

Uporaba direktne Ljapunove metode za ugotavljanje stabilnosti elektroenergetskih sistemov z univerzalnim prečnim transformatorjem

Valentin Ažbe, Rafael Mihalič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: valentin.azbe@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek obravnava ugotavljanje tranzientne stabilnosti elektroenergetskih sistemov (EES) s pomočjo direktne Ljapunove metode. Za uspešno uporabo teh metod za EES, ki vsebujejo naprave FACTS, moramo vpliv teh naprav primerno upoštevati. Do sedaj uporaba te metode v EES z univerzalnim prečnim transformatorjem (UPT) ni bila povsem mogoča, kajti primeren prispevek te naprave v energijski funkciji EES še ni bil poznan. Ta članek prikazuje postopek ugotavljanja prispevka UPT v energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo. Po nekaj predpostavkah smo določili izraz za energijsko funkcijo UPT, ki ga lahko dodamo katerikoli obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo omrežja. Ustreznost energijske funkcije EES z UPT smo preverili na testnem sistemu generator – toga mreža in jo uporabili za ugotavljanje kritičnega časa odstranitve motnje v testnem sistemu z več generatorji. Energijska funkcija se je izkazala za ustrezno. S tem smo omogočili uporabo direktne Ljapunove metode za EES, ki vsebujejo UPT.

Ključne besede: Naprave FACTS, Ljapunove metode, regulacija elektroenergetskih sistemov, tranzientna stabilnost elektroenergetskih sistemov, univerzalni prečni transformator

Application of the direct Lyapunov method for transient-stability assessment of electric-power systems with the unified power flow controller

Extended abstract. The paper deals with the direct Lyapunov method for transient-stability assessment of electric-power systems (EPS). To be able to successfully apply direct methods or other energy function-based calculations in EPSs that include flexible AC transmission system (FACTS) devices, the influence of these devices has to be properly considered. In power systems incorporating unified power-flow controllers (UPFCs) this is currently not always possible because the present EPS energy functions do not involve appropriate UPFC actions. This paper presents a method for incorporating the transient-stability improvement function of the most versatile FACTS device, i.e. the unified power-flow controller (UPFC), into the energy function for multimachine systems.

A UPFC is presented by the injection model in Fig. 2. The model equations (1) – (4) are the basis for construction of the energy function. These are modified in the same way as swing equations in [4] and summed together (9). The first integral of this sum is the energy

function for a UPFC and can be obtained only by intuition. Assuming constant controllable parameters, the energy function (11) can be determined. It can be added to any existing structure-preserving energy function as an additional term that represents the effect of a UPFC.

According to Fig. 2c, the energy function (11) is equal to the sum of the reactive powers Q_{si} and Q_{sj} and represents the total reactive power injected into the power system by the UPFC. Comparing this energy function to those of some other FACTS devices, we see that they all correlate with the injected reactive powers. In the case of FACTS devices that do not act as current or voltage sources, e.g. the static var compensator (SVC), controllable series compensation (CSC) and phase-shifting transformer (PST), the energy function is equal to half the sum of the reactive powers. In the case of a static series synchronous compensator (SSSC) and UPFC, the energy function is equal to the sum of the reactive powers.

Because constant controllable parameters of a UPFC might not be suitable for studying the UPFC's contribution to the transient-stability enhancement, the

application of the newly constructed energy function is extended to the application of sectional-constant controllable parameters using (12). Adequacy of the newly constructed energy function was tested for a UPFC in a longitudinal test system. Critical clearing times (CCTs) obtained by the direct Lyapunov method were equal to the CCTs obtained by simulation, consequently the energy function proved to be adequate.

The application of sectional-constant controllable parameters was demonstrated in an IEEE nine-bus three-machine test system. The UPFC was controlled to act like an SSSC. From the results we see that the CCTs obtained by the direct method for both the SSSC from [7] and the presented UPFC acting as an SSSC are identical. This proves that consideration of the sectional-constant UPFC parameters as described above can be applied in calculations to approximate various continuous (non-discrete) control strategies.

Using the newly constructed energy function, the application of the direct Lyapunov method for an EPS that includes UPFCs is possible.

Keywords: FACTS devices, Lyapunov methods, power system control, power-system transient stability, UPFC

1. Uvod

Članek obravnava eno izmed metod ugotavljanja tranzientne stabilnosti elektroenergetskih sistemov (EES), to je direktna Ljapunova metoda. Ta metoda je imela zaradi svoje enostavnosti velik pomen pred nastankom računalnikov. S pojavom računalnikov so prišle v ospredje digitalne simulacije EES, s katerimi korak za korakom rešujemo sistem nelinearnih diferencialnih (nihajnih) enačb. Kljub čedalje večji hitrosti računalniških simulacij le-te niso primerne za sprotno (on-line) ugotavljanje tranzientne stabilnosti, temveč le pri načrtovanju elektroenergetskih omrežij. Želja upravljavcev prenosnega omrežja po sprotne ugotavljanju tranzientne stabilnosti je ponovno zbudila zanimanje za direktno Ljapunovo metodo, ki bi pri tem lahko imela ključno vlogo.

Osnovni del direktne Ljapunove metode je konstrukcija primerne Ljapunove funkcije, s katero EES namesto z nizom nelinearnih diferencialnih enačb opišemo z nizom algebrskih enačb. Konstruiranih je bilo več različnih Ljapunovih funkcij, a se je za edino uporabno izkazala funkcija, ki pomeni sistem kot vsoto kinetične in potencialne energije po odpravi motnje [1] in jo dobimo z integriranjem nihajnih enačb sistema. Ta energijska funkcija je bila za EES brez naprav FACTS že določena, z nastankom naprav FACTS pa je nastala potreba po določitvi njihovega vpliva na energijsko funkcijo EES.

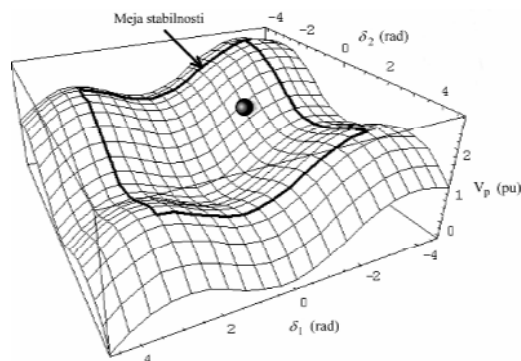
Članek prikazuje določitev energijske funkcije EES, ki vsebuje najbolj vsestransko napravo FACTS, t.j.

univerzalni prečni transformator (UPT). Določena je na modelu EES z ohranjeno strukturo, kar med drugim omogoča upoštevanje več naprav FACTS hkrati.

V nadaljevanju je predstavljen princip direktne Ljapunove metode, v naslednjem poglavju sledi opis UPT, v 4. poglavju izpeljava energijske funkcije, v 5. poglavju numerični primeri ugotavljanja tranzientne stabilnosti EES in v 6. poglavju sklep članka.

2. Direktna Ljapunova metoda

Uporabo direktne Ljapunove metode za ugotavljanje tranzientne stabilnosti EES lahko ilustrativno prikažemo na mehanskem modelu kroglice na skledasto oblikovani površini kot v [2]. Model je prikazan na sliki 1. Površina skledaste oblike pomeni potencialno energijo sistema po odpravi motnje. Za omrežje s tremi generatorji jo lahko predstavimo kot ploskev v tridimenzionalnem prostoru, kjer horizontalni osi predstavljata rotorski kot dveh generatorjev glede na tretjega. (t.j. δ_1 in δ_2 glede na sliko 1), vertikalna os pa potencialno energijo sistema. Potencialna energija ima lokalni minimum v stabilni ravnovesni točki, ki ustreza rotorskim kotom po končanem prehodnem pojavu po odpravi motnje. Okrog te točke potencialna energija tvori površino skledaste oblike, ki je stabilno območje obratovanja sistema.



Slika 1: Kroglica na površini potencialne energije
Figure 1: Ball on a potential-energy surface

Stanje sistema (t.j. kote rotorjev) predstavlja kroglica, katere kinetična energija predstavlja kinetično energijo sistema in se kotali po površini potencialne energije. V stacionarnem stanju kroglica miruje na dnu sklede v stacionarni ravnovesni točki. Ko nastane motnja, npr. kratek stik, kroglica pospešuje proti vrhu sklede, vse dokler motnja ni odstranjena. Glede na vsoto kinetične in potencialne energije kroglice v trenutku odstranitve motnje se lahko le-ta odkotali čez rob oz. prevoj sklede, kar pomeni nestabilno stanje, ali pa niha v skledi in se vrne na dno, kar pomeni stabilno stanje. Za ugotavljanje tranzientne stabilnosti sistema vsoto kinetične in potencialne energije kroglice primerjamo s kritično energijo, t.j. potencialno energijo EES na meji stabilnega območja.

Meja stabilnega območja poteka po prevojnih točkah, kot je prikazano na sliki 1. Eno od meril tranzientne stabilnosti je kritični čas odstranitve motnje (critical clearing time - CCT). To je čas, v katerem mora biti motnja odstranjena, da sistem ohrani stabilnost. Za povsem točno ugotovitev CCT bi morali določiti kritično energijo v točki, kjer bi kroglica pri tem CCT dosegla mejo stabilnosti. Ker to točko lahko določimo le s ponavljanjem simulacije, si pomagamo s poenostavitvami. Prvi način poenostavitve je, da za kritično energijo določimo potencialno energijo v najnižji sedelni točki. S tem je ugotovljeni CCT vedno manjši od dejanskega in je tako »na varni strani«. Vendar se je izkazalo, da so ti rezultati preveč konservativni in s tem predaletč od dejanskih, še zlasti pri EES z večjim številom generatorjev in s tem z večjim številom sedelnih točk, ki so lahko precej oddaljene od dejanske trajektorije kroglice. Druga možnost izbire kritične energije je vrednost potencialne energije v točki sedla, ki je najbližje trajektoriji kroglice. Tretja možnost je metoda PEBS (potential energy boundary surface), s katero kritično energijo določimo kot vrednost potencialne energije v točki, kjer kroglica prečka mejo stabilnosti, če motnje ne odstranimo. S tem se izognemo matematično zapletenemu iskanju sedelnih točk. Izvedemo le eno simulacijo, t.j. simulacijo sistema z neodpravljeno motnjo. CCT določimo kot trenutek, ko je na trajektoriji kroglice z neodstranjeno motnjo vsota kinetične in potencialne energije kroglice (t.j. energija sistema z odpravljeno motnjo) enaka potencialni energiji kroglice na meji stabilnosti.

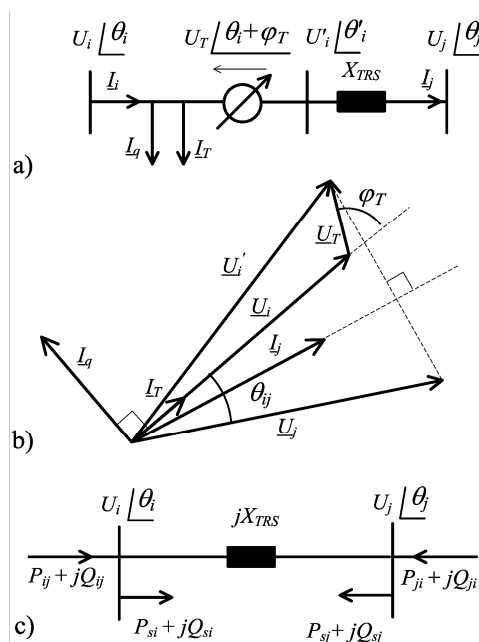
Za sistem generator – toga mreža postane tridimenzionalna krivulja na sliki 1 dvodimenzionalna z eno samo prevojno točko, ki določa mejo stabilnosti. Trajektorija takega sistema (kroglice) je enoumno določena, zato se morajo CCT, določeni po direktni metodi, povsem ujemati z rezultati simulacijske metode. Pogoj za to je seveda pravilna energijska funkcija EES, po kateri računamo vrednost potencialne in kinetične energije. Tako lahko na sistemu generator – toga mreža s primerjanjem CCT, dobljenih s pomočjo simulacije in direktne metode, potrjujemo ustreznost energijske funkcije EES.

3. Prenosne karakteristike UPT

Za upoštevanje UPT v energijskih funkcijah EES tega predstavimo z injekcijskim modelom. Za sistem brez upoštevanja izgub UPT lahko zapišemo kot serijsko vezan napetostni vir z reaktanco X_{TRS} in vzporedno priključenim tokovnim virom. Model naprave, nameščene med zbiralki i in j , ter diagram fazorjev napetosti predstavlja slika 2 (a-b).

Tok I_T je v fazi z \underline{U}_i in predstavlja izmenjavo delovne moči med serijsko in vzporedno vejo. I_q je jalovi tok paralelne veje in je v večjem delu operacijskega območja neodvisen od velikosti napetosti

U_i . Regulabilni parametri so U_T , φ_T in I_q , medtem ko je I_T odvisen od injicirane delovne moči v serijski veji.



Slika 2: a) model UPT; b) diagram fazorjev napetosti; c) injekcijski model
Figure 2: a) model of the UPFC; b) phasor diagram; c) injection model

Injekcijski model serijske veje UPT je predstavljen v [3]. Je enak splošnemu injekcijskemu modelu statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (SSSC - static synchronous series compensator). Dodamo še jalovi tok vzporedne veje in po nekaj matematičnih operacijah dobimo izraze za injekcijski model UPT.

$$P_{si} = \frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (1)$$

$$P_{sj} = -\frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2)$$

$$Q_{si} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) + U_i \cdot I_q \quad (3)$$

$$Q_{sj} = -\frac{U_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) \quad (4)$$

kjer je $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ glede na sliko 2.

4. Energijska funkcija UPT

Energijska funkcija kot integral nihajnih enačb EES z ohranjeno strukturo je konstruirana v [4]. Ta energijska funkcija V je zapisana kot vsota kinetične energije V_k in potencialne energije V_p .

$$V = V_k + V_p \quad (5)$$

Energijska funkcija (5) je izpeljana za EES brez naprav FACTS. Ker je določena za EES z ohranjeno strukturo, vpliv UPT določimo kot dodatek k energijski funkciji (5). Glede na postopek izpeljave (5) v [4] ta dodatek določimo kot integral vsote injiciranih delovnih in jalovih moči (1) – (4), ki jih preoblikujemo enako kot nihajne enačbe EES v [4]. Pri tem je energijska funkcija odvisna od regulacijske strategije oz. od poteka regulabilnih parametrov v času prehodnega pojava in je za vsako regulacijsko strategijo ni mogoče najti v analitični obliki, temveč ostaja v obliki integrala in je s tem odvisna od poti. Naš pristop k reševanju tega problema je, da smo energijsko funkcijo izpeljali za konstantne regulabilne parametre, ki omogočajo najmanj zapleteno določanje energijske funkcije. Uporabo tako določene energijske funkcije smo razširili na odsekoma konstantne parametre. Tako se v času prehodnega pojava regulabilni parametri lahko večkrat skočno spremenijo.

V preteklosti je že bilo ugotovljeno ([3], [5]), da mora UPT za največje izboljšanje tranzientne stabilnosti injicirati največji U_T in I_q . S tem je predpostavka, da sta U_T in I_q konstantna (t.j. nastavljena na maksimum), povsem upravičena. Upoštevanje konstantnega kota φ_T na splošno ni najbolj primerno za izboljšanje tranzientne stabilnosti, vendar pa je ob upoštevanju možnosti uporabe izpeljane energijske funkcije tudi za odsekoma konstantne regulabilne parametre ta način upoštevanja ustrezen. Upoštevanje odsekoma konstantnih parametrov je opisano v poglavju 4.2. Ob upoštevanju, da so U_T , I_q in φ_T konstantni, lahko konstruiramo energijsko funkcijo UPT.

4.1 Konstruiranje Ljapunove energijske funkcije

Za konstrukcijo energijske funkcije UPT sledimo postopku iz [4], ki opisuje konstruiranje energijske funkcije za EES brez naprav FACTS. Injicirane delovne moči (1) in (2) pomnožimo s časovnim odvodom posameznih kotov napetosti \mathcal{U}_i in \mathcal{U}_j in jih seštejemo:

$$P_{si} \mathcal{U}_i = \frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot \mathcal{U}_i \quad (6)$$

Enačbe (3) in (4) delimo z U_i in U_j in množimo s časovnim odvodom \mathcal{U}_i in \mathcal{U}_j :

$$\frac{Q_{si}}{U_i} \mathcal{U}_i = \frac{\mathcal{U}_i U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) + \mathcal{U}_i \cdot I_q \quad (7)$$

$$\frac{Q_{sj}}{U_j} \mathcal{U}_j = -\frac{\mathcal{U}_j U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (8)$$

Enačbe (6) - (8) seštejemo:

$$\frac{U_T}{X_{TRS}} \cdot \left[U_j \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot \mathcal{U}_i + \mathcal{U}_i \cdot \cos(\varphi_T) - \mathcal{U}_j \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right] + \mathcal{U}_i \cdot I_q \quad (9)$$

Ob predpostavki, da sta U_T in I_q nastavljena na največjo vrednost in da je φ_T konstanten, lahko z nekaj intuicije zapišemo (9) kot:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{U_T}{X_{TRS}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_T) - U_j \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right) + U_i \cdot I_q \right] \quad (10)$$

Zdaj lahko preprosto dobimo Ljapunovo energijsko funkcijo v obliki $V_{UPT} = f(\underline{U}_i, \underline{U}_j)$ kot integral (10), ki opisuje potencialno energijo UPT:

$$V_{UPT} = \frac{U_T}{X_{TRS}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_T) - U_j \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right) + U_i \cdot I_q \quad (11)$$

Ta energijska funkcija je enaka vsoti injiciranih jalovih moči UPT Q_i in Q_j glede na sliko 2c.

Energijske funkcije naprav FACTS so tesno povezane z injiciranimi jalovimi močmi naprav v omrežje. V okviru raziskav smo ugotovili, da je pri napravah, ki delujejo kot napetostni ali tokovni pretvornik in sta injicirana napetost ali/in tok neodvisna od napetosti priključnih sponk, energijska funkcija enaka celotni vsoti jalovih moči, ki jih naprava injicira v omrežje. Take naprave so poleg UPT še npr. STATCOM (Static compensator), SSSC (static synchronous compensator) in IPFC (interline power-flow controller). Pri napravah, kjer je vir napetosti ali toka pasivni element in sta injicirana napetost ali tok linearno odvisna od napetosti priključnih sponk, je energijska funkcija enaka polovici injicirane jalove moči naprave v omrežje. Take naprave so SVC (static var compensator), CSC (controllable series compensation), PAR (phase angle regulator) in QBT (quadrature boosting transformer).

4.2 Upoštevanje odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov

Konstantni regulabilni parametri, za katere smo definirali energijsko funkcijo UPT (11), na splošno niso najbolj primerni za proučevanje prispevka serijskih naprav FACTS k izboljšanju tranzientne stabilnosti. Osredotočili smo se predvsem na parameter φ_T , t.j. na kot injicirane serijske napetosti UPT. Testni primeri v [6] so pokazali, da se kot φ_T ne spreminja hitro, torej ga lahko upoštevamo kot odsekoma konstantnega – vrednost kota φ_T se med trajanjem prvega nihaja po odstranitvi motnje le nekajkrat skočno spremeni. Če je kot φ_T odsekoma konstanten, velja za UPT enaka energijska funkcija (11) – vendar le v okviru posameznega odseka, v katerem so parametri konstantni. Pri uporabi direktnih metod za ugotavljanje tranzientne stabilnosti, kjer primerjamo vrednost energijske funkcije med posameznimi odseki z različnimi regulacijskimi parametri, je treba posamezne odseke medsebojno uskladiti, kot je to opisano v nadaljevanju.

Za pravilno primerjavo energije V , ki je vsota kinetične energije V_k in potencialne energije V_p , s

potencialno energijo V_p vzdolž trajektorije sistema za čas prvega nihaja mora biti potencialna energija V_p vzdolž trajektorije sistema zvezna. Poudariti je treba, da se ob skočni spremembi kota injicirane napetosti φ_T skočno spremenijo tudi fazorji napetosti omrežja, medtem ko se koti in hitrosti generatorjev ne morejo skočno spremeniti. Posledično se skočno spremeni potencialna energija sistema, ki je odvisna od fazorjev napetosti omrežja. Da naredimo potencialno energijo V_p zvezno vzdolž trajektorije sistema, moramo odšteti posamezne skočne spremembe potencialne energije, ki nastanejo ob spremembi kota φ_T . To je mogoče narediti, saj je V_p določena le do integracijske konstante. Označimo število sekcij do trenutno računane potencialne energije V_p z w . Ustrezno vrednost potencialne energije izračunamo s pomočjo enačbe:

$$V_p = V_p^w - V_{pPRVA}^w + \sum_{z=1}^{w-1} [V_{pZADNJA}^z - V_{pPRVA}^z] \quad (12)$$

kjer je

$$V_p = V_p + V_{UPFC} \quad (13)$$

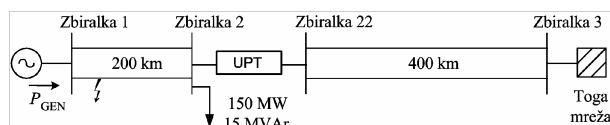
Oznaka PRVA pomeni prvo vrednost potencialne energije V_p v odseku z , oznaka ZADNJA pa zadnjo vrednost potencialne energije V_p v odseku z vzdolž trajektorije sistema. Vsota, izražena v drugem delu (12), pomeni vsoto posameznih skokov potencialne energije pri spremembi kota φ_T .

Enačbo (12) lahko posplošimo za upoštevanje skočnega spreminjanja kateregakoli od regulabilnih parametrov UPT.

5. Numerični primeri

Ugotovljeno energijsko funkcijo UPT (11) smo najprej preverili na longitudinalnem sistemu generator – toga mreža. Za določanje CCT smo uporabili metodo PEBS, opisano v 2. poglavju.

Testni sistem predstavlja slika 3. Sestavljen je iz generatorja, priključenega na togo mrežo prek dveh odsekov dveh vzporednih 500 kV daljnovodov. UPT moči 265 MVA je vključen v sredini vodov prek serijskega transformatorja s kratkostično napetostjo $u_k=3.75\%$. Pred in med motnjo sta parametra U_T in I_q nastavljena na vrednost 0. Na zbiralko 2 smo priključili breme. Generator je predstavljen klasično, začetna napetost je bila nastavljena na 1 p.u. in kot 30° . Predvideli smo odstranitev motnje, torej je konfiguracija sistema pred motnjo in po njej enaka.



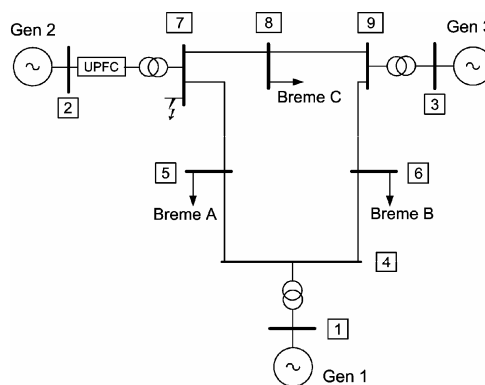
Slika 3. Testni sistem generator – toga mreža
Figure 3. Single-machine infinite-bus test system

Za kratkek stik blizu zbiralke 2 smo izračunali CCT s pomočjo simulacijske metode korak za korakom ter po direktni metodi s pomočjo novo konstruirane energijske funkcije. Rezultati za različne največje vrednosti U_T in I_q in za različne kote φ_T so predstavljeni v tabeli I. Delovna bremena so modelirana kot konstantne admitance, tako kot v [4], zato je njihov vpliv v direktni metodi določen numerično. Kot je razvidno iz tabele I, so rezultati digitalne simulacijske in direktne metode identični, kar potrjuje pravilnost konstruirane energijske funkcije (11). Koti φ_T so izbrani tako, da je povečanje tranzientne stabilnosti maksimalno. Pri drugih kotih je povečanje tranzientne stabilnosti manjše, lahko pa pride tudi do zmanjšanja tranzientne stabilnosti.

TABELA I
KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE

U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
			čas [ms]	čas [ms]
0	0	0	133	133
0.1	85	0	144	144
0.15	85	0	149	149
0	0	0.1	142	142
0.15	85	0.1	156	156
0.15	85	0.2	162	162

Naslednji numerični primer prikazuje izračun CCT, ko so regulabilni parametri odsekoma konstantni. Izračun smo izvedli na IEEE devetvozliščnem sistemu s tremi generatorji [8], ki ga prikazuje slika 4.



Slika 4: IEEE devetvozliščni sistem z enim UPT
Figure 4: IEEE nine-bus test system with one UPFC

Regulabilni parameter φ_T se skočno spreminja tako, da je pretok delovne moči med serijsko in vzporedno vejo UPT čim manjši (t.j. niha okrog vrednosti 0, pri tem je amplituda nihanja lahko poljubno majhna, odvisno od velikosti koraka spreminjanja kota φ_T). Poleg tega smo vzporedni jalovi tok I_q nastavili na vrednost 0. Tako UPT obratuje kot SSSC. Pri izračunu CCT smo za upoštevanje skokov potencialne energije upoštevali (12) in (13).

Rezultati so zbrani v tabeli II. Izračunane CCT smo primerjali z rezultati v [7], kjer je predstavljen SSSC v enakem IEEE devetvozliščnem testnem sistemu. Rezultati so v obeh primerih enaki. Izračun lahko upoštevamo kot dokaz, da v direktnih metodah ugotavljanja tranzientne stabilnosti lahko odsekoma konstantne parametre uporabimo za aproksimacijo zveznih regulacijskih strategij.

TABELA II
IZRAČUNANI CCT PO DIREKTNI METODI ZA SSSC V [7]
IN ZA UPT, KI OBRATUJE KOT SSSC

SSSC		UPT	
U_T [pu]	U_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
brez SSSC	brez UPT	245	245
0	0	234	234
0.1	0.1	241	241
0.2	0.2	247	247
0.3	0.3	253	253

Z dodatnimi numeričnimi primeri smo ugotavljali občutljivost metode na širino koraka, v katerem predpostavimo, da so regulacijski parametri konstantni. Izračuni kažejo, da med trajanjem prvega nihaja dovolj le par skočnih sprememb, da je sprememba CCT manjša od 1 ms, kolikor znaša integracijska konstanta numeričnih izračunov.

6. Sklep

Za uporabo direktne Ljapunove metode ugotavljanja tranzientne stabilnosti EES smo konstruirali energijsko funkcijo EES, ki upošteva vključitev UPT. Ker je energijska funkcija določena za sistem z ohranjeno strukturo, omogoča upoštevanje več UPT hkrati. Energijska funkcija je določena za konstantne regulabilne parametre UPT in razširjena za uporabo pri odsekoma konstantnih parametrih. Ustreznost energijske funkcije smo preverili s primerjavo rezultatov ugotavljanja kritičnih časov odstranitve motnje po direktni in simulacijski metodi na testnem sistemu generator – toga mreža. Ustreznost upoštevanje odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov smo preverili na IEEE devetvozliščnem sistemu s tremi generatorji, pri čemer smo kot injicirane napetosti UPT skočno spreminjali tako, da je obratoval kot SSSC. S primerjavo rezultatov med UPT in SSSC smo potrdili ustreznost upoštevanja odsekoma konstantnih parametrov.

Rezultati numeričnih primerov kažejo, da UPT lahko izboljša tranzientno stabilnost EES. Ugotovljeno energijsko funkcijo bi lahko uporabili tudi za regulacijsko strategijo UPT za čim večje izboljšanje tranzientne stabilnosti na podlagi numeričnega iskanja največjega odvoda energijske funkcije EES znotraj posameznega časovnega odseka s konstantnimi regulacijskimi parametri, kar bo smer nadaljnega dela.

7. Literatura

- [1] P. Sauer, M. A. Pai, "Power System Dynamics and Stability," Prentice Hall, 1998.
- [2] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani, "A practical method for the direct analysis of transient stability," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, pp. 573–582, March/April 1979.
- [3] K. R. Padiyar, V. Immanuel, "Modelling of SVC for stability evaluation using structure preserving energy function," *Electric Power & Energy Systems*, vol. 16, str. 339–348, 1994.
- [4] Th. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella, "Structure preserving direct methods for transient stability analysis of power systems," *Proceedings of 24th Conference on Decision and Control*, str. 70-77, December 1985.
- [5] L. D. Colvara, E. B. Festrats, S. C. B. Araujo, "Power System Stability Analysis With FACTS Effects," *Proceedings of the 2nd IASTED International Conference, Power and Energy Systems*, str. 227–232, Junij 2002.
- [6] R. Mihalič, "Določitev obratovalnih parametrov prečnega transformatorja za izboljšanje obratovalnih razmer in povečanje prenosne zmogljivosti elektroenergetskega sistema," doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1993.
- [7] U. Gabrijel, "Naprave FACTS v energijskih funkcijah elektroenergetskih sistemov", Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2003.
- [8] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Press Power Systems Engineering Series, Revised Printing, 1999.

Valentin Ažbe je diplomiral leta 1996, magistriral leta 2003 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 2000 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko kot mladi raziskovalec. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo. Od leta 2005 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Ukvarja se z analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.

Rafael Mihalič je diplomiral leta 1986, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Po diplomi je postal asistent na omenjeni fakulteti na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave. Med letoma 1988 in 1991 je bil zaposlen pri SIEMENS AG Erlangen na inštitutu za razdeljevanje električne energije in načrtovanje omrežij. Od leta 2005 je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Je član CIGRE, član IEEE, predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje delovanja vključuje predvsem analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.