sinusu kuta δ , tako da je početni kut δ_0 to veći, što veću snagu sustav prenosi. Za određenu vrstu kvara na određenom mjestu prijenosnog sustava, površina usporavanja rotora je manja, što je kut δ_0 veći, odnosno što je veća snaga prijenosa u stacionarnom stanju prije kvara. Održavanje prijelazne stabilnosti na nekoj mreži i uz pretpostavku neke vrste kvara na nekom mjestu određuje moguću snagu prijenosa u stacionarnom stanju. To je granica prijelazne stabilnosti.

Ukoliko se na mjestu K na jednom od paralelnih vodova dogodi neizravni trofazni kratki spoj npr. preko impedancije luka Z_k , predmetnu reaktanciju treba dodati u seriju s reaktancijom X_{K0} na shemi između točaka K i 0 (slika 1-31).

U slučaju nesimetričnih kratkih spojeva na jednom od paralelnih vodova prijelazna stabilnost može se održati uz uvjet brzog iskopčanja voda u kvaru. Nadomjesna shema sustava sa slike 1-25 prilikom nesimetričnih kvarova predložena je na slici 1-35, a na slici 1-36 predložena je ista mreža nakon pretvorbe trokuta reaktancija vodova u zvijezdu.



Slika 1-35 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za nesimetrične kratke spojeve na jednom od paralelnih vodova



Slika 1-36 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za nesimetrične kratke spojeve na jednom od paralelnih vodova

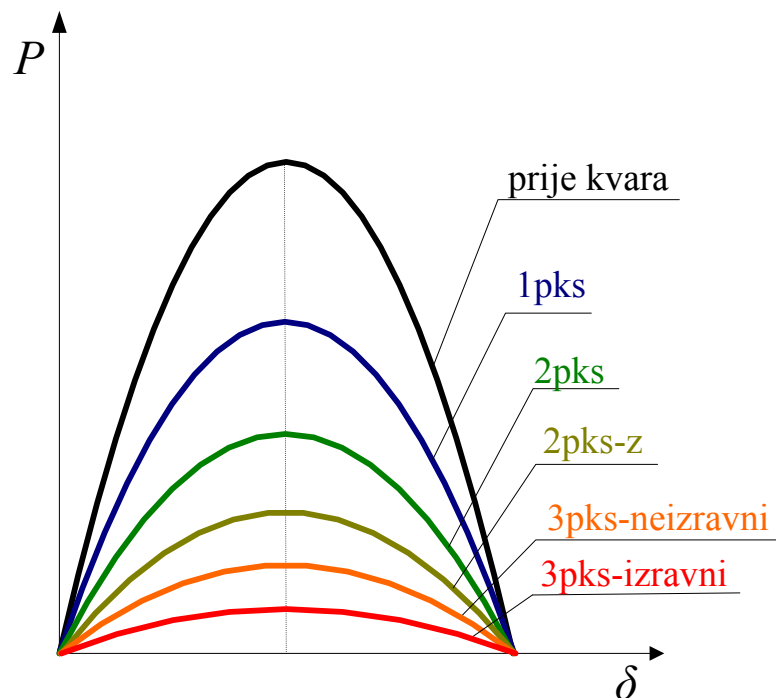
Reaktancija X_{K0} , koja se za pojedine vrste nesimetričnih kratkih spojeva u ekvivalentnu shemu direktnog sustava komponenata spaja između točaka K i 0 , određuje se na isti način kao što je opisano prilikom razmatranja nesimetričnog kvara na jednostrukom vodu i nesimetričnog kvara na sabirnicama elektrane.

Konstrukcija površina ubrzavanja i kočenja u dijagramu snaga – kut kvalitativno je ista kao ona na slici 1-32 za slučaj trolnog kratkog spoja na jednom od vodova, samo je viši maksimum krivulje koja vrijedi tijekom kvara.

Za otklanjanje nesimetričnih kvarova isključivanjem voda u kvaru uz mogućnost održanja prijelazne stabilnosti, tj. za određivanje kritičnog kuta isklopa δ_{1kr} vrijedi jednako kvalitativno razmatranje kao i prilikom trolnog kratkog spoja.

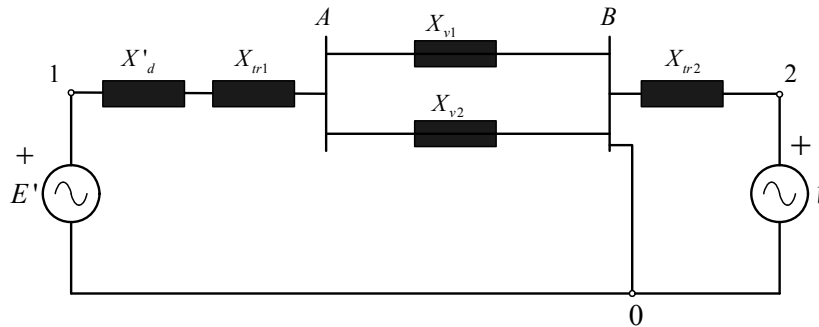
Maksimum krivulje snaga – kut tijekom trajanja kratkog spoja (kao i u slučaju prijenosnog sustava sa samo jednim vodom) ovisi (uz konstantne unutarnje napone generatora i krute mreže) o nadomjesnoj reaktanciji pri kvaru između generatora i krute mreže. Taj je maksimum veći, što je nadomjesna reaktancija pri kvaru manja, tako da analiza utjecaja pojedinih vrsta kratkog spoja na prijelaznu stabilnost daje i za prijenosni sustav od dva paralelna voda kvalitativno isti redoslijed kao i u slučaju jednog voda (slika 1-37).

Razlika se pojavljuje pri izravnom trolnom kratkom spoju na jednom od vodova jer je u tom slučaju moguć prijenos određene djelatne snage po vodu koji nije u kvaru.



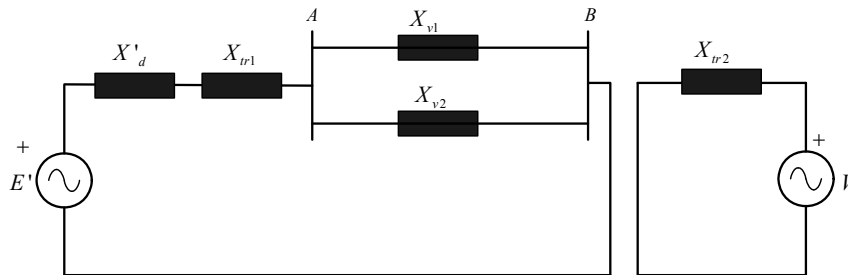
Slika 1-37 *Krivulje snaga – kut koje u prijelaznom stanju vrijede za različite vrste kratkih spojeva na jednom od vodova u slučaju prijenosnog sustava sastavljenog od dva paralelna voda*

Za slučaj najnepovoljnijeg izravnog trolnog kratkog spoja na sabirnicama B (slika 1-25) nadomjesna shema predložena je na slici 1-38.



Slika 1-38 Nadomjesna shema mreže sa slike 1-25 za trolni kratki spoj na sabirnicama B

U ovom slučaju također dolazi do razdvajanja mreže u dva dijela (slika 1-39).



Slika 1-39 Rastavljeni dijelovi mreže sa slike 1-38 pri trolnom kratkom spoju na sabirnicama B

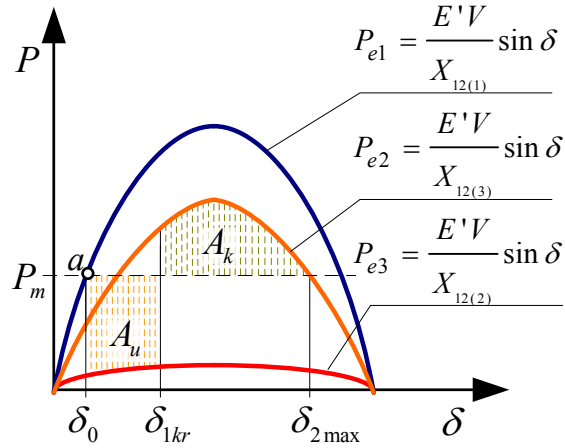
U ovom slučaju krivulje snaga – kut izgledaju poput onih na slici 1-27 (sinkroni pogon generatora nije moguće održati).

1.10 Određivanje kritičnog kuta isklopa

Za prijenosni sustav (slika 1-25) s dva paralelna voda, koji povezuju generator s jedne i krutu mrežu s druge strane, moguće je proračunom odrediti kritični kut isklopa δ_{lkr} pri kratkom spoju na jednom od vodova, uzimajući u obzir maksimalni dozvoljeni kut njihovanja δ_{2max} (kut pri kojem se kratki spoj mora isključiti, da bi se spriječio raspad sustava – bez djelovanja automatskog ponovnog uključanja).

Nadomjesna reaktancija prijenosnog sustava prije kvara je $X_{12(1)}$, nadomjesna reaktancija pri kratkom spoju na jednomvodu je $X_{12(2)}$, a nadomjesna reaktancija $X_{12(3)}$ je reaktancija sustava s jednim vodom (drugi vod je isključen zbog kratkog spoja).

Uvjet prijelazne stabilnosti sustava je da površina ubrzavanja bude jednaka površini usporavanja, $A_u = A_k$ (slika 1-40).



Slika 1-40 Određivanje kritičnog kuta isklopa δ_{1kr} uzimanjem u obzir maksimalnog kuta njihanja δ_{2max}

Veličina površine A_u računa se kao razlika površina:

$$A_u = P_m (\delta_{1kr} - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \frac{E'V}{X_{12(2)}} \sin \delta d\delta \quad (1.45)$$

S obzirom na to da u početnoj radnoj točki a vrijedi $P_m = P_{e1}$, za površinu ubrzanja može se pisati:

$$\begin{aligned} A_u &= (\delta_{1kr} - \delta_0) \frac{E'V}{X_{12(1)}} \sin \delta_0 - \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \frac{E'V}{X_{12(2)}} \sin \delta d\delta \\ &= (\delta_{1kr} - \delta_0) \frac{E'V}{X_{12(1)}} \sin \delta_0 - \frac{E'V}{X_{12(2)}} \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \sin \delta d\delta \end{aligned} \quad (1.46)$$

Slično se može izvesti jednačba za površinu kočenja:

$$A_k = \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2max}} \frac{E'V}{X_{12(3)}} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{2max} - \delta_{1kr}) \quad (1.47)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} A_k &= \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2max}} \frac{E'V}{X_{12(3)}} \sin \delta d\delta - (\delta_{2max} - \delta_{1kr}) \frac{E'V}{X_{12(1)}} \sin \delta_0 \\ &= \frac{E'V}{X_{12(3)}} \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2max}} \sin \delta d\delta - (\delta_{2max} - \delta_{1kr}) \frac{E'V}{X_{12(1)}} \sin \delta_0 \end{aligned} \quad (1.48)$$

Izjednačavanjem $A_u = A_k$ dobiva se:

$$\begin{aligned}
& (\delta_{2\max} - \delta_0) \frac{E'V}{X_{12(1)}} \sin \delta_0 = \\
& = \frac{E'V}{X_{12(2)}} \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \sin \delta \, d\delta + \frac{E'V}{X_{12(3)}} \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2\max}} \sin \delta \, d\delta
\end{aligned} \tag{1.49}$$

Dijeljenjem objiju strana jednadžbe (1.49) s izrazom $\frac{E'V}{X_{12(1)}}$ dobije se:

$$(\delta_{2\max} - \delta_0) \sin \delta_0 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(2)}} \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \sin \delta \, d\delta + \frac{X_{12(1)}}{X_{12(3)}} \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2\max}} \sin \delta \, d\delta \tag{1.50}$$

Što nakon integracije daje:

$$\begin{aligned}
& (\delta_{2\max} - \delta_0) \sin \delta_0 = \\
& = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(2)}} (-\cos \delta_{1kr} + \cos \delta_0) + \frac{X_{12(1)}}{X_{12(3)}} (-\cos \delta_{2\max} + \cos \delta_{1kr})
\end{aligned} \tag{1.51}$$

Neka je:

$$k_1 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(2)}}, \quad k_2 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(3)}} \tag{1.52}$$

Uz opisanu supstituciju jednadžba (1.51) poprima oblik:

$$(\delta_{2\max} - \delta_0) \sin \delta_0 = k_1 \cos \delta_0 - k_2 \cos \delta_{2\max} + (k_2 - k_1) \cos \delta_{1kr} \tag{1.53}$$

Iz jednadžbe (1.47) slijedi izraz za kritični kut isklopa δ_{1kr} :

$$\cos \delta_{1kr} = \frac{(\delta_{2\max} - \delta_0) \sin \delta_0 - k_1 \cos \delta_0 + k_2 \cos \delta_{2\max}}{k_2 - k_1} \tag{1.54}$$

Gdje se iznos razlike $(\delta_{2\max} - \delta_0)$ uvrštava u radijanima.

Umjesto izraza (1.54) neki autori koriste izraz (1.55):

$$\cos \delta_{1kr} = \frac{\frac{P_m}{P_{\max}} \cdot (\delta_{gr} - \delta_0) + r_2 \cdot \cos \delta_{gr} - r_1 \cdot \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \tag{1.55}$$

Gdje su:

$$r_1 = \frac{P_{\max(2)}}{P_{\max(1)}}, \quad r_2 = \frac{P_{\max(3)}}{P_{\max(1)}}, \quad \delta_{2\max} = \delta_{gr} \quad \text{ i } \quad P_{\max} = P_{\max(1)} \quad (1.56)$$

Kritičnom kutu isklopa pripada kritično vrijeme isklopa t_{kr} koje je najdulje vrijeme koje se s obzirom na prijelaznu stabilnost još može dozvoliti.

Za tropolni KS na sabirnicama elektrane ili na jednostrukom vodu $k_1 = 0$, $k_2 = 1$ pa izraz (1.54) postaje:

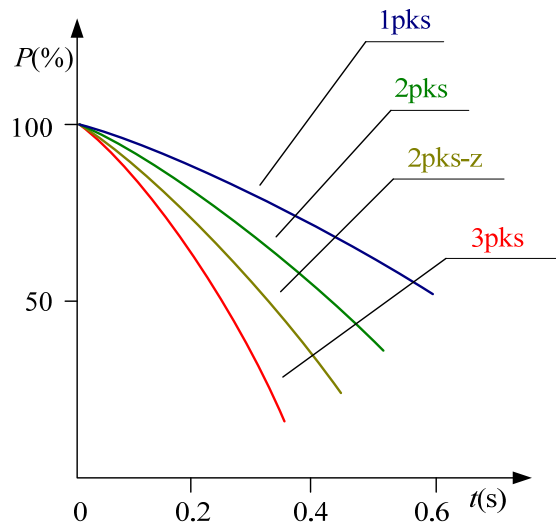
$$\cos \delta_{1kr} = (\delta_{2\max} - \delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0 \quad (1.57)$$

U tom slučaju može se eksplicitno odrediti kritično vrijeme prema izrazu:

$$t_{kr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{1kr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (1.58)$$

1.11 Utjecaj automatskog ponovnog uključenja na prijelaznu stabilnost

Općenito može se zaključiti da primjena brzih sustava relejne zaštite značajno doprinosi održavanju prijelazne stabilnosti pri pojavi kratkog spoja u visokonaponskim elektroenergetskim mrežama. Na slici 1-41 prikazano je kako se smanjivanjem ukupnog vremena djelovanja relejne zaštite prijenosnog sustava može povećavati snaga prijenosa u stacionarnom stanju.

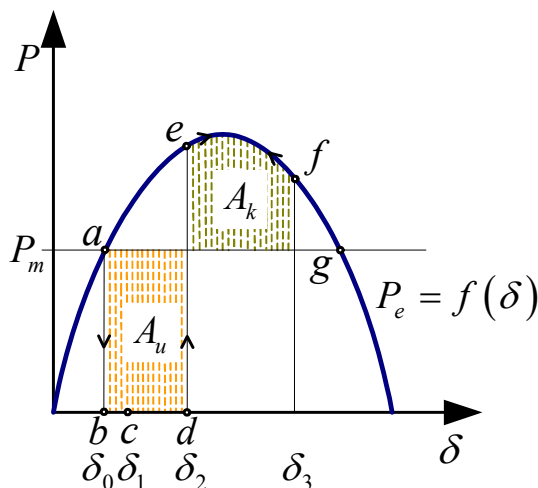


Slika 1-41 Ovisnost stacionarne snage prijenosa o ukupnom vremenu djelovanja zaštite za različite vrste kratkih spojeva

Većina kvarova koji se dogode na prijenosnim vodovima su prolaznog karaktera, stoga se nakon otklanjanja kratkog spoja djelovanjem odgovarajućih prekidača, često primjenjuje tehnika APU-a, što je opisano u prethodnim poglavljima.

1.11.1 Slučaj s jednim vodom

Na slici 1-42 prikazana je krivulja snaga-kut za slučaj prolaznog trolnog izravnog kratkog spoja te djelovanja APU-a kada je elektrana (generator) povezana s krutom mrežom samo jednim vodom.



Slika 1-42 Površine ubrzanja i kočenja pri prolaznom trolnom izravnom kratkom spoju uz primjenu uspješnog APU-a

Sinusoida $P_e = f(\delta)$ odnosi se na mrežu bez poremećaja, dok u slučaju voda tijekom kratkog spoja kao i za iskopčani vod ne postoji mogućnost nikakvog prijenosa snage, te se radna točka u ovim slučajevima kreće po apscisi.

Ako nastane trolni direktni kratki spoj, snaga prijenosa pada na nulu i radna se točka iz početne točke a uz isti kut δ_0 prelazi u točku b . Zbog toga što je razlika mehaničke i električne snage pozitivna, povećavat će se kut rotora δ , sve do trenutka trolnog isklapanja voda na oba njegova kraja. To se događa u točki c uz kut δ_1 (što znači da je trajanje kratkog spoja proporcionalno kutnoj razlici $\delta_1 - \delta_0$). Električna snaga koja se prenosi vodom još uvijek je jednaka nuli, pa se kut i dalje povećava do vrijednosti δ_2 uz gibanje radne točke duž apscise do točke d . Ta točka odgovara trenutku djelovanja APU-a. Zbog uključenja voda, te stoga što je tijekom beznaponske pauze (proporcionalna je kutnoj razlici $\delta_2 - \delta_1$) uzrok izravnog trolnog kratkog spoja nestao (u praksi relativno rijedak slučaj), uspostavlja se prvotno stanje s mogućnošću prijenosa električne snage.

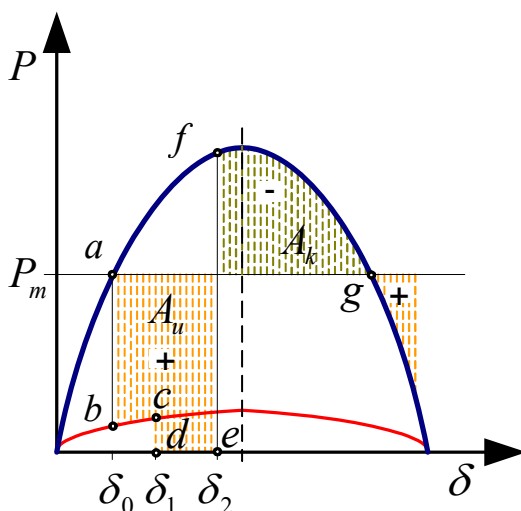
Posljedica toga je pomicanje radne točke uz konstantni kut δ_2 u točku e . Rotor se do sada ubrzavao, tako da mu je brzina veća od sinkrone. Zbog tromosti rotora, kut se i dalje povećava, ali s obzirom da je sada električna snaga veća od mehaničke, dolazi do njegovog usporavanja. Taj proces traje sve do kuta δ_3 , odnosno točke f koja se dobije na temelju jednakosti površina.

U ovom je primjeru prijenosni sustav ostao stabilan, jer je točka f lijevo od sjecišta vodoravne linije mehaničke snage i silaznog dijela krivulje električne snage (točka g). Nakon dolaska u točku f , gdje je brzina rotora jednaka sinkronoj, kut δ se opet počinje smanjivati. Rotor će se zbog gubitaka prigušeno njhati i konačno će se smiriti u staroj radnoj točki a . Očuvanje stabilnosti (osim prolaznog karaktera kvara) osigurano je

pravovremenim isključenjem voda, te ispravno odabranomj beznaponskoj pauzi u okviru APU-a. U slučaju kada bi se prilikom usporavanja rotora stabilnost bi bila izgubljena u slučaju ako dođe čak do točke g , a da se brzina još nije smanjila na vrijednost sinkrone. To naravno nastaje ako je površina kočenja manja od površine ubrzavanja.

S obzirom na to da je prema pogonskim statistikama oko 80% prolaznih kvarova na vodovima jednopolni kratki spoj, relativno se često koristi jednopolni APU. U slučaju jednopolnog prolaznog kratkog spoja na jedinom vodu između elektrane i krute mreže, moguć je prijenos određene djelatne snage preko faza koje nisu u kvaru.

Slučaj trolnog isklapanja jednostrukog voda pri jednopolnom kratkom spoju uz neuspješni APU vrijedi situacija predočena na slici 1-43.

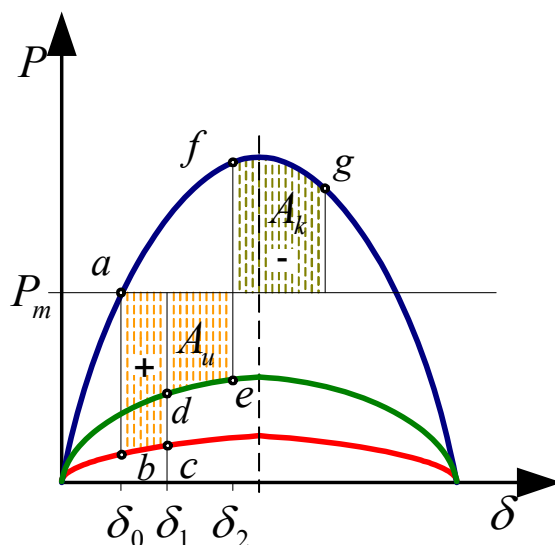


Slika 1-43 Utjecaj primjene trolnog APU-a na jednostrukom vodu pri jednopolnom kratkom spoju (neuspješni APU)

Nakon nastupanja jednopolnog kratkog spoja u trenutku koji odgovara kutnom položaju rotora generatora δ_0 , radna točka prelazi na crvenu krivulju koja odgovara toj vrsti kvara. Po toj se krivulji radna točka kreće sve do trenutka trolnog isklapanja pri kutu δ_1 , kada, s obzirom da nema više prijenosa električne snage, prelazi na os apscise. Beznaponska pauza traje do kutnog položaja δ_2 , kada dolazi do trolnog APU-a. U takvim uvjetima, s obzirom da se kinetička energija nagomilana pri ubrzavanju rotora prilikom njihanja ne može potrošiti prije dolaska radne točke u položaj g , stabilnost se neće moći održati.

Za jednako trajanje jednopolnog kratkog spoja i beznaponske pauze, slučaj povoljnog utjecaja jednopolnog APU-a predočen je na slici 1-44.

Crvena krivulja u ovom slučaju također odgovara stanju s jednopolnim kratkim spojem u trajanju koje odgovara kutnoj razlici $\delta_1 - \delta_0$. Ako se u trenutku koje odgovara kutnom položaju rotora δ_1 isključi samo kvarom pogođena faza, moguć je i tijekom trajanja beznaponske pauze (odgovara kutnoj razlici $\delta_2 - \delta_1$) prijenos određene djelatne električne snage preko faza koje nisu u kvaru, čemu odgovara zelene krivulja.



Slika 1-44 Utjecaj primjene jednopolnog APU-a na jednostrukom vodu pri jednopolnom kratkom spoju (uspješni APU)

Jednopolni APU uslijediti će pri kutu δ_2 , što rezultira povratkom radne točke u točku f na plavoj krivulji prijenosnog sustava prije kvara. Na taj je način površina ubrzanja A_u bitno smanjena, što naravno zahtijeva i odgovarajuće manju površinu kočenja A_k , tako da je prijelazna stabilnost očuvana.

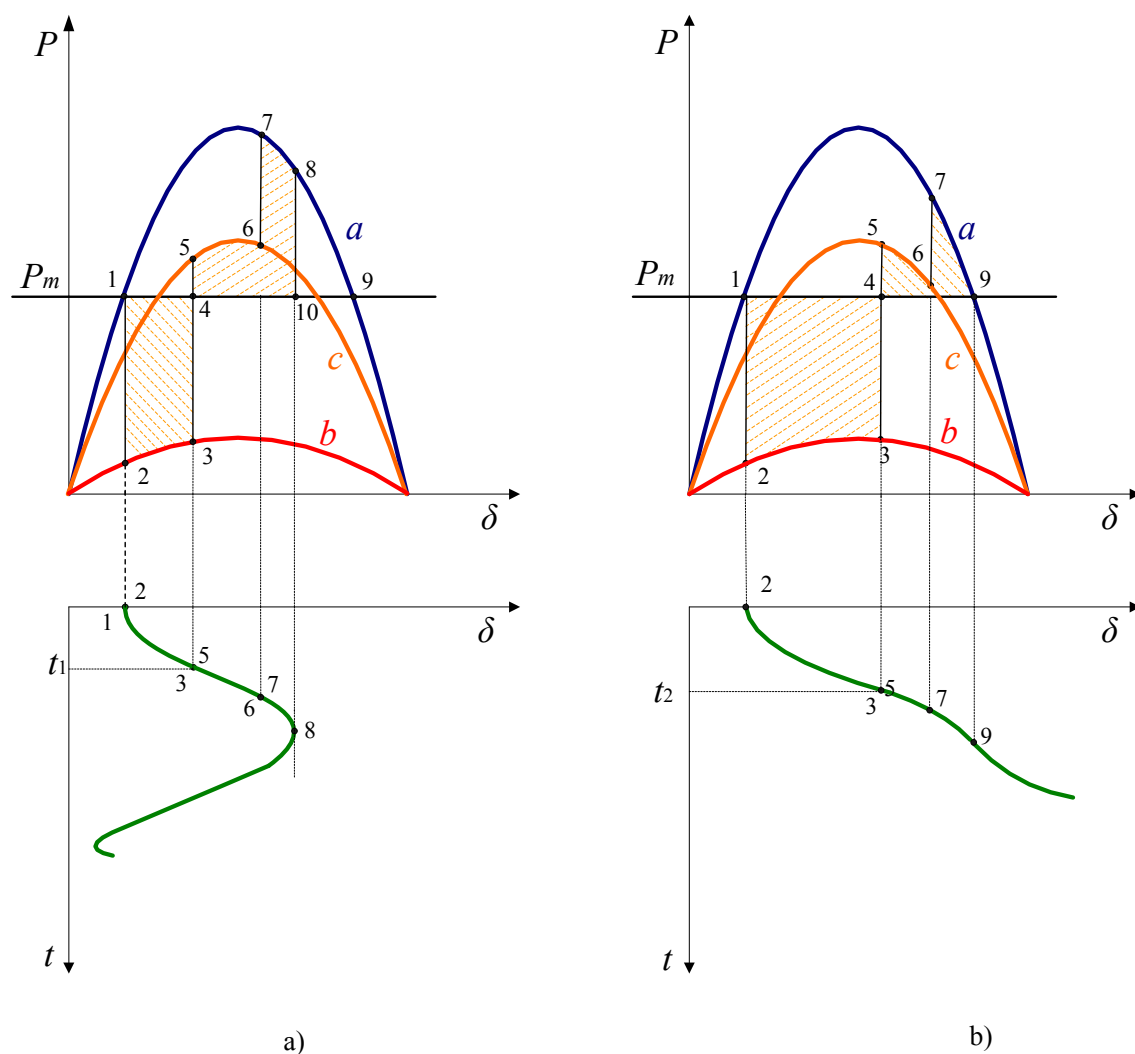
1.11.2 Slučaj s dva voda

Slika 1-45 prikazuje utjecaj trolnog kratkog spoja u dva slučaja s različitim vremenima otklanjanja nastalog kratkog spoja; u prvom slučaju agregat ima stabilan odziv, a u drugom nestabilan.

U oba slučaja akcelerirajuća snaga $I-2$ ubrzava rotor od točke 2 do točke 3 kada nastupi kvar. Kada dođe do ispada jednog od vodova radna točka se premješta u točku 5 te se, zbog dobivene kinetičke energije, pomiče dalje po karakteristici c . Nakon što je prošlo određeno vrijeme, koje je potrebno da bi se sigurno ugasio luk unutar prekidača, sustav za automatsko ponovno uključanje ponovno uklapa ispali vod i sustav se pomiče iz točke 6 u točku 7. Karakteristika snaga-kut se zatim pomiče po a karakteristici do točke 8, u stabilnom slučaju (slika 1-45 a), u kojoj vrijedi da je površina koja odgovara usporavanju $4-5-6-7-8-10$ jednaka onoj koja odgovara ubrzanju $1-2-3-4$. Sustav je stabilan s granicom stabilnosti koja odgovara površini $8-9-10$.

U nestabilnom slučaju, slika (slika 1-45 b), povećano vrijeme otklanjanja kvara povećava površinu koja odgovara ubrzanju $1-2-3-4$ što umanjuje površinu usporavanja te se prethodno stvorena energija ne može potrošiti. Posljedica toga je da rotor generatora ispada iz sinkronizma sa sustavom i gubi stabilnost.

Ukoliko se radi o trajnom kratkom spoju vod koji je uklopljen djelovanjem APU-a ponovno ispada i takav se ciklus odnosi na neuspješni APU.



Slika 1-45 Površine koje odgovaraju ubrzavanju i usporavanju rotora kod uspješnog APU-a : a) stabilan slučaj; b) nestabilan slučaj

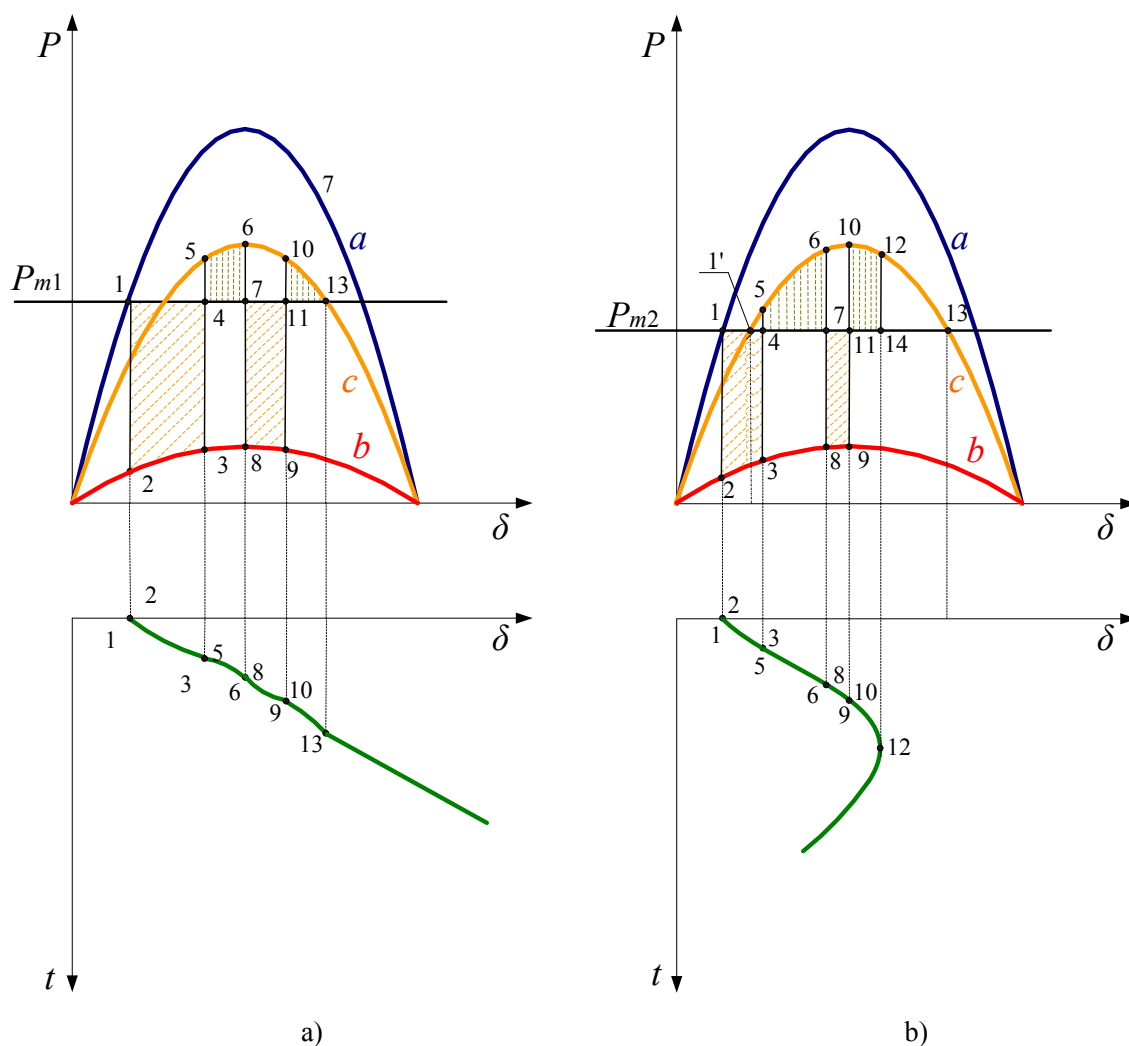
Neuspješni APU predstavlja mnogo veću opasnost za stabilnost sustava od uspješnog APU-a. U slučaju neuspješnog APU-a slijed događanja je sljedeći:

- Oba voda ispravno rade (prije kvara).
- Nastupi kratki spoj.
- Vod u kvaru ispadne iz pogona i samo jedan vod ispravno radi.
- Ponovo nastupa kratki spoj zbog pokušaja APU-a voda na kojem je trajni kratki spoj).
- Vod u kvaru trajno ispada iz pogona tako da samo jedan vod ostaje u pogonu

Ilustraciju nestabilnog i stabilnog neuspješnog automatskog ponovnog uklopa prikazuje slika 1-46. U prvom slučaju rotor zahtjeva kinetičku energiju za vrijeme trajanja kratkog spoja koja je proporcionalna površini 1-2-3-4. Tijekom isključenja voda u kvaru rotor usporava i gubi energiju proporcionalnu površini 4-5-6-7. Pokušaj ponovnog APU-a voda na kojem je trajni kratki spoj rezultira povećanjem kinetičke energije proporcionalno površini 7-8-9-11. Kad vod u kvaru trajno ispadne iz pogona, za usporavanje ostaje površina 10-13-11. Kako je suma površina koje odgovaraju ubrzavanju 1-2-3-4 i 7-8-9-11

veća od sume površina koje odgovaraju usporavanju 4-5-6-7 i 10-13-11, rotor prelazi točku 13 i prelazi u asinkroni rad.

Ukoliko se vrijeme otklanjanja kvara skрати kao i vrijeme APU-a, te ukoliko se smanji opterećenje prije kvara s P_{m1} na P_{m2} , sustav može ostati stabilan, kao što je prikazano na slici 1-46 b). Suma površina koje odgovaraju ubrzavanju 1-2-3-4 i 7-8-9-11 jednaka je sumi površina koje odgovaraju usporavanju 4-5-6-7 i 10-11-14-12 i sustav je stabilan s granicom stabilnosti koja odgovara površini 12-14-13. To vrijedi uz pretpostavku da je titranje prigušeno, a novo ravnotežno stanje u točki 1' odgovara karakteristici snaga-kut s jednim isključenim vodom.



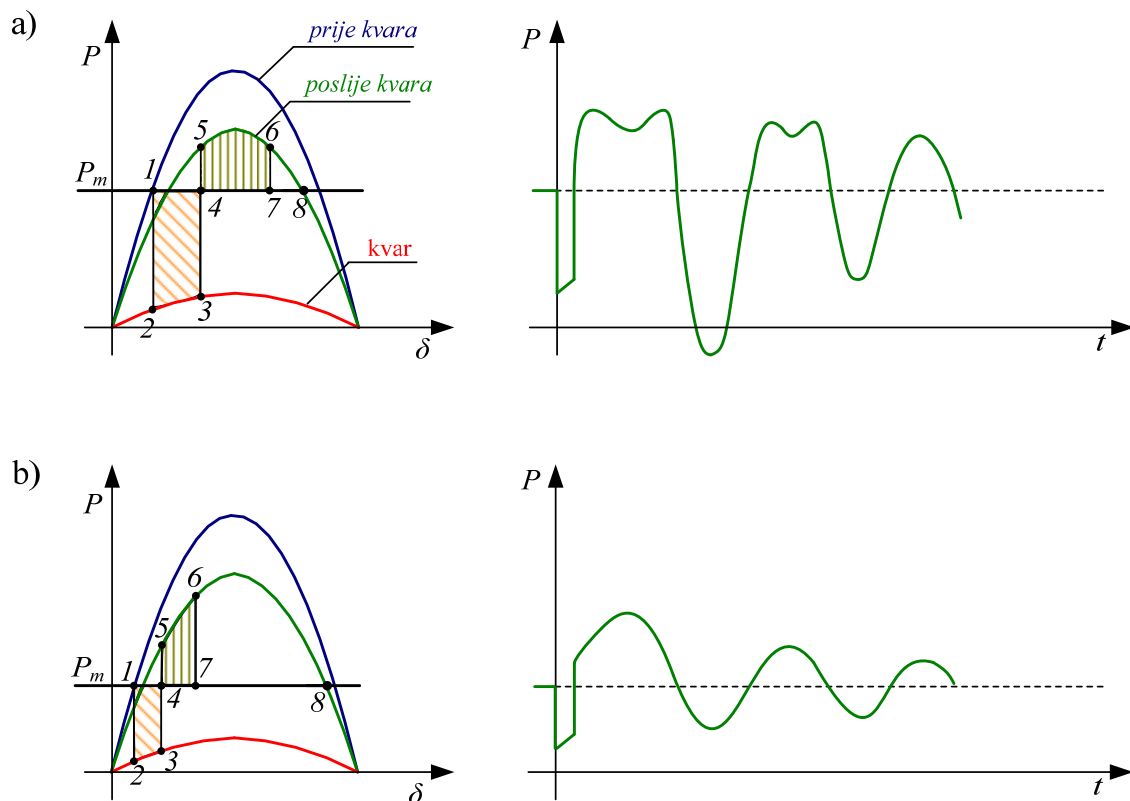
Slika 1-46 Površine koje odgovaraju ubrzavanju i usporavanju rotora pri neuspješnom APU: a) nestabilan slučaj; b) stabilan slučaj

1.12 Njihanje snage

Titranja rotora koja prate kvar proizvode titraje u proizvedenoj snazi. Oblik u kolebanjima snage može biti izvor korisne, iako približne informacije o postojećoj granici stabilnosti za prijelaznu stabilnost.

U slučaju spoja generatora s krutom mrežom preko dvostrukog voda te kvara na jednom od vodova te trajnog isključenja voda u kvaru (bez APU-a) situacija je predočena na slici 1-47. Ukoliko je granica stabilnosti 6-7-8 mala (slika 1-47 a), oscilacije kuta opterećenja bit će velike i mogu dostići vrijednost 90° . Odgovarajuće oscilacije snage će se povećavati dok kut opterećenja δ ne dosegne maksimum kada će se početi smanjivati. Tijekom povratnog njihanja rotora snaga će u početku rasti, dok kut rotora ne prijeđe maksimum karakteristike, kada počinje padati. Kao rezultat na valnom obliku snage $P_e(t)$ mogu se vidjeti karakteristične „grbe“ koja nestaju kako se oscilacije prigušuju.

Ukoliko je granica prijelazne stabilnosti 6-7-8 velika (slici 1-47 b), tada se grbe ne pojavljuju, jer je maksimalna vrijednost oscilacije kuta opterećenja manja od 90° i oscilacije se nalaze samo s jedne strane karakteristike snaga-kut.



Slika 1-47 Oscilacije snage u slučaju a) niske granice prijelazne stabilnosti
b) visoke granice prijelazne stabilnosti

1.13 Učinak smanjenja toka

Prijelazna karakteristika $P_e(\delta)$ koja se koristi za analizu prijelazne stabilnosti vrijedi pod uvjetom da je veza između toka i uzbuđenog namota konstantna, dakle ako je $E' = konst.$ Budući da se magnetska energija troši na otporniku uzbuđenog namota, zbog smanjenja toka se smanjuje i E' . Ako je vrijeme uklanjanja kvara malo, učinci smanjenja toka mogu se zanemariti prilikom promatranja prijelazne stabilnosti, ali ako je vrijeme uklanjanja kvara veliko onda smanjenje E' ima značajan učinak. Na slici 1-47 predočen je slučaj u kojem je $E' = konst.$ Ako se uključe učinci smanjenja toka, amplituda karakteristike $P_e(\delta)$ će se smanjiti, čime će se smanjiti i dostupno područje usporavanja 4-5-8 i prijelazna

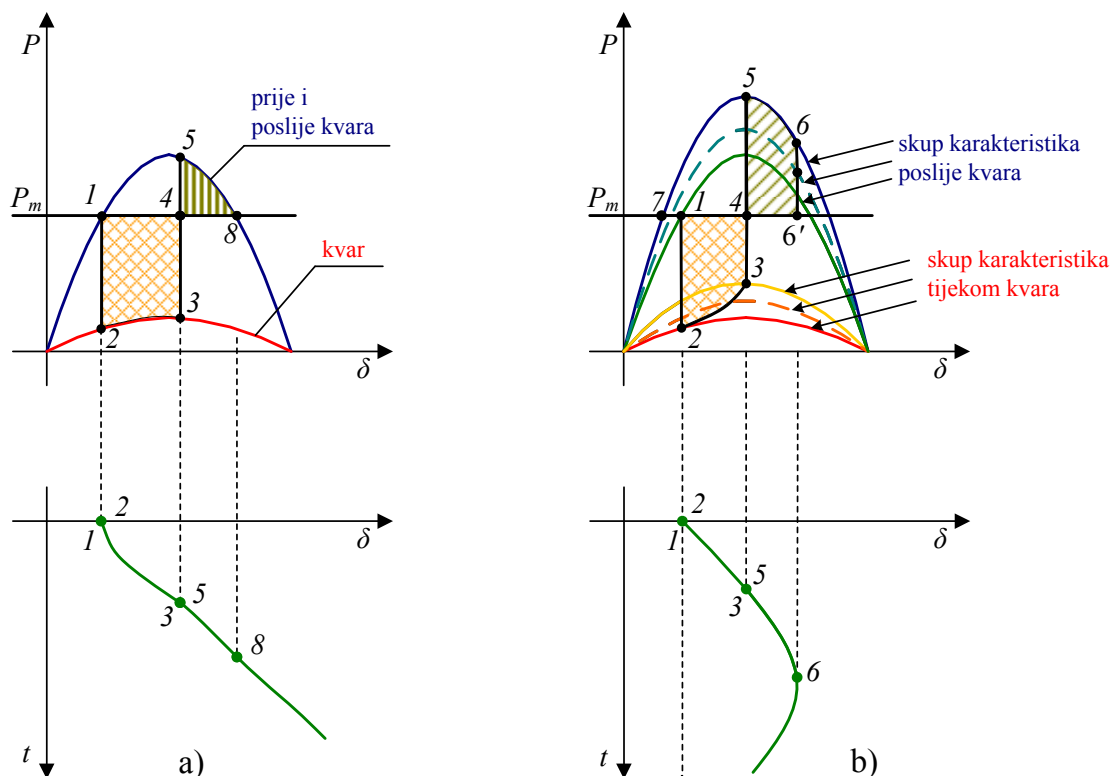
stabilnost će se pogoršati. Posljedično, korištenje klasičnog modela može dovesti do optimistične ocijene kritičnog vremena kvara.

1.14 Učinci automatskog regulatora napona

U slučaju velikog poremećaja utjecaj automatskog regulatora napona je sličan utjecaju pri malim poremećajima. Odmah nakon nastanka i prestanka kvara, kvalitetni automatski regulator napona može spriječiti gubitak sinkronizma.

Kada se dogodi kvar, napon na sabirnicama generatora pada i velika regulacijska pogreška ΔV će natjerati automatski regulator napona da poveća uzбудnu struju generatora. Ipak, uzbudna struja se neće trenutno promijeniti zbog kašnjenja koje ovisi o vremenskim konstantama automatskog regulatora napona i o vremenskoj konstanti uzbudnog namota generatora.

Kada nema automatskog regulatora napona, u slučaju nekog poremećaja sustav će izgubiti stabilnost (slika 1-48 a). Učinak automatskog regulatora napona, prikazan na slici 1-48 b), je povećanje uzbudne struje što dovodi do povećanja prijelazne elektromotorne sile E' . Ovo povećanje E' može se predočiti skupom karakteristika snaga-kut $P_e(\delta)$ za različite vrijednosti E' . Brzoreagirajući automatski regulator napona i uzбудnik mogu povećati napon uzbuđe do kraja prije otklanjanja kvara, iako će promjena struje uzbuđe, a time i E' , kasniti zbog vremenske konstante uzbudnog namota generatora.



Slika 1-48 Područje ubrzavanja i usporavanja kada je utjecaj regulatora napona a) zanemaren i b) uključen

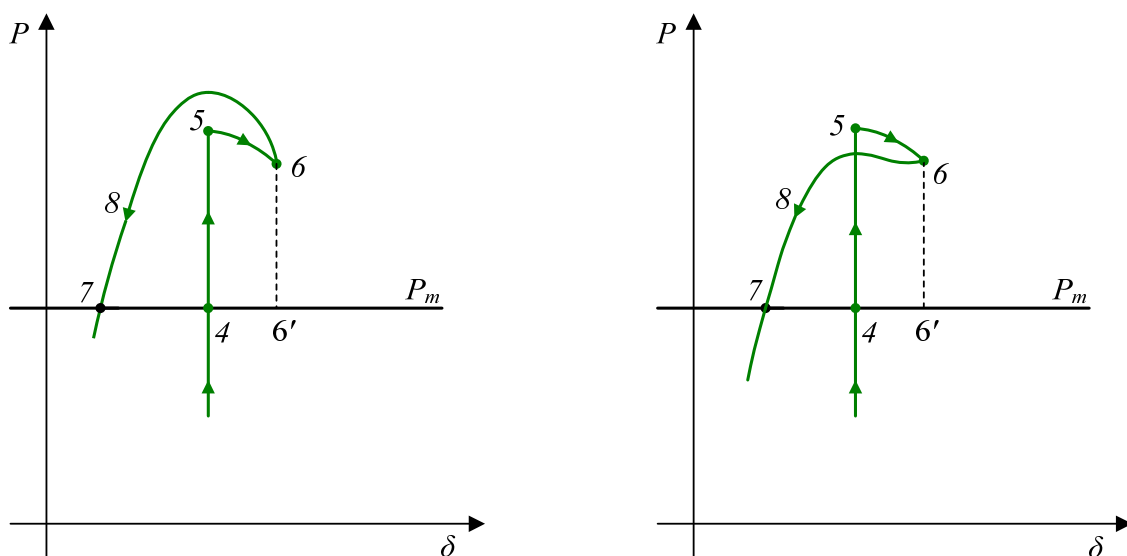
Povećanje struje uzbuđe, a time i E' , ima dva pozitivna učinka. Prvo, kako se E' povećava, smanjuje se snaga ubrzavanja i područje ubrzavanja 1-2-3-4 se malo smanji. Drugo, kada se ukloni kvar, sustav će slijediti višu karakteristiku snaga-kut koja odgovara novome E'

pa je dostupno veće područje usporavanja. U primjeru na slici 1-48 b) rotor dostiže najveću snagu u točki 6, a područje usporavanja 4-5-6-6' je jednako području ubrzavanja 1-2-3-4 prije vraćanja u ravnotežnu točku.

Iako brzoreagirajući automatski regulator napona smanjuje prvi njihaj rotora, on može povećati drugi i ostale njihaje ovisno o parametrima sustava, odnosno dinamičkim karakteristikama.

Ako se razmotri slučaj dugog prijenosnog voda uz pretpostavku da je u trenutku uklanjanja kvara kut δ velik. Nakon uklanjanja kvara, napon na sabirnicama generatora će se povećati s male vrijednosti tijekom kvara na neku relativno malu vrijednost poslije kvara (krivulja 1 na slici 1-49). Posljedično će automatski regulator napona nastaviti povećavati struju uzbude da bi povratio napon na sabirnicama generatora. U ovom slučaju će se povratni njihaj rotora dogoditi na najvišoj mogućoj prijelaznoj karakteristici $P_e(\delta)$. Ova situacija je prikazana na slici 1-49 a), gdje je prikazana trajektorija sustava nakon uklanjanja kvara. Automatski regulator napona nastavlja povećavati struju uzbude tijekom povratnog njihaja povećavajući područje usporavanja 6-8-7-6'. To rezultira povećanjem amplitude sljedećih njihaja rotora pa, u ovome slučaju, automatski regulator napona može imati i negativan utjecaj na prijelaznu stabilnost generatora.

U slučaju kratkog prijenosnog voda (slika 1-49 b), poput vodova koji povezuju HE Varaždin na EES, napon na sabirnicama generatora V se uspješno podiže nakon uklanjanja kvara, unatoč velikoj vrijednosti δ . Budući da će malo povećanje prijelazne elektromotorne sile E' biti uzrokovano povećanjem struje uzbude tijekom kvara, napon na sabirnicama generatora se može vratiti na vrijednost nešto veću od referentne. Posljedično, ovaj veliki napon na sabirnicama generatora će utjecati da automatski regulator napona smanji struju uzbude za vrijeme povratnog njihaja rotora; amplituda prijelazne karakteristike snaga-kut će se smanjiti, čime će se smanjiti i područje usporavanja 6-8-7-6'. Ovo smanjenje područja usporavanja vodi do smanjenja amplitude sljedećih njihaja rotora. U ovome slučaju automatski regulator napona poboljšava prijelaznu stabilnost i u njihovom unaprijed i unazad.



Slika 1-49 Njihaj rotora nakon uklanjanja kvara u slučaju: a) dugog prijenosnog voda; b) kratkog prijenosnog voda

Slika 1-49 je usko povezana s prigušenjem kojeg uzrokuje automatski regulator napona prilikom manjih poremećaja. Iznos negativnog prigušenja kojeg proizvodi automatski regulator napona povećava se s duljinom voda jer to povećava koeficijent proporcionalnosti između $\Delta\delta$ i ΔV . Primjer prikazan na slici 1-49a) odgovara situaciji kada je to negativno prigušenje veće od pozitivnog prigušenja sustava, dok slika 1-49b) prikazuje obrnut slučaj.

1.15 Mjere za poboljšanje prijelazne stabilnosti u suvremenim elektroenergetskim sustavima

S obzirom da su istraživanja prijelazne stabilnosti specifične studije za određenu pretpostavljenu konfiguraciju EES-a i određene uvjete u sustavu, stabilnost sustava može biti smanjena pri nekim drugačijim uvjetima pogona sustava i/ili za njegovu drugačiju topologiju. Zbog toga je potrebno posebnu pozornost posvetiti mjerama kojima bi se navedeni problem smanjio, a pogon sveo ispod granice postavljene uslijed prijelazne stabilnosti. Za neki sustav jedna od mjera poboljšanja prijelazne stabilnosti ne mora nužno biti dovoljna. Najbolji pristup je dakako u kombinaciji nekoliko mjera koje su izabrane kao najučinkovitija pomoć održanju stabilnosti pri različitim mogućim kvarovima i stanjima sustava. Rješenja problema stabilnosti ne smiju biti izvedena ako kvare neka druga svojstva elektroenergetskog sustava.

U slučaju izbora mjera za poboljšanje stabilnosti sustava potrebno je pažljivo procijeniti dobitke i troškove njihove primjene. Metodama poboljšanja prijelazne stabilnosti nastoji se postići barem jedan od sljedećih učinaka:

- smanjenje utjecaja poremećaja minimiziranjem ozbiljnosti kvara te vremena njegovog trajanja,
- povećanje restaurirajućih sinkronih sila,
- smanjenje momenta ubrzanja razvojem sustava za upravljanje mehaničkim snagama pogonskih strojeva te
- smanjenje momenta ubrzanja primjenom umjetnog opterećenja.

Prekidači s nezavisnim sklapanjem polova. Nezavisno sklapanje polova odnosi se na korištenje odvojenih mehanizama prekidača za svaku fazu tako da se sve tri faze zatvaraju i otvaraju nezavisno jedna o drugoj. Kao rezultat, greška na jednom polu neće ograničiti sklapanje drugih dvaju polova. Iako polovi prekidača djeluju nezavisno, relejna zaštita se uobičajeno udešava tako da se isključuju sva tri pola za bilo koji tip kvara. Korištenje nezavisnog sklapanja ima prednosti osobito na lokacijama na kojima kriteriji projektiranja sustava uključuju trofazne kvarove u kombinaciji sa zatajenjem prekidača. Održavanje stabilnosti sustava pri trofaznom kvaru uz zatajenje sva tri pola prekidača ekstremno je teško. S prekidačima projektiranim za nezavisno sklapanje, istovremena greška na sva tri pola nije vjerojatna. Korištenje dvostruke relejne zaštite, zavojnica isključenja prekidača i proradnih mehanizama praktički osigurava proradu barem dva pola. Stoga, nezavisno djelovanje prekidača s greškom svodi trofazni kvar na jednofazni kvar sa zemljom uz proradu dva pola. Ozbiljnost trofaznog kvara se korištenjem takvih prekidača znatno smanjuje.

Jednopolno sklapanje. Jednopolno sklapanje koristi odvojene mehanizme djelovanja u svakoj fazi. Za jednofazne kvarove sa zemljom zaštita se projektira tako da isključi samo fazu koja je u kvaru nakon čega se uvodi ponovno uključivanje unutar perioda od 0.5 s do 1.5

s. Za višefazne kvarove isključuju se sve tri faze. Tijekom perioda u kojem je jedna faza otvorena, snaga se prenosi preko preostale dvije. Budući da je većina kvarova na prijenosnim vodovima tipa jednofaznog kvara sa zemljom, otvaranje i zatvaranje samo faze u kvaru predstavlja poboljšanje prijelazne stabilnosti nad trofaznim isključenjem i uključenjem. Jednopolno sklapanje osobito je privlačno u situacijama u kojima jedna glavna prijenosna veza povezuje dva sustava ili proizvodnu jedinicu s ostatkom sustava. Također može biti korištena u sustavima s višestrukim vodovima u svrhu poboljšanja sigurnosti sustava u odnosu na višestruke kvarove. Međutim, u primjeni jednopolnog sklapanja javljaju se tri potencijalna problema koje je prethodno neophodno razmotriti:

- pražnjenje sekundarnog luka,
- mehanička naprezanja osovine turbina-generator te turbinskih lopatica i
- termička naprezanja obližnjih generatora uslijed inverznih struja.

Kada se jedna faza trofaznog voda otvori na oba kraja, faza u kvaru je kapacitivno i induktivno povezana s dvije preostale faze koje nisu u kvaru i koje su još pod naponom. Stoga će u izoliranoj fazi biti induciran napon zbog kapacitivne povezanosti te u manjoj mjeri zbog induktivne povezanosti. Iznos induciranog napona je izravna funkcija kapaciteta između faza te između faze i zemlje. Inducirani napon može uzrokovati luk u produženom periodu nakon otvaranja faze. Luk koji se pojavljuje na faznom vodiču koji je u kvaru nakon isključenja naziva se sekundarni luk. Struja sekundarnog luka prvenstveno ovisi o naponu voda i dužini sekcije voda koja je isključena. Na nju također utječu lokacija kvara, priključenje poprečne zavojnice izravno na otvorenu fazu te transpozicija voda.

Nužno je razmotriti i dugačke turbinske lopatice niskotlačnog dijela sa stajališta frekvencija osnovnih vibracijskih modova koje ne smiju koindicerati s višekratnikom brzine vrtnje. Jednopolno sklapanje tijekom beznaponske pauze kada je jedna faza otvorena može uzrokovati pojavu oscilacija momenta frekvencije 100 Hz. Te oscilacije mogu se naći u rezonanciji s prirodnim vibracijskim modovima lopatice te uzrokovati njihovo oštećenje. Sekvencija jednopolnog sklapanja predstavlja niz uzastopnih poremećaja osovinskog sustava turbina-generator. Inicijalni poremećaj je kvar (kratki spoj) koji za jednofazni kvar sa zemljom nije vrlo opasan. Nakon uklanjanja kvara otvaranjem faze u kvaru, nastaje drugi poremećaj. Ponovno uključenje otvorene faze, bilo uspješno ili neuspješno, uvodi novi poremećaj. Svaki takav incident doprinosi naprezanju osovinskog sustava i ako se generator često nalazi u takvim stanjima njihov kumulativni utjecaj može uzrokovati znatno oštećenje osovine. Utjecaj jednopolnog sklapanja na osovinski sustav i lopatice često je istraživao, ali dobiveni rezultati ne ukazuju na značajno skraćanje vijeka trajanja lopatica ili osovinskih dijelova. Štoviše, prema današnjem iskustvu nisu indicirani nikakvi problemi te vrste koji bi bili rezultat jednopolnog sklapanja.

Nesimetričnost sustava u tijeku perioda u kojem je jedna faza otvorena uzrokuje pojavu inverznih struja u statoru obližnjih generatora i sinkronih kompenzatora. Inverzne statorsche struje induciraju rotorske struje frekvencije 100 Hz koje uzrokuju zagrijavanje. Uspostavljeni su mnogi standardi kojima se definira kontinuirano i kratkotrajno opterećenje generatora u nesimetričnim uvjetima. Kratkotrajno opterećenje se mjeri pomoću $I_2^2 t$ koji predstavlja umnožak kvadrata inverzne fazne struje stroja i vremena. Dozvoljeni $I_2^2 t$ ovisi o tipu stroja i kod generatora s izraženim polovima iznosi 40 p.u.²s (struja I_2 izražena je u p.u. vrijednosti nazivne armaturne struje, a vrijeme t u sekundama).

Vrlo brzo uklanjanje kvara. Kinetička energija rotora agregata tijekom kvara izravno je proporcionalna trajanju kvara; što se kvar brže ukloni to su manje njegove posljedice. Dvoperiodski prekidači (prekid kvara unutar dva perioda ili 40 ms pri 50 Hz) u kombinaciji s vrlo brzim relejima i pripadnom komunikacijom u današnje su vrijeme široko korišteni na lokacijama gdje je bitno brzo uklanjanje kvara. U posebnim uvjetima čak i brže uklanjanje može biti poželjno. Tako su razvijeni i primjenjeni jednoperiodski prekidači (npr. u kompaniji Bonneville Power Administration). U kombinaciji s brzim senzorom nadstrujnog tipa koji prati iznos kvara, ukupni prekid kvara postiže se u približno jednom periodu. Jednoperiodski prekidači još uvijek nisu u širokoj primjeni. Moguće je i korištenje ultra brzog zaštitnog sustava visokonaponskog prijenosnog EES-a koji se zasniva na otkrivanju putnih valova.

Vrlo brzi uzbudni sustavi. Poboljšanje prijelazne stabilnosti moguće je postići putem brzih privremenih povišenja uzbudnog napona generatora. To povišenje tijekom prijelaznih poremećaja utječe na povišenje unutarnjeg napona stroja što nadalje povisuje sinkronizirajuću snagu. Tijekom prijelaznih poremećaja uzrokovanih kvarovima u prijenosnom sustavu te uklanjanja kvarova isključenjem vodova pogođenih kvarom, napon generatora je nizak. Automatski regulator napona na te uvjete reagira povećanjem uzbudnog napona generatora te time utječe na poboljšanje prijelazne stabilnosti. Učinak ove mjere ovisi o sposobnosti uzbudnog sustava da brzo poveća uzbudni napon na najveću moguću vrijednost. Uzbudni sustavi s visokim inicijalnim odzivom i visokim stropnim naponima su u tom pogledu učinkovitiji. Stropni naponi su ograničeni izolacijom rotora generatora. Kod termo jedinica stropni naponi se najčešće ograničavaju na od 2.5 do 3.0 puta veći iznos od iznosa uzbudnog napona pri nazivnom opterećenju. Brzi odziv uzbudnog sustava na promjene napona generatora koji se zahtijeva za poboljšanje prijelazne stabilnosti često uvodi smanjenje prigušenja lokalnog moda oscilacija. Dodatnim uzbudnim krugom, nazvanim stabilizatorom EES-a (PSS), uvodi se odgovarajuće prigušenje oscilacija u sustavu te omogućava korištenje uzbudnih sustava s visokim odzivom. Korištenje uzbudnih sustava s visokim inicijalnim odzivom koji su opremljeni sa stabilizatorom EES-a najučinkovitija je i najekonomičnija metoda poboljšanja ukupne stabilnosti sustava.

Diskontinuirana regulacija uzbude. Pravilno primijenjen stabilizator EES-a osigurava prigušenje lokalnog kao i međupodručnog moda oscilacija. U uvjetima velikih signala ili u prijelaznim uvjetima, općenito uzevši stabilizator pozitivno doprinosi stabilnosti prvog njihaja. U prisutnosti oba moda oscilacija (lokalni i međupodručni) uobičajeni odziv stabilizatora može dozvoliti uzbudi da bude smanjenja nakon vrha prvog njihaja lokalnog moda te prije postizanja ukupnog vrha njihaja. Dodatna poboljšanja prijelaznoj stabilnosti mogu biti učinjena održavanjem uzbude na stropnoj razini, uz poštivanje ograničenja napona generatora, sve do postizanja najviše točke njihaja.

Osim navedenih mjera u sustavima se koriste i sljedeći postupci:

- smanjenje reaktancije prijenosnog sustava,
- regulirana poprečna kompenzacija,
- dinamičko kočenje,
- sklapanje prigušnica,
- odspajanje generatora sa sustava te
- upravljivo razdvajanje sustava na otoke i rasterećenje.