



Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije

Kvalifikacijski doktorski ispit

Mr. sc. Nedjeljka Grulović – Plavljanic, v. pred.

**ANALIZA KUTNE STABILNOSTI GENERATORA
PRIKLJUČENOG NA ELEKTROENERGETSKI SUSTAV**

Split, veljača 2015.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KLASIFIKACIJA STABILNOSTI	3
3. JEDNADŽBA GIBANJA ROTORA GENERATORA	6
4. KUTNA STABILNOST PRI MALIM POREMEĆAJIMA	9
4.1. Kutna stabilnost jednog generatora priključenog na elektroenergetski sustav	11
4.2. Kutna stabilnost višegeneratorskog elektroenergetskog sustava	13
5. PRIJELAZNA STABILNOST	15
5.1. Prijelazna stabilnost jednog generatora priključenog na elektroenergetski sustav	16
5.2. Prijelazna stabilnost višegeneratorskog elektroenergetskog sustava	23
6. MJERE ZA POBOLJŠANJE PRIJELAZNE STABILNOSTI VIŠEGENERATORSKOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA	27
6.1. Vrlo brzi uzbudni sustavi	27
6.2. Vrlo brzo uklanjanje kvara	28
6.3. Brzi digitalni turbinski regulatori	28
7. ZAKLJUČAK	29
LITERATURA	30

1. UVOD

Pitanje stabilnosti elektroenergetskog sustava (EES-a) jedno je od temeljnih pitanja koje se rješava prikladnom analizom stabilnosti sustava. Pod pojmom stabilnosti podrazumijeva se sposobnost generatora, koji rade paralelno u sustavu, da nakon poremećaja ostanu u zajedničkom sinkronom pogonu.

Danas se u suvremenim elektroenergetskim sustavima traži veća pouzdanost rada sustava, odnosno veća vjerojatnost da sustav, unatoč unutarnjim ili vanjskim poremećajima, obavlja svoju funkciju sigurne i stabilne opskrbe potrošača električnom energijom. Stabilnost i sigurnost rada elektroenergetskog sustava dva su temeljna kriterija u analizi rada sustava. Da bi se postigla željena visoka razina sigurnosti i pouzdanosti, razmatranje stabilnosti sustava nužno je kod planiranja proširenja i njegove izgradnje, kao i za vrijeme rada.

Potreba za simulacijama u području elektroenergetskih sustava pojavila se već početkom 20. stoljeća zbog nepraktičnosti u obavljanju eksperimenata na cijelom sustavu. Zbog tog su razloga razvijeni različiti analitički alati za proučavanje dinamičkog ponašanja elektroenergetskih sustava prilikom različitih vrsta poremećaja. Daljnjim razvojem računala pojavili su se programi za analizu prijelaznih pojava elektroenergetskih sustava, koji su postali neophodni prilikom projektiranja i odabira načina upravljanja sustavom, a sve radi povećavanja sposobnosti sustava da izdrže utjecaj velikih poremećaja.

Prvi članci vezani za stabilnost i dinamiku EES-a počeli su se pojavljivati u zbornicima i tehničkim časopisima u isto vrijeme kad su prvi međusobno povezani elektroenergetski sustavi izgrađeni [1-2]. Kako su se elektroenergetski sustavi razvijali, interes za njihovu stabilnost, odnosno ponašanje prilikom poremećaja je rastao sve dok ta problematika nije postala posebno područje interesa za inženjersku i znanstvenu zajednicu. Najveći doprinos u razvoju teorijskih osnova za analizu stabilnosti elektroenergetskog sustava dali su istraživači u zemljama čiji sustavi pokrivaju velika područja, ponajviše Sjedinjene Američke Države, Kanada i bivši Sovjetski Savez. Prvi znanstveni radovi te ostala literatura koja se bavi dinamikama elektroenergetskih sustava objavljena je na engleskom i ruskom jeziku [3-6]. Veliki doprinos daljnjem razvoju u analizi dinamike EES-a dao je Venikov [7-11], koji se posvetio fizikalnom tumačenju problematike analize elektromehaničkih prijelaznih pojava. Većina ostale literature koja se bavi dinamikama elektroenergetskih sustava je napisana u drugoj polovici 20. stoljeća [12-16], među kojima se posebno ističe Kundur [16] koji svojim opsežnim pristupom daje odličan pregled i uvid u načine modeliranja i analize stabilnosti elektroenergetskih sustava. Na bazi literature [16], ubrzani razvoj računalne tehnologije izazvao je veće zanimanje znanstvene zajednice za problematiku prikladnog matematičkog modeliranja pojedinih elemenata elektroenergetskih sustava. To je rezultiralo činjenicom da postoji veliki broj radova objavljenih u posljednjih 20 do 30 godina koji glavni naglasak daju na učinkovitoj uporabi računala u analizi stabilnosti i rada elektroenergetskog sustava [16-26].

Programi za simulaciju u vremenskoj domeni su sastavni dio alata za analizu elektroenergetskih sustava. S programima za simulaciju u vremenskoj domeni dinamički odziv elektroenergetskog sustava na poremećaje ili promjene u stanju sustava može se izračunati upotrebom odgovarajućih matematičkih modela zasnovanih na numeričkim algoritmima. Elektromagnetske prijelazne pojave obično nastaju kao posljedica promjena u konfiguraciji EES-a, te se obično proučavaju korištenjem programa prilagođenih za analizu

brzih elektromagnetskih prijelaznih pojava, kao što je među ostalim i EMTP-RV program [27-28].

Kod elektromagnetskih prijelaznih pojava vrlo je važna veličina koraka u simulaciji koja je reda nekoliko desetaka mikrosekundi, iako može biti čak i manja ovisno o vrsti proučavanog elektromagnetskog fenomena. Stoga se često pri analizi elektromagnetskih prijelaznih pojava, zbog dugih vremenskih konstanti povezanih s dinamikom agregata (zajedno povezani sinkroni generatori i pripadajuće turbine), koriste pojednostavljeni modeli takvih uređaja koji su često dovoljni, uzimajući u obzir vremenski period razmatrane elektromagnetske prijelazne pojave.

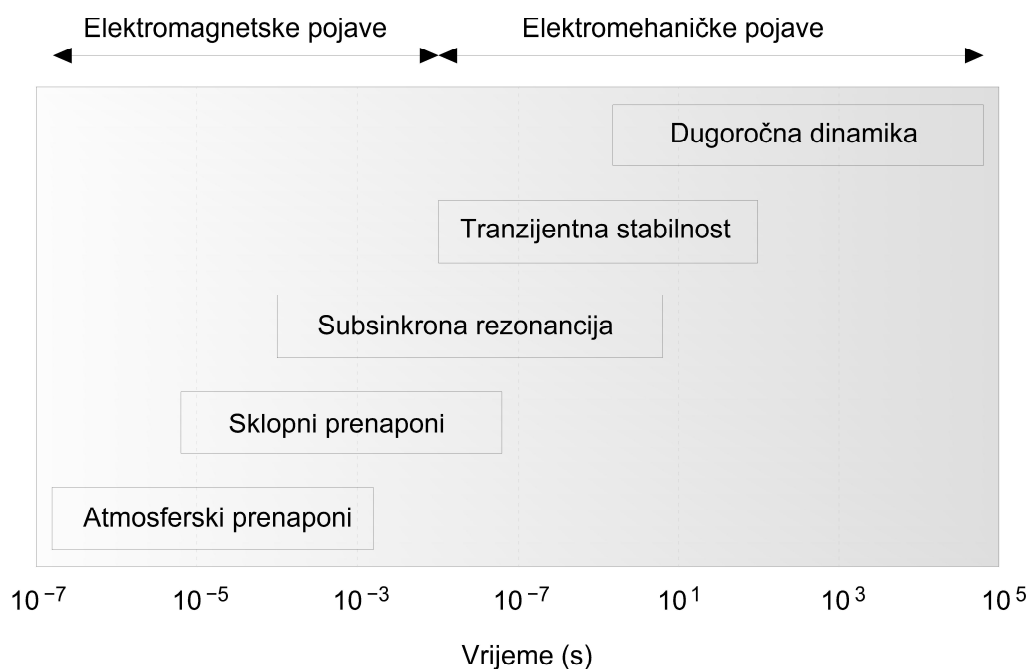
Elektromehaničke prijelazne pojave su sporije prijelazne pojave koje, zbog neravnoteže između zakretnog momenta turbine i protumomenata generatora odnosno interakcije između mehaničke (kinetičke) energije pohranjene u rotirajućim dijelovima strojeva i elektromagnetske energije pohranjene u EES-u, rezultiraju sporim oscilacijama rotora generatora (agregata). Analiza ove vrste prijelaznih pojava je poznata kao simulacija kutne stabilnosti u EES-u, koja se radi korištenjem postojećih programa za proračun kutne stabilnosti u EES-u [29-30]. Većina tih programa u analizi ne uzima u obzir utjecaj automatskog regulatora napona i turbinskog regulatora na prijelaznu stabilnost EES-a, premda najnovije spoznaje pokazuju njihov znatan utjecaj odnosno potrebu da se uzmu u razmatranje prilikom analize kutne stabilnosti sustava.

Dugo vremena programi za elektromagnetske prijelazne pojave i programi za elektromehaničke prijelazne pojave nisu bili objedinjeni. Razlog za odvojeno korištenje tih programa je što su ciljevi analize elektromagnetskih prijelaznih pojava i analize elektromehaničkih prijelaznih pojava različiti. U analizi elektromagnetskih prijelaznih pojava istražuju se brze prijelazne pojave, koje zbog malih vremenskih konstanti nemaju utjecaj na dinamiku sporijih elektromehaničkih sustava. U analizi kutne stabilnosti cilj je proučiti utjecaj velikog poremećaja na dinamiku i stabilnost cijelog EES-a. Tehnički je moguće provesti analizu stabilnosti prijelazne pojave, također, u EMTP programu. U tom slučaju, vrijeme potrebno za simulaciju u EMTP programu u usporedbi s tradicionalnim programima za analizu kutne stabilnosti je znatno duže jer je potrebno uzeti znatno manji vremenski inkrement simulacije. Zbog navedenih problema, kombinirana simulacija elektromagnetskih i elektromehaničkih prijelaznih pojava oduvijek je bila izazov, pa su razvijeni razni modeli koji kombiniraju elektromagnetske i elektromehaničke simulacije [31-34].

U ovom je radu opisana analiza kutne stabilnosti pri malim i velikim poremećajima (prijelazna stabilnost). Kao uvod u složeno područje stabilnosti rada elektroenergetskog sustava razmotren je problem kutne stabilnosti jednog generatora priključenog na EES te nakon toga problematika analize kutne stabilnosti višegeneratorskog EES-a pri malim i velikim poremećajima (prijelazna stabilnost). Također su razmotrene različite mjere koje se inače koriste u suvremenim elektroenergetskim sustavima radi poboljšanja i očuvanja prijelazne stabilnosti uzrokovane velikim poremećajima.

2. KLASIFIKACIJA STABILNOSTI

Dinamičke pojave u elektroenergetskim sustavima mogu se razvrstati u različite kategorije ovisno o trajanju prijelazne pojave [35]. Kao što je prikazano na Slici 2.1, vremenski interval prijelaznih pojava elektroenergetskog sustava varira od mikrosekundi (udar munje) do sati i dana (dugoročne dinamičke pojave). Ukupni vremenski raspon prijelaznih pojava u elektroenergetskom sustavu je općenito svrstan u brze elektromagnetske prijelazne pojave i spore elektromehaničke prijelazne pojave. Kompletan elektroenergetski sustav može se promatrati kao povezani elektromehanički i elektromagnetski sustav sa širokim rasponom vremenskih konstanti. Postoje brze elektromagnetske prijelazne pojave, nastale interakcijom između magnetskih polja induktiviteta i električnih polja kondenzatora. Osim toga, postoje sporije elektromehaničke prijelazne pojave zbog interakcije između mehaničkih (kinetičkih) energija pohranjenih u rotacijskim dijelovima rotacijskih strojeva.

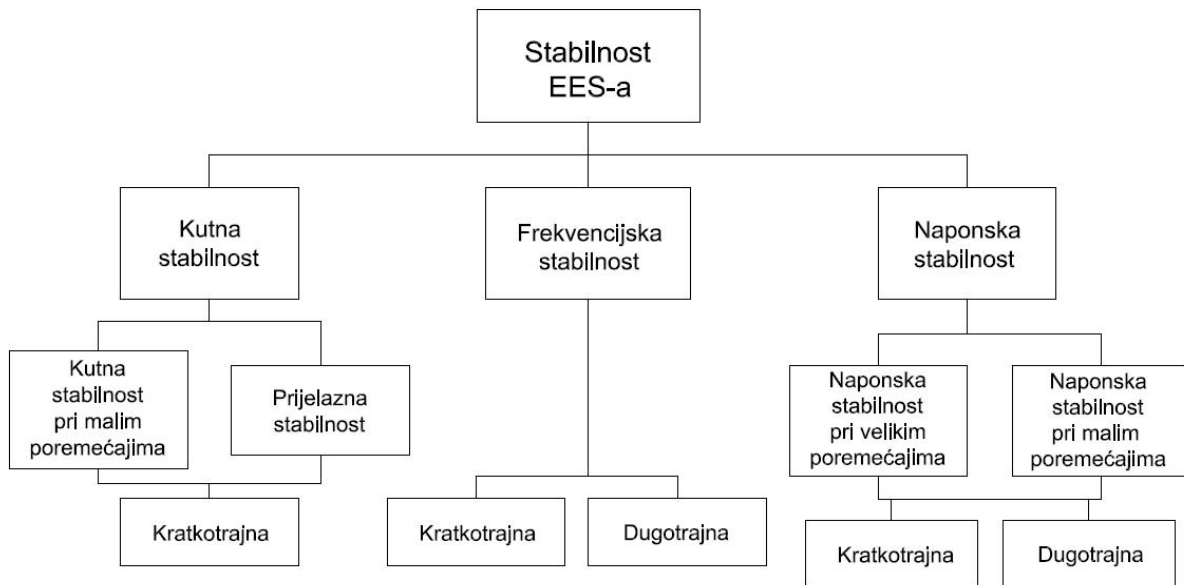


Slika 2.1. Vremenski okvir prijelaznih pojava (tranzijenata) elektroenergetskih sustava

Prema [36-38], stabilnost EES-a možemo u osnovi podijeliti na na kutnu, naponsku i frekvencijsku stabilnost (Slika 2.2). Jasno je da je ova podjela uvjetna, jer je skoro nemoguće napraviti jasnu i preciznu razliku između različitih oblika (ne)stabilnosti. Ova podjela govori o dominantnim fizičkim veličinama koje se prate i čije se kritične vrijednosti dostižu u slučajevima nestabilnosti.

Kod kutne stabilnosti dominiraju električni kutovi rotora sinkronih generatora. To znači da kutna stabilnost iskazuje sposobnost sinkronih generatora da održavaju sinkronizam. Kutna stabilnost se dijeli na stabilnost pri malim poremećajima i tranzijentnu (prijelaznu) stabilnost. Stabilnost pri malim poremećajima odnosi se na sposobnost elektroenergetskog sustava da očuva sinkronizam pri malim i sporim poremećajima. Ova vrsta stabilnosti po svom ishodu

može biti aperiodički ili oscilacijski nestabilna. Treba istaći da se za ovu vrstu stabilnosti u literaturi često koristi termin statička stabilnost.



Slika 2.2. Klasifikacija stabilnosti elektroenergetskih sustava

U ovisnosti o razmatranom slučaju, stabilnost se može analizirati pri malim poremećajima sa ili bez uvažavanja efekata uređaja za regulaciju napona, odnosno uzbude sinkronih generatora, kao i uređaja za regulaciju brzine vrtnje. U anglo-saksonskoj se literaturi za stabilnost pri malim poremećajima uz uvažavanje efekata regulacije napona i brzine odziva, koristi termin dinamička stabilnost. U ruskoj, njemačkoj i francuskoj literaturi ovaj termin označava stabilnost pri velikim poremećajima, za što se u anglo-saksonskoj literaturi koristi termin tranzijentna stabilnost. Da ne bi dolazilo do konfuzije i nesporazuma oko upotrebe termina dinamička stabilnost CIGRE i IEEE PES preporučili su da se ovaj termin ne koristi, već da se koriste izvorni termini: stabilnost pri malim poremećajima i tranzijentna (prijelazna) stabilnost (stabilnost pri velikim poremećajima). Tranzijentna ili prijelazna stabilnost bavi se efektima iznenadnih i velikih poremećaja, čija je krajnja posljedica ispad iz pogona pojedinih važnih elemenata sustava (vodova, transformatora, generatora) ili prestanak napajanja električnom energijom pojedinih područja.

Naponska stabilnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sustava da održava prihvatljive vrijednosti napona u svim čvorovima sustava. Fenomen naponske stabilnosti je nastao kao posljedica povezivanja elektroenergetskih sustava u velike elektroenergetske interkonekcije. Ovakvo povezivanje sustava omogućuje postizanje dobrih tehn-ekonomskih svojstava sustava. Između ostalog, u velikoj mjeri je eliminirana i kritičnost s aspekta kutne stabilnosti, kao i kritičnost problema regulacije frekvencije. Rješavanje jedne grupe problema izaziva druge probleme, koji na početku analiza nisu bili dominantni i isticani u prvi plan. Velike interkonekcije omogućuju prijenos većih količina električne energije iz područja gdje ima viška električne energije u područje gdje je ona deficitarna. Pri tome može doći do većeg opterećenja elemenata sustava i pogoršanja naponskih prilika u pojedinim dijelovima sustava. Do naponske nestabilnosti najčešće dolazi kada poslije iznenadnih poremećaja nastanu

nekontrolirani padovi napona u pojedinim (ili u svim) čvorovima sustava. Treba istaći da na pojavu naponske nestabilnosti veliki utjecaj imaju tokovi reaktivnih snaga u sustavu, dok na kutnu stabilnost dominantno utječu tokovi radnih snaga.

Kod naponske stabilnosti se, kao i kod kutne, razlikuju naponska stabilnost pri malim i naponska stabilnost pri velikim poremećajima. Podjela stabilnosti na stabilnost pri malim i stabilnost pri velikim poremećajima (bilo kutna ili naponska) predstavlja svojevrsnu vremensku dekompoziciju problema stabilnosti. Stabilnost pri malim poremećajima proučava dugotrajne efekte, uključujući stacionarna stanja, dok se stabilnost pri velikim poremećajima bavi analizom efekata u kratkom vremenskom periodu neposredno poslije nastanka poremećaja.

Pored prethodno definiranih podjela stabilnosti, u novije vrijeme se u literaturi susreće i termin frekvencijska stabilnost. Termin frekvencijska stabilnost je u vezi s analizom odziva sustava pri poremećajima koji imaju za posljedicu znatna, ali spora odstupanja napona, frekvencije i tokova snaga. Ovdje se radi o elektromehaničkim prijelaznim procesima, čija je osnovna karakteristika kaskadni razvoj početnog poremećaja. Razlika između analize kratkog i dugog trajanja nije precizno razgraničena, već ovisi o pojavi koja se razmatra i korištenim matematičkim modelima. Frekvencijska stabilnost kratkog trajanja obuhvaća elektromehaničke prijelazne procese koji traju nekoliko desetina sekunda do minute, dok se frekvencijska stabilnost dugog trajanja odnosi na vremenske periode od nekoliko minuta do nekoliko desetina minuta, ili pak do nekoliko sati.

3. JEDNADŽBA GIBANJA ROTORA GENERATORA

Svaka promjena opterećenja, trenutno se očituje u promjeni električnog momenta M_e generatora, što uzrokuje neravnotežu između tog momenta i mehaničkog momenta turbine M_m . Uz zanemarenje mehaničkih gubitaka uslijed rotacije, jednačba gibanja glasi:

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = M_m - M_e \quad (3.1)$$

gdje je:

J - ukupni moment tromosti agregata (kgm^2),
 ω_r - kutna brzina 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, dok su promjene električnog momenta generatora M_e relativno brze.

Kutna brzina rotora može se izraziti jednačbom:

$$\omega_r = \omega_0 + \Delta\omega_r \quad (3.2)$$

gdje je:

ω_0 - sinkrona kutna brzina rotora,
 $\Delta\omega_r$ - promjena kutne brzine rotora uzrokovana neravnotežom mehaničkog i električnog momenta.

Promjena kutne brzine rotora može se izraziti i preko vremenske promjene kuta opterećenja rotora generatora δ_r :

$$\Delta\omega_r = \frac{d\delta_r}{dt} \quad (3.3)$$

Nakon uvrštenja izraza (3.2) i (3.3) u (3.1), dobije se izraz:

$$J \cdot \frac{d\left(\omega_0 + \frac{d\delta_r}{dt}\right)}{dt} = J \cdot \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = M_m - M_e \quad (3.4)$$

Ako se prethodni izraz pomnoži sa sinkronom kutnom brzinom rotora ω_0 , dobije se izraz:

$$J \cdot \omega_0 \cdot \frac{d^2\delta_r}{dt^2} = \omega_0 \cdot M_m - \omega_0 \cdot M_e \quad (3.5)$$

Umjesto ovisnosti kutne brzine o odgovarajućim momentima, mogu se promatrati ovisnosti kutne brzine o mehaničkoj i električnoj snazi. Mehanička snaga na vratilu turbine, prema osnovnoj jednadžbi rotacije je:

$$P = \omega_r \cdot M \quad (3.6)$$

Nakon uvrštenjem izraza (3.6) u (3.5), dobije se izraz:

$$J \cdot \omega_0 \cdot \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} = \frac{\omega_0}{\omega_r} \cdot P_m - \frac{\omega_0}{\omega_r} \cdot P_e \quad (3.7)$$

gdje je:

P_m - snaga koju turbina predaje generatoru,

P_e - električna radna snaga generatora (uz zanemarene gubitke).

Tijekom poremećaja kutna brzina sinkronog stroja je približno jednaka sinkronoj kutnoj brzini $\omega_r \approx \omega_0$ pa se može pisati:

$$J \cdot \omega_0 \cdot \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} = P_m - P_e = M_i \cdot \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} \quad (3.8)$$

Prethodna jednadžba naziva se jednadžba njihanja i temeljna je jednadžba koja opisuje dinamika rotora. Umnožak momenta tromosti agregata i sinkrone kutne brzine ($M_i = J \cdot \omega_0$) naziva se kutni moment. Uvaži li se utjecaj prigušnog momenta, tada diferencijalna jednadžba njihanja glasi:

$$M_i \cdot \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} + D_i \cdot \frac{d \delta_r}{dt} + P_e - P_m = 0 \quad (3.9)$$

gdje je D_i faktor prigušenja.

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

$$H = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2 \cdot S_n} = \frac{W_R}{S_n} \quad (3.10)$$

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

$$\delta_r = \frac{\delta}{p}; \quad \omega_r = \frac{\omega}{p} \quad (3.11)$$

gdje je p ukupan broj pari polova sinkronog generatora.

Nakon uvrštenja izraza (3.10) i (3.11) u (3.8), dobije se jednačba njihanja:

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_n}{\omega_n} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (3.12)$$

Uobičajeno je jednačbu njihanja izražavati korištenjem relativnih veličina. To znači normalizaciju jednačbe na zajedničku baznu snagu S_B . U ovom slučaju je $S_B = S_n$, nazivna kutna brzina u relativnim jedinicama iznosi $\omega_n = 1$, pa se jednačba njihanja može pisati kao:

$$2 \cdot H \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = p_m - p_e \quad (3.13)$$

Često je prikladnije umjesto diferencijalne jednačbe drugog reda koristiti dvije diferencijalne jednačbe prvog reda:

$$2 \cdot H \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt} = p_m - p_e \quad (3.14)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (3.15)$$

4. KUTNA STABILNOST PRI MALIM POREMEĆAJIMA

Svaka neravnoteža 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. Te su oscilacije izazvane vrlo malim promjenama pogonskog stanja. U velikoj većini slučajeva vrlo mali poremećaji neće imati štetne posljedice po stabilnost, ali oni, ipak, mogu u nekim sustavima i pod određenim okolnostima prouzročiti pojavu nestabilnog stanja. U većini će se slučajeva oscilacije što ih izazivaju mali poremećaji u sustavu vrlo naglo prigušiti. Ima sustava koji su podložni stvaranju tzv. spontanijih oscilacija, a to su slučajevi 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 pojačati. Jedan karakterističan slučaj pojave takvih oscilacija je kada oscilira jedan ili skupina generatora s obzirom na ostali dio sustava koji se može smatrati krutim. Ove se oscilacije mogu analizirati na osnovi promjenjivosti kutne opterećenja generatora, ili npr. promjenjive kutne brzine ili izlazne snage. U ovim se slučajevima govori o oscilacijama pojedinog generatora ili o lokaliziranim oscilacijama.

Mnogo češće su oscilacije snaga što se javljaju u posebnom tipu prijenosnih vodova, što ih nazivamo interkonekcijskim vodovima. Tu se 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 drugog, već kao cjelina oscilira jedna skupina strojeva prema drugoj skupini. To se odražava u oscilacijama tokova snaga u interkonekcijskim vodovima, pa se upotrebljavaju i posebni pojmovi kao što su: oscilacije interkonekcijskog voda ili ponekad stabilnost interkonekcijskog voda. 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 Republike Hrvatske). U jednom i drugom slučaju se govori o oscilacijama više strojeva.

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. Vlanje 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 kao što je naprimjer kut δ . 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 točniji 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.

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 električnih stupnjeva.

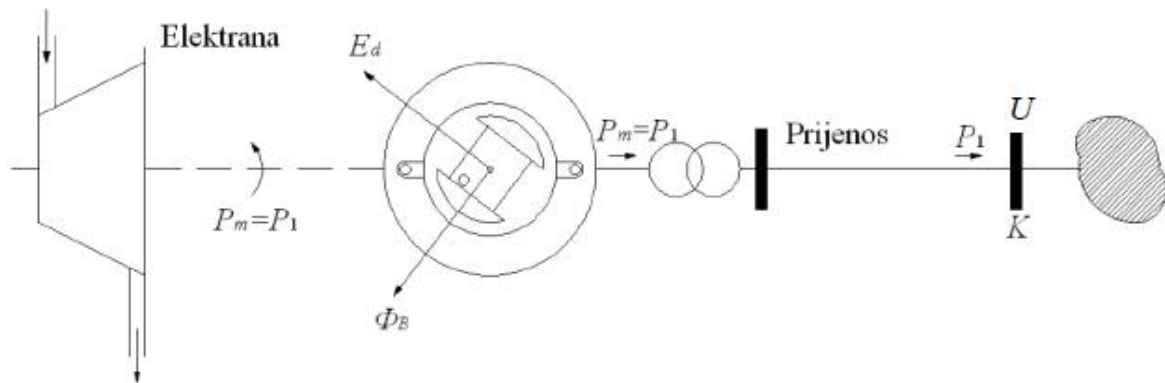
Dakle, stabilnost pri malim poremećajima odnosi se na slučajeve kada se opterećenje polagano mijenja te ne postoji utjecaj tromosti zamašnih masa agregata i tromosti magnetskih polja. To znači da promjena pogonskog stanja teži k nuli pa se može prikazati izrazom:

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta t} \rightarrow 0 \quad (4.1)$$

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 pak 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 matematičkog modela sustava.

4.1. Kutna stabilnost jednog generatora priključenog na elektroenergetski sustav

Na Slici 4.1 predočena je jednopolna shema trofaznog sinkronog generatora priključenog na krutu mrežu. Povećava li se neizmjereno polako punjenje turbine, tj. povećava li se mehanička snaga P_m na osovini rotora generatora, slijedi da će se povećati radna električna snaga P_e koju generator predaje elektroenergetskom sustavu.



Slika 4.1. Pojednostavljena shema spoja generatora preko blok transformatora i voda na krutu mrežu te veza između prostornog položaja rotora i fazorskog dijagrama

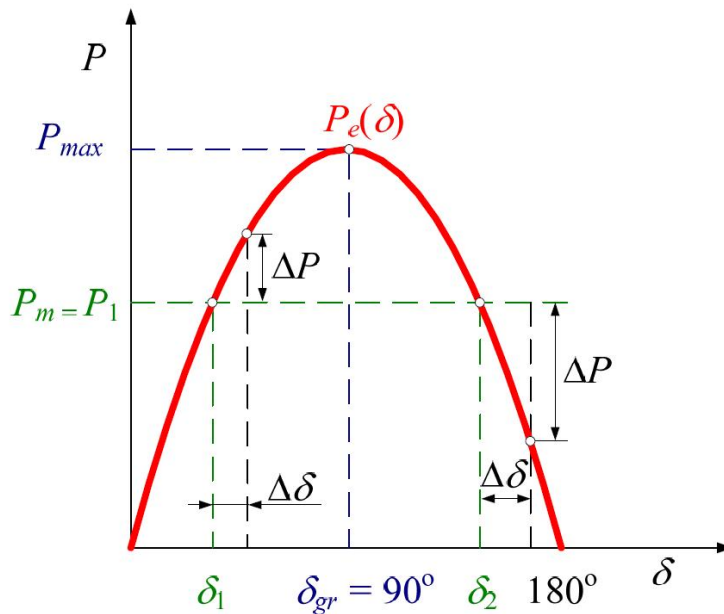
Ako se zbog jednostavnosti pretpostavi kako se radi o sustavu bez gubitaka snage te da je riječ o turbogeneratoru, radna električna snaga koju on predaje elektroenergetskom sustavu može se izračunati korištenjem izraza :

$$P_e = \frac{E_o \cdot U_K}{X} \cdot \sin \delta_{uk} \quad (4.2)$$

gdje je:

- E_o – efektivna vrijednost linijske EMS rotora,
- U_K – napon elektroenergetskog sustava u točki K,
- X – ukupna reaktancija prijenosnog sustava,
- δ_{uk} – ukupni kut opterećenja (kut između fazora \bar{E}_{of} i \bar{U}_{Kf}).

Pri konstantnoj uzbuđi generatora i konstantnom naponu elektroenergetskog sustava u točki K te konstantnoj reaktanciji, radna električna snaga mijenjat će se samo u ovisnosti o promjeni kuta δ . Ako se ta promjena snage prikaže u ovisnosti o kutu opterećenja δ , dobije se krivulja snaga – kut (Slika 4.2).



Slika 4.2. Krivulja snaga-kut za sustav prikazan na Slici 4.1

Iz Slike 4.2 vidljivo je 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 radna snaga P_1 , pri čemu je kut opterećenja δ_1 . Pogonska točka (δ_1, P_1) označena je na krivulji snaga – kut.

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, prema (3.8), nastupa usporavanje rotora jer je električni moment veći od mehaničkog, odnosno snaga akceleracije je negativna. Uslijed toga smanjivat će se kut $\delta_1 + \Delta\delta$ sve dok ne postane jednak početnom kutu δ_1 kada će se ponovo uspostaviti ravnoteža između primljene mehaničke i predane električne snage. Ako bi se kut δ_1 smanjio na vrijednost $\delta_1 - \Delta\delta$, snaga akceleracije postala bi pozitivna, pa bi došlo 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, vrijede sasvim drugi odnosi. Npr. povećá 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 ubrzanja agregata i do daljnjeg povećanja kuta opterećenja. Opisane promjene rezultirat će povećanjem kutne brzine rotora i gubitkom sinkronizma.

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 opisana je sljedećim izrazom:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} > 0 \quad (4.4)$$

Deriviranjem jednadžbe (4.2) po δ dobiva se sljedeći izraz:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_o \cdot U_k}{X} \cdot \cos \delta_{uk} \quad (4.5)$$

Izraz (4.5) predstavlja tzv. sinkronizirajuću snagu. Prethodna razmatranja vrijede za sustav u kojem se nalazi samo jedan stroj.

4.2. Kutna stabilnost višegeneratorskog elektroenergetskog sustava

U radu višegeneratorskog EES-a snaga svakog pojedinog stroja ovisi o ukupnom kutu opterećenja pojedinog sinkronog generatora prema nekom referentnom generatoru (generatoru čiji se fazor 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.

Metode po kojima se ispituje dinamičko vladanje sustava pri malom poremećaju temelje se na teoriji stabilnosti Ljapunova iz 1892. godine. Kao što je već opisano u temeljnim studijama o stabilnosti, stabilnost pri malim poremećajima najčešće se istražuje primjenom kriterija koeficijentata sinkronizirajućih snaga. 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:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} > 0 \quad ; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.6)$$

Općenito vrijedi da stabilnost sustava pri malim poremećajima prije svega ovisi o početnom pogonskom stanju sustava.

Rezultirajuća nestabilnost sustava može se pojaviti u dva oblika:

- porast kuta opterećenja uz aperiodičke promjene kuta opterećenja s vremenom,
- oscilacije kuta opterećenja uz porast amplitude s vremenom zbog nedovoljnog prigušnog momenta.

U današnjim elektroenergetskim sustavima problem kutne stabilnosti pri malim poremećajima obično se očituje u 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.

U suvremenim elektroenergetskim sustavima s velikim brojem sinkronih strojeva ne mogu se (istraživanje realnog, a ne idealiziranog stanja) formulirati granice stabilnosti pri malim poremećajima pomoću kutnih razlika (ukupni kut opterećenja pojedinog sinkronog generatora prema nekom referentnom generatoru). Poznato je kako velike kutne razlike vode

nestabilnosti pri malim poremećajima, ali kolike su njihove granične vrijednosti, općenito je neodređeno. 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° .

5. 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 elektroenergetskom sustavu. Rezultirajući odziv sustava manifestira se velikom kutnom razlikom između sinkronih strojeva i izravno utječe na nelinearnost odnosa snage i kuta.

Poznato je da se sinkroni generator (agregat) priključen na EES vlada kao titrajni krug u kojem energija njiše između dva različita spremnika energije; EES koji je spremnik električne energije i rotora agregata koji je spremnik mehaničke energije. Zbog njihanja energije javljaju se njihanja svih električnih i mehaničkih veličina generatora (frekvencije, struje, napona, brzine vrtnje, kuta opterećenja, radne i jalove snage) koja se nazivaju elektromehaničkim njihanjima. Ponašanje agregata u pogonu može se opisati određenim diferencijalnim jednadžbama. Istraživanje stabilnosti utemeljeno je na kriteriju jednakih površina ili iterativnom numeričkom rješavanju diferencijalnih jednadžbi njihanja.

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 beskonačno:

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta t} \rightarrow \infty \quad (5.1)$$

Jednadžba (5.1) može se pojaviti u dva slučaja:

- promjena je neizmjerljivo velika i događa se u konačnom vremenu (ovakav slučaj se ne pojavljuje u praksi),
- 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, tj. dolazi do njihanja rotora generatora zajedno s mehanički vezanim masama (rotori pogonskih strojeva s obzirom na referentno okretno polje statora). Rotori pojedinih generatora u sustavu njišu različito i kada dođe do njihovog međusobnog razilaženja gubi se stabilnost.

5.1. Prijelazna stabilnost jednog generatora priključenog na elektroenergetski sustav

Prilikom razmatranja problema prijelazne stabilnosti treba pretpostaviti da se kut opterećenja δ , radi tromosti masa rotora, ne može trenutno promijeniti i da se magnetsko polje, koje je određeno fazorom tranzijentne EMS rotora \bar{E}'_o , također ne može trenutno promijeniti. Pretpostavljeno je da su reaktancije elemenata prijenosne mreže jednake nuli.

Pri trenutnoj promjeni opterećenja, uzevši u obzir prethodna zanemarenja, jednadžba prijelazne stabilnosti dobije se ako se umjesto efektivne vrijednosti EMS rotora (E_o) u fazorskom dijagramu koristi efektivna vrijednost tranzijentne EMS rotora E'_o , te ako se umjesto sinkrone reaktancije generatora X_d koristi tranzijentna sinkrona reaktancija X'_d . S početnom reaktancijom se ne računa jer je njeno trajanje samo nekoliko stotinki sekunde. Jednadžba prijelazne stabilnosti generatora opisana je sljedećim izrazom:

$$P_{PS} = \frac{E'_o \cdot U_K}{X} \cdot \sin \delta_{uk} \quad (5.2)$$

gdje je:

E'_o – efektivna vrijednost tranzijentne linijske EMS rotora,

X'_d – tranzijentna sinkrona reaktancija,

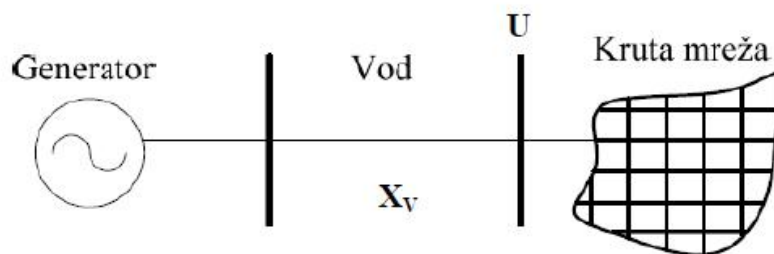
X_v – ekvivalentna reaktancija voda,

U_K – napon elektroenergetskog sustava u točki K,

δ_{uk} – ukupni kut opterećenja (kut između fazora \bar{E}'_{of} i \bar{U}_{Kf}).

X – ukupna reaktancija prijenosnog sustava ($X = X'_d + X_v$),

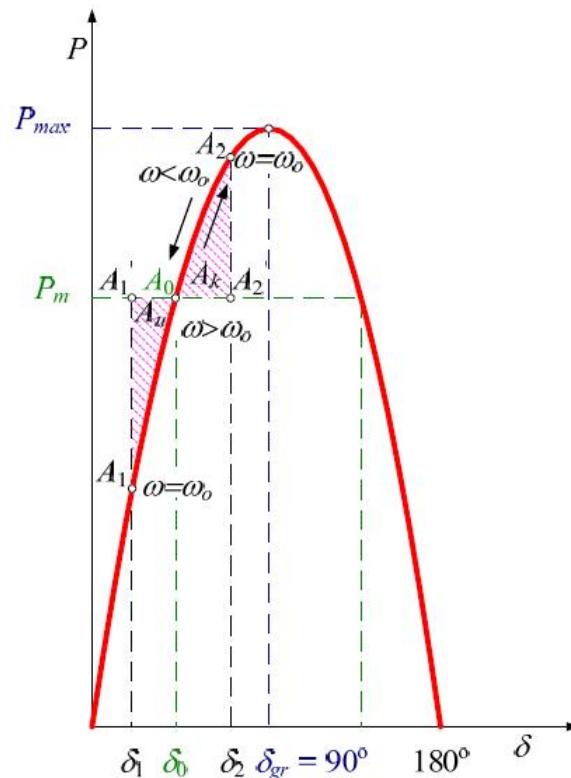
Pojave pri prijelaznoj stabilnosti pogona generatora mogu se najlakše razumjeti razmatranjem jednostavnog prijenosnog sustava prikazanog na Slici 5.1:



Slika 5.1. Shema spoja trofaznog generatora na krutu mrežu preko jednog voda

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 (5.2) koji sadrži tranzijentnu EMS rotora E'_o , napon krute mreže U_K , ukupnu reaktanciju između stezaljki generatora i sabirnice krute mreže te sinus ukupnog kuta opterećenja između fazora napona mreže i tranzijentne EMS rotora. 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 udarca određeno točkom A_1' i kutom δ_1 prema Slici 5.2.



Slika 5.2. Krivulja snaga-kut za sustav sa Slike 5.1

Ako je udarni poremećaj uzrokovao smanjenje električne snage, kao posljedicu imamo razliku mehaničke i električne snage koja je pozitivnog predznaka i koja će utjecati na ubrzavanje rotora generatora. Kutna akceleracija bit će proporcionalna duljini dužine A_1A_1' . 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 ($\omega > \omega_0$) 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 dao pri usporavanju. Kut δ_2 do kojeg je rotor generatora zanjihao određuje se iz poznatog uvjeta jednakih površina: $A_u = A_k$.

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 . S 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). Analitički proračun krivulje njihanja za prijenosni sustav s jednim generatorom i krutom mrežom vodi k rješavanju diferencijalne jednadžbe njihanja (3.9). Kvantitativno rješavanje problema prijelazne stabilnosti sustava s više strojeva vodi na rješavanje sustava diferencijalnih jednadžbi.

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 usporenju, 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 njihaja rotora sinkronih strojeva) što je izazovu nagle i velike promjene pogonskog stanja u sustavu, odnosno nagle i velike preraspodjele tokova snaga u sustavu. Utvrđivanje stabilnosti provodi se na temelju kriterija jednakih površina ili točnije iterativnim numeričkim rješavanjem diferencijalnih jednadžbi njihanja.

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

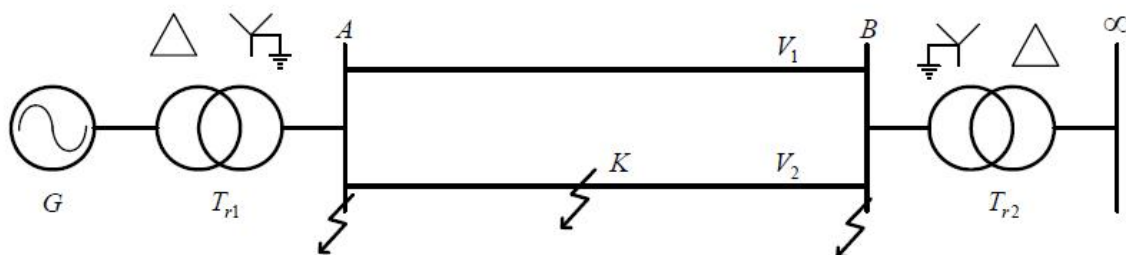
Vremenski period od interesa za studije prijelazne stabilnosti je obično u rasponu od 3 do 5 sekundi nakon početka poremećaja. Može se produžiti i do 10 sekundi za vrlo velike sustave s dominantnim unutarnjim kutnim odstupanjem. Prijelazna nestabilnost u nekom sustavu nastaje pod utjecajem velikog poremećaja 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, pa se sljedeće pogonsko stanje razlikuje od onog prije poremećaja. Za sustav je nužno da novo ustaljeno stanje promijenjenog sustava bude, također, stabilno. Postoji

moćnost da promijenjeni sustav bude dinamički nestabilan, pa da se oscilacije nakon poremećaja podržavaju, ili čak im amplitude rastu do točke kad nastupi raspad sustava.

Za prijenosni sustav s dva paralelna voda (Slika 5.3), koji povezuju generator s jedne i krutu mrežu s druge strane, moguće je proračunom odrediti kritični kut isklopa δ_{1kr} pri kratkom spoju na jednom od vodova, uzimajući u obzir maksimalni dozvoljeni kut njihanja δ_{2max} (kut pri kojem se kratki spoj mora isključiti da bi se spriječio raspad sustava).

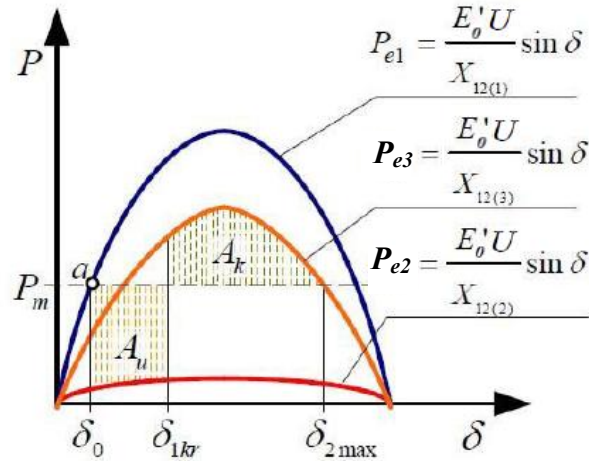


Slika 5.3. Jednopolna shema trofaznog generatora koji je preko transformatora i dvostrukog dalekovoda priključen na sabirnice krute mreže



Slika 5.4. Jednopolna shema prijenosa od jednog generatora do krute mreže preko dvostrukog voda

Nadomjesna reaktancija prijenosnog sustava prije kvara je $X_{12(1)}$, nadomjesna reaktancija pri kratkom spoju na jednom vodu 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 (koćenja), $A_u = A_k$ prema Slici 5.5.



Slika 5.5. Određivanje kritičnog kuta isklopa δ_{1kr} uzimanjem u obzir maksimalnog kuta njihjanja δ_{2max}

Iznos površine A_u računa se kao:

$$A_u = P_m \cdot (\delta_{1kr} - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(2)}} \cdot \sin \delta \, d\delta \quad (5.3)$$

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

$$\begin{aligned} A_u &= (\delta_{1kr} - \delta_0) \cdot \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(1)}} \cdot \sin \delta_0 - \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(2)}} \cdot \sin \delta \, d\delta \\ &= (\delta_{1kr} - \delta_0) \cdot \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(1)}} \cdot \sin \delta_0 - \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(2)}} \cdot \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \sin \delta \, d\delta \end{aligned} \quad (5.4)$$

Slično se može izvesti jednadžba za površinu kočenja:

$$A_k = \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2max}} \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(2)}} \sin \delta \, d\delta - P_m \cdot (\delta_{2max} - \delta_{1kr}) \quad (5.5)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} A_k &= \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2max}} \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(3)}} \cdot \sin \delta \, d\delta - (\delta_{2max} - \delta_{1kr}) \cdot \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(1)}} \cdot \sin \delta_0 \\ &= \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(3)}} \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2max}} \sin \delta \, d\delta - (\delta_{2max} - \delta_{1kr}) \cdot \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(1)}} \cdot \sin \delta_0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Nakon izjednačavanja $A_u = A_k$, dobije se:

$$(\delta_{2\max} - \delta_0) \cdot \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(1)}} \cdot \sin\delta_0 = \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(2)}} \cdot \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \sin\delta \, d\delta + \frac{E'_o \cdot U}{X_{12(3)}} \cdot \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2\max}} \sin\delta \, d\delta \quad (5.7)$$

Dijeljenjem objiju strana jednadžbe (5.7) sa $\frac{E'_o \cdot U}{X_{12(1)}}$ slijedi izraz:

$$(\delta_{2\max} - \delta_0) \cdot \sin\delta_0 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(2)}} \cdot \int_{\delta_0}^{\delta_{1kr}} \sin\delta \, d\delta + \frac{X_{12(1)}}{X_{12(3)}} \cdot \int_{\delta_{1kr}}^{\delta_{2\max}} \sin\delta \, d\delta \quad (5.8)$$

pa je nakon integracije :

$$(\delta_{2\max} - \delta_0) \cdot \sin\delta_0 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(2)}} \cdot (-\cos\delta_{1kr} + \cos\delta_0) + \frac{X_{12(1)}}{X_{12(3)}} \cdot (-\cos\delta_{2\max} + \cos\delta_{1kr}) \quad (5.9)$$

Neka je:

$$k_1 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(2)}}, \quad k_2 = \frac{X_{12(1)}}{X_{12(3)}} \quad (5.10)$$

Uz opisanu supstituciju, jednadžba (5.9) poprima oblik:

$$(\delta_{2\max} - \delta_0) \cdot \sin\delta_0 = k_1 \cdot \cos\delta_0 - k_2 \cdot \cos\delta_{2\max} + (k_2 - k_1) \cdot \cos\delta_{1kr} \quad (5.11)$$

Iz jednadžbe (5.11) slijedi izraz za kritični kut isklopa δ_{1kr} :

$$\cos\delta_{1kr} = \frac{(\delta_{2\max} - \delta_0) \cdot \sin\delta_0 - k_1 \cdot \cos\delta_0 + k_2 \cdot \cos\delta_{2\max}}{k_2 - k_1} \quad (5.12)$$

Neki autori koriste i sljedeći izraz:

$$\cos\delta_{1kr} = \frac{\frac{P_m}{P_{\max}} \cdot (\delta_{gr} - \delta_0) \cdot \sin\delta_0 + r_2 \cdot \cos\delta_{gr} - r_1 \cdot \cos\delta_0}{k_2 - k_1} \quad (5.13)$$

gdje je:

$$r_1 = \frac{P_{\max(2)}}{P_{\max(1)}} \quad (5.14)$$

$$r_2 = \frac{P_{\max(3)}}{P_{\max(1)}} \quad (5.15)$$

$$\delta_{2\max} = \delta_{gr} \quad (5.16)$$

$$P_{\max} = P_{\max(1)} \quad (5.17)$$

Kritičnom kutu isklopa pripada kritično vrijeme isklopa t_{kr} koje je najdulje vrijeme koje se s obzirom na prijelaznu stabilnost još može dozvoliti. Kritično vrijeme isklopa t_{kr} može se odrediti polazeći od jednadžbe gibanja rotora:

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_n}{\omega_n} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (5.18)$$

S obzirom da je P_e funkcija kuta δ , a samim tim i funkcija vremena, računanje kritičnog vremena isklopa t_{kr} nije jednostavno. Pokazuje se da se do analitičkog izraza za kritično vrijeme isključenja kvara može doći samo u slučaju trolnog kratkog spoja ($P_e = 0$) te da se za druge vrste kvarova trebaju numerički rješavati diferencijalne jednadžbe.

Za trolni kratki spoj na sabirnicama elektrane ili na jednostrukom vodu vrijedi da je $k_1 = 0$, $k_2 = 1$, pa izraz 5.13 za kritični kut postaje:

$$\cos\delta_{1kr} = (\delta_{2\max} - \delta_0) \cdot \sin\delta_0 - \cos\delta_0 \quad (5.19)$$

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

$$t_{kr} = \sqrt{\frac{4 \cdot H \cdot (\delta_{1kr} - \delta_0)}{\omega_s \cdot P_m}} \quad (5.20)$$

5.2. Prijelazna stabilnost višegeneratorskog elektroenergetskog sustava

Analiza prijelazne stabilnosti višegeneratorskog EES-a predstavlja dosta složen zadatak, jer treba obuhvatiti veliki broj generatora. Matematički model obuhvaća sustav diferencijalnih jednadžbi i sustav algebarskih jednadžbi koji se moraju istovremeno rješavati. Sukladno postavljenom zadatku vezano za točnost i vremenski period za koji se radi analiza, sinkroni generatori se mogu modelirati različitim sustavima diferencijalnih jednadžbi, koji opisuju elektromehaničke i elektromagnetske pojave.

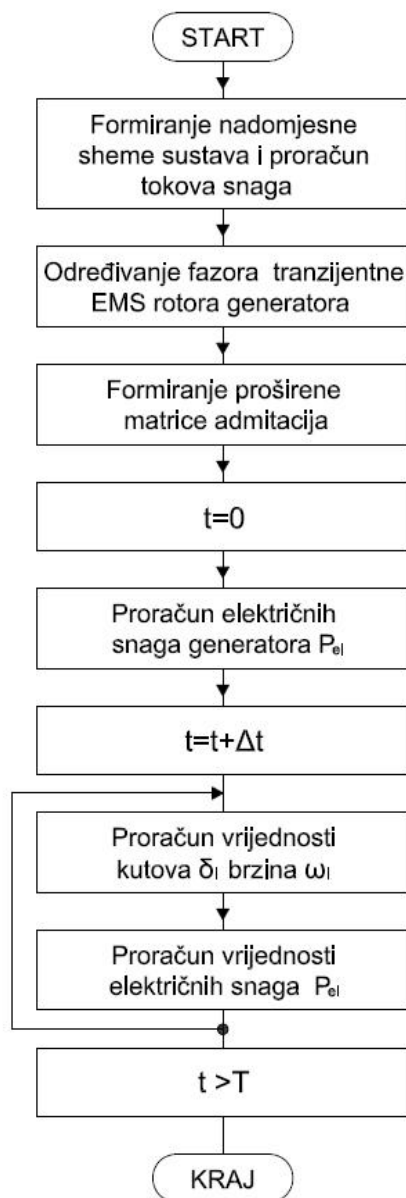
Za duže vremenske periode moraju se uvažiti i efekti regulacije (napona i frekvencije), te je tada u razmatrani matematički model potrebno uključiti i matematičke modele uređaja za regulaciju napona i frekvencije. Zbog velike složenosti matematičkog modela, uobičajena analiza prijelazne stabilnosti se obično do sada radila za period trajanja do 1 s. Ovakva analiza, koja je poznata pod imenom analiza prijelazne stabilnosti tijekom prve periode oscilacija, omogućava da se uvedu brojne pretpostavke pri formiranju matematičkog modela.

Pretpostavke koje su se najčešće koristile:

- mehanička snaga svih generatora je nepromijenjena tokom čitavog perioda koji se razmatra,
- sinkroni generatori se predstavljaju modelom s konstantnom elektromotornom silom iza prijelazne reaktancije,
- zanemaruje se prigušni moment,
- gibanje rotora sinkronih generatora promatra se preko odgovarajućeg kuta elektromotorne sile iza prijelazne reaktancije,
- potrošači se modeliraju konstantnim impedancijama (admitancijama).

Ove pretpostavke omogućuju da se model EES-a s više generatora za analizu prijelazne stabilnosti formira na sličan način kao i model EES-a s jednim generatorom. Takav model, iako pojednostavljen, sadrži sustave diferencijalnih i algebarskih jednadžbi, koji se istovremeno rješavaju primjenom općepoznatih numeričkih metoda za rješavanje sustava diferencijalnih jednadžbi (Taylorova metoda, Eulerova metoda, Metode Runge-Kutta,...).

Klasični pristup pri analizi prijelazne stabilnosti tijekom prve periode oscilacija sastoji se od određenih uobičajenih koraka) koji su prikazani na dijagramu toka (Slika 5.6).



Slika 5.6. Dijagram toka pri analizi prijelazne stabilnosti

U prvom koraku formira se nadomjesna shema sustava i izvrši proračun tokova snaga za stanje koje prethodi kvaru (poremećaju). Ovdje se radi o proračunu stacionarnog stanja. U drugom koraku na osnovi proračuna napona iz prvog koraka određuju se moduli i fazni kutovi elektromotornih sila iza tranzijentnih reaktancija generatora. Ako je poznat fazor napona na stezaljkama i-tog generatora \bar{U}_i , fazor tranzijentne EMS rotora \bar{E}'_{oi} se može izračunati korištenjem izraza:

$$\bar{E}'_{oi} = \bar{U}_i + jX'_{di} \cdot \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = E'_{oi} e^{j\delta_i} \quad (5.21)$$

gdje je:

- P_i - radna snaga na priključnim krajevima generatora (kW),
 Q_i - jalova snaga na priključnim krajevima generatora (kVAr).
 N_G - ukupni broj generatora u EES-u
 $i=1,2,\dots,N_G$

Pored jednadžbe (5.21) elektromotorna sila \bar{E}'_{oi} i početni kut δ_i mogu se izračunati i na drugi način. Modul elektromotorne sile \bar{E}'_{oi} može se odrediti pod pretpostavkom da je fazor napona \bar{U}_i privremeno u referentnoj osi:

$$E'_{oi} = \sqrt{\left(U_i + \frac{Q_i \cdot X'_{di}}{U_i} \right)^2 + \left(\frac{P_i \cdot X'_{di}}{U_i} \right)^2} \quad (5.22)$$

S obzirom da je kut između fazora elektromotorne sile \bar{E}'_{oi} i napona \bar{U}_i :

$$\delta_i^0 = \arctg \frac{\frac{P_i \cdot X'_{di}}{U_i}}{U_i + \frac{Q_i \cdot X'_{di}}{U_i}} \quad (5.23)$$

onda je početna vrijednost kuta elektromotorne sile \bar{E}'_{oi} , računato u odnosu na referentnu os sustava:

$$\delta_i = \delta_i^0 + \theta_i \quad (5.24)$$

gdje je θ_i kut fazora napona \bar{U}_i .

U trećem koraku formira se proširena matrica admitancija s uvedenim internim čvorovima generatora, gdje su između tih čvorova i čvorova mreže (na koje su povezani generatori) vezane tranzijentne reaktancije generatora. Primjenom Kronove redukcije eliminiraju se svi čvorovi osim čvorova iza tranzijentnih reaktancija (internih čvorova generatora). Ovakva redukcija matrice admitancija obavlja se kako u režimu trajanja kvara, tako i za stanje poslije isključenja kvara. Jasno je da se u nadomjesnoj shemi koja odgovara stanju kvara, mora na mjestu kvara nalaziti odgovarajuća admitancija (impedancija) koja reprezentira vrstu kvara. U četvrtom koraku podese se vrijeme na $t = 0$.

U petom koraku korištenjem izračunatih tranzijentnih elektromotornih sila rotora \bar{E}'_{oi} proračunavaju se električne snage P_{ei} pomoću sljedeće jednadžbe:

$$P_{ei} = E_{oi}'^2 \cdot G_{ii} + E_{oi}' \cdot \sum_{k=1}^{N_G} E_{ok}' \cdot [G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (5.25)$$

gdje su E_{oi}' i E_{ok}' moduli tranzijentnih EMS-a rotora pojedinih generatora.

Konduktancija i supscientancija, koje se nalaze u ovoj relaciji, uzimaju se iz reduciranih matrica admitancija. Da li će se koristiti matrica koja odgovara stanju kvara ili stanju poslije isključenja kvara, zavisi od režima u kojem se sustav nalazi u danom vremenskom trenutku. Prema tome, oznaku za snagu i-tog generatora P_{ei} ovdje treba uzeti kao opću oznaku, a koja

se može odnositi na snagu za vrijeme kvara kao i na snagu poslije isključenja kvara, što zavisi od konkretnog trenutka za koji se obavlja proračun.

U šestom koraku pomoću poznatih vrijednosti P_{ei} , δ_i , ω_i u internim čvorovima generatora u trenutku t , proračunavaju se vrijednosti kutova δ_i i brzina ω_i u trenutku $t + \Delta t$. Proračun se obavlja izračunavanjem odgovarajućih prirasta brzine i kutova odnosno rješavanjem sljedećih sustava diferencijalnih jednačbi:

$$\frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\omega_s}{2H \cdot S_n} \cdot (P_{mi} - P_{ei(t)}), \quad i = 1, 2, \dots, N_G, \quad (5.26)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_{i(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G. \quad (5.27)$$

U sedmom koraku koristeći nove vrijednosti kutova δ_i proračunavaju se snage P_{ei} u trenutku $t + \Delta t$. Ako je $t > T$ proces proračuna se zaustavlja. U suprotnom se vraća na šesti korak. Na ovaj način dobivaju se vremenske karakteristike kutova i brzina rotora sinkronih generatora. Od oblika ovih karakteristika može se zaključiti da li sustav po isključenju kvara ostaje stabilan ili prelazi u nestabilno stanje.

6. MJERE ZA POBOLJŠANJE PRIJELAZNE STABILNOSTI VIŠEGENERATORSKOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

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 sinkronizacijskog momenta,
- smanjenje momenta ubrzanja razvojem sustava za upravljanje mehaničkim snagama pogonskih strojeva.

6.1. 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 generatora što nadalje povećava sinkronizirajuću snagu. Tijekom prijelaznih poremećaja uzrokovanih kvarovima u prijenosnom sustavu 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 (projektiranu) vrijednost. Uzbudni sustavi s visokim inicijalnim odzivom i visokim stropnim naponima su u tom pogledu učinkovitiji. Maksimalni naponi su ograničeni izolacijom namota rotora generatora. Kod termo jedinica maksimalni naponi se najčešće ograničavaju na 2,5 do 3 puta a kod hidro jedinica na 1,8 do 2 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 u dosadašnjim analizama prijelazne stabilnosti.

6.2. 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 primijenjeni 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.

6.3. Brzi digitalni turbinski regulatori

Brzi digitalni turbinski regulatori sastoje se od procesnog računala (programibilnog logičkog kontrolera - PLC), senzorskog dijela (za mjerenje pozicije otvora turbine, brzine vrtnje i radne snage agregata) te izvršnog dijela (elektro-hidraulički servomotor). Regulator može raditi u sljedećim režimima rada: pokretanje agregata, zaustavljanje agregata, brzo zaustavljanje agregata, regulacija otvora turbine, regulacija frekvencije te regulacija radne snage. Odabir načina rada regulatora izvodi se ili preko vanjskih digitalnih ulaza ili automatski ovisno o uvjetima rada agregata i uvjetima u EES-u. Prva tri navedena načina rada su prijelazna stanja kroz koja regulator dovodi agregat do sinkronizacije ili u stanje mirovanja, a preostali načini rada su regulacijski koje odabire operater ili sam regulator ovisno o uvjetima rada agregata.

Prilikom rada brzog digitalnog turbinskog regulatora u režimu regulacije po snazi, referentna vrijednost otvora turbine je suma izlaza iz PID regulatora snage i bloka predupravljanja. Blok za predupravljanje izravno djeluje na PID regulator otvora turbine za brzo zatvaranje, koji djeluje na poticaj senzora koji reagiraju na ubrzavanje agregata. Ako iznos nagle promjene snage prekorači polovicu nazivne snage agregata, na poticaj senzora ubrzavanja, zaobilazi se postavljena statika i mrtva zona regulatora i izravno se djeluje na PID regulator otvora turbine i snaga turbine će se regulirati na nižu vrijednost. Svrha uvođenja bloka predupravljanja je u otvaranju turbine na vrijednost koja približno odgovara referentnoj snazi (vremenska konstanta djelovanja 0,1-0,2 s). Pri analizi prijelazne stabilnosti u radu višegeneratorskog EES-a osim sinkronizacijskog momenta potrebno je uzeti u razmatranje i utjecaj prigušnog momenta koristeći doprinos digitalnog turbinskog regulatora u prijelaznim režimima rada generatora. Dakle, korištenje brzih digitalnih turbinskih regulatora koji omogućuju forsiranje dinamike i brži odziv sustava regulacije je također jedna od bitnih mjera za poboljšanja prijelazne stabilnosti.

7. ZAKLJUČAK

U ovom je radu opisana problematika analize kutne stabilnosti pri malim i velikim poremećajima (prijelazna stabilnost). Većina programa je bazirana na klasičnom pristupu pri analizi kutne stabilnosti višegeneratorskog EES-a. Klasični pristup podrazumijeva određena zanemarenja kao što su pretpostavke da je mehanička snaga svih generatora nepromijenjena tokom čitavog perioda koji se razmatra, da se sinkroni generatori predstavljaju jednostavnim modelom s konstantnom elektromotornom silom iza prijelazne reaktancije te da se zanemaruju prigušni momenti. Uvedene pretpostavke donekle imaju smisla ako se analizira prijelazna stabilnost samo tijekom prve periode oscilacija.

Najnovije spoznaje pokazuju da je korištenje sustava s visokim inicijalnim odzivom, koji su opremljeni sa stabilizatorom EES-a, vrlo učinkovita metoda za poboljšanja ukupne stabilnosti sustava. Stoga je, za dulju vremensku analizu prijelazne stabilnosti u modernim sustavima, potrebno uzeti u obzir utjecaj automatskog regulatora napona i turbinskog regulatora na prijelaznu stabilnost EES-a. Uočava se potreba za detaljnijim matematičkim modelom sinkronog generatora, što rezultira u konačnici složenim matematičkim modelom za analizu prijelazne stabilnosti.

Elektromehaničke prijelazne pojave su mnogo sporije prijelazne pojave u usporedbi sa elektromagnetskim prijelaznim pojavama. Stoga, dugo vremena, programi za elektromagnetske prijelazne pojave i programi za elektromehaničke prijelazne pojave nisu bili ujedinjeni u program za zajedničku simulaciju. Zbog navedenih problema, kombinirana simulacija elektromagnetskih i elektromehaničkih prijelaznih pojava je oduvijek bila izazov, pa su razvijeni razni modeli koji kombiniraju elektromagnetske i elektromehaničke simulacije.

Klasičan pristup u analizi prijelazne stabilnosti višegeneratorskog EES-a nije pogodan za analizu modernih elektroenergetskih sustava. Zbog razvoja modernih uzbudnih i turbinskih regulacijskih sustava s relativno brzim vremenima odziva, potrebno je njihov utjecaj svakako uzeti u obzir. To u konačnici rezultira složenim matematičkim modelima, pa problematika objedinjavanja elektromagnetskih i elektromehaničkih prijelaznih pojava i dalje predstavlja problem odnosno daje mogućnost za razvijanje naprednih algoritama za analizu prijelazne stabilnosti u modernim elektroenergetskim sustavima.

LITERATURA

- [1] Rinaldi, S. M.; Peerenboom, J. P.; Kelly, T. K.: "Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies", *Control Systems Magazine, IEEE*, vol. 21, no. 6, p. 11, 2001.
- [2] Machowski, J.; Bialek, J. W.; R. Bumby, J. R.: "Power System Dynamics: stability and control", John Wiley and Sons, Ltd, 2008.
- [3] Dahl, O.G.C.: "Electric Power Circuits-Theory and Applications", McGraw-Hill, New York, 1938.
- [4] Crary, S. B.: "Power System Stability", John Wiley and Sons, Vols I, II, Inc., New York (1945, 1947).
- [5] Kimbark, E. W.: "Power System Stability", John Wiley and Sons, Vols I, II, III, Inc., New York, (1948, 1950, 1956), reprinted by IEEE, 1995.
- [6] Zdanov, P. S.: "Stability of electric power systems", Gosudarstvennoe Energeticeskoe Izdatelstvo, Moscow and Leningrad (in Russian), 1948.
- [7] Venikov, V. A.: "Electromechanical transient processes in electric power systems", Gosudarstvennoe Energeticeskoe Izdatelstvo, Moscow and Leningrad (in Russian), 1958.
- [8] Venikov, V. A.: "Transient electromechanical processes in electric power systems", Vyssaa Skola, Moscow (in Russian), 1978a.
- [9] Venikov, V. A.: "Transient Processes in Electric Power Systems", Mir, Moscow, 1978b.
- [10] Venikov, V. A.: "Transient electromechanical processes in electric power systems", Vyssaa Skola, Moscow (in Russian), 1985.
- [11] Venikov, V. A.: "Transient Phenomena in Electric Power Systems", Pergamon Press, Oxford, 1964.
- [12] Rūdenberg, R.: "Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungerscheinungen in Starkstromanlagen", Julius Springer, Berlin, 1923.
- [13] Rūdenberg, R.: "Transient Performance of Electric Power Systems", McGraw-Hill, New York, 1950.
- [14] Yu, Y. N.: "Electric Power Systems dynamics", New York, 1983.
- [15] Racz, L.Z; Bokay, B.: "Power System Stability", Kluwer Academic, 1988.
- [16] Kundur, P.: "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York, 1994.
- [17] Anderson, P.M.; Fouad, A.A.: "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, 2nd edn IEEE Press, 2003.
- [18] Arrillaga, J.; Arnold, C.P.; Harker, B.J.: "Computer Modelling of Electrical Power Systems", John Wiley and Sons, Ltd, 1983.

- [19] Arrillaga, J.; Arnold, C.P.: " Computer Analysis of Power Systems ", John Wiley and Sons, Ltd, 1990.
- [20] Ilić, M.; Zaborszky, J.: " Dynamics and Control of Large Electric Power Systems ", John Wiley and Sons, Inc., New York, 2000.
- [21] Saccomanno, F.: " Electric Power System Control: Analysis and Control ", Wiley–IEEE Press, 2003.
- [22] Pai, M.A.: " Power System Stability: Analysis by the direct method of Lyapunov ", North-Holland, Amsterdam, 1981.
- [23] Pai, M.A.: " Energy Function Analysis for Power System Stability ", Kluwer Academic 1989.
- [24] Fouad, A.A.; Vittal, V.: " Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method ", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [25] Pavella, M.; Murthy, P.G.: " Transient Stability of Power Systems. Theory and Practice ", John Wiley and Sons, Ltd, 1994.
- [26] Pavella, M.; Ernst, D.; Ruiz-Vega, D.: " Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control ", Kluwer Academic, 2000.
- [27] Dommel, H. V.: " Digital computer solution of electromagnetic transients in single-end multiphase networks", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 4, p. 388, 1969.
- [28] Elektromagnetic Transients Program (EMTP), Theory book, Bonneville Power Administrator (editor: H. W. Dommel), 1986.
- [29] Fankhauser, H.; Aneros, K.; Edris, A.-A.; Torseng, S.: " Advanced simulation techniques for the analysis of power system dynamics ", Computer Applications in Power, IEEE, vol. 3, no. 4, pp. 31-36, 1990.
- [30] Astic, J.; Bihain, A.; Jerosolimski, M.: " The mixed adams-bdf variable step size algorithm to simulate transient and long term phenomena in power systems", Power Systems, IEEE Transactions on., Vol. 9, No. 2, pp. 929-935, 1994.
- [31] Linnert, U.: " Neue Differenzenleitwertverfahren zur Simulation dynamischer Ausgleichsvorgänge mit grossen Schrittweiten " Archiv für Elektrotechnik, Vol. 76, pp. 101-110, 1992.
- [32] Henschel, S.: " Analysis of electromagnetic und electromechanical power system transients with dynamic phasors", Ph. D. dissertation, University of British Columbia, 1999.
- [33] Venkatasubramanian, V.: " Tools for dynamic analysis of the general large power system using time-varying phasors ", International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 16, No. 6 p. 365, 1994.
- [34] STRI, " SIMPSOW – Power System Simulation and Analysis Software, <http://www.stri.se>."
- [35] Sauer, P. W.; Pai, M. A.: Power System Dynamics and Stability, 1 st. ed. Prentice Hall, 1997.

- [36] Tasić, D.: "Analiza elektroenergetskih mreža i sustava ", Edicija Osnovni udžbenici, Elektronski fakultet, Niš, 2010.
- [37] Padiyar, K. R.: "Power System Dynamics - Stability and Control", BS Publications, 2008.
- [38] Ožegović, M.; Ožegović, K.: "Električne energetske mreže III ", FESB, Split, 1997.