

Ocena dinamične sigurnosti elektroenergetskih sistemov s pomočjo digitalne simulacije

Uroš Kerin¹, Grega Bizjak¹

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: uros.kerin@fe.uni-lj.si, grega.bizjak@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku smo predstavili postopek za oceno dinamične sigurnosti elektroenergetskih sistemov. Postopek smo razvili v okviru programskega orodja za simulacijo dinamičnih stanj elektroenergetskih sistemov NETOMAC, v katerega smo ga tudi v celoti implementirali. V članku smo na kratko opisali kriterije stabilnega obratovanja sistemov in definirali upoštevane vrste stabilnosti. Na podlagi opredelitve obratovalnih stanj sistema smo določili območja obratovanja in podali karakteristične lastnosti sistema v posameznem območju. Predstavili smo modularno strukturo ocenjevalnega postopka in naloge posameznih modulov. Delovanje postopka smo preizkusili na poenostavljenem simulacijskem modelu dejanskega sistema. Rezultati postopka so na voljo v grafični in numerični obliki in v obliki krajšega besedila.

Ključne besede: dinamične sigurnosti, tranzientna stabilnost, napetostna stabilnost, NETOMAC

Power System Dynamic Security Assessment using digital simulation

Extended abstract. Electrical energy plays an extremely important role in the world's constantly increasing growth in economy and industry. This is why, power systems have been growing and are nowadays most complicated man-made systems in the world. To meet the increasing demand and to assure secure operation, an intensive planning and development of power systems have to be made. All over the world, engineers are using various approaches and methods to predict the systems behavior in most common conditions. Nowadays, the most widely used methods and simulations are made with neural networks and other fast and reliable procedures. Their main advantage is the speed of the calculation process. However, to prepare the neurons for it, they have to be trained, which is a much time consuming and complicated procedure. In this paper, we propose a new approach, based on the NETOMAC program system. The software already uses fast calculation methods and does not require any special additions. We use the NETOMAC's abilities to develop the basics for the new algorithm providing us with the Dynamic Security Assessment of the network. For testing purposes we utilize the topology of the Hydro-Quebec's 735kV transmission level. During the simulation, the system is exposed to various contingencies. They are different for

each system and are normally reduced to the most severe ones. The paper presents theoretical basics of stability, structure of the developed framework and obtained results.

Keywords: dynamic security assessment, transient stability, voltage stability, NETOMAC

1 Uvod

Zanesljivo in sigurno obratovanje elektroenergetskega sistema (EES) je v času odprtega trga z električno energijo prednostna funkcija vsakega operaterja. V EES mora kljub dnevnim motnjam, spremembam topologije in nepredvidenim obratovalnim stanjem ohraniti sistemsko celovitost in zanesljivost dobave električne energije. Ocena dinamične sigurnosti (ODS) je postopek, ki upravitelju omrežja pomaga pri razumevanju dinamičnih lastnosti reguliranega EES. Z njim lahko ugotovimo tipe motenj, ki vplivajo na obratovanje in določimo območje v katerem je obratovanje sigurno. V času zmogljive strojne in programske opreme je postopek ODS mogoče definirati z uporabo več različnih metod [1]. V zadnjem času so v ospredju metode, ki razmere v EES analizirajo in ocenijo bodisi na podlagi uporabe nevronske omrežij ali z uporabo direktnih metod na podlagi energijskih funkcij. Odlikujejo jih časovno hitro reševanje, prilagodljivost in praktično neomejena uporabnost,

vendar hkrati zahtevajo veliko kompleksnih definicij in uporabniškega časa. Kratek povzetek tovrstnih metod je podan v [2]. Nekoliko manj znane in uporabljane pa so metode, ki temeljijo na numeričnem reševanju obravnavanih primerov. Zaradi numerične zasnove in v preteklosti omejene procesorske moči se niso razvijale vzporedno z drugimi metodami, temveč so se uporabljale le pri časovno neomejenih simulacijah. Te metode odlikujeta uporabnost in preprosto definiranje ter izvajanje izbranih funkcij.

V splošnem je primarni namen postopka ODS določiti območje sigurnega obratovanja za izbrani EES. Po literaturi [3] je območje sigurnega obratovanja mogoče ugotoviti z zaporednim izvajanjem štirih korakov:

1. izbira kritičnih motenj,
2. simulacija motenj in detajlna analiza nastalih sistemskih razmer,
3. pregled rezultatov in ugotovitev morebitnih kršitev,
4. zaporedno izvajanje 2. in 3. koraka do približne določitve območja sigurnega obratovanja.

Raziskave dinamične sigurnosti so bile do nedavnega osredotočene na hitro izvajanje 2. in 3. koraka. Na modelu obravnavanega EES se je s simulacijami številnih motenj določilo območje obratovanja, v katerem EES kljub motnjam ohrani sigurno obratovanje. To je bil sicer uveljavljen in preizkušen postopek, ki pa smo ga v našem primeru še nekoliko izboljšali. Izboljšava zajema predvsem 1. korak in vključuje redukcijo števila motenj na tiste, pri katerih je verjetnost prehoda v nestabilno obratovanje največja (kritične motnje). Za redukcijo stanj je na voljo več naprednih metod, na primer [4], v raziskanih EES pa je redukcijo mogoče izvesti tudi na podlagi izkušenj.

V članku povzet postopek ODS ne temelji na aktualnih metodah, temveč na numerični obravnavi. Izvedli smo ga z uporabo programskega orodja, ki se uporablja predvsem za digitalno obdelavo prehodnih stanj električnih omrežij. Osnova postopka so že opisani koraki, pri čemer smo v simulacijah upoštevali majhen nabor motenj. Postopek smo izvedli na poenostavljenem modelu dejansko obstoječega EES.

2 Obratovalni kriteriji, tranzientna in napetostna stabilnost

Ocena dinamične sigurnosti je podana na podlagi določil in zahtev, podanih z obratovalnimi kriteriji EES, in na podlagi definicij stabilnosti EES, ki so podane v [5]. Na splošno velja, da če v prehodnih stanjih sistema pride do kršitev teh kriterijev, razmere v sistemu ocenimo kot nesigurne.

V našem primeru smo za oceno sigurnosti obratovanja uporabili kriterije pravil obratovanja in kriterije tranzientne in napetostne stabilnosti. V nadaljnjem razvoju postopka pa je predvidena razširitev

nabora upoštevanih kriterijev še na druga področja stabilnosti. Morebitno nestabilno stanje EES smo ocenili na podlagi primerjave trenutnih razmer z definicijo tranzientne stabilnosti in napetostne nestabilnosti:

Tranzientna stabilnost je sposobnost sistema, da kljub večjim motnjam ohrani sinhrono obratovanje vseh v EES povezanih elementov. V visokonapetostnih omrežjih so vplivom motenj najbolj izpostavljeni generatorji. Zaradi rezerve moči se na motnje hipno odzovejo z nekontroliranim pospeševanjem rotorjev, kar povzroči osciliranje izhodnih moči in v izrednih primerih tudi izgubo sinhronizma ter posledično nestabilno obratovanje.

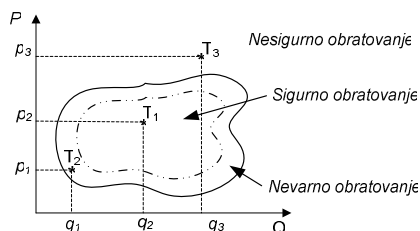
Napetostna nestabilnost je proces neustavljivega padanja (drsenja) napetosti do trenutka popolnega zloma oziroma hipnega upada na vrednost blizu nič. Pojav imenujemo napetostni zlom. Največkrat nastane v omrežjih, v katerih je prišlo do nenadnega izpada napetostnih podpornih točk, ki jih sestavljajo elektrarne, kompenzacijski elementi ipd. Procesu ni vedno mogoče predvideti. Nastane lahko z zakasnitvijo po motnji in ga v začetnem stadiju zaradi počasnega upadanja napetosti ne zaznamo.

3 Sigurno obratovanje EES in dinamična sigurnost

Z namenom opredelitve trenutnega obratovalnega stanja EES smo v raziskavi obratovanje sistema uvrstili v tri obratovalna področja:

- *Sigurno obratovanje*: je območje, v katerem je obratovanje EES stabilno. Vzpostavljeno je ravnovesje pretokov moči in z obratovalnimi kriteriji predpisano napetostno stanje. Rezerva moči v sistemu je zadostna. Na večino motenj se sistem dinamično odzove in se po njih vrne v točko sigurnega obratovanja. V izrednih primerih lahko sistem preide v območje nevarnega ali nesigurnega obratovanja.
- *Nevarno obratovanje*: je območje, v katerem je obratovanje EES stabilno. Vzpostavljeno je ravnovesje moči, vendar pri minimalni rezervi moči. Nekoliko slabše so tudi napetostne razmere. V večini primerov bo motnja povzročila direkten prehod v nesigurno obratovanje.
- *Nesigurno obratovanje*: je območje, v katerem so bodisi kršeni obratovalni kriteriji ali pa je obratovanje sistema nestabilno.

Območja obratovanja so ponazorjena na sliki 1. Območje sigurnega obratovanja je območje, v katerem je točka T1, nevarno območje je določeno s točko T2 in območje nesigurnega obratovanja s točko T3. Meje med posameznimi območji so zaradi različnosti karakteristik elementov in nepredvidljivosti obratovanja včasih težko določljive.



Slika 1: Območja obratovanja EES
Fig. 1: Areas of power system operation

4 Struktura postopka za oceno dinamične sigurnosti EES

Dinamično sigurnost EES preverjamo v času prehodnega pojava, tj. po motnji. Odziv sistema spremljamo skozi časovni potek karakterističnih veličin in glede na definirane kriterije podamo oceno sigurnosti. Če motnja ne povzroči prekoračitve dovoljenih odstopanj in v sistemu ni kršitev obratovalnih pravil ali indikacij nestabilnosti, dinamično stanje ocenimo kot sigurno.

4.1 Struktura postopka

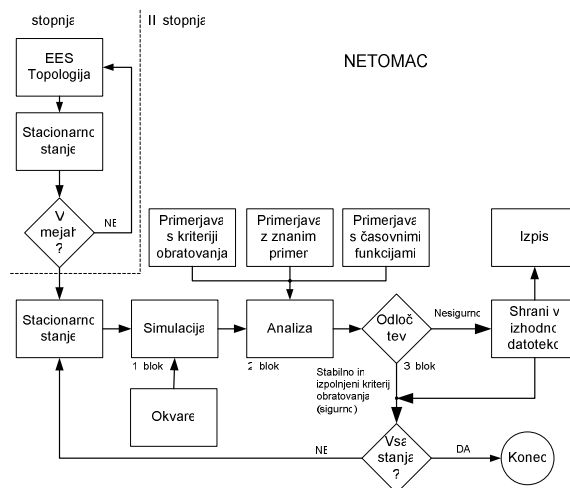
Za izvedbo ODS smo razvili sklop programskih modulov. Z uporabo programskega jezika FORTRAN smo jih implementirali v simulacijsko orodje NETOMAC [6]. Razvoj modulov je temeljil na podlagi smernic v [7].

Moduli tvorijo simulacijski postopek, prikazan na sliki 2. Postopek se izvaja v dveh stopnjah. V prvi stopnji, z izračunom stacionarnih pretokov moči in napetosti referenčnega obratovalnega stanja, preverimo ustreznost simulacijskega modela omrežja. Če izračunane razmere ustrezajo pogojem normalnega obratovalnega stanja in zahtevam po točnosti modeliranega EES, je model omrežja primeren za obravnavo v drugi stopnji postopka. V nasprotnem primeru ga je treba prilagoditi podanim zahtevam. Prvo stopnjo za vsak model izvedemo le enkrat.

Druga stopnja obsežnejša in je jedro postopka. Sestavljena je iz treh zaporednih blokov, ki so ključni za izvajanje postopka ODS (slika 2; 1. blok, 2. blok in 3. blok), ter dodatnih blokov za izpis rezultatov in končanje postopka. V posameznem bloku smo programsko definirali izvajanje namenskih funkcij, ki delno obdelajo izhodne podatke predhodnega bloka. Pri tem je izvajanje operacij soodvisno. Naloge posameznih blokov so:

- **Blok Simulacija;** blok simulira motnje v modeliranem omrežju v referenčnem stanju. Simulacije izvaja z numeričnim reševanjem diferencialnih enačb pri izbranem časovnem koraku. Rezultate simulacij posreduje bloku za analizo.

- **Blok Okvare;** v bloku je shranjen nabor motenj in okvar, ki jih želimo simulirati. Nabor je specifičen za vsako obravnavano omrežje posebej, definirano število okvar pa je lahko nad 10.000 stanj pri časovno neomejenem postopku ali zgolj nekaj deset stanj pri hitrih ODS.
- **Blok Analiza;** izvaja analizo simuliranih razmer. Analiza temelji na sprotni primerjavi rezultatov simulacij s kriteriji sigurnega obratovanja. Dodatno so razmere analizirane še na podlagi preteklih dogodkov, trenda gibanja karakterističnih veličin, karakteristik obratovanja posebnih elementov in specifičnih omejitev sistema.
- **Blok Odločitev;** odloča, ali je obratovanje omrežja v času prehodnega pojava sigurno ali ne. Odločitev temelji na logičnih vrednostih izhodnih spremenljivk, ki jih posreduje blok za analiziranje.
- **Bloka Shrani in Izpis;** bloka sta namenjena za interaktivno obveščanje uporabnika o nesigurnih stanjih omrežja. Podatke o vzroku nestabilnosti in morebitnih kršitvah obratovalnih kriterijev shranita v izhodno datoteko, uporabniku pa ponudita tudi grafičen prikaz nastalih razmer.
- **Blok Stanja sistema;** preverja število simuliranih stanj v enem postopku ODS. Posredno je povezan z blokom za simuliranje, prek katerega šteje simulirana stanja v modelu. Ko število ustreza številu definiranih motenj, postopek ustavi.



Slika 2: Struktura ODS postopka
Fig. 2: Structure of the DSA procedure

4.2 Hitrost postopka

Hitrost postopka oziroma dolžina njegovega trajanja je poleg s predstavljeno strukturo izvajanja operacij pogojena tudi s parametri simulacij. Ker na strukturo postopka, ko je le-ta enkrat zaključena, ne moremo več vplivati, hitrost postopka v končnem reguliramo le še s slednjimi. Med parametre simulacij uvrščamo: število simuliranih motenj oziroma stanj sistema in časovne

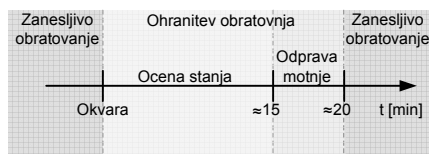
parametre, kot so simulirani časovni interval in časovni korak.

Simulirana stanja EES prenosorazmerno vplivajo na dolžino postopka. Ker se čas s številom stanj podaljšuje, za hitro izvedbo postopka v nabor vključimo minimalno število stanj, navadno le kritična. Izberemo jih bodisi na podlagi preteklih raziskav bodisi na podlagi rezultatov redukcije večjega števila stanj.

Simulirani časovni interval določimo tako, da v primeru ohranitve sigurnega obratovanja njegova dolžina ustreza dolžini najdaljšega prehodnega pojava, medtem ko pri nesigurnem obratovanju njegova dolžina ustreza času, v katerem do nesigurnosti pride. Tovrstna definicija intervala bistveno prispeva k hitrosti postopka. Pri več nesigurno ocenjenih stanjih EES je čas postopka namreč tudi do 60% krajši, kot če bi vseskozi uporabljali enak interval.

Časovni korak simulacij izberemo na podlagi kompromisa med hitrostjo in točnostjo postopka, pri čemer je v [8] točnost opredeljena kot prioritarna zahteva za ODS. Zato privzamemo, da lahko postopek na tej podlagi pohitrimo le tedaj, ko rezultati postopka pri manjšem časovnem koraku (večja točnost) z minimalnim odstopanjem sovpadajo z rezultati postopka pri večjem časovnem koraku (manjša točnost).

Če je izvedba postopka dovolj hitra, ga je mogoče uvrstiti v segment tako imenovanih postopkov v realnem času. Po navedbah v referenčni literaturi [9] je realni čas aplikativno uporabnega postopka ODS v kombinaciji s sistemi SCADA definiran kot čas, ki ga sistemski operater potrebuje za odpravo defektnega stanja. Shematska ponazoritev in intervalna delitev je podana na sliki 3. Celoten interval je razdeljen na več odsekov: reakcijski čas operaterja, čas, potreben za analizo trenutnih razmer, čas iskanja in ocene rešitev ter čas izvedbe izbranih ukrepov. Postopek ODS lahko operater uporabi pri iskanju in oceni rešitev nastale situacije in pri preverjanju odločitev pred njegovo izvedbo.



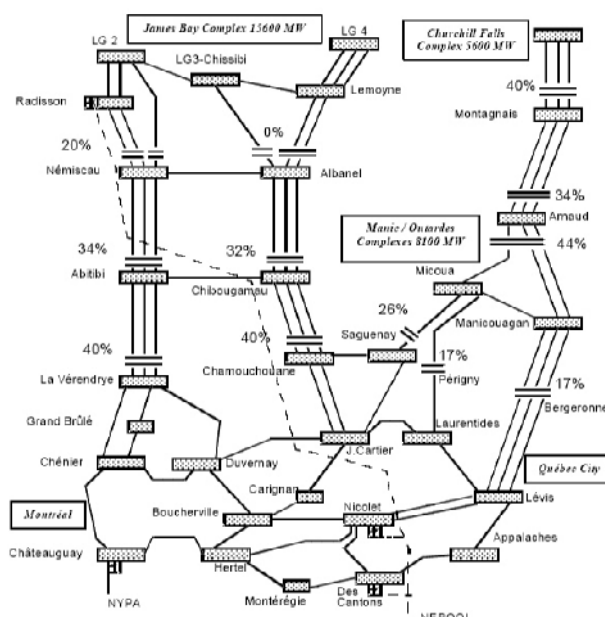
Slika 3: Časovni okvir vzpostavitve normalnega stanja EES
Fig. 3: Time frame for restoring system security

5 Izvedba postopka za oceno dinamične sigurnosti EES

5.1 Model elektroenergetskega sistem

Za preizkus postopka smo uporabili poenostavljen model EES, podjetja Hydro-Quebec iz Kanade. V simulacijskem modelu je zajeta topologija 735 kV izmeničnega omrežja in priključeni elektroenergetski

elementi (EE). Topologija je razdeljena na dva dela: severni del s proizvodnjo električne energije in južni del s koncentriranim odjemom. Oba sta med seboj povezana s tremi daljnovodnimi koridorji, pri čemer vsak koridor združuje tri samostojne daljnovodne poti. Omrežje ima tako iz severnega proti južnemu delu izrazito radialno topologijo, ki se v bližini večjih porabniških središč zazanka (slika 4). Skupna dolžina modeliranih daljnovodnih povezav je približno 12000 km. Model zajema deset porabniških vozlišč, dve mejni vozlišči, 19 pomožnih vozlišč in sedem generatorskih vozlišč. Na generatorska vozlišča je priključenih 58 hidroagregatov. Modelirano omrežje je obremenjeno z 19GW delovne in 2,7GVAr jalove moči.



Slika 4: Prenosni sistem Hydro-Quebec 735 kV
Fig. 4: Hydro-Quebec 735 kV transmission system

Elektroenergetski elementi so predstavljeni z ustreznimi dinamičnimi karakteristikami in ustrezajo kriterijem dinamičnih ekvivalentov, podanih v [1]. Modeliran EES zajema modela serijske in paralelne kompenzacije vodov, model interkonekcijskih povezav, detajlen model hidro generatorja s pripadajočo napetostno in frekvenčno regulacijo, poenostavljen model SVC in frekvenčno in napetostno odvisni model bremen. Modelirana je tudi nadtokovna zaščita, ki pa zaradi raziskovanja najbolj neugodnih primerov v simulacijah ni upoštevana. Podroben opis modeliranja je podan v [6].

5.2 Parametri simulacij

Postopek smo izvedli pri omejenem naboru motenj in v dveh časovnih korakih. Izbrali smo 30 motenj, kjer smo nekatere povzeli po [10], druge pa smo smiselno izbrali sami. Zajeli smo dogodke, ki bodisi neposredno bodisi posredno vplivajo na sigurno obratovanje: izpad

generatorja, izpad kompenzacijskih naprav, izpad prenosnih poti, kratki stiki in kombinacije naštetega.

Simulacije smo izvedli pri časovnih korakih 1 ms in 10 ms. S korakom 1 ms smo dosegli zahtevano točnost, vendar smo glede na težnje po še hitrejšem postopku in ugotovitvi, da so rezultati postopka enaki, korak povečali na 10 ms.

S predhodnimi raziskavami modela EES smo ugotovili, da so z motnjami povzročeni prehodni pojavi kratki in da ne povzročijo napetostne nestabilnosti. Na tej podlagi smo dolžino simuliranega intervala nastavili na 10 sekund pri sigurnih stanjih, v primeru nesigurnih stanj pa je interval krajši in je odvisen od trenutka kršitve kriterijev sigurnega obratovanja.

5.3 Rezultati

V [11] je podan kriterij glede časovnega okvira hitrih postopkov ODS. Za simulacije 30 kritičnih motenj pri simulacijskem intervalu 10 s v EES z 2000 vozlišči in 250 generatorji lahko postopek potrebuje največ 10 minut. Za primerjavo je v tabeli 1 podan dosežen časovni okvir v članku predstavljenega postopka.

Časovni korak	Trajanje postopka
1 ms	1 min 58 s
10 ms	59 s

Tabela 1: Hitrost postopka ODS

Table 1: Calculating speed of the DSA procedure

Menimo, da po zmogljivostih in glede na kriterije v [11] predstavljen postopek spada v razred hitrih postopkov ODS. Kljub različno velikim EES (opisanih v [11] in v poglavju 5.1) ima namreč na voljo še dovolj časovne rezerve, da bi pri obravnavi EES z več vozlišči in EE še vedno zadostil kriterijem po hitrosti izvedbe. Rezultati tako sovpadajo z zastavljenim ciljem in so dobro izhodišče za nadaljnje izboljšave in razvoj.

Poleg hitrosti izvedbe trend razvoja tovrstnih postopkov narekuje tudi nazoren pregled nad rezultati simulacij (ang. monitoring). S tem razlogom so v orodja najpogosteje implementirani grafični vmesniki, ki uporabniku na različne načine omogočajo analizo posameznih primerov. V našem primeru so rezultati postopka na voljo v dveh oblikah: kot besedilo ali v diagramih. Rezultati v obliki besedila so shranjeni v posebni datoteki in vsebujejo podatke o ODS vseh simuliranih stanj. Ocena posameznega stanja je sestavljena iz informacij o razmerah v omrežju in vzroku morebitne nestabilnosti, vrsti in lokaciji motnje ter trajanju motnje. Datoteka se ustvari vzporedno z zagonom postopka in je unikatna za vsak sklop simulacij. Primer delno izpisanega besedila je podan na sliki 5. Primer opisuje razmere ob nastanku tripolnega kratkega stika (3P KS) v enem izmed vozlišč omrežja (N-CHF), ki traja 350 ms. Kratak stik povzroči nestabilno obratovanje priključenega generatorja

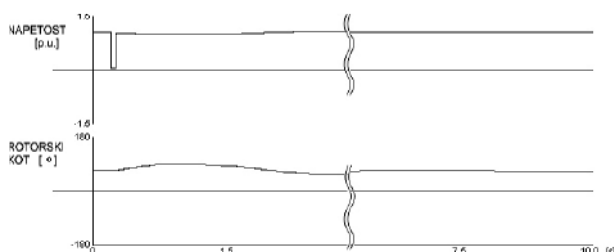
GLG401. V podanem primeru so razmere v omrežju ocenjene kot nesigurne.

```
STATUS      : UNSTABLE GENERATOR
GENERATOR   : GLG401
FAULT       : three phase short circuit
LOCATION     : N-CHF
F. DURATION : .35 s
```

Slika 5: Izpis rezultatov simulacij v obliki besedila

Fig. 5: Text output of simulation results

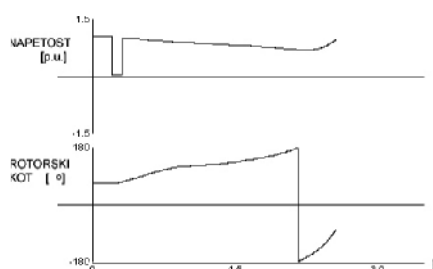
Rezultati v obliki diagramov prikazujejo potek veličin po izbiri uporabnika. Primer izrisa ob simulaciji 3P KS prikazujeta sliki 6 in 7. Na slikah je na prvem diagramu prikazana napetost na mestu okvare in na drugem rotorski kot električno najbližjega generatorja. Sliki sta simbolični.



Slika 6: Ohranitev sinhronnega obratovanja

Fig. 6: System secure operation

Slika 6 prikazuje razmere v primeru 3P KS, ki traja 150 ms. Motnji sledita nihanje napetosti in kratko pospeševanje rotorjev generatorjev. Ker sistem ohrani stabilno obratovanje, je prehod med stanji ocenjen kot siguren. Simulacijski interval v skladu z definicijo v poglavju 5.2 traja 10 s.



Slika 7: Izguba sinhronizma

Fig. 7: Loss of synchronization

Pri daljših okvarah imajo rotorji generatorjev na voljo več časa za pospeševanje. Zato pri 350 ms dolgem 3P kratkem stiku rotorji nekaterih generatorjev že pospešijo do izgube sinhronnega obratovanja (slika 7). Prehod med stanji postane nestabilen, zato razmere v omrežju ocenimo kot nesigurne. Na sliki 7 podane razmere ustrezajo že podanemu opisu na sliki 5. Simulacijski interval je zaradi nestabilnosti in definicije v poglavju 5.2 avtomatično skrajšan, v tem primeru na 2,5 s.

6 Sklep

Predstavljeni postopek za oceno dinamične sigurnosti ustreza vsem podanim zahtevam po točnosti, zanesljivosti in hitrosti izvedbe. Kljub preprosti konstrukciji in uporabi preproste ocenjevalne logike ga je na podlagi rezultatov mogoče primerjati z naprednejšimi postopki, ki pa so že v osnovi kompleksnejši in zaradi tega tudi težje izvedljivi. Izstopa po umestitvi v zaprto programsko okolje, kjer nam je posamezne bloke uspelo realizirati z omejenim naborom razpoložljivih funkcij. Njihovo delovanje smo ustrezno povezali in dosegli hitro analizo obravnavanih stanj.

Kljub zadovoljivim rezultatom pa bi bilo postopek na nekaterih mestih smiselno izboljšati. Poleg razširitve nabora kriterijev ocenjevanja velja omeniti še del za analizo dinamičnih odzivov, ki bi mu z uporabo bodisi energijskih funkcij ali indeksov stabilnosti bistveno povečali zmogljivosti diagnosticiranja. S tem bi neposredno vplivali na hitrost delovanja ocenjevalne logike in posledično tudi na hitrost celotnega postopka. Pri izvajanju postopka na različnih delovnih postajah smo ugotovili tudi izrazito odvisnost hitrosti izračuna od razpoložljivih procesorskih zmogljivosti. Ker konstrukcija postopka ni časovno pogojena, je tovrstna odvisnost posledica uporabljenega programskega orodja. V tem primeru lahko hitrejšo delovanje zagotovimo le z izbiro zmogljivejših delovnih postaj.

Povzamemo lahko, da je predstavljeni postopek preprost in uporaben pri ODS. Od uporabnika zahteva le vnos simulacijskega modela omrežja in izbiro časovnih parametrov simulacij. Po oceni vseh definiranih stanj so uporabniku na voljo rezultati v obliki kratkega tekstovnega poročila, ki je podprto z grafičnimi izrisi časovno odvisnih veličin.

7 Literatura

- [1] K. Morison, L. Wang, P. Kundur, "Power System Security Assessment", IEEE Power & Energy magazine, September/October 2004
- [2] S. Bruno, E. De Tuglie, M. La Scala, "Transient Security Dispatch for the Concurrent Optimization of Plural Postulated Contingencies", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 3, pp. 707-714, August 2002
- [3] Y. Mansour, E. Vaahedi, M. A. El-Sharkawi, "Dynamic Security Contingency Screening and Ranking Using Neural Networks", IEEE Transactions on neural networks, vol. 8, no. 4, pp. 942-950, July 1997
- [4] C. Fu, A. Bose, "Contingency Ranking Based on Severity Indices in Dynamic Security Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999
- [5] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, May 2004
- [6] U. Kerin, "Ocena dinamične sigurnosti s simulacijskim programom NETOMAC", Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, September 2004
- [7] A.B.R. Kumar, V.Brandwajn, A.Ipakachi, R. Adapa, "Integrated framework for dynamic security analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998
- [8] CIGRE Task Force, "Advanced Angle Stability Controls", Chapter 5, Integration of Dynamic Security Assessment and Stability Controls, 1999
- [9] T. George, J. Crisp, G. Ledwich, "Advanced tools to manage power system stability in the National Electricity Market", NEEMCO, Queensland University of Technology
- [10] G. Trudel, S. Bernard, G. Scott, "Hydro-Quebec's plan against extreme contingencies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999
- [11] G.C. Ejebe, C. Jing, J.G. Waight, V. Vittal, G. Pieper, F. Jamshidian, P. Hirsch, D. Sobajic, "Online Dynamic Security Assessment in an EMS" IEEE Computer Applications in Power, pp. 43-47, January 1998

Uroš Kerin je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (2004). Kot mladi raziskovalec je zaposlen v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Njegova področja raziskav obsegajo analizo in optimizacijo omrežij, dinamiko prehodnih stanj in kakovost električne energije.

Grega Bizjak je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (v letih 1990, 1993 in 1997). Njegovo raziskovalno področje zajema predvsem modeliranje elementov elektroenergetskega sistema za potrebe digitalne simulacije s poudarkom na stikalnih aparatih in simulacije prehodnih pojavov v industrijskih omrežjih.