

Dinamika i regulacija elektroenergetskog sustava

Prof.dr.sc. **Sejid Tešnjak**

Prof.dr.sc. **Igor Kuzle**

Kutna stabilnost sustava

Temeljni pojmovi

- Pouzdanost
- Sigurnost
- Stabilnost

Pouzdanost pogona elektroenergetskog sustava je temeljni cilj njegovog projektiranja.

Da bi bio pouzdan, sustav mora biti **siguran** većinu vremena.

Da bi bio siguran sustav mora biti **stabilan**.

Pouzdanost EES

- **Pouzdanost** elektroenergetskog sustava je vjerojatnost zadovoljavajućeg rada tijekom dugog vremena.
- **Pouzdanost opskrbe** – pojam koji uključuje neprekidnost isporuke i kvalitetu električne energije. Do prekida opskrbe neke skupine potrošača može doći zbog kvara na opremi u samom potrošačkom području. Uklanjanjem kvara, a i prije, uspostavlja se redovna opskrba električnom energijom kvarom pogođenog područja sustava.

Pouzdanost EES

- Detaljnim planiranjem gradnje mreže može se smanjiti vjerojatnost pojave raspada EES-a.
- Neki od načina su: povoljnije dimenzionirana prijenosna mreža (sa što više zamki, što više paralelnih prijenosnih veza), upotreba kvalitetnije elektroenergetske opreme, odgovarajuća zaštita od smetnji i kratkih spojeva, potrebne regulacijske naprave, te raspoloživost snage u elektranama, obzirom na zahtjeve potrošnje.
- Pouzdaniji rad sustava također uvjetuju i savjesno održavanje elemenata EES-a i pravodobna modernizacija sustava.
- Pouzdanost rada sustava se provjerava za neka unaprijed određena pogonska stanja i događaje. Time se pokušava osigurati rad sustava u takvim pogonskim stanjima.

Sigurnost EES

- **Sigurnost** elektroenergetskog sustava odnosi se na stupanj rizika u njegovoj sposobnosti da "preživi" neizbježne poremećaje bez prekida usluge korisnicima.
- Vezana je za otpornost (robustnost) sustava na neizbježne poremećaje.
- Kriterij n-1.

Stabilnost EES

- **Stabilnost** bilo kojeg sustava je sposobnost kontinuiranog nepromijenjenog rada nakon poremećaja.
- **Stabilnost EES-a** je sposobnost EES-a da uz dano početno stanje, ostane u ravnotežnom pogonskom stanju nakon izloženosti fizičkom poremećaju, s varijablama sustava u granicama koje osiguravaju integritet sustava.
- **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 u cilju izolacije ili namjernog isključenja elemenata radi očuvanja pogona preostalog dijela EES-a.

Stabilnost EES

- **Gubitak stabilnosti** - dešava se npr. nakon što pojedini generatori izgube sinkronizam, a pojedini se vodovi isključe iz mreže djelovanjem zaštite. Ako se pravodobno ne odvoji dio sustava odakle se poremećaj počeo širiti, dolazi do raspada sustava ili, ako sustav ostane djelomično u pogonu, do nezadovoljavajuće kvalitete pogona u dijelu sustava koji radi.
- **Raspad EES-a** - posljedica nestabilnosti sustava u nekom trenutku. Može potrajati i do nekoliko desetaka sati. Uzrokuje velike gubitke u nacionalnoj privredi koji katkad mogu biti i veći od posljedica elementarnih nepogoda.

Pojave nestabilnosti u EES-u

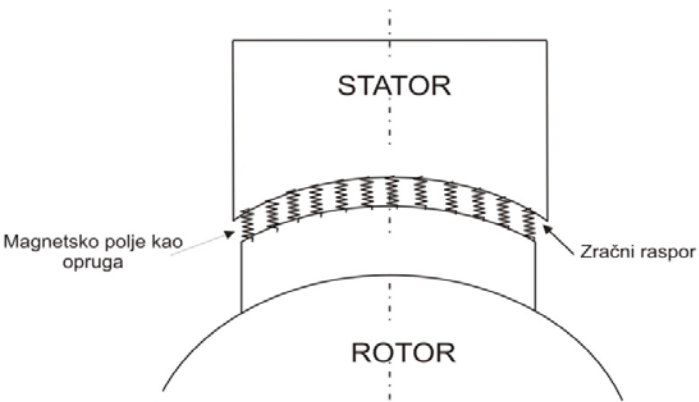
- Osim problema ograničenosti prijenosa javili su se i neki novi problemi.
- Veličina sustava je glavni problem stabilnosti. Veliki sustavi su podložni velikoj raznolikosti pogonskih stanja, ovisno o veličini opterećenja i raspoloživosti snage u elektranama, te o raznolikosti poremećaja (kratki spojevi, ispadi opterećenja, generatora, prijenosnih vodova)
- Prijelazne pojave u sustavu mogu izazvati preraspodjelu snage po vodovima. Preraspodjela tokova snaga dovodi do prekoračenja propusne moći prijenosnih vodova, što dovodi do njihovog isključenja.
- Pojavama nestabilnosti pogoduju i nepravilna rukovanja opremom.

Podjela stabilnosti u EES-u

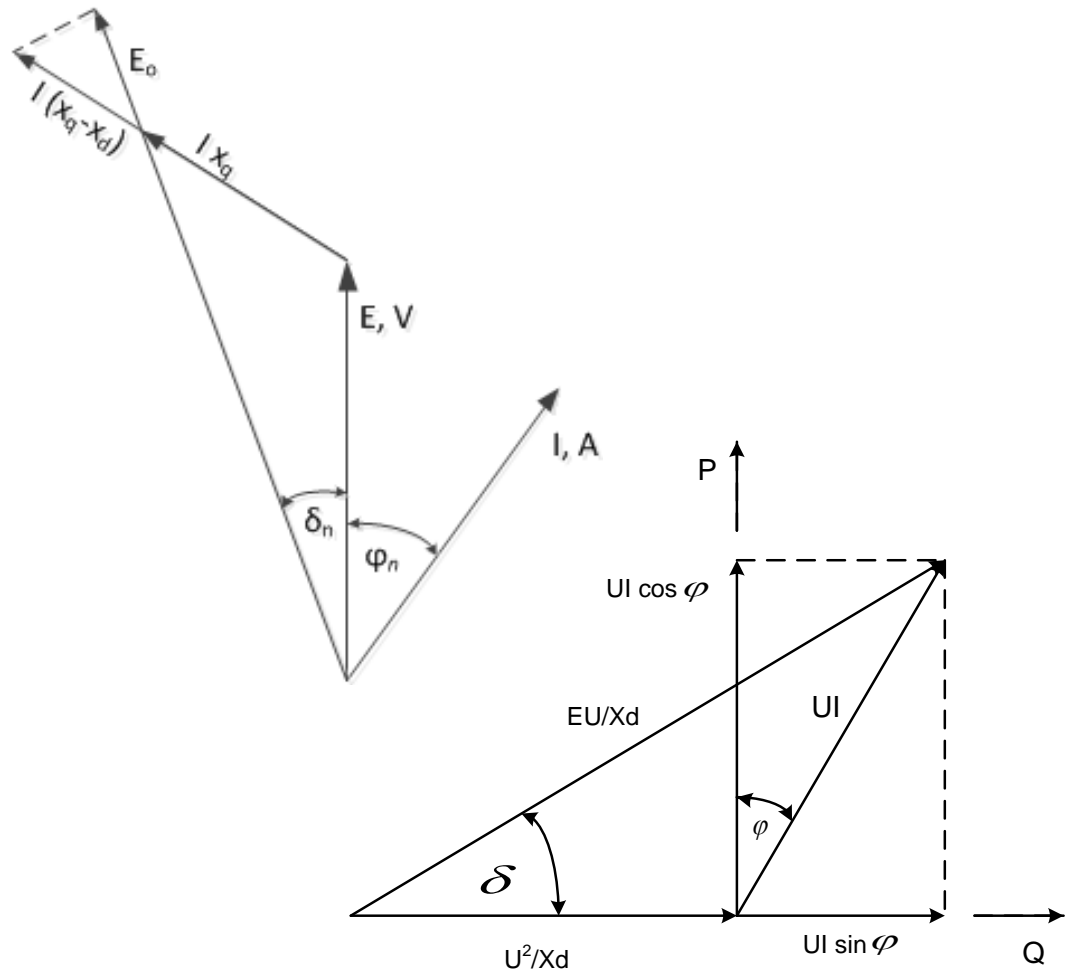
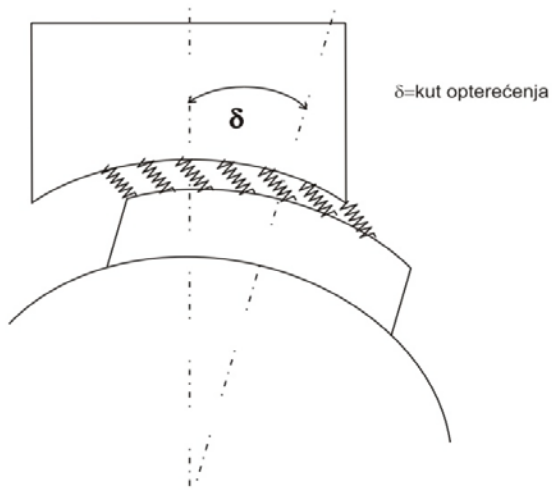
- **Kutna stabilnost** ili stabilnost kuta opterećenja (kratkotrajna)
 - nemogućnost održavanja sinkronizma nakon velikih ili malih poremećaja
- Frekvencijska stabilnost (kratkotrajna i dugotrajna)
 - nemogućnost EES-a da održi frekvenciju unutar propisanih granica
- Naponska stabilnost (kratkotrajna i dugotrajna)
 - Nemogućnost sustava da održava napone u propisanim granicama u svim čvorištima sustava. Posljedica je poremećaja (povećanja potrošnje ili promjene stanja sustava) koji uzrokuju progresivno i nekontrolirano smanjenje napona.

Kut opterećenja

PRAZNI HOD



OPTEREĆENJE



Definicija kutne stabilnosti

- **Kutna stabilnost** je sposobnost sustava da održi sinkrone strojeve u sinkronom radu nakon poremećaja.
- Ovisi o sposobnosti održavanja/povratka ravnoteže između električnog i mehaničkog momenta svakog sinkronog stroja u sustavu.
- Poremećaji uzrokuju neravnotežu tih dvaju momenata, što rezultira ubrzanjem ili usporenjem rotora agregata.
- Promjena električnog momenta može se podijeliti na dvije komponente jednu u fazi s poremećajem kuta rotora (sinkronizirajuća komponenta) i drugu u fazi s promjenom brzine rotora (prigušna komponenta):

$$\Delta M_e = M_s \Delta \delta + M_D \Delta \omega$$

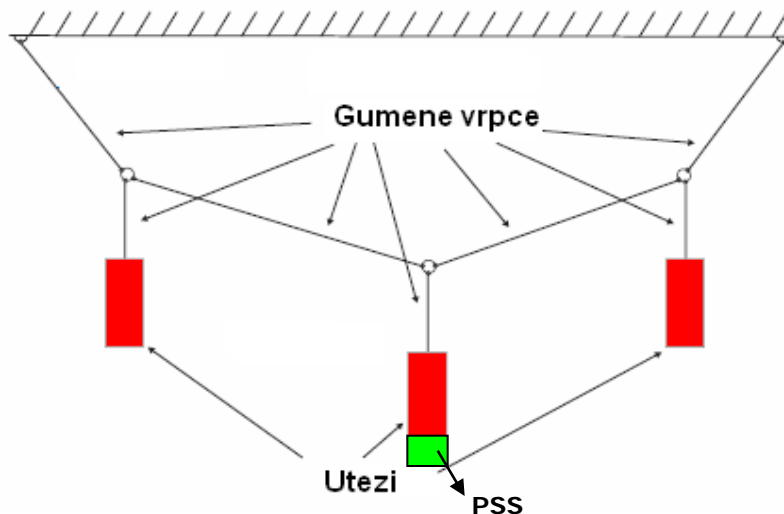
- Stabilnost sustava ovisi o postojanju obje ove komponente.

Kutna stabilnost

- Narušena kutna stabilnost:
 - neoscilatorna (aperiodički porast kuta rotora uslijed nedostatka sinkronizirajuće komponente momenta) i oscilatorna nestabilnost (posljedica nedovoljne prigušne komponente momenta)
- Problem elektromehaničkih oscilacija:
 - sinkroni stroj priključen na mrežu ima svojstvo titrajnog sustava u kojem energija oscilira između dva skladišta različitih vrsta energije. Skladište električne energije čini kruta mreža, a mehaničke rotor agregata.

Kutna stabilnost

- EES se može predstaviti kao mreža utega međusobno povezanih gumenim trakama:
 - Utezi → generatori
 - Gumene trake → prijenosni vodovi, (reaktancija vodova)
 - Poremećaji → kvar prijenosnog voda, ispad ili uključenje potrošača ili proizvođača električne energije, promjena momenta turbine ili referentne vrijednosti napona generatora



nedostatak prigušnog momenta → **oscilacije**
 nedostatak sinkronizacijskog momenta → **porast kuta** → ispad iz sinkronizma
 ugradnja brzih AVR → povećanje sinkronizacijskog i smanjenje prigušnog momenta

Kutna stabilnost

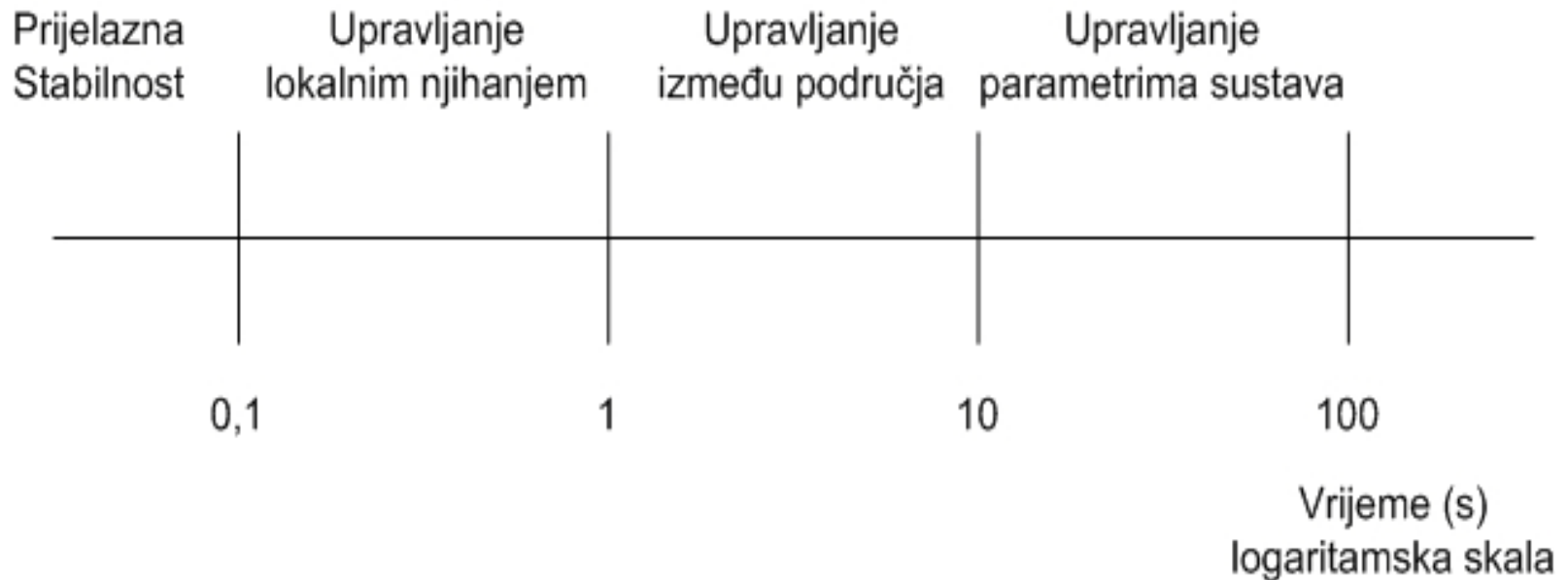
- Problem stabilnosti prijelaznog pogona (promjena voznog reda) - neuravnoteženost između proizvedene snage u elektranama i opterećenja
- Neravnoteža između proizvodnje i potrošnje uzrokuje pojavu njihanja rotora, a za daljnju posljedicu ima pojavu oscilacija u tokovima snaga prijenosne mreže.
- Neki elektroenergetski sustavi podliježu stvaranju pojava spontanih oscilacija (oscilacije, koje se izazvane malim poremećajima, trajno se održavaju)
- Oscilacije pojedinog generatora:
 - slučaj kada oscilira jedan ili skupina generatora obzirom na preostali dio sustava (krutu mrežu).
 - Ove oscilacije su vidljive s promjenom kuta opterećenja generatora, brzine vrtnje ili s lokaliziranim oscilacijama

Kutna stabilnost

- Oscilacije više strojeva - dešavaju se u slučaju kada su VN vodovima spojeni razni EES-i ili dijelovi istog EES-a. Tada generatori, osim što osciliraju jedan u odnosu na drugi, oscilira i jedna skupina generatora u odnosu na druge. To dovodi do pojave njihavanja snaga u spojnim vodovima.
 - Interkonekcijski (spojni) vodovi - vodovi koji spajaju pojedine veće skupine sinkronih generatora na međusobno razdvojenim površinama.
 - Oscilacije interkonekcijskih vodova - iako se mogu tolerirati u nekim granicama obzirom na njihovu amplitudu, nakon ispada spojnih vodova može doći do nestabilnosti u pojedinim EES-ima koji su bili spojeni međusobno preko interkonekcijskih vodova.
 - Uzroci pojava oscilacija interkonekcijskih vodova se kriju u opterećenjima generatora, veličini opterećenja, ispadima u sustavu, itd.

Kutna stabilnost

- Veća vjerojatnost pojave spontanih oscilacija postoji kada su EES-i rasprostranjeni na velike površine zbog vjerojatnije longitudinalne konfiguracije mreže, ili zbijene skupine elektrana povezanih međusobno slabim prijenosnim vezama.



Klasična teorija stabilnosti

- Nastala početkom tridesetih godina, kao odgovor na sve češće pojave nestabilnosti u dvadesetima. Velik problem tada su predstavljale ograničenosti prijenosnog sustava.
- Temelji se na promatranju dvaju karakterističnih stanja:
 - Kutna stabilnost pri malim poremećajima (neoscilatorna ili oscilatorna)
 - Odnosi se na ispitivanje stabilnosti nekog ustaljenog pogonskog stanja, uz uvažavanje malih promjena opterećenja što se dešavaju kontinuirano tijekom rada EES-a
 - Prijelazna stabilnost
 - Odnosi se na istraživanje vladanja sustava u kratkom razdoblju pojave elektromehaničkih oscilacija što ih izazovu nagle i velike promjene pogonskog stanja u sustavu

Klasična teorija stabilnosti

- Utvrđivanje stabilnosti provodi se na temelju kriterija jednakih površina ili, točnije, rješavanjem diferencijalnih jednadžbi njihovanja, metodom korak po korak (step-by-step)
- Klasična teorija stabilnosti bila je oslonac praksi dugo vremena, a dobrim djelom je to još i danas.

Kutna stabilnost pri malim poremećajima

- Poremećaji dovoljno mali da je moguća linearizacija jednačbi sustava matematičkog modela EES-a
- Znatno ovisi o početnom stanju sustava, značajki prijenosnog sustava, regulacije uzbude sinkronog generatora
- Problem ove stabilnosti obično se očituje u oscilacijama čija se amplituda povećava zbog **nedovoljnog prigušnog momenta**
- Vremenski period promatranja 10-20 s

Kutna stabilnost pri malim poremećajima

Problem stabilnosti pri malim poremećajima određuje na temelju kriterija sinkronizirajućih snaga:

$$P_s = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} > 0 \qquad \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} < 0$$

U najjednostavnijem pretpostavljenom sustavu s dva generatora gubitak sinkronizma će se desiti ako se pokuša raditi s kutnim pomakom između rotora strojeva od 90° el.

U suvremenim sustavima teško je odrediti kutnu granicu nestabilnosti. U velikim sustavima s jako razmaknutim strojevima, ta granica može biti prilično iznad 90° el., dok se u nekim slučajevima, ovisno o razmješčaju opterećenja u sustavu i njegovim značajkama, nestabilnost javlja pri manjim kutovima.

Kutna stabilnost pri malim poremećajima

U praksi je malo vjerojatna ova pojava nestabilnosti, jer, ako i dođe do pojave kutne nestabilnosti, dispečer to na vrijeme primjećuje na temelju postupnih promjena nekih parametara stanja (opadanje napona na sabirnicama), pa pravodobno reagira i tako se izbjegne nestabilnost u sustavu.

Prijelazna stabilnost

- Stabilnost prilikom pojave velikih poremećaja uslijed kojih se javlja velika kutna razlika među sinkronim strojevima kojoj doprinosi i izrazita nelinearnost krivulje snaga-kut
- Nastaje uslijed **nedovoljnog sinkronizirajućeg momenta**
- Ovisi o početnom stanju i o intenzitetu nastalog poremećaja
- Odnosi se na prvi period njihaja
- Vremenski period promatranja obično 3-5 s, ali može biti i do 10 s u vrlo velikim sustavima s oscilacijama na slabim poveznim vodovima

Prijelazna stabilnost

- Bavi se brzim i naglim promjenama opterećenja
- Najčešće se radi o kratkom spoju, ispadu neke veće proizvodne jedinice ili potrošača ili ispadu važnijih vodova
- Tijekom velikih poremećaja uslijed neravnoteže snaga između sustava dolazi do prijenosa energije između generatora i njihanja rotora
- Što je veliki poremećaj? Ovisi relativno o veličini sustava, npr. za hrvatski sustav bi to bio ispad jednog bloka TE Sisak (210 MW)

Prijelazna stabilnost

- Studije prijelazne stabilnosti EES-a provode se na temelju praćenja velikih poremećaja, rješavanjem sustava algebarskih jednačbi kojima se opisuju električne prilike u mreži, te rješavanjem niza diferencijalnih jednačbi koje opisuju dinamičko vladanje sinkronih strojeva i njihovih regulacijskih naprava.
- Broj algebarskih jednačbi uglavnom ovisan o veličini elektroenergetskog sustava, dok je broj diferencijalnih jednačbi s jedne strane funkcija veličine sustava, a s druge pojedinosti što su obuhvaćene pri modeliranju elemenata sustava.
- Točniji model zahtijeva veći broj diferencijalnih jednačbi.

Prijelazna stabilnost

- Zadaća današnjih studija stabilnosti je zato uobličena i razvojem numeričkih metoda računanja diferencijalnih jednadžbi, kako bi se optimiziralo vrijeme računanja u odnosu na zahtjeve točnosti modela EES-a, a sve sa svrhom očuvanja stabilnosti u istom.
- Vrlo važno je raspolagati i točnim podacima elementima u sustavu, posebice generatora, jer nam oni često mogu dati konkretnije podatke od matematičkog modela.
- Utjecaj subtrazijentnog perioda na elektromehaničku dinamiku često se zanemaruje što omogućava korištenje klasičnog modela generatora
- Pretpostavlja se da se sustav prije nastupanja kvara nalazi u stabilnom stanju

Najvažniji parametri generatora

Matematički modeli sedmog i petog reda sinkronog generatora kojima su obuhvaćeni učinci triju statorskkih namota, rotorskog uzbuđnog namota i prigušnog namota sadrže sljedeće parametre najčešće dobivene od proizvođača stroja:

- x_d, x_q - sinkrona reaktancija u d-osi, odnosno u q-osi
- x'_d - prijelazna reaktancija u d-osi
- x'_q - prijelazna reaktancija u q-osi
- x''_d, x''_q - početna reaktancija u d-osi, u q-osi
- T'_{d0} - početna vremenska konstanta p.h. u d-osi
- T''_d - početna vremenska konstanta k.s. u d-osi
- T''_{q0} - početna vremenska konstanta p.h. u q-osi
- R_a - otpor statorskog namota
- H - konstanta tromosti rotirajućih masa

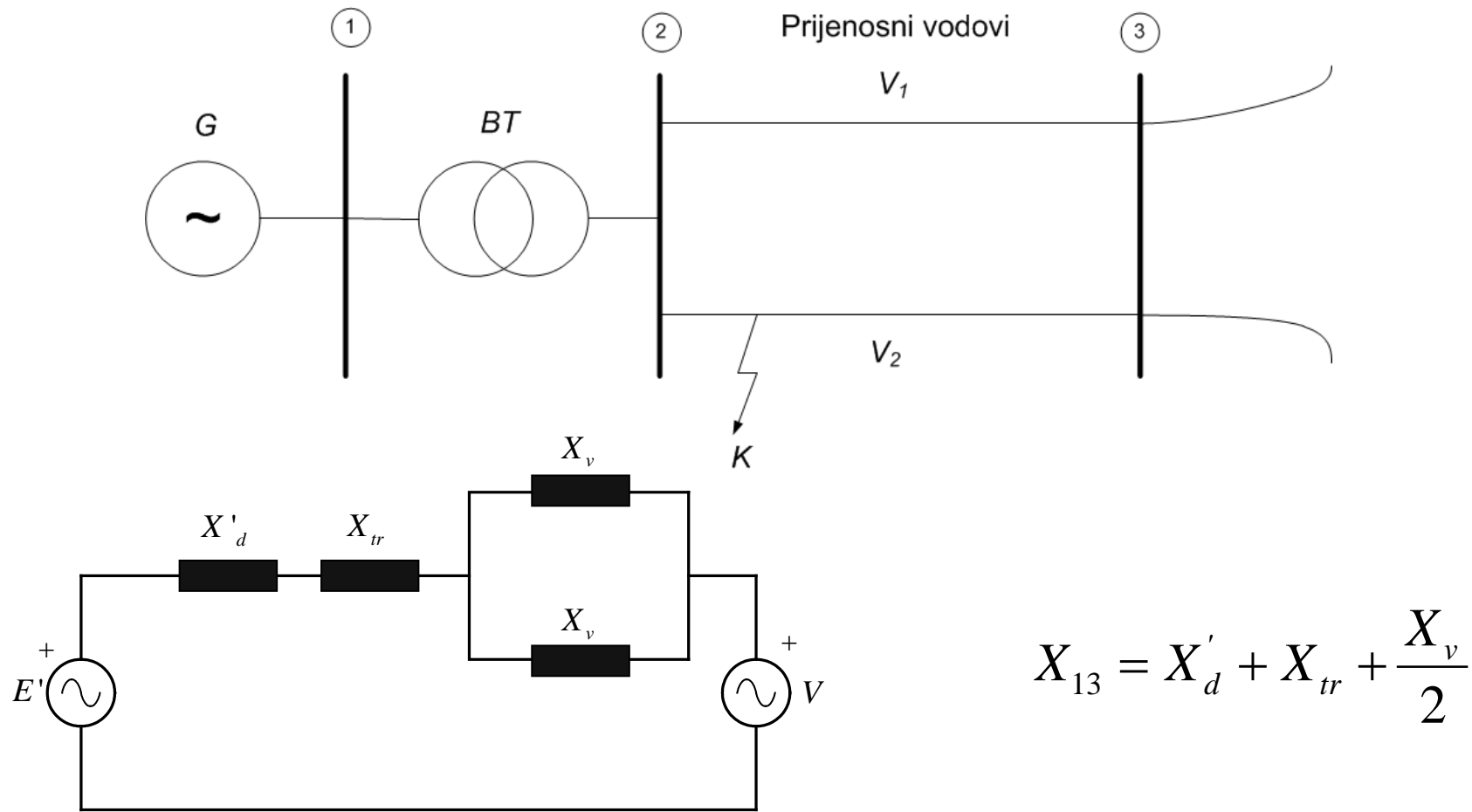
Proračuni

- Vrlo važna stavka prilikom studija prijelazne stabilnosti je i modeliranje opterećenja. Najčešće modeliranje konstantnog opterećenja je pregruba pretpostavka za analizu stabilnosti današnjih EES-a.
- U blizini granice prijelazne stabilnosti karakter prijelazne pojave može se bitno promijeniti zbog pogrešaka matematičkog modela, ali i zbog netočnosti parametara. Posljedice može biti da se stanje koje je na temelju proračuna proglašeno stabilnim, u stvarnosti pokaže nestabilnim, i suprotno
- U tom slučaju rezultate treba prikazati s površinama koje ograničavaju ekstremne krivulje njihanja

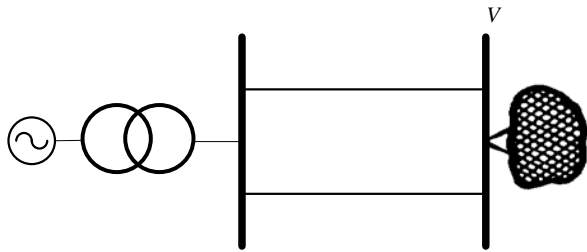
Utjecaj kratkog spoja



Metoda jednakih površina



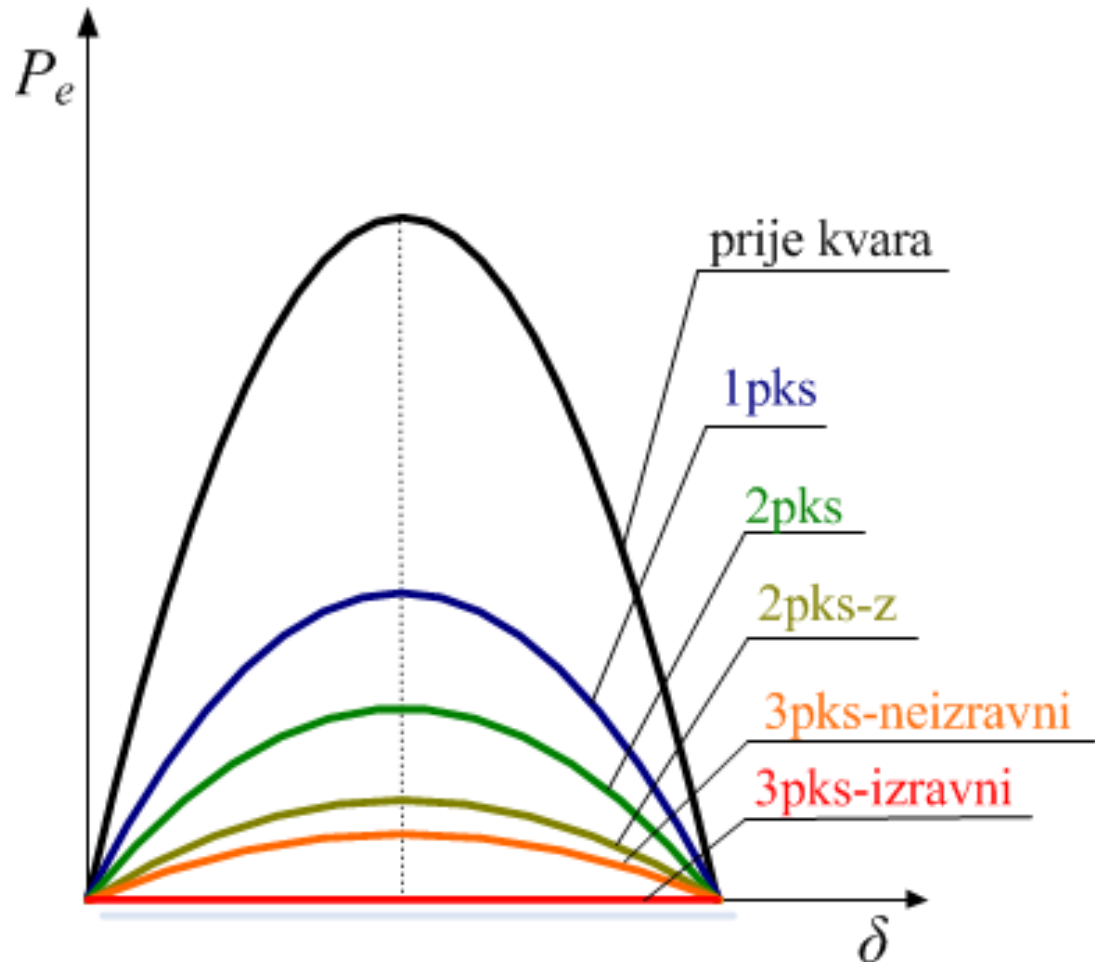
Utjecaj pojedinih vrsta kratkoga spoja na stabilnost



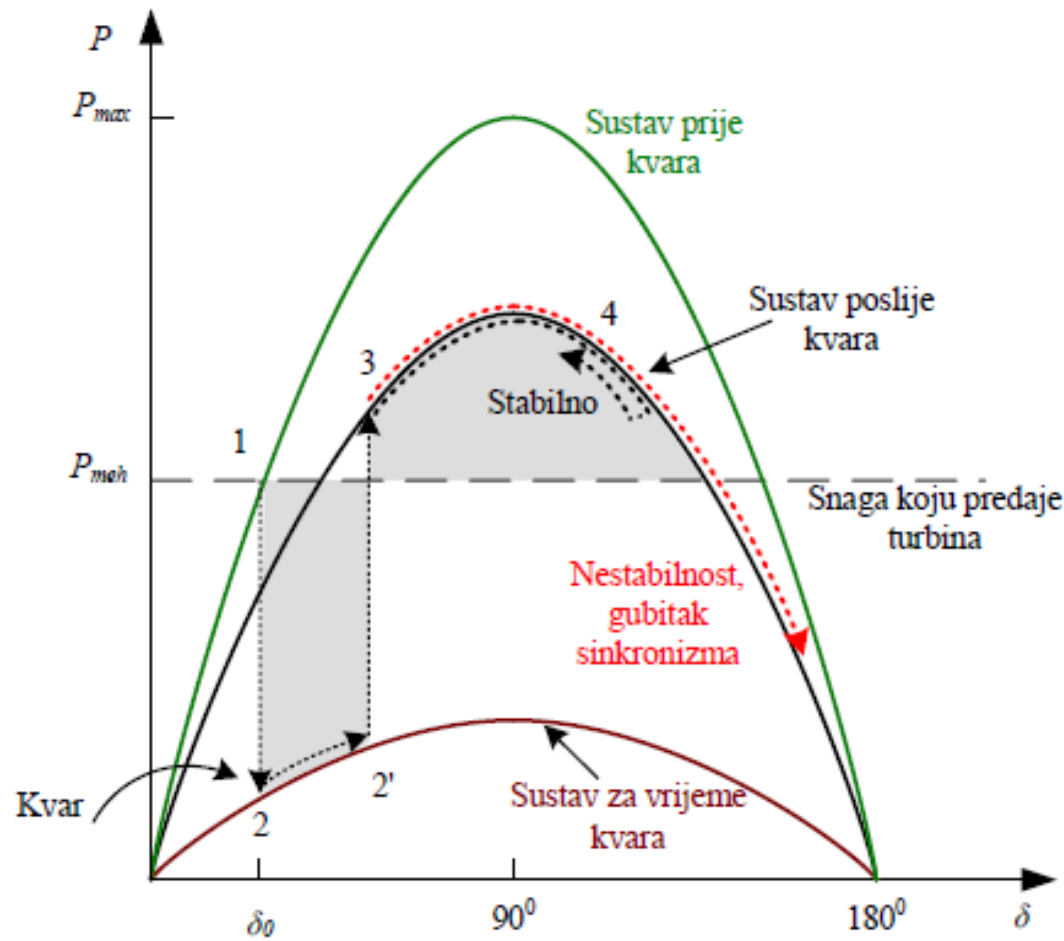
$$P_e(\delta) = \frac{E'V}{X_{13}} \sin \delta$$

Granica stabilnosti za kut 90° kada je sinkronizirajuća snaga jednaka nuli.

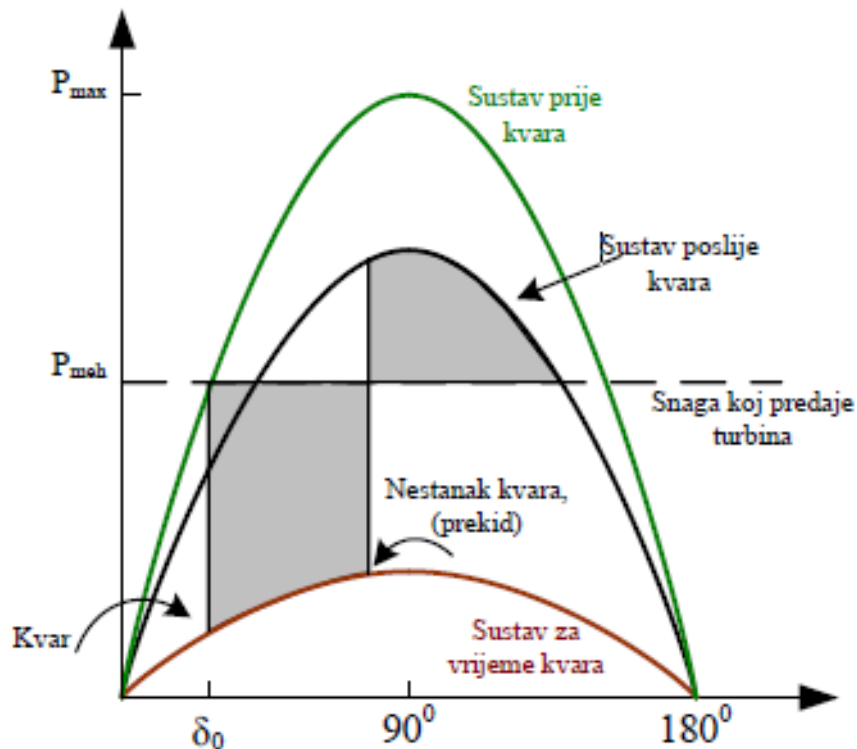
$$P_s = \frac{dP_e}{d\delta} = 0$$



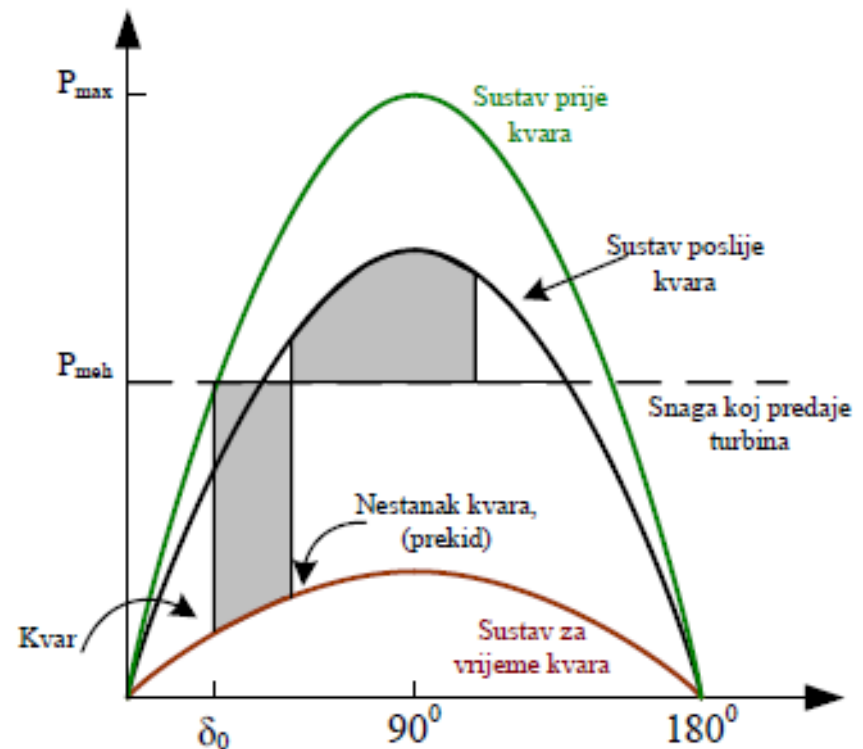
Krivulja opterećenja sinkronog generatora



Utjecaj vremena otklanjanja kvara na prijelaznu stabilnost



(a) Predugo vrijeme otklanjanja kvara



(b) Kratko vrijeme otklanjanja kvara

Ekvivalentna reaktancija

Postoje tri stanja koja prate poremećaj u sustavu i isto tako tri različite vrijednosti ekvivalentne reaktancije:

1) Stanje prije kvara

$$x'_d = x'_{dPRE}$$

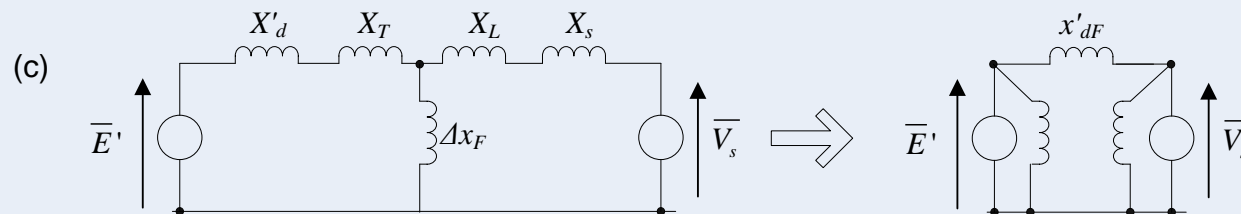
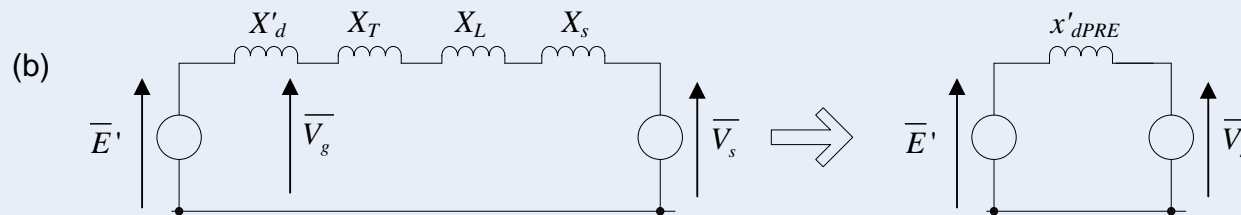
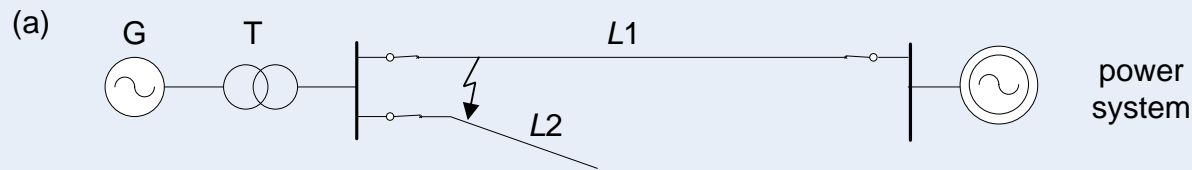
2) Stanje tijekom kvara

$$x'_d = x'_{dF}$$

3) Stanje nakon kvara

$$x'_d = x'_{dPOST}$$

Impedancija na mjestu kvara



Kvar koji je uklonjen bez promjene impedancije ekvivalentne mreže

Reaktancija na mjestu kvara

Ekvivalentna reaktancija prije kvara cijele prijenosne linije x'_{dPRE} je :

$$x'_{dPRE} = X'_d + X_T + X_L + X_s$$

Vrijednosti paralelno vezane reaktancije koje predstavljaju različite tipove kvara :

Tip kvara	Tropolni (3pks)	Dvopolni sa zemljom (2pks sa zemljom)	Dvopolni (2pks)	Jednopolni (1pks)
Δx_F	0	$\frac{X_2 X_0}{X_2 + X_0}$	X_2	$X_2 + X_0$

Reaktancija na mjestu kvara

Koristeći transformaciju zvijezda-trokut mreža se može transformirati tako da su naponi E' i V_s izravno spojeni na ekvivalentnu reaktanciju kvara :

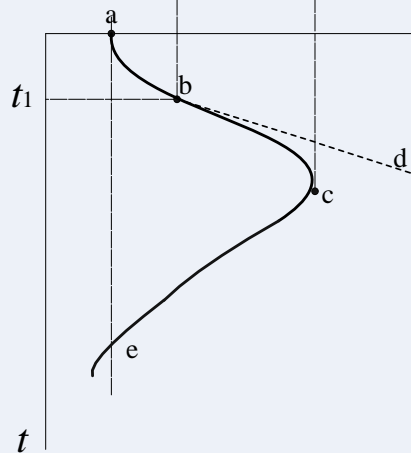
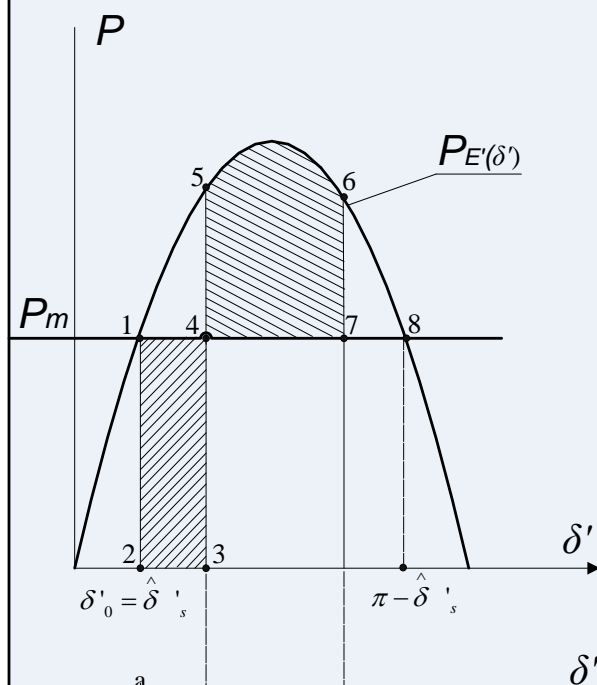
$$x'_{dF} = X'_d + X_T + X_L + X_s + \frac{(X'_d + X_T)(X_L + X_s)}{\Delta x_F}$$

Kada je kvar otklonjen otvaranjem prekidača na vodu L2 , ekvivalentni strujni krug je isti kao u razdoblju prije kvara tj. vrijedi $X'_{dPOST} = X'_{dPRE}$

Tropolni kratki spoj

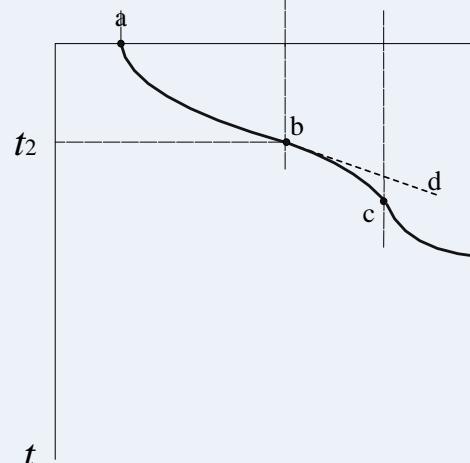
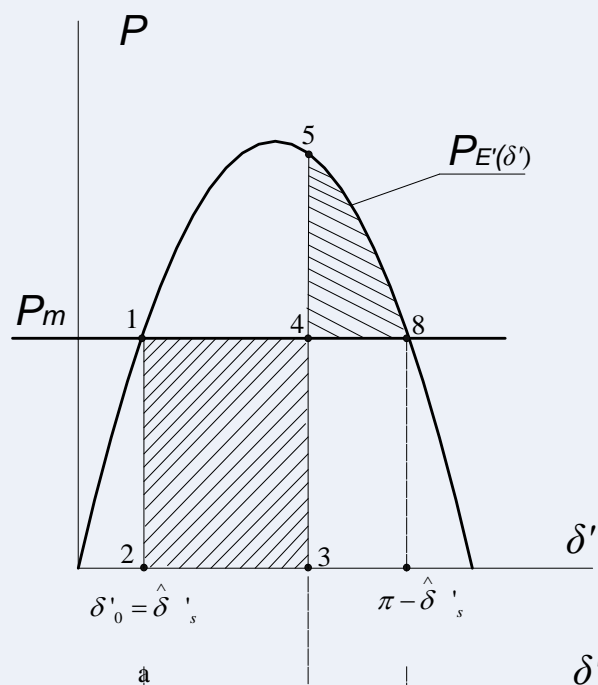
- Korištenje kriterija jednakih površina za analizu utjecaja tropolnog kratkog spoja na stabilnost sustava
- Mehanička snaga turbine P_m se smatra konstantnom

$$\Delta x_F = 0 \rightarrow x'_{dF} = \infty$$
- Razmjena snage između generatora i sustava potpuno je blokirana kvarom
- Struja kratkog spoja je čisto induktivna



Površina (4-5-6-7)=Površina (1-2-3-4)

(a)



Površina (1-2-3-4)>Površina (4-5-8)

(b)

Područja
ubrzavanja i
usporavanja
rotora:

a) Vrijeme
eliminacije
kratkog spoja
kratko-

**STABILNO
STANJE**

b) Vrijeme
eliminacije
kratkog spoja
dugo-

**NESTABILNO
STANJE**

$$P_a = P_m - P_E$$

Granica prijelazne stabilnosti

Definirana je granica prijelazne stabilnosti :

$$K_{površine} = \frac{površina(6-7-8)}{površina(4-5-8)}$$

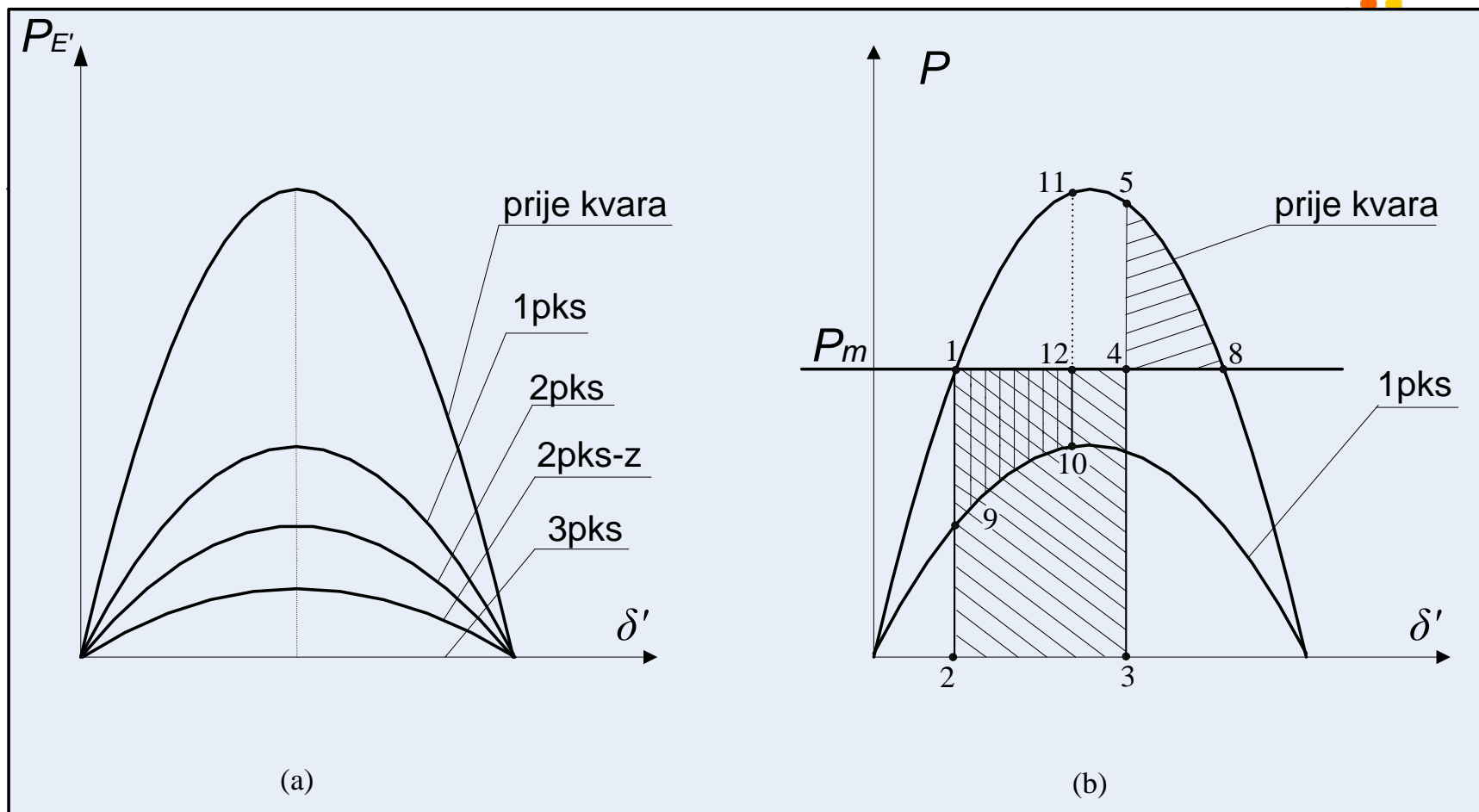
Najduže vrijeme za koje vrijedi da će generator još uvijek ostati u sinkronizmu naziva se kritično vrijeme eliminacije kvara

Relativna razlika između kritičnog i stvarnog vremena eliminacije kvara se koristi za procjenu granice prijelazne stabilnosti

$$K_{time} = \frac{t_{cr} - t_f}{t_{cr}}$$

Nesimetrični kratki spojevi

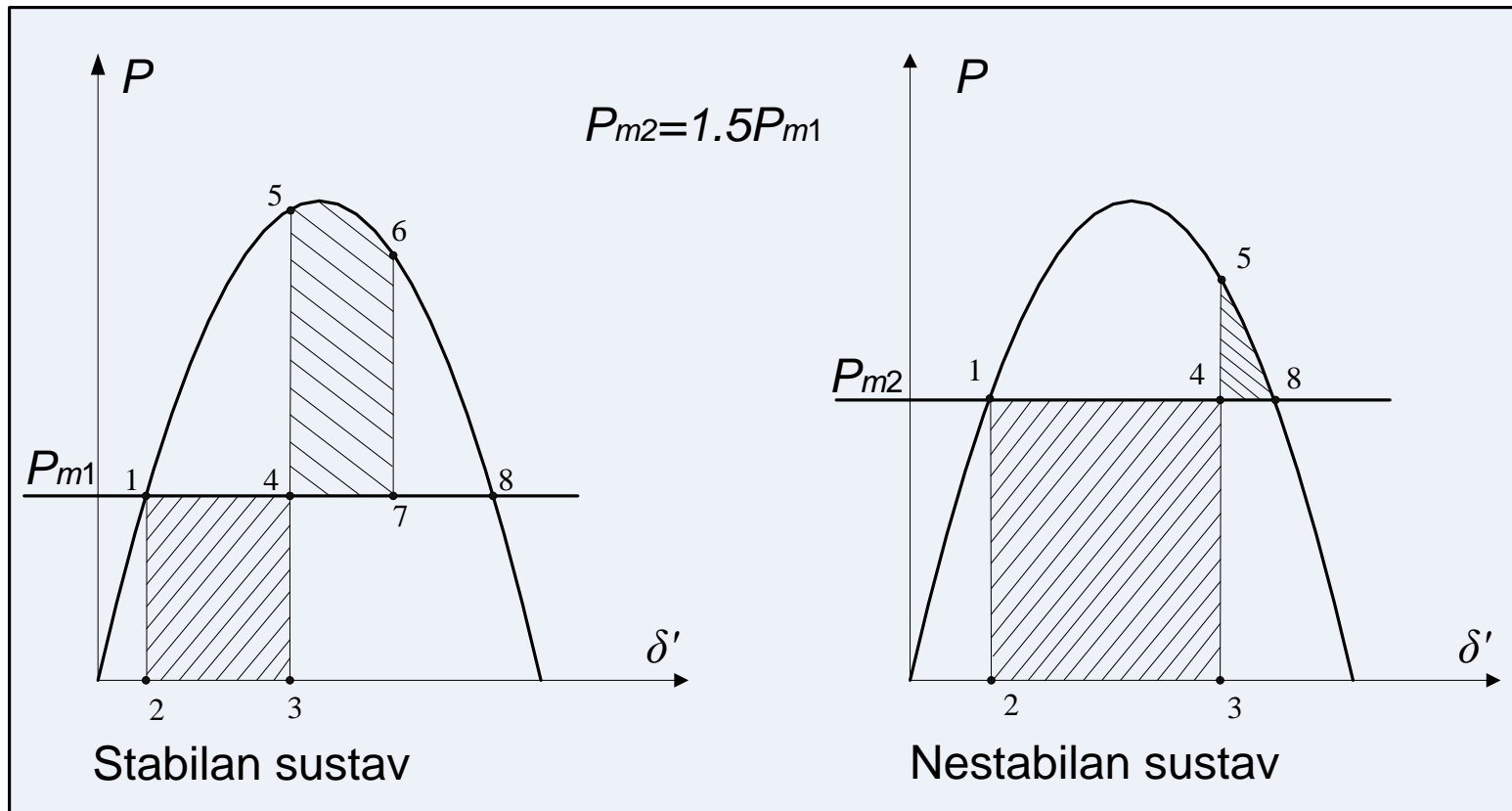
- Barem jedna od faza ostaje zdrava i omogućava prijenos neke snage u sustav
- Ekvivalentna reaktancija koja predstavlja kvar x'_{dF} ne raste do beskonačnosti
- Povećanje reaktancije je obrnuto proporcionalno Δx_F i ovisi o tipu kvara
- Utjecaj nesimetričnog kratkog spoja na stabilnost istražena je na primjeru jednopolnog kratkog spoja
- Kritično vrijeme eliminacije kvara je dulje za jednopolni kratki spoj u odnosu na trolepolni



Utjecaj nesimetričnih kratkih spojeva:

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

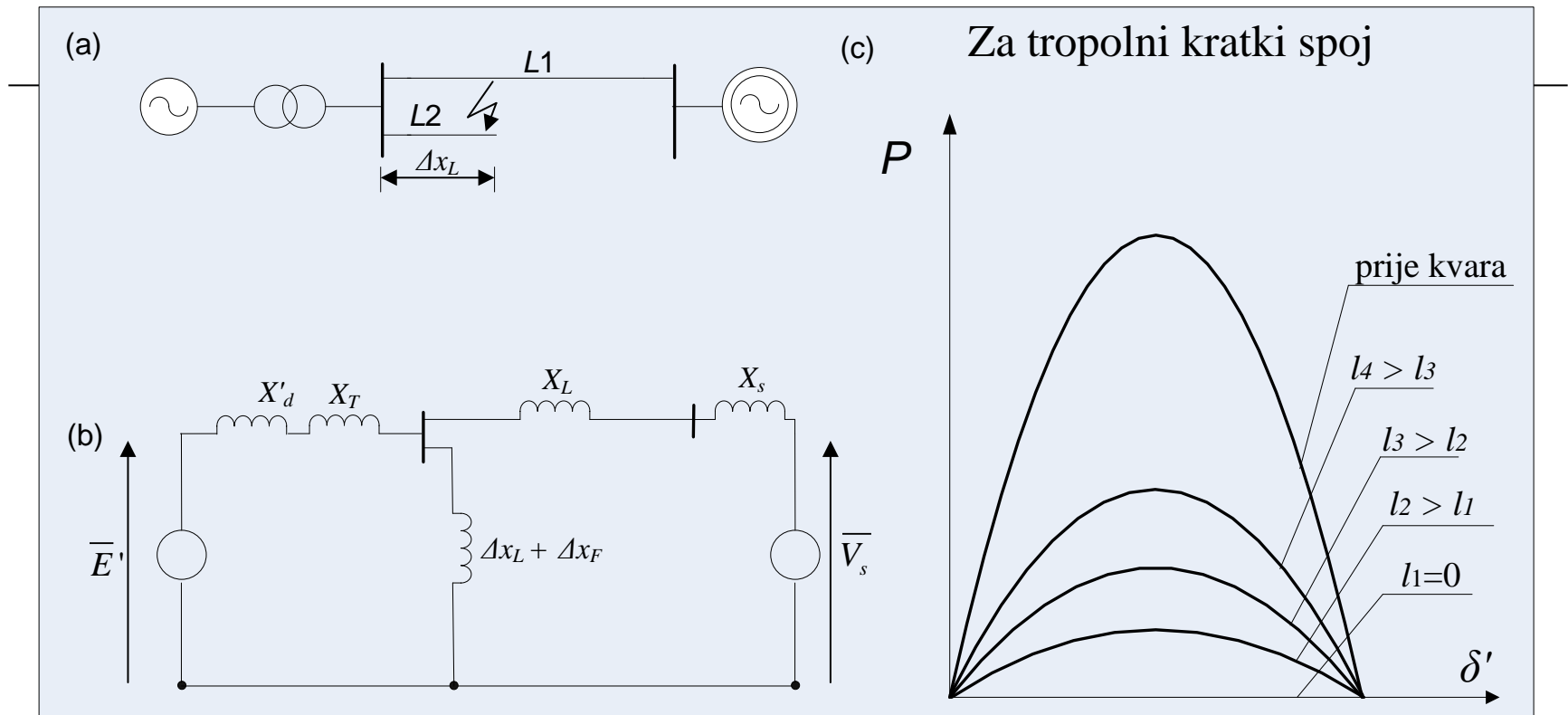
Utjecaj opterećenja prije nastanka kratkog spoja



Što je opterećenje generatora prije nastanka kvara veće kritično vrijeme za eliminaciju kvara je kraće

Utjecaj udaljenosti mjesta kvara

- Do sada je bilo pretpostavljeno da je kvar nastao blizu sabirnica generatora
- Ako se mjesto nastanka kvara na vodu nalazi na nekoj udaljenosti od sabirnica, impedancija voda u kvaru Δx_L je proporcionalna udaljenosti mjesta kvara i reaktanciji po jedinici duljine u per-unit
- Što je udaljenost mjesta nastanka kratkog spoja veća kratki spoj je manje snažan i vrijeme eliminacije kvara može biti dulje

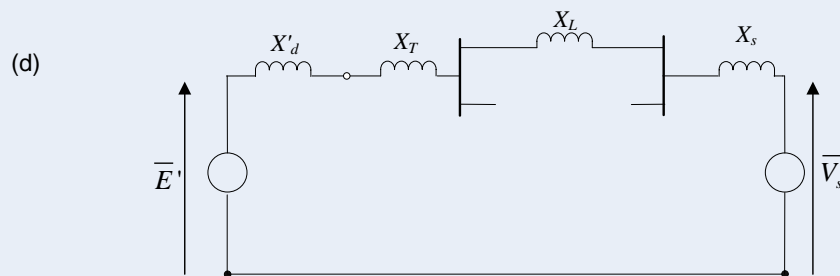
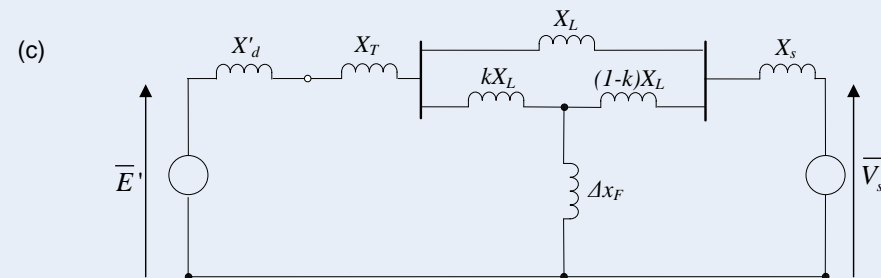
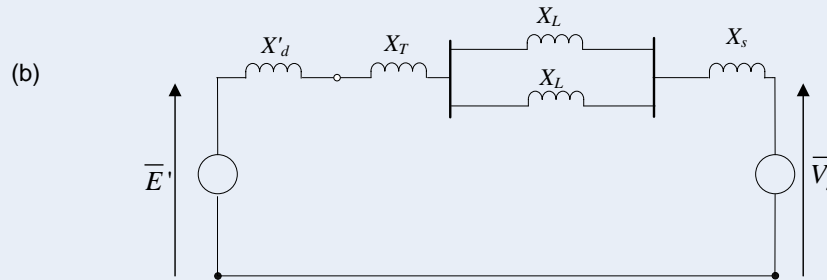
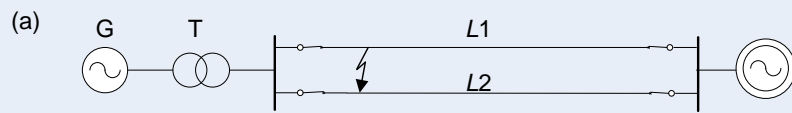


U slučaju nesimetričnih kratkih spojeva veličina karakteristike snaga-
kut raste u odnosu na trofazni kratki spoj

Udaljeni jednofazni kratki spoj može imati jako malen utjecaj na
generator

Kratki spoj koji je eliminiran s/bez APU-a

- Većina kvarova koji se dogode na prijenosnim vodovima su prolaznog karaktera
- Vod koji je bio u kvaru se može ponovno uklopiti nakon određenog vremena koje je potrebno da bi se potpuno ugasio luk između kontakata prekidača
- Ovaj proces je poznat pod pojmom **automatski ponovni uklop** ili **APU**



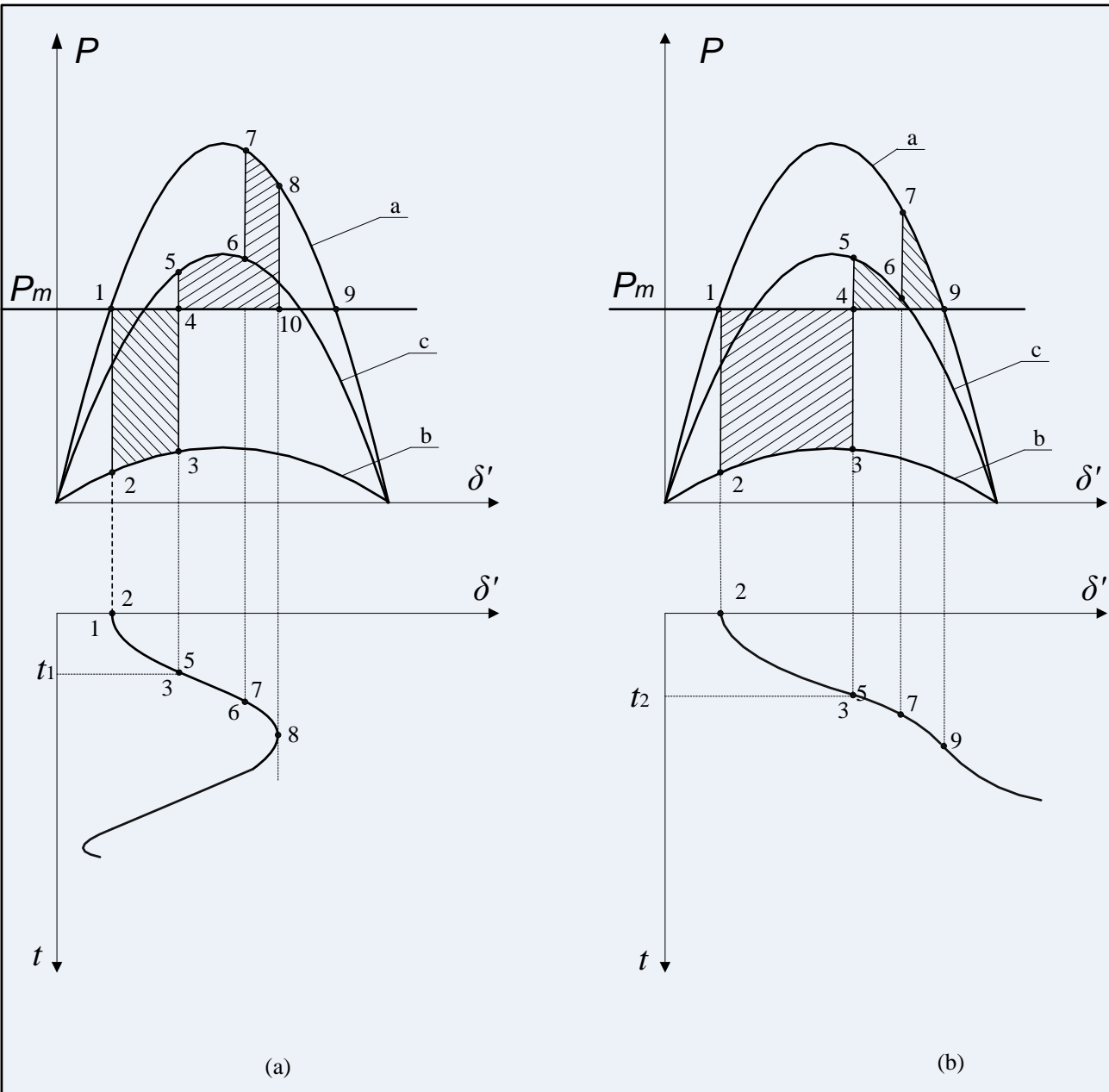
Niz događaja za uspješan APU:

Oba voda ispravno rade (prije nastanka kvara) - slika b)

Kratki spoj - slika c)

Ispad voda koji je bio u kvaru - slika d)

Vod koji je bio u kvaru je automatski ponovno uklopljen i oba voda ispravno rade



Uspješni APU

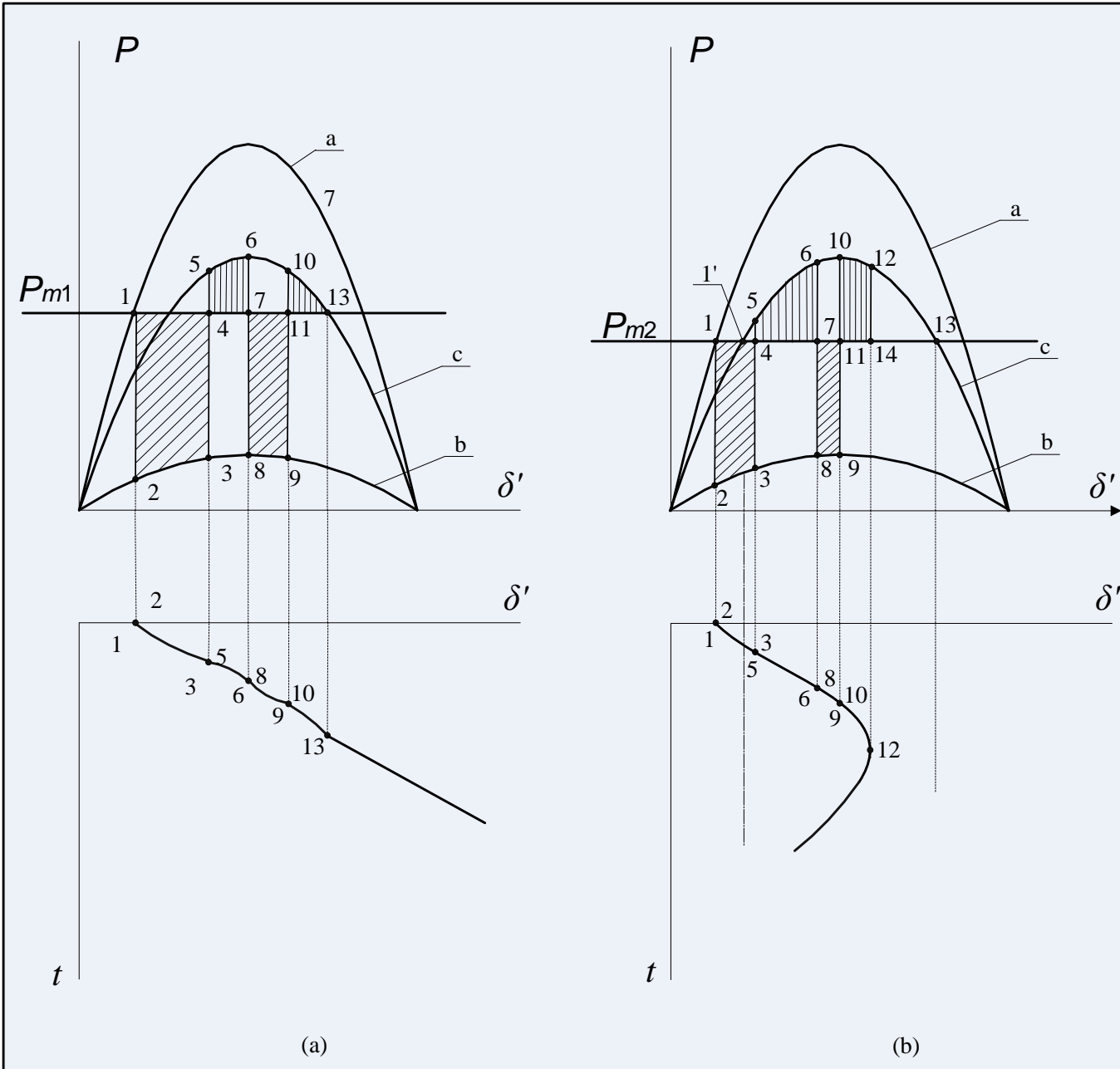
Utjecaj trofaznog kratkog spoja s dva vremena eliminacije kvara

a) Stabilan odziv

b) Nestabilan odziv

Neuspješni APU

- Ukoliko se radi o trajnom kratkom spoju vod koji je uklopljen APU-om ponovno ispada iz pogona i takav ciklus se naziva **neuspješni APU**
- **Neuspješni APU** predstavlja mnogo veću opasnost za stabilnost sustava
- **Slijed događaja za neuspješni APU:**
 - Oba voda ispravno rade
 - Nastupi kratki spoj
 - Vod u kvaru ispadne iz pogona i jedan vod ispravno radi
 - Ponovo nastupa kratki spoj
 - Vod u kvaru trajno ispada iz pogona



Neuspješni APU :

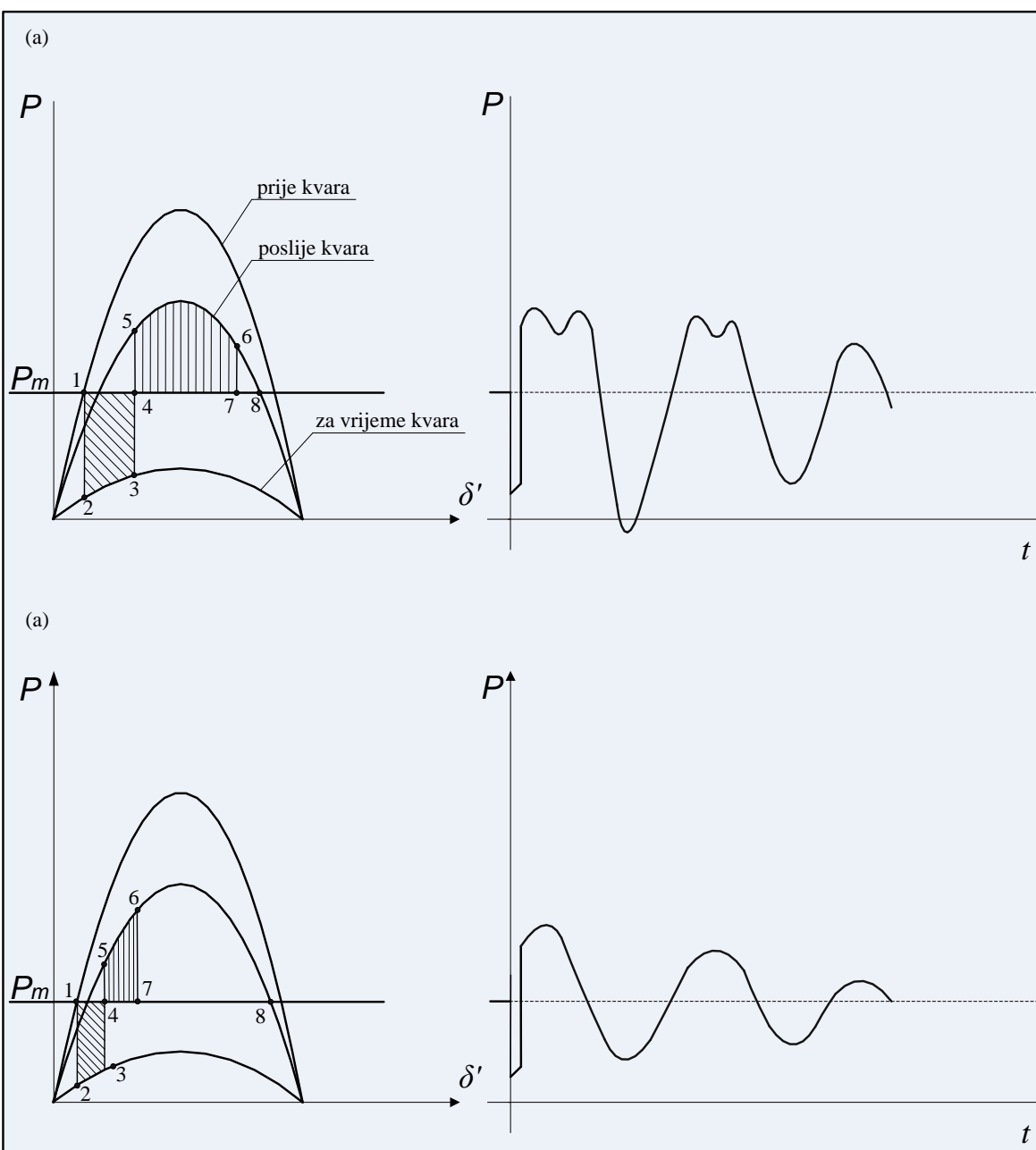
a) Nestabilan odziv

b) Stabilan odziv

- kraće vrijeme eliminacije kvara
- smanjeno opterećenje prije nastanka kvara
- 1' - novo ravnotežno stanje sa jednim vodom isključenim

Njihanje snage

- Titranja rotora koja prate kvar isto tako proizvode titraje u proizvedenoj snazi
- Oblik u kolebanjima snage može biti izvor približne informacije o granici prijelazne stabilnosti
- Ukoliko je granica stabilnosti mala oscilacije kuta opterećenja će biti velike i mogu dostići vrijednost $\pi/2$ – valni oblik snage ima karakteristične “grbe”
- Ukoliko je granica stabilnosti velika, grbe se ne pojavljuju jer je maksimalna vrijednost oscilacije kuta opterećenja manja od $\pi/2$
- Njihanje snage se javlja prije na prijelaznoj karakteristici snaga-kut nego na onoj statičkoj



Oscilacije snage

- a) Niska granica prijelazne stabilnosti- valni oblik snage sa karakterističnim "grbama"
- b) Visoka granica prijelazne stabilnosti- valni oblik snage bez "grbi"