Dr Milenko Đurić

Modeli za analizu stabilnosti elektroenergetskih sistema

PREDGOVOR

Ova monografija obrađuje problematiku STABILNOSTI EES-a (elektroenergetskih sistema). Stabilnost elektroenergetskih sistema (skraćeno EES-a) je veoma kompleksna oblast i ne može se iscrpsti jednim delom. Na srpskom jeziku, praktično ne postoji knjiga koja celovito obrađuje stabilnost EES-a. Osim monografije Dragana Tasića i Nikole Rajakovića "Uticaj potrošnje na naponsku stabilnost elektroenergetskih sistema", praktično ne postoji ni jedna knjiga koja se bavi stabilnošću EES-a. U svetskoj literaturi postoji veći broj knjiga koje se bave ovom oblašću. Neke od njih navedene su u referencama. Namera autora nije bila da napiše delo koje bi, uz korišćenje raspoložive svetske literature, potpuno pokrilo razmatranu oblast. Osnovna ideja ove monografije je da sažme radove autora koji su već objavljeni kako u domaćim, tako i u inostranim časopisima.

U monografiji se ne startuje od elementarnih pojmova vezanih za stabilnost EES-a, već se daju matematički modeli EES-a koji mogu biti baza za razvoj programskih celina (softvera) za analizu stabilnosti složenih EES-a. Prema tome, monografija podrazumeva da čitalac već vlada osnovnim znanjima vezanim za stabilnost dinamičkih sistema pa i EES-a.

U prvom poglavlju izveden je Parkov matematički model sinhrone mašine na kome se temelje kasnije razvijeni matematički modeli složenih EES-a. Nakon toga, data je analiza parametara sinhrone mašine i način određivanja svih parametara mašine na osnovu pasoških parametara generatora.

U drugom poglavlju razvijeni su matematički modeli sinhrone mašine bez i sa regulatorom pobude i stabilizatorom EES-a. Izvedene su sve moguće varijante matematičkih modela generatora sa različitim veličinama kao promenljivog stanja. Matematički modeli generatora izvedeni su u originalnoj nelinearnoj formi a zatim su date i 1inearizovane varijante tih modela.

U trećem poglavlju izvedene su SPREŽNE jednačine koje povezuju matematičke modele pojedinih generatora koji rade paralelno u jedinstvenom EES-u i omogućavaju formiranje matematičkih modela složenih višemašinskih EES-a.

U četvrtom poglavlju izvedeni su matematički modeli EES-a za analizu stabilnosti pri malim poremećajima, odnosno linearizovani modeli EES-a. Izvedeno je nekoliko varijanti linearizovanih matematičkih modela EES-a. Analiza stabilnosti EES-a, pri malim poremećajima, vrši se izračunavanjem sopstvenih vrednosti matrica stanja izvedenih modela EES-a koji sadrže i matrice stanja, ili načine njihovog određivanja.

U petom poglavlju izvedeni su nelinearni modeli složenih EES-a koji služe za analizu stabilnosti pri velikim poremećajima, ili za analizu tranzijentne stabilnosti. Izvedeni modeli pogodni su za analizu tranzijentne stabilnosti metodom INTEGRACIJE diferencijalnih jednačina, koje čine model EES-a.

U šestom poglavlju izvršena je analiza NAPONSKE stabilnosti EES-a, kao poseban segment stabilnosti EES-a. Ovaj odeljak se ne bazira, za razliku od prethodnih, na Parkovom modelu sinhrone mašine. Naponska stabilnost je analizirana pomoću NAPONSKIH KARAKTERISTIKA čvorova mreže EES-a i NAPONSKIH KARAKTERISTIKA potrošača. Drugi metod za analizu naponske stabilnosti, koji je dat u monografiji, bazira se na analizi DETERMINANTE I SOPSTVENIH VREDNOSTI JAKOBIJANA sistema nelinearnih jednačina za proračun tokova snaga i napona u stacionarnom režimu EES-u. Obe date metode polaze od stacionarnog stanja EES-a i koriste jednačine koje to stanje opisuju, za razliku od prethodnih poglavlja u kojima se analiza bazira na diferencijalnim jednačinama, koje čine modele složenih EES-a.

Ova monografija je okosnica kursa "Stabilnost elektroenergetskih sistema" na postdiplomskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru "Elektroenergetski sistemi" u grupama "Elektroenergetska postrojenja" i "Elektroenergetske mreže".

U Beogradu, 2023. Dr Milenko Đurić, red. prof.

SADRŽAJ

PREDGOVOR

1 PARKOV MATEMATIČKI MODEL STANDARDNOGSINHORNOG GENERATORA..... 7

Diferencijalne jednačine sinhronog generatora u koordinatnom sistemu vezanom za stator..... 7
Sopstvene induktivnosti namotaja sinhrone mašine..... 11
Međusobne induktivnosti namotaja sinhrone mašine..... 12
Transformacija rastezanja..... 14
Diferencijalne jednačine sinhrone mašine u (α,β,o) sistemu..... 16
Transformacija rotacije..... 20
Diferencijalne jadnačine mašine u (d, q, O) koordinatnom sistemu..... 21
Snaga i moment generatora u (d, q, O) koordinatnom sistemu..... 26
Kompletan Parkov model sinhrone mašine..... 27
Ekvivalentna šema sinhrone mašine..... 28
Parametri sinhronog generatora..... 29
Parametri (g) sa prigušenim namotajima po q-osi pri otvorenom statoru..... 29
Parametri po d-osi za generator sa prigušenim namotajima..... 31
Parametri pod-osi za generator bez prigušnih namotaja..... 34
Određivanje nestandardnih parametara generatora za d-osu..... 36
Određivanje nestandardnih parametara generatora za Q-osu..... 37

2 MODIFIKOVANI MODEL STANDARDNE SINHRONE MAŠINE..... 38

RIAZ-ov model mašine sa elektromotornim silama..... 38
Linearizovan RIAZ-ov model neregulisanog sinhronog generatora..... 47
Linearizovan RIAZ-ov model regulisanog sinhronog generatora..... 47
Model sinhronog generatora sa fluksevima..... 53
Linearizovan model neregulisanog generatora sa fluksevima..... 54
Linearizovan model regulisanog generatora sa fluksevima..... 55
Model generatora sa strujama..... 57
Uprošćen model generatora sa strujama..... 58
Linearizovan model neregulisanog generatora sa strujama..... 60
Linearizovan model regulisanog generatora sa strujama..... 61

3 POVEZNE JEDNAČINE ZA GENERATORE U SLOŽENOM EES-u 63

Sprežne jednačine za nelinearne modele sinhrone mašine..... 66
Sprežne jednačine za linearne modele sinhrone mašine..... 68

4 MODELI VIŠEMAŠINSKIH SISTEMA ZA ANALIZU STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA PRI MALIM POREMEĆAJIMA..... 70

Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone..... 70
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1..... 72
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a..... 74
Modeli EES-a dobijeni korišćenjem modela generatora sa fluksevima..... 75
Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone..... 75
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sastabilizatorom EES-a..... 77
Modeli EES-a dobijeni korišćenjem modela generatora sa strujama..... 78
Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone..... 78
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a..... 80

5 MODELI VIŠEMAŠINSKIH SISTEMA ZA ANALIZU STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA PRI VELIKIM POREMEĆAJIMA..... 82
Modeli EES-a zasnovanina RIAZ-ovom modelu generatora..... 82
Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone..... 82
Određivanje početnih uslova za započinjanje procesa numeričke integracije..... 86
Model EES-a ukome generatori imajupobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a..... 88
Modeli EES-a zasnovani na modelu generatora sa fluksevima..... 91
Model EES-a u kome geenratori imaju konstantne pobudne napone..... 91
Modeli EES-a zasnovani na modelu generatora sa strujama..... 94
Model EES-a u kome generatori imaju konstane pobudne napone..... 94
6 NAPONSKA STABILNOST U ELEKTROENERGETSKIMSISTEMIMA..... 97
Naponska stabilnost u svetlu naponskih karaktersitika čvorova i potrošača..... 97
Naponske karakteristike čvorova i potrošača u (u-z) koordinatama..... 98
Naponske karakteristike čvorova i potrošača u (u-i) koordinatama..... 100
Naponske karakteristike čvorova i potrošača u (u-s) koordinatama..... 102
Zaključak..... 104
Analiza naponske stabilnosti pomoću Jakobijana nelinearnog sistema jednačina za rešavanje tokova snaga i naponskihprilika u EES-u..... 105
Potrošač je tipa konstantne impedanse..... 107
Potrošač je tipa konstantne struje..... 109
Potrošač je tipa konstantne snage..... 110
6 LITERATURA..... 113