

Vpliv statičnega var kompenzatorja na harmonsko popačenje v slovenskem prenosnem omrežju

Ambrož Božiček, Leopold Herman, Boštjan Blažič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ambroz.bozicek@gmail.com

Povzetek. Prispevek predstavlja vidike vpliva vgradnje statičnega var kompenzatorja (SVC) v slovensko prenosno omrežje na kakovost električne energije in se osredotoča na posledično povzročena harmonska popačenja. Za napetostne razmere v slovenskem prenosnem omrežju so značilna precejšnja nihanja na dnevni ravni, kar je posledica spreminjanja odjema električne energije iz prenosnega omrežja v slovenskih vozliščih, spreminjanja tranzita električne energije med sosednjimi državami prek Slovenije, prav tako pa tudi variacije nivoja napetosti v sosednjih državah (predvsem na Hrvaškem). Ob klasičnih elektramah, ki uravnavajo napetostni nivo z regulacijo jalove moči, se regulacija napetosti lahko izvaja s pomočjo pasivnih reaktivnih elementov (dušilk in kondenzatorjev) ali s katero od aktivnih kompenzacijskih naprav, kot je statični var kompenzator (SVC). Takšna naprava sicer omogoča relativno hitre dinamične odzive na spremembe razmer v omrežju, vendar zaradi tiristorske tehnologije med svojim delovanjem proizvaja tokovne harmonske komponente, kar lahko posledično negativno vpliva na harmonsko napetostno popačenje omrežja na širšem območju električnega omrežja. V prispevku bomo nakazali lastnosti ene od mogočih izvedb SVC, ki je bila za ELES ena od možnih variant dinamičnih kompenzacijskih naprav za regulacijo napetosti v visokonapetostni razdelilni transformatorski postaji v Beričevem. Prikazana bosta vpliv delovanja SVC na harmonsko popačenje omrežja in vpliv variacije harmonskih impedanc omrežja.

Ključne besede: Statični var kompenzator SVC, harmonsko popačenje, modeliranje prenosnega omrežja, EMT-simulacije

Impact of the static-var compensator on the harmonic distortion in the Slovenian power transmission network

The paper analyses the impact of the static-var compensator (SVC) on the power quality, specifically on harmonic distortion. To minimize the daily voltage fluctuations caused by variations in the power consumption, power transfer over the Slovenian power transmission network and voltage levels in the neighboring countries, effective solutions are needed for voltage control by controlling the reactive power. This can be assured by using passive reactive elements (shunt reactors and shunt capacitors) or active compensation devices, such as SVC. As one of the possible solutions the paper proposes SVC connected at the Beričevo transformer station. The impact of the harmonic distortion on the network is analyzed also in terms of different configurations of the Slovenian power transmission system.

Keywords: Static-var compensator SVC, harmonic distortion, transmission system modelling, EMT simulations

1 UVOD

Visokonapetostna omrežja za prenos električne energije postajajo vse bolj podvržena dejavnikom, ki vplivajo na visoka nihanja napetosti. Eden od pomembnih vplivov je prav gotovo liberalizacija trga z električno energijo, zaradi katere obremenitve sistema sledijo ekonomskim kriterijem trgovanja z električno energijo, tehnični vidiki pa v takih razmerah zgolj postavljajo omejitve prenosa energije po omrežju. Večje spremembe v obremenitvah sistema, ki jih povzročajo variacije lokalnega odjema energije, nestanovitni prehodi električne energije prek slovenskega omrežja, hkrati pa tudi vpliv napetostnih razmer v sosednjih omrežjih vplivajo na napetostno raznolikost in variacije znotraj slovenskega prenosnega omrežja. Največja dnevna nihanja napetosti običajno opazamo med dnevnim in nočnim obratovanjem. V dnevnem času je poraba tako jalove kakor delovne moči visoka, zato so napetosti v omrežju zaradi padcev napetosti od generatorjev do porabnikov nižje, ponoči pa razbremenjeni daljnovodi, ki so po naravi tudi kapacitivni elementi, dvigujejo napetost v omrežju.

Ena od običajnih rešitev take situacije je regulacija napetosti s pomočjo kompenzacije jalove moči v omrežju, kar pomeni, da kapacitivno moč daljnovodov, ki dviguje napetost omrežja, kompenziramo z generiranjem jalove moči induktivnega karakterja, s čimer kapacitivni tok daljnovodov delno preusmerimo v dušilke. Ta ukrep ustrezno zniža napetosti. Podobno lahko prenizke napetosti omrežja, ki jih povzroča pretok delovne in induktivne jalove energije po omrežju, kompenziramo z lokalno generacijo kapacitivne moči.

Ena izmed modernih rešitev za kompenzacijo jalove moči je po drugi strani klasični aktivni kompenzator, statični var kompenzator [1]. Te naprave so v uporabi že desetletja in učinkovito rešujejo težave kompenzacije v industrijskih omrežjih s kompenzacijo odjema jalove energije in zmanjševanjem vpliva pulzirajočih odjemalcev na fliker v omrežju [2]. V prenosnih omrežjih se SVC uporablja za dinamično regulacijo napetosti v stacionarnih ali tranzientnih okoliščinah (npr. subsinhronska medsystemska nihanja, kolebanje napetosti ipd. [6]), kot kompenzator jalove moči pa je v vlogi podpore napajanja dolgih kabelskih povezav in kompenzacije odjema jalove moči naravno komutirajočih pretvorniških naprav (npr. HVDC pretvorniške postaje [7]).

Poleg tega da SVC generira zvezno variabilno jalovo moč, pa v odvisnosti od delovne točke proizvaja tudi relativno velik delež tokovnih harmonskih injekcij [1]. Te se deloma pretakajo med elementom, ki popačenje proizvaja (tiristoro regulirana dušilka ali TCR, angl. Thyristor Controlled Reactor), in filtrskimi elementi v sklopu SVC-naprave, del pa jih vseeno teče v preostalo omrežje.

Kolikšen je ta delež in kako vpliva na rezultirajoče harmonsko popačenje napetosti v posameznih vozliščih prenosnega omrežja, je močno odvisno od impedančne karakteristike omrežja pri posameznih harmonskih komponentah, določanje teh karakteristik pa je predvsem v prenosnih omrežjih v praksi zelo negotovo zaradi merilne opreme (v primeru izvedbe meritev na terenu) ali zaradi pomanjkljivih simulacijskih modelov (v primeru, ko se impedanca določa s pomočjo modeliranja).

V članku bo prikazano, kako se lahko v praksi določajo impedančne karakteristike prenosnih omrežij s pomočjo simulacijskih modelov, v katerem rangu so impedance in kako natančno so lahko določene. V kombinaciji s harmonskimi injekcijami, ki jih predvidevamo za nelinearne naprave (SVC), lahko s pomočjo impedanc omrežja določimo vpliv naprave na nove harmonske popačitve napetosti v prenosnem omrežju.

2 SVC V SLOVENSKEM PRENOSNEM OMREŽJU

Vgradnja SVC v slovensko prenosno omrežje je predvidena kot ena od potencialnih rešitev, ki bi omogočala kompenzacijo jalove moči v osrednjem vozlišču, v Beričevem. Pri delovanju v kombinaciji s preostalimi predvidenimi kapacitivnimi in induktivnimi pasivnimi kompenzacijskimi napravami bi SVC sodeloval v decentraliziranem sistemu za pomoč pri regionalni regulaciji napetosti.

Prednost SVC pred drugimi pasivnimi, mehansko vklopljivimi elementi, je, da SVC sodi med aktivne kompenzacijske naprave, ki lahko jalovo moč regulirajo brezstopenjsko oziroma zvezno. Neprekinjeno prilagajanje jalove moči z minimalnim reakcijskim časom nekaj deset milisekund omogoča sodelovanje pri kompenzaciji dinamičnih pojavov, kot sta pojav kolebanja napetosti (fliker) in medsystemska nihanja.

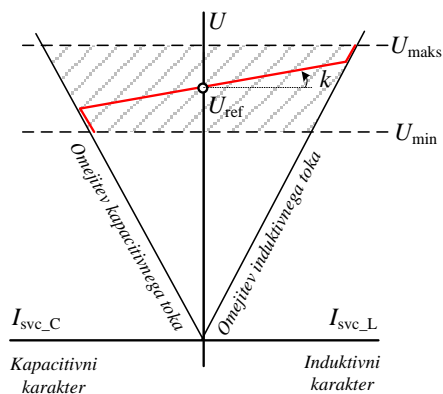
Ker je predvidena rešitev slovenskega napetostnega problema decentralizirana kompenzacija jalove moči, je velikost posamezne kompenzacijske enote manjša, prilagojena doseganju optimalnega razmerja med minimalnim zahtevanim vplivom na omrežje in ceno investicije. Cenovno je izvedba enostavnih mehansko vklopljivih elementov sprejemljivejša kot SVC, a ne ponuja dinamičnih lastnosti, kot jih SVC, zato je v slovenskem prenosnem omrežju predvidena uporaba enega dinamičnega kompenzatorja in večjega števila mehansko vklopljivih enot, kar tudi zmanjšuje možnosti interakcije med regulatorji posameznih naprav.

3 LASTNOSTI SVC

Na podlagi predhodno izvedenih analiz pretokov moči v skrajnih napetostnih razmerah [8] je optimalen rang moči enote SVC, lociranega v Beričevem, ki omogoča tehnično in ekonomsko upravičljivo napetostno regulacijsko območje, takšen, da zagotavlja proizvodnjo tako jalove induktivne kakor kapacitivne jalove moči med vrednostmi okoli -150 Mvar (C) in 150 Mvar (L).

Zaradi velike odvisnosti maksimalne izhodne moči SVC od napetosti na mestu priključitve je treba za doseganje zelene nazivne moči v celotnem napetostnem razponu zadostno dimenzionirati elemente SVC, in to tako, da pri najnižjih napetostih še zagotavljajo generacijo pričakovane jalove moči. Takšno dimenzioniranje je za SVC, ki temelji na pasivnih elementih, katerih izhodna moč se spreminja z napetostjo na priključnih sponkah, bistveno drugačno kot npr. za statični kompenzator (STATCOM, [8]), katerega tokovno delovno območje je skoraj neodvisno od napetosti na priključnem mestu.

Primer obratovalnega območja omenjenega SVC je prikazan na Slika 1. Diagram prikazuje vse delovne točke (šrafirano območje), ki jih lahko dosežemo s SVC, z neprekinjeno črto pa je prikazana karakteristika delovanja SVC pri regulaciji napetosti z referenčno vrednostjo U_{ref} in naklonsko karakteristiko k .



Slika 1: Obratovalni diagram za SVC.

3.1 Določanje osnovnih elementov SVC

Elemente SVC določamo na podlagi zahtevane jalove moči pri določeni napetosti, zveznosti pri spreminjanju moči in potrebe po filtriranju harmonskih komponent.

Moč se najprej določi za kapacitivne elemente, ki morajo zagotavljati določeno raven kapacitivne moči pri najnižjih omrežnih napetostih. V drugem koraku se določi velikost zvezno nastavljivega induktivnega elementa (TCR), katerega naloga je, da skompenzira moč kapacitivnih elementov in generira še dodatno induktivno moč, ki je določena kot maksimalna induktivna moč SVC pri določeni napetosti.

TCR pri delovanju povzroča veliko harmonskih tokov, zato so kapacitivni elementi konfigurirani kot filtri, ki zagotavljajo potrebno znižanje harmonskih komponent, ki jih SVC injicira v omrežje.

Vprašanja, ki jih v fazi načrtovanja takšne naprave lahko razrešimo z ustreznimi sistemskimi analizami, se nanašajo na sledeče:

- rang dinamične in statične moči;
- izvedba induktivnih elementov – TCR: enojen TCR ali npr. dvojen TCR polovičnih moči;
- izvedba kapacitivnih elementov: MSC (mehansko vklopljiv kondenzator) ali harmonski filter;
- analiza ključnih harmonikov, ki jih je nujno treba filtrirati zaradi prevelikega vpliva na preostalo omrežje;
- število filtrskih enot;
- topologija filtrske vezave.

Konfiguracija SVC je določena v odvisnosti od namena uporabe. SVC, ki se uporabljajo v industrijskih omrežjih, so večinoma namenjeni kompenzaciji flikerja in jalove moči, medtem ko pa je uporaba v prenosnih omrežjih namenjena napetostni podpori.

Natančnejše analize pokažejo, da je delovanje TCR zelo občutljivo za nesimetrične razmere v sistemu in prisotnosti nizkih sodih harmonikov. Nesimetrična napetost na priključnih sponkah lahko povzroči, da tretji harmonik, ki ga povzroča posamezna veja v TCR, ni popolnoma kompenziran na delta navitju TCR, zato se

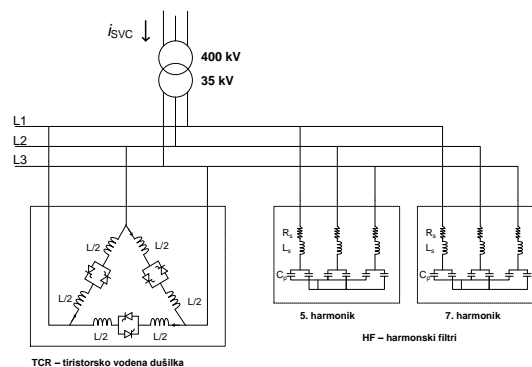
del tretjega harmonika injicira v omrežje. Podobno se dogaja v primeru sodih napetostnih harmonikov (predvsem drugega in četrtega). Ti povzročijo, da se injekcije drugega harmonika TCR še dodatno povečajo, interakcija z omrežjem pa lahko povzroči nepričakovana nasičenja transformatorjev, nepravilno delovanje zaščitnih elementov ipd. Minimizacija vpliva nizkih sodih harmonikov se velikokrat izvede s pomočjo uporabe ustrezno uglašene C-tip filtra, s čimer pa se delno dušijo tudi višjeharmonske komponente.

V prenosnih omrežjih, kjer je SVC dimenzioniran zgolj za podporo napetosti, takšnih »industrijskih« razmer v večini primerov ne zasledimo. Poleg manjših nesimetrij tudi ni (vsaj za zdaj) prisotnih toliko sodih harmonikov. V tem primeru lahko govorimo o simetričnih napetostnih razmerah, ki omogočajo, da se tretje harmonske injekcije ($n*3$) kompenzirajo znotraj TCR, preostale lihe komponente (5., 7., 11., 13. itd.) pa po potrebi filtriramo s pasivnimi filtri v različnih kombinacijah (samo 5. harmonska ali 5. in 7. ali samo 7. ipd.). Na Slika 2 je predstavljena ena od konvencionalnih izvedb SVC, ki vsebuje naslednje elemente:

- TCR v enojni izvedbi,
- harmonski filter za 5. harmonsko komponento in
- harmonski filter za 7. harmonsko komponento.

Koliko bodo filtri filtrirali harmonike TCR, je odvisno tudi od harmonske impedance preostalega omrežja. Ta je lahko zelo kompleksna in odvisna od topoloških značilnosti, bremen, vodov in drugih elementov, ki vplivajo na impedanco omrežja. Zato sistemske študije vpliva tokovnih harmonskih komponent na harmonsko popačenje napetosti zahtevajo natančne impedančne modele omrežja. Medtem ko impedance filtrov analiziramo analitično, pa impedanco omrežja zaradi kompleksnosti analiziramo z metodami frekvenčnega skeniranja [10][11], kar se lahko izvede v sklopu simulacijskih programov ali, sicer nekoliko oteženo, na realnem omrežju z merilnimi napravami.

SVC, ki je uporabljen v nadaljnjih analizah, je sestavljen iz enega TCR in dveh harmonskih filtrov (Slika 2), tabela 1 pa prikazuje parametre posameznih sestavnih elementov.



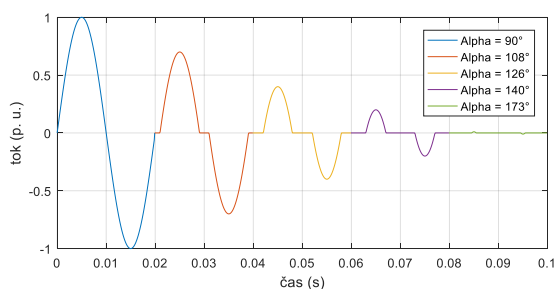
Slika 2: Izbrana topologija SVC.

Tabela 1: Nazivni podatki elementov SVC.

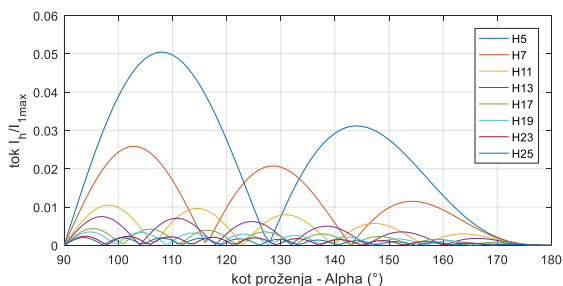
TCR	Q	-315 Mvar
	L_{Δ}	33 mH
	U	35 kV
	I_{HI}	3.0 kA
	α_{min}	95°
HF1	Vezava	LC serijsko
	QHF	100 Mvar
	f_{res}	245 Hz
	C	249 μ F
	L	1,69 mH
	$X_L/R_L @ f_{res}$	0,02
HF2	Vezava	LC serijsko
	QHF	50 Mvar
	f_{res}	345 Hz
	C	127 μ F
	L	1,67 mH
	$X_L/R_L @ f_{res}$	0,02

3.2 Tokovne injekcije TCR

TCR je element z dvema glavnima sestavnima elementoma, dušilkami in stikali (tiristorji). S pomočjo proženja ob natanko določenem trenutku znotraj ene periode lahko tiristorsko stikalo omogoča prevajanje induktivnega toka z različnimi amplitudami osnovne komponente. Tako se v idealnih razmerah kot proženja spreminja na območju med 90° in 180° in s tem navidezno spreminja induktivnost dušilke med vrednostjo $L = L$ (popolno prevajanje) in neskončno ($L \rightarrow \infty$, ves čas zaprta stikala). V vseh vmesnih korakih se TCR obnaša kot nelinearni element in povzroča tok z visoko vsebnostjo harmonskih komponent (Slika 3), katerih amplituda se spreminja v odvisnosti od kota proženja (Slika 4).



Slika 3: Karakteristični tok v eni veji TCR pri različnih kotih proženja.



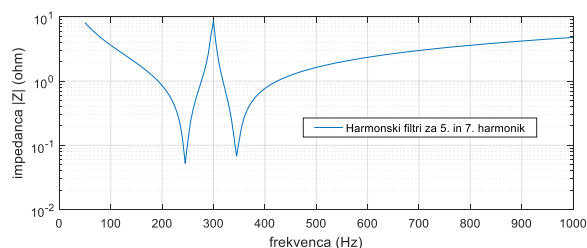
Slika 4: Amplituda harmonskih tokov TCR pri različnih kotih proženja.

TCR je v trifaznem vezju sestavljen iz treh vej, vezanih v trikot, kar omogoča kompenziranje komponent ničnega sistema že znotraj TCR, če so te komponente generirane simetrično v vseh treh vejah.

3.3 Določanje impedančne karakteristike harmonskih filtrov in prenosnega omrežja

Če TCR obravnavamo kot vir harmonskega toka, se ta tok lahko usmerja proti filterskemu vezju in preostalemu omrežju, odvisno od impedance posameznega dela, ki ju obravnavamo kot v paralelni vezavi. Poznavanje impedance je torej ključno za določanje harmonskih komponent toka in posledično napetostnih harmonskih popačitev v omrežju.

Na Slika 5 je prikazana impedančna karakteristika vezja obeh filtrov izbranega SVC. Iz slike so razvidne serijske nizkoimpedančne in paralelne visokoimpedančne resonančne točke, ki jih povzročata filtra na 35-kV zbiralki. Filtra sta praviloma uglašena nekoliko pod izbrano harmonsko frekvenco (tabela 1), ki jo želimo filtrirati, s čimer se izognemo obratovanju v resonanci, da omilimo pretirano nihanje impedance filtra v primeru nihanja omrežne frekvence ali ob minimalnem variranju impedanc elementov filtra.



Slika 5: Frekvenčna karakteristika harmonskih filtrov SVC na 35-kV zbiralkah.

Impedanca preostalega električnega omrežja je v večini primerov veliko bolj kompleksna. Vsak element, ki je priključen na omrežje, vpliva na potek karakteristike. Kombinacije reaktivnih elementov ustvarjajo paralelne in serijske resonančne tokokroge, upornosti pa resonance praviloma dušijo in določajo minimalne impedance v tokokrogih.

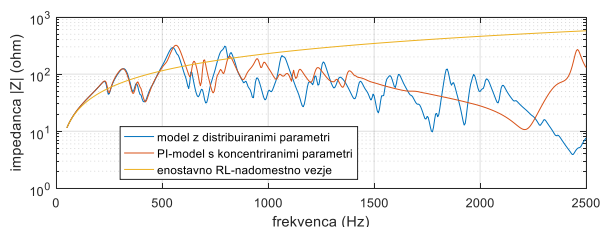
V enostavnih analizah, kjer nas harmonska popačenja ne zanimajo in analiziramo zgolj osnovnoharmonsko komponento, se visokonapetostno omrežje modelira z enostavnimi modeli, najpogosteje s serijsko vezavo induktivnosti in upornosti, ki skupaj določata takšno impedanco, da sta kos doseганju izbrane kratkostične moči in razmerja R/X pri nazivni napetosti. Seveda je jasno, da kompleksna omrežja, modelirana s takšno impedanco, pripisujejo višjiharmonskim impedancam povsem netočne vrednosti. Zato je treba frekvenčno karakteristiko omrežja analizirati na podlagi natančnega modela omrežja, ki zajema vse elemente, ki imajo večji vpliv na impedanco, merjeno v izbrani točki sistema. Pri tem so ključni elementi tisti, ki izkazujejo relativno

visoke vrednosti kapacitivnosti, kot npr. pri daljnovodih, kablovodih, kompenzacijskih napravah, filtrih ipd.

Natančneje lahko impedanco celotnega omrežja določimo s frekvenčnim skeniranjem omrežja. Tako sicer določimo nadomestno impedanco celotnega sistema, impedanco posamezne radialne veje pa na podlagi toka, ki teče v radialno vejo pri določeni harmonski napetosti iz točke opazovanja.

Slika 6 prikazuje rezultat frekvenčnega skeniranja omrežja Slovenije v izbranem vozlišču (RTP Beričevo), pri čemer so uporabljeni trije različni modeli daljnovodov omrežja:

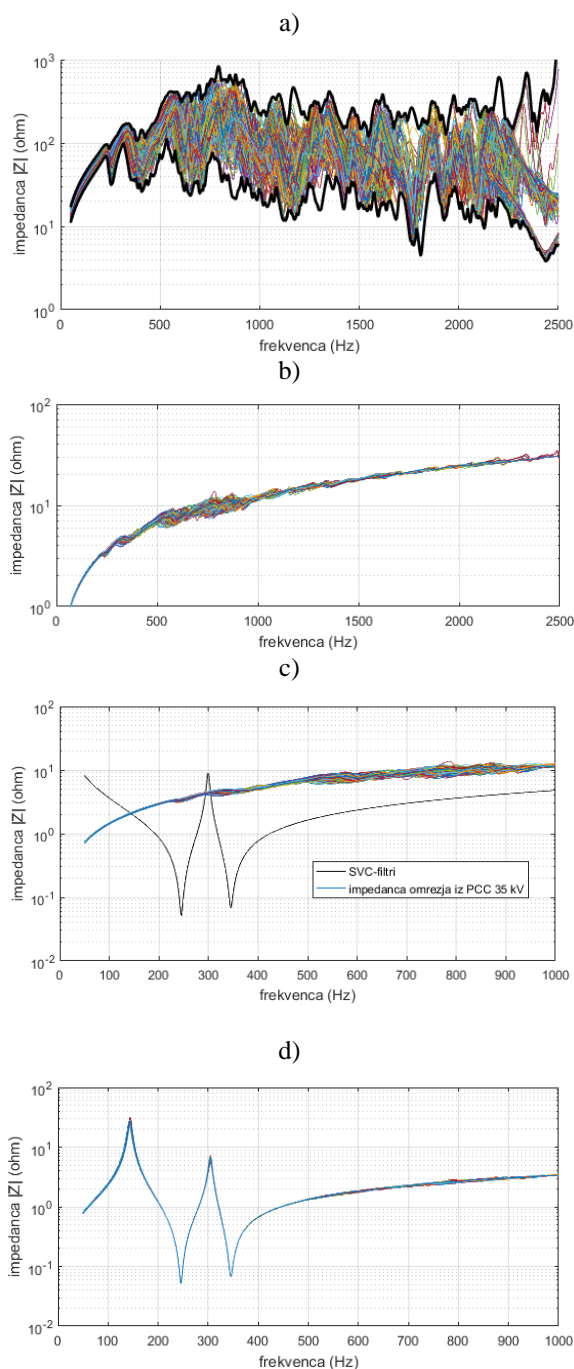
- poenostavljena impedanca RL;
- omrežje, modelirano s koncentriranimi PI-modeli vodov (poenostavljeni, frekvenčno neodvisni model); in
- omrežje, modelirano z modeli vodov s porazdeljenimi parametri (natančnejši, frekvenčno odvisni model).



Slika 6: Impedanca prenosnega omrežja iz 400-kV zbiralke v Beričevem za tri različne modele omrežja in eno konfiguracijo omrežja.

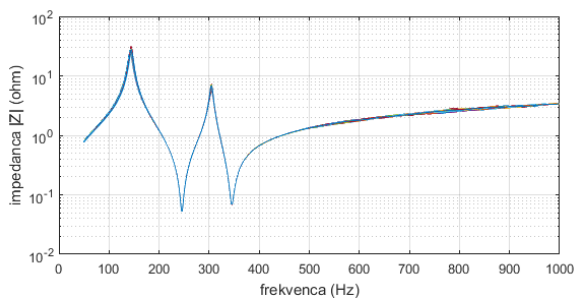
Primerjava vseh treh modelov vidno nakazuje, da se lahko pri posameznih frekvencah v odvisnosti od izbranega modela omrežja impedančne razmere bistveno razlikujejo. Vsi trije modeli so umerjeni pri osnovni frekvenci 50 Hz, tako da imajo vsi enako kratkostično moč, torej enako kratkostično impedanco pri tej frekvenci. Pri višjih frekvencah prihaja do večje razlike med impedancami posameznih modelov. Medtem ko najenostavnejši model omrežja, RL-impedanca, od najnatančnejšega (model s porazdeljenimi parametri) bistveno odstopa že pri 5. harmoniku, pa model s koncentriranimi parametri ohranja relativno natančnost vsaj do 10. harmonika.

Impedanca omrežja je skupek impedanc vseh elementov, ki so povezani v omrežje, zato nanjo vplivajo tako topološke spremembe omrežja kakor tudi spremembe bremen in drugih elementov s spremenljivimi impedancami.



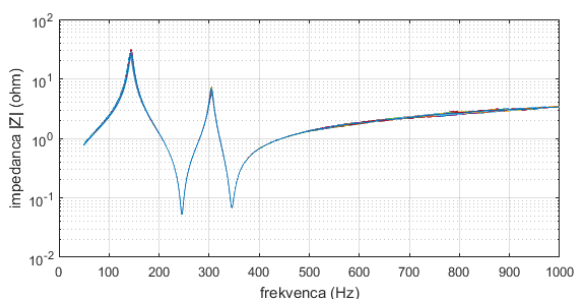
Slika 7: Impedančna karakteristika omrežja: a) iz 400-kV zbiralke v Beričevem, b) na sekundarni strani SVC transformatorja (35 kV) za različne (N-1) konfiguracije omrežja, c) ločeno prikazane impedanice omrežja in harmonskih filtrov na 35 kV, d) variante impedance filtrov in omrežja skupaj.

Če impedanco prenosnega 400-kV omrežja določamo iz nižjih napetostnih nivojev (npr. 35 kV –



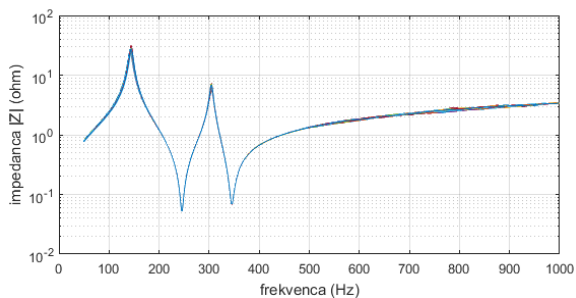
Slika 7b), se skupni impedanci serijsko prišteje še dodatek zaradi lastne impedance transformatorja do izbranega napetostnega nivoja. Zaradi relativno velike impedance transformatorja postanejo nihanja impedance prenosnega omrežja znatno nižja v primerjavi s skupno impedanco.

Na



Slika 7a so prikazane impedančne karakteristike omrežja iz ene zbiranke pri najrazličnejših normalnih in izrednih (N-1) konfiguracijah omrežja in bremen. Za vse analizirane primere sta določeni minimalna in maksimalna pričakovana vrednost, ki določata impedančno ovojnico, ki bo v nadaljevanju uporabljena za določitev pričakovanih maksimalnih napetostnih popačitev.

V sklopu analize impedančnih razmer omrežja lahko ocenimo učinkovitost filtrov SVC pri filtriranju harmonskih injkcij TCR, kar posledično določa harmonske tokovne injkcije naprave SVC v prenosno omrežje. Nižja kot je impedanca filtra pri določenem harmoniku v primerjavi z impedanco omrežja, večji delež tokovnih injkcij TCR se bo pretakal skozi filter namesto v omrežje.



Slika 7c prikazuje primerjavo nabora impedanc omrežja in skupno impedanco dveh harmonskih filtrov (za 5. in 7. harmonik). Ugotovimo lahko, da so pri izbranih harmonikih impedanca filtrov veliko nižje kakor

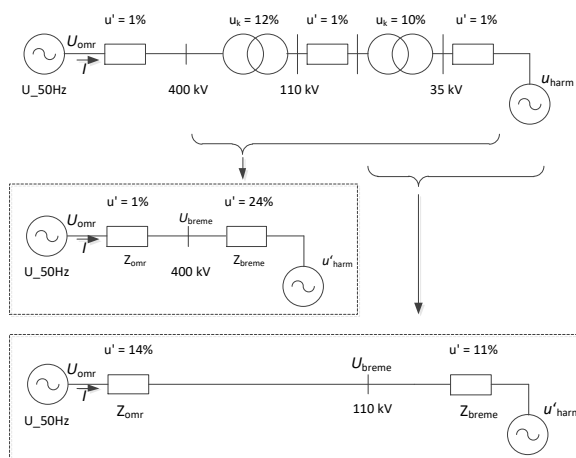
impedanca omrežja, zato bodo te harmonske komponente tekle v filtre ter ne bodo povzročale pretokov in posledično harmonskih padcev napetosti na omrežnih elementih. V nasprotju s tem lahko ugotovimo, da bodo 6. harmonska komponenta in komponente, nižje od 150 Hz, kjer filtra izražata visoko impedanco, v večji meri tekle v omrežje.

3.4 Vpliv spremembe impedance omrežja na harmonske injkcije nelinearnih naprav

Harmonska popačenja napetosti so odraz prisotnosti najrazličnejših harmonskih virov, pri prepoznavanju njihovega vpliva pa jih je treba klasificirati glede na njihove lastnosti. Med harmonske vire štejemo vse tiste naprave, ki priklopljene na idealni sinusni vir napetost pri osnovni frekvenci v omrežje oddajajo tok harmonskega spektra. Po enostavni klasifikaciji lahko vire delimo na tokovne vire in napetostne vire, vse pa modeliramo kot idealni vir z ustrezno sklopno impedanco do priključne točke. V praksi se najpogosteje izkaže, da je posamezen vir težko opredeliti kot en ali drug tip za celotno frekvenčno območje. Kompleksnost izvedbe naprave in fleksibilnost njenega delovanja, kar je velikokrat pogojeno z regulacijskimi funkcijami naprave, otežujeta natančnejšo obravnavo naprave kot enostaven harmonski vir.

Ne glede na to, kakšne vrste je harmonski vir, lahko na podlagi impedanc omrežja, kamor je naprava priključena, tak vir ponazorimo na poenostavljen način.

S pomočjo enostavnega vezja na Slika 8 sklepamo, da lahko poljubni harmonski napetostni vir pod določenimi pogoji poenostavljeno prikažemo kot tokovni harmonski vir. Pogoji za to poenostavitev je zagotovitev ustreznih impedančnih razmer, ki morajo določati mnogo nižjo impedanco omrežja kakor impedanco bremena (harmonskega vira). V primeru na sliki 8 se impedanca bremena analizira iz vozlišča, določenega z U_{breme} , v smeri omrežja in v smeri bremena ločeno. Če v VN-



Slika 8: Analiza nadomestnega modela harmonskega vira iz različnih vozlišč omrežja v luči impedanc omrežja.

omrežju analiziramo vpliv harmonskih virov z nižjih napetostnih nivojev, se zaradi transformatorjev in preostalih impedanc impedanca do harmonskega vira močno poveča. Kot je prikazano v enačbah (1) in (2), nadaljnji vpliv spreminjanja impedance omrežja Z_{omr} bistveno ne vpliva na velikost injiciranega toka napetostnega harmonskega vira. Z vidika prenosnega omrežja lahko posledično vse harmonske vire, razen injekcij pri tistih frekvencah, za katere omrežje izraža visokoimpedančne paralelne resonančne točke, obravnavamo kot tokovne injekcije.

$$I = \frac{U_{omr} - U_{breme}}{Z_{omr} + Z_{breme}} \quad (1)$$

$$\frac{Z_{omr}}{Z_{breme}} \ll 1 \rightarrow \frac{dI}{dZ_{omr}} \approx 0 \quad (2)$$

3.5 Harmonsko popačenje v prenosnem omrežju

Harmonska popačenja v omrežju nastajajo kot posledica padcev napetosti pri posameznih harmonikah zaradi harmonskih tokov. Harmonski tokovi se pretakajo od vira do ponora. Harmonski vir so lahko nelinearne naprave na različnih napetostnih nivojih, ponor harmonikov pa so impedance, ki izražajo nizke vrednosti pri določenem harmoniku. Takšne impedance se lahko pojavljajo v sklopu bremen ali v sklopu preostalih elementov omrežja. Vzrok za nizko impedanco je lahko filtrsko vezje, kot ga zasledimo pri SVC, lahko pa tudi nizke resonančne impedance, ki nastanejo v kombinaciji induktivnih in kapacitivnih elementov omrežja (npr. induktivna navitja transformatorjev in kapacitivnosti kablanskega omrežja). V tem primeru harmonska komponenta resonira med harmonskim virom in omrežjem samim.

Skladno z impedancami omrežja in harmonskimi viri se, podobno kot za osnovno komponento (50 Hz), lahko izračunajo harmonski pretoki energije za celotno omrežje, s tem pa se določijo tokovne poti posamezne harmonske komponente in padci harmonske napetosti na povezavah med harmonskimi izvori in ponori.

3.6 Simulacijski primer

Vpliv dejanskih harmonskih injekcij realnega prenosnega sistema je zelo težko reproducirati, saj injekcije harmonskih tokov, ki prihajajo v 400-kV omrežje z nižjih napetostnih nivojev, niso merjene niti ne morejo biti natančno analizirane z obstoječimi induktivnimi merilnimi tokovnimi transformatorji. Analiza zato podaja vpliv enega nelinearnega vira harmonikov, SVC, na harmonske razmere v slovenskem omrežju.

Za simulacije omrežja je bil uporabljen simulacijski program DigSilent, ki med drugim omogoča izračun harmonskih pretokov energije, torej simulacij v frekvenčnem prostoru, ki določajo razmere v omrežju za posamezno stacionarno obratovalno stanje.

Harmonska analiza je izvedena za 400-kV zbiralko v Beričevem, pri čemer model omrežja obsega celotno 400-kV, 220-kV in 110-kV omrežje Slovenije, delno pa tudi omrežja sosednjih držav, ki so električno blizu Beričevem in za to vozlišče izkazujejo precejšen impedančni vpliv.

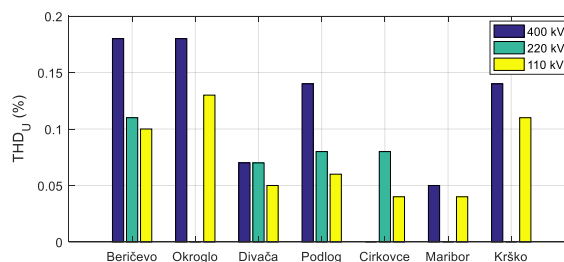
Vir harmonskega popačenja (tokovnih injekcij) je v tem primeru le TCR, preostala popačenja, ki jih povzročajo drugi razpršeni harmonski viri, pa so zanemarljeni. Ker se injekcija harmonskih komponent TCR spreminja v odvisnosti od obratovalne točke in vse harmonske komponente ne dosežejo maksimalne injekcije hkrati, je injekcija vsake komponente analizirana za maksimalno predvideno amplitudo.

Analizirane so karakteristične harmonske komponente, ki jih TCR (v Beričevem) proizvaja v simetričnih razmerah, torej 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23. in 25. harmonik.

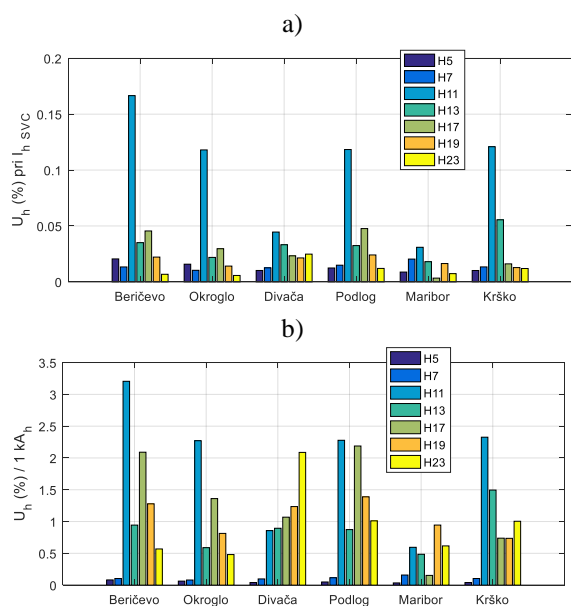
Slika 9 prikazuje rezultirajoče napetostne popačitve (THD_U) na pomembnejših 400-kV, 220-kV in 110-kV vozliščih v slovenskem sistemu. Opazimo lahko, da čeprav je vir harmonikov lociran v Beričevem, vse napetostne harmonske komponente niso največje prav v tem vozlišču. Na 110-kV nivoju je THD_U višji v Okroglem in Krškem, medtem ko so popačitve na drugih napetostnih nivojih povsod nižje.

Podobno lahko na Slika 10a in b spremljamo občutljivost posameznega vozlišča za posamezno harmonsko komponento. Slika 10a prikazuje amplitude posameznih napetostnih harmonskih komponent, za spekter in amplitude harmonskih injekcij SVC, medtem ko Slika 10b prikazuje občutljivost za amplitudno enake tokovne injekcije pri vseh harmonskih komponentah.

Na Slika 10 lahko ugotovimo, da prihaja do zelo velikih razlik pri vplivu injekcij na posamezne napetostne harmonike. Medtem ko 5. in 7. harmonik ne povzročata pretiranih napetostnih popačitev, 11. harmonik izstopa iz povprečja. Ta je najvišji v Beričevem, 17. harmonik je najbolj prisoten v Podlogu, 23. pa v Divači. Občutljivosti za določen harmonik so močno povezane z mestom injekcije harmonika, zato je treba za vsako novo lokacijo injekcij določiti vpliv na posamezno harmonsko komponento posameznega vozlišča.



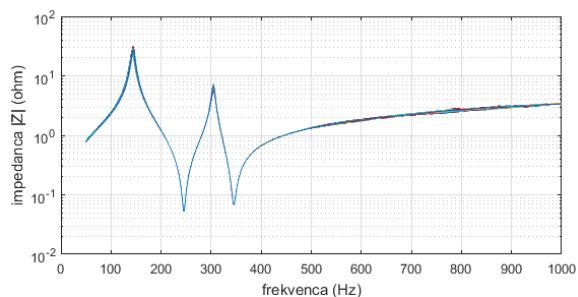
Slika 9: THD-napetosti v prenosnem omrežju, povzročene zaradi SVC v Beričevem.



Slika 10: Posamezne napetostne harmonske komponente, povzročene v različnih 400-kV vozliščih zaradi a) različnih tokovnih harmonskih injkcij (spekter SVC, osnovna komponenta 1 kA) in b) amplitudno enakih harmonskih injkcij (vse komponente po 1 kA).

Za harmonike, ki so najbolj prisotni, lahko na podlagi impedančne karakteristike omrežja, ki je prikazana na Slika 6, ugotovimo, da tvorijo visoko impedančno resonanco, kar posledično vpliva tudi na večji učinek toka na napetost.

Glede na pričakovane variacije impedanc, kot je bilo prikazano na



Slika 7a, pa lahko pričakujemo, da se impedance pri posameznem harmoniku spremenijo tudi do nekajkrat; za 11. harmonik so lahko impedance v primerjavi s tistimi iz uporabljenega primera npr. do 7-krat nižje, kar lahko pomeni 7-krat nižjo pričakovano napetostno popačitev pri tem harmoniku.

4 ZAKLJUČEK

V prispevku je prikazano, kako bi tokovne harmonske injkcije, ki bi jih povzročal SVC, priključen na 400-kV zbiralko v Beričevem, vplivale na harmonsko popačenje napetosti v slovenskem prenosnem omrežju. Podlaga za določanje harmonskih popačitev napetosti so bile tokovne injkcije, ki bi jih povzročal SVC, ter impedanca

omrežja, ki jo tvorijo vsi elementi prenosnega električnega omrežja.

Variacija obratovalnih pogojev in konfiguracij omrežja je pokazala, da se impedance lahko spreminjajo v širokem pasu, kar vpliva tudi na učinke tokovnih injkcij na napetostno popačitev.

Predstavljeni primeri nakazujejo, kako impedance prenosnega sistema najvišjih napetostnih nivojev zaradi močne električne povezanosti med sistemi preostalih držav izkazujejo izrazite impedančne variacije zaradi medsebojnih resonančnih krogov.

Ker je impedančna karakteristika določena na podlagi simulacijskega modela, ostaja nekaj dvoma o točnosti modela. Verifikacija impedanc na podlagi realnih meritev omrežja ostaja ena od pomembnejših nalog, ki bi jih bilo treba izvesti, vendar so takšne meritve brez specialnih naprav (harmonskih generatorjev) na napetostnih nivojih prenosnega sistema tako rekoč nemogoče.

LITERATURA

- [1] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, Feb 2002.
- [2] B. Blažič, D. Matvoz, I. Papič: Analiza ukrepov za zmanjšanje flikerja v prenosnem omrežju Slovenije, 2008, let. 75, št. 1–2
- [3] M. Keerthana and S. Banumathi, "Enhancement of transient stability using wide area controlled SVC's," 2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE), Karur, 2017, pp. 1–4.
- [4] U. Princy, S. Jaseena, S. Sreedharan and S. Sreejith, "Voltage stability analysis of power system network integrated with renewable source and SVC," 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, 2017, pp. 1–6.
- [5] H. Samet and A. A. Bagheri, "Enhancement of SVC performance in flicker mitigation of wind farms," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 15, pp. 3823–3834, 10 19 2017.
- [6] B. Gao, X. Xiao, C. Zhao and Y. Zhao, "Using SVC for SSO Damping and Its Side-effects on the AC System," 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, 2010, pp. 1–4.
- [7] SVC to stabilize an AC system connected to a large HVDC interconnection, ABB; https://library.e.abb.com/public/bc0a1d1cd5a0ae5cc1256fda003b4d4d/A02-0141_Chester_LR.pdf
- [8] Optimizacija regulacije napetosti v prenosnem omrežju EES Slovenije, izbor ustreznih tehnologij naprav ter določitev njihovega obsega za kompenzacijo napetosti, ELES, študija št. 2322, september 2016.
- [9] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, December 1999.
- [10] S. Müller, J. Meyer, P. Schegner, and S. Djokic, "Harmonic modeling of electric vehicle chargers in frequency domain," in Int. Conf. Renew. energies and Power Quality (ICREPQ), 2015, pp. 1–6.
- [11] L. P. Frater, A. R. Wood, and N. R. Watson, "Linearisation of NonLinear Loads by Phase Dependent Frequency Coupling Admittance Matrices," 16th PSCC, 2008.

ZAHVALA

Prispevek je del rezultatov študije *Harmonska analiza v EES Slovenije ob vgradnji kompenzacijskih naprav v okviru projekta SINCRO.GRID*, izvedene v letu 2018 za družbo ELES, d. o. o., v sklopu mednarodnega projekta SINCRO.GRID. Projekt sofinancira Evropska komisija iz programa Instrument za povezovanje Evrope. Avtorji se družbi ELES, d. o. o., za vključitev v projekt SINCRO.GRID in dovoljenje za objavo rezultatov iskreno zahvaljujejo.

Ambrož Božiček je obiskoval Fakulteto za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je leta 2006 diplomiral, leta 2011 pa doktoriral na področju delovanja kompenzacijskih naprav. Njegovo raziskovalno področje obsega še analize električnih omrežij, vplivov uvajanja elektromobilnosti, kakovost električne energije in vključevanje modernih obnovljivih virov v električna omrežja.

Leopold Herman je diplomiral leta 2008 in doktoriral leta 2014 na Fakulteti za elektrotehniko Univerza v Ljubljani. Trenutno je na isti fakulteti zaposlen kot raziskovalec v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Njegovo raziskovalno delo obsega področje kakovosti električne energije, sodobnih kompenzacijskih naprav in razpršenih virov električne energije.

Boštjan Blažič je doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen kot predavatelj. V letu 2013 je bil gostujoči predavatelj na Tehnični Univerzi na Dunaju (Technische Universität Wien) v Avstriji. Njegovo raziskovalno delo sega na področje delovanja elektroenergetskega sistema, kjer se posebej osredotoča na tematike vpliva obnovljivih virov in elektromobilnosti na sistem, konceptov načrtovanja in vodenja elektroenergetski omrežij ter matematične analize delovanja kompenzacijskih naprav v elektroenergetiki.