

METODA ZA ESTIMACIJU UTICAJA PRIKLJUČENJA NOVIH POTROŠAČA NA VREDNOST FLIKERA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

A METHOD FOR ESTIMATION OF INFLUENCE OF CONNECTING NEW LOADS TO DISTRIBUTION GRID ON FLICKER VALUE

Nikola LAKETIĆ, Avalon Partners d.o.o, Srbija
Vladimir ĐIKIĆ, EMS A.D., Srbija
Vladimir KRNAJSKI, EMS A.D., Srbija
Aleksandar TATALOVIĆ, Avalon Partners d.o.o, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Rad predstavlja inovativnu metodu za estimaciju vrednosti flikera prouzrokovanog radom jednog ili više perspektivnih izvora flikera u distributivnoj i prenosnoj mrežu. Metoda se bazira na proračunu vremenskog profila efektivne vrednosti napona uz korišćenje modela izvora flikera u visokoj vremenskoj rezoluciji i modela prenosne ili distributivne mreže. Metoda određuje profil napona u velikom broju kvazistacionarnih tačaka, sa visokom vremenskom rezolucijom od 20 ms, zbog čega ova metoda ima visoku preciznost u pogledu flikera. U radu su predstavljeni rezultati primene metode na konkretnom potrošaču – elektrolučnoj peći. Metoda je prvo primenjena za estimaciju flikera usled rada elektrolučne peći, a zatim za estimaciju rada peći zajedno sa STATCOM uređajem. Merenjima kvaliteta napona na realnom potrošaču pokazana je tačnost metode za oba slučaja. Rezultati verifikacije pokazuju visoku tačnost predloženog metoda estimacije. Predloženi metod se može koristiti i za izdvajanje uticaja konkretnog potrošača na povećanje vrednosti flikera u tački priključenja. Metod se može jedostavno proširiti i za proračun uticaja injekcije drugih tipova poremećaja (viši harmonici, varijacije napona,...) za širok spektar različitih tipova potrošača.

Ključne reči: kvalitet napona, injekcija poremećaja, limiti za injekciju poremećaja, elektrolučna peć, elp, STATCOM

ABSTRACT

The paper presents an innovative method for estimating the flicker value caused by the operation of one or more prospective sources of flicker in the distribution and transmission network. The method is based on the calculation of the time profile of the rms voltage value using load model in high time resolution and a transmission or distribution network model. The method determines the voltage profile in a large number of quasi-stationary points, with a high time resolution of 20 ms, which is why this method has a high accuracy in terms of flicker. The paper presents the results of applying the method to connection of a specific consumer - an Electric Arc Furnace. The method was first applied for the estimation of flicker due to the operation of the electric arc furnace, and then for the estimation of the operation of the furnace together with the STATCOM device. Voltage quality measurements on a real consumer showed the accuracy of the method for both cases. The verification results show the high accuracy of the proposed estimation method. The proposed method can also be used to isolate the influence of a specific consumer on the increase in flicker value at the connection point. The method can be easily extended to calculate the impact of the injection of other types of disturbances (higher harmonics, voltage variations,...) for a wide range of different types of consumers.

Key words: power quality, disturbance injection, disturbance limits, electric arc furnace, eaf, STATCOM

1. UVOD

Estimacija doprinosa perspektivnog potrošača ili elektrane naponskom flikeru predstavlja veliki praktični problem u postupku izdavanja dozvole za priključenje na distributivnu ili prenosnu mrežu, kao i u procesu izrade tehničkog rešenja za smanjenje injekcije flikera. Ovakvi slučajevi se sreću u praksi kod priključenja velikih potrošača koji standardno predstavljaju izvore flikera, poput postrojenja sa elektrolučnim pećima, linijama za tačkasto i elektrolučno zavarivanje, kao i drugih pogona sa izraženom dinamikom rada. Fliker je nemoguće izračunati analitički, jer se vrednost flikera ne računa za jedno kvazistacionarno stanje, već se dobija u vremenskom prozoru od 10 minuta kroz proces filtriranja i statističke obrade velikog broja uzoraka kontinualnog naponskog signala.

U ovom referatu predstavljena je inovativna metoda za estimaciju vrednosti flikera usled rada jednog ili grupe perspektivnih korisnika koji treba da se priključe na distributivnu ili prenosnu mrežu. Pored ovoga, ova metoda može da se koristi za izdvajanje uticaja jednog potrošača na vrednost flikera u tački priključenja pri kontroli emisije flikera, prognozu efekata mera za smanjenje flikera, kao i pri planiranju razvoja mreže i investicija.

Prednost ove metode je što omogućava da se estimacija flikera izvrši sa relativno visokom tačnošću i *apriori*, još u fazi planiranja, a pre priključenja korisnika na mrežu; kao i *aposteriori* na osnovu samo jednog seta merenja nakon priključenja, bez potrebe za privremenim isključenjem objekta. Prve rezultate verifikacije metode i njene primene autori su prikazali u dva prethodna referata [1] [2].

Elektrolučne peći velikih snaga predstavljaju jedan od najvećih izvora flikera u prenosnoj i distributivnoj mreži, a ujedno i najteže za estimaciju zbog stohastičnosti, nelinearnosti i brzih varijacija opterećenja u procesu topljenja šarže. Nije redak slučaj da je priključenje elektrolučne peći dovodio do značajnog porasta nivoa flikera u čitavom nizu čvorova u prenosnoj [3] i distributivnoj mreži [4], te dovodio do pritužbi potrošača na niskom naponu zbog vizuelne iritacije prouzrokovane treperenjem osvetljenja. Zbog toga je od velikog značaja da se nivo emisije ovih potrošača i njihov uticaj na ukupni nivo flikera unapred odredi sa što većom tačnošću, kako u tački priključenja, tako i po dubini mreže. Ako bi se uticaj potrošača odredio još u fazi izdavanja dozvole za priključenje, moglo bi se utvrditi da li prema kriterijumu flikera postoje uslovi za njihovo priključenje i, ukoliko postoje, da li je i kakve mere potrebno sprovesti za smanjenje emisije flikera.

Eksperimentalno je pokazano ([1] [2]) da predložena metoda omogućava preciznu estimaciju flikera kako usled rada peći, tako i za optimizaciju mera na ograničenju emisije flikera. U ovom radu prikazani su efekti estimacije flikera elektrolučne peći 50 MW predmetnom metodom pre i posle puštanja u rad STATCOM uređaja za brzu dinamičku kompenzaciju.

2. POSTOJEĆE METODE MODELOVANJA UTICAJA ELEKTROLUČNE PEĆI NA FLIKER

Usled nemogućnosti razvoja nekog jednostavnijeg analitičkog modela elektrolučne peći zbog nelinearnosti i stohastičnosti električnog luka, kao i zbog kompleksnosti i nelinearnosti samog procesa izračunavanja flikera, i velikog broja potrebnih tačaka, emisije flikera elektrolučne peći procenjivana je korišćenjem emirijskih formula u kojima figurišu tzv. fliker koeficijenti i snage kratkog spoja na elektrodama i u tački priključenja [5]. Opseg varijacije samih koeficijenata bio je relativno širok i konačni rezultati su dosta zavisili od izbora konkretnih vrednosti, te je njihova pouzdanost bila relativno mala i bili su ili suviše konzervativni ili previše optimistički.

U literaturi su predstavljene i pojednostavljene metode injekcije struje i tokova snaga [6] za izračunavanje propagacije flikera u više tačaka mreže ukoliko je poznata vrednost flikera u jednoj tački. Ove metode su zasnovane na rešavanju jednačina modela mreže za jedno ili nekoliko stacionarna stanja, najčešće pomoću računarskih simulacija.

Tek sa razvojem računarskih alata, javila se mogućnost za razvojem kompleksnijih numeričkih modela elektrolučne peći i to u dva pravca: u frekventnom i u vremenskom domenu [5]. Modeli u vremenskom domenu modeluju nelinearnu strujno-naponsku karakteristiku luka i njenu zavisnost od dužine luka, kao i varijaciju parametara luka koje su delom periodične, a delom stohastičke. Obzirom da primena ovih modela zahteva simulacije u vremenskom domenu i relativno veliki broj tačaka (32-512) u okviru jedne periode mrežnog napona (20ms), njihova primena pri određivanju flikera (koje zahteva vremenski interval od bar 10min) je jako zahtevna numerički i u pogledu računarskih resursa i praktično onemogućava uključivanje složenog modela mreže, već isključivo njenog pojednostavljenog ekvivalenta.

S druge strane, za potrebu estimacije emisije flikera predloženi su i pojednostavljeni modeli izvora flikera koji se zasnivaju na merenju vremenskog profila opterećenja ovih potrošača i modelovanju vremenske promene njihove

aktivne i reaktivne snage ili na promeni impedanse [6] [7]. Ovakvi modeli omogućavaju korišćenje RMS simulacija uz upotrebu relativno kompleksnih modela prenosnih i distributivnih mreža, kao i analizu značajno dužih vremenskih intervala. Iako je za neke druge izvore flikera dovoljno uzeti u obzir nekoliko tipičnih kvazistacionarnih stanja i njihovo smenjivanje, za adekvatno modelovanje elektrolučne peći neophodno je uzeti veliki broj tačaka sa periodom od najviše 10 ili 20ms.

3. MERENJE EMISIJE FLIKERA

Fliker napona opisuje se preko dva parametra: kratkotrajne (P_{st}) i dugotrajne (P_{lt}) jačine flikera. Ovi parametri određuju se obradom merenog signala napona u flikermetru, definisanog u standardu IEC 61000-4-15 [8]. Svi moderni mrežni analizatori koji pripadaju klasi A prema standardu IEC 61000-4-30 [9] imaju u sebi implementiran algoritam za izračunavanje P_{st} i P_{lt} .

Obzirom da na mereni napon utiču: svi potrošači priključeni na mrežu, elektrane, distribuirani izvori, kao i određeni poremećaji u mreži te rasklopne operacije, vrednosti P_{st} i P_{lt} koje se dobijaju na osnovu merenja mrežnim analizatorom predstavljaju rezultantu usled delovanja svih navedenih izvora poremećaja. U opštem slučaju je nemoguće samo na osnovu merenja napona odrediti doprinos pojedinih izvora flikera ukupnom nivou flikera u mreži. U određenim specifičnim slučajevima kada jedan ili više potrošača, koji nisu u potpunosti jednovremeni, predstavljaju dominantni izvor flikera, moguće je odrediti njihov pojedinačni doprinos ukoliko se sinhronizovano meri i opterećenje svakog od njih. U svim ostalim slučajevima do sada je korišćena metoda koja podrazumeva dva seta merenja (v. IEC 61000-3-7 [10]): kada posmatrani izvor flikera radi i kada ne radi. U tom slučaju se mora usvojiti pretpostavka da je doprinos svih ostalih izvora flikera nepromenjen, kao i da se usvoji način sabiranja flikera koji potiču od različitih izvora. Obzirom da se radi o merenjima koja treba da traju bar 7 dana i da obuhvate sve relevantne radne režime, skoro je nemoguće obezbediti nepromenljivost ostalih izvora flikera. Zbog toga su doprinosi P_{st} i P_{lt} određeni na ovakav način nedovoljno pouzdani.

Metoda predložena u ovom radu rešava napred navedene probleme. Ona omogućava da se na osnovu merenja profila opterećenja izvora flikera (potrošača, elektrane, obnovljivog izvora...) pouzdano odredi njegov doprinos ukupnoj vrednosti P_{st} i P_{lt} i to sa relativno visokom tačnošću. Ovo je od posebnog interesa za operatore distributivnih ili prenosnih mreža, jer im omogućava da kontrolišu da li je emisija flikera od strane pojedinih korisnika u okviru dodeljenih emisionih limita.

4. OPIS METODE HIGH RESOLUTION VOLTAGE FLICKER ESTIMATION

Predložena metoda estimacije flikera proračunava vremenski profil efektivne vrednosti napona u posmatranoj tački mreže, koji je dobijen simulacijom rada izvora flikera u visokoj vremenskoj rezoluciji na modelu prenosne i distributivne mreže. Metoda određuje profil napona u velikom broju kvazistacionarnih tačaka, sa visokom vremenskom rezolucijom od 20 ms, zbog čega ova metoda ima visoku preciznost u pogledu flikera. Dodatno, metoda koristi postojeći detaljni model prenosne mreže u programskom paketu *DigSilent Power Factory*.

Jačina flikera određuje se propuštanjem tako dobijenog profila napona kroz etalonirani softverski flikermetar, namenski razvijen i optimizovan u programskom paketu *Matlab/Simulink*, sa ciljem efikasne obrade signala sa velikim brojem uzoraka. Flikermetar je i realizovan i verifikovan u skladu sa zahtevima standarda IEC 61000-4-15 [8].

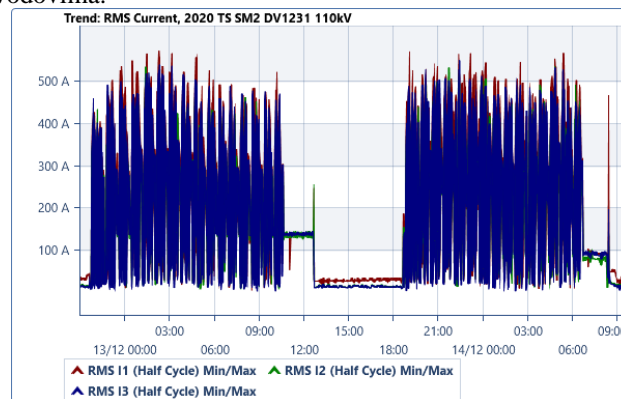
Modeli izvora flikera u programskom paketu *DigSilent Power Factory* razvijeni su na osnovu terenskog merenja profila opterećenja tipičnih izvora flikera mrežnim analizatorima klase A (prema standardu [9]), koji omogućavaju da se uzorkovanje vrednosti napona, struje, aktivne i reaktivne snage vrši sa velikom vremenskom rezolucijom od od 50 kHz. Na ovaj način se dobio kvalitetan model elektrolučne peći, kako po dinamici promene tako i po sadržaju viših harmonika, tako i po vremenskoj rezoluciji od 20 ms u dovoljno dugačkom trajanju da bi se mogao modelovati uticaj potrošača na fliker.

5. VERIFIKACIJA METODE NA REALNOM POTROŠAČU

Metoda je inicijalno razvijena za potrebe analize propagacije emisije flikera konkretnog potrošača sa elektrolučnim pećima priključenog na prenosnu mrežu 110 kV.

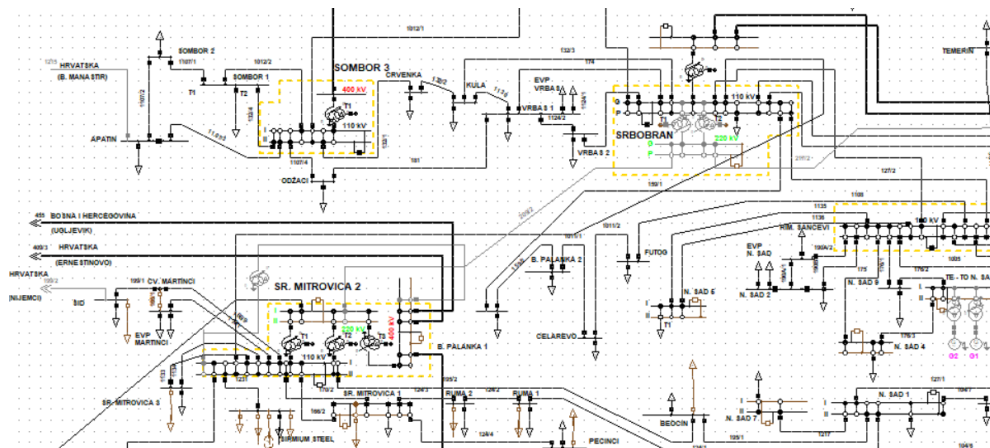
Model potrošača – elektrolučne peći, napravljen u programskom paketu *DigSilent Power Factory* (videti Slika 1), uključen je u *DigSilent PowerFactory* model dela prenosne mreže (

Slika 2) koji obuhvata mreže naponskih nivoa 400 kV, 220 kV i 110 kV sa generatorima, transformatorima i nadzemnim i kablovskim vodovima.



Slika 1 - Izmerena struja potrošača u tački priključenja na 110 kV sa visokom učestanošću uzorkovanja

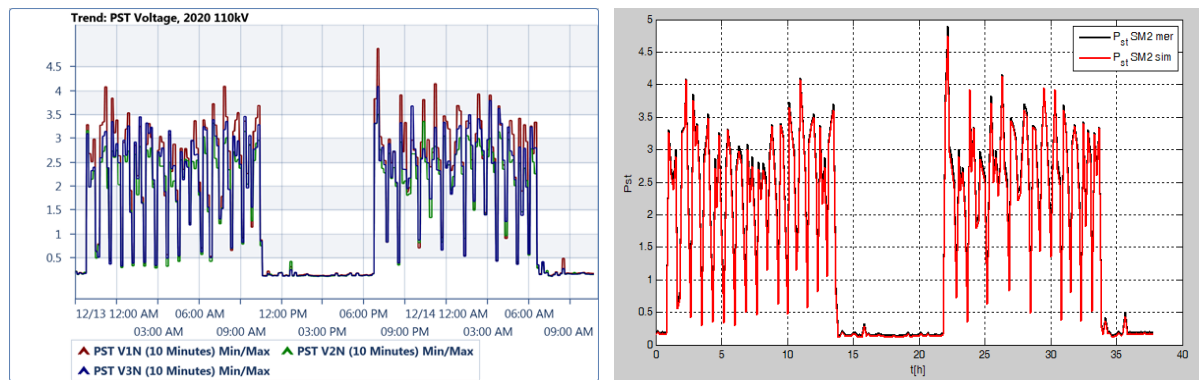
Koristeći pomenuti model potrošača u visokoj vremenskoj rezoluciji i model prenosne mreže, računarskom simulacijom je dobijena vremenska promena napona u visokoj rezoluciji, u većem broju čvorova mreže, koja je prouzrokovana varijacijom struje elektrolučne peći. Obradom tako dobijenog signala napona za sve posmatrane čvorove mreže, u etaloniranom softverskom flikermetru realizovanom u programskom paketu Matlab Simulink, dobijene su estimirane su vrednosti za P_{st} i P_{lt} u većem broju čvorova mreže.



Slika 2 - Model dela prenosne mreže u programskom paketu *DigSilent Power Factory*

U cilju verifikacije metode, izvršen je niz računarskih simulacija koje odgovaraju izmerenim radnim režimima potrošača u različitim fazama topljenja šarže. Na

Slika 3 uporedno su prikazane vremenske promene P_{st} u tački priključenja potrošača na prenosnu mrežu dobijene merenjima (crna boja) i simulacijom (crvena boja). Vrednosti P_{st} dobijene simulacijom odgovaraju vrednostima dobijenim merenjem u svim radnim režimima potrošača sa elektrolučnim pećima.

Slika 3 - Vremenske promene P_{st} u tački priključenja (110 kV) (levo izmereno, desno simulacija)

Vrednosti flikera dobijene simulacijom i terenskim merenjima uporedo su prikazane u Tabela 1. Vrednosti dobijene simulacijom za oba posmatrana čvora prenosne mreže naponskog nivoa 110 kV (tačka priključenja, tačka u dubini mreže) odgovaraju izmerenim vrednostima na terenu. Najveća zabeležena apsolutna greška određivanja P_{st} iznosi 0,152, a najveća relativna greška 4,76 %. Ovde je važno istaći da klasa tačnosti merenja jačine flikera (P_{st}) za uređaje sertifikovane prema IEC 61000-4-30 [9] klasa A iznosi 5% (v. IEC 61000-4-15 [8]), te se može smatrati da su rezultati estimacije flikera ovom metodom u okviru klase tačnosti korišćenog mrežnog analizatora klase A.

Odavde se zaključuje da se predmetna metoda za estimaciju flikera može koristiti za potrošače sa elektrolučnim pećima sa zadovoljavajućom pouzdanošću i tačnošću.

Tabela 1 – Verifikacija metode: uporedni prikaz rezultata merenja i kompjuterske estimacije

Tačka priključenja				Čvor u dubini mreže			
Simulac.	Mereni	Aps. greska	Rel. greska [%]	Simulac.	Mereni	Aps. greska	Rel. greska [%]
$P_{st}(L1)$	$P_{st}(L1)$			$P_{st}(L1)$	$P_{st}(L1)$		
3.727	3.840	-0.113	-2.951	3.450	3.468	-0.018	-0.531
4.741	4.893	-0.152	-3.104	4.391	4.428	-0.037	-0.847
2.961	3.049	-0.088	-2.903	2.735	2.708	0.027	1.012
1.799	1.889	-0.090	-4.759	1.663	1.686	-0.023	-1.394

6. VERIFIKACIJA METODE U POSTUPKU ESTIMACIJE UTICAJA STATCOM-A

Nakon verifikacije metode i modela na samom izvoru flikera, izvršen je niz simulacija u kojima su razmotrena potencijalna rešenja za smanjenje injekcije flikera konkretnog potrošača. Cilj je bio da se uporede tehnički efekti primene različitih rešenja, te da se odabere ono koje postojeći problem rešava na zadovoljavajući način uz najmanje investicije. Pri tome je za svako rešenje razmatrana i propagacija flikera kroz mrežu i zauzeće kapaciteta mreže u više čvorova po dubini mreže.

Nakon izvršenog većeg broja simulacija, rešenje koje se pokazalo kao tehnički i ekonomski najefikasnije je brza dinamička kompenzacija reaktivne snage elektrolučnih peći pomoću STATCOM-a. Ovo je u skladu sa praktičnim iskustvom izloženim u literaturi [3] [4], gde je u nizu konkretnih slučajeva konstatovano da proširenje kapaciteta mreže (transformatori, vodovi,...) samo delimično rešava problem povišenog flikera prouzrokovanog emisijom od strane elektrolučne peći, a da je za potpuno rešavanje problema neophodna primena brze dinamičke kompenzacije reaktivne snage (SVC ili STATCOM).

U dosadašnjoj praksi, procena uticaja STATCOM-a na smanjenje flikera prouzrokovanog radom elektrolučne peći uglavnom se zasniva na simulacijama u vremenskom domenu [11], što zahteva modelovanje električnog luka i STATCOM-a (i energetskog dela i kontrolnog algoritma) u vremenskom domenu. Ovakav pristup je najobuhvatniji i omogućava da se uvažavaju i tranzijenti pri radu STATCOM-a čije trajanje je znatno kraće od jedne periode mrežnog napona. Međutim, za formiranje ovakvih modela potreban je veliki nivo detalja, od kojih neki nisu unapred poznati sa zadovoljavajućom tačnošću, a odgovarajuće simulacije zahtevaju velike računarske resurse i vreme, što značajno sužava primenu u smislu ograničene kompleksnosti mreže i limitirane dužine

posmatranog intervala koji se analizira. Pritom se pri određenim vrednostima parametara mogu javiti i problemi vezani za konvergenciju simulacije.

Predmetna metoda, za procenu efekata ugradnje STATCOM-a na smanjenje emisije flikera, modeluje odziv STATCOM-a usrednjeno na nivou jedne periode naizmeničnog napona (20ms), zanemarujući brze tranzijente. Ovakav pristup uslovljen je i samim modelom elektrolučne peći, čija je rezolucija takođe 20ms. Treba imati u vidu da je za poznavanje tačnog dinamičkog odziva STATCOM-a, u slučaju brzopromenljivog opterećenja (što je ovde slučaj), potrebno poznavanje detalja realizacije kontrolnog i energetskog dela STATCOM-a, a koji se razlikuju od proizvođača do proizvođača i često nisu javno dostupni. Stoga je za procenu efekata ugradnje STATCOM-a na smanjenje emisije flikera, usvojen praktičan pristup u kome se očekivana vrednost flikera daje u jednom uskom opsegu - u zavisnosti od performansi STATCOM-a. Za donju granicu opsega flikera usvojen je idealni slučaj u kome je zaostala reaktivna snaga jednaka nuli (STATCOM dovoljnog kapaciteta i brzine). Za gornju granicu opsega flikera usvojen je realniji scenario koji uzima u obzir postojanje određene zaostale reaktivne snage prouzrokovane ograničenim kapacitetom STATCOM-a i njegovom konačnom brzinom odziva.

Estimacija efekata rada STATCOM-a na smanjenje flikera elektrolučne peći, primenom predmetne metode, prikazani su u Tabela 2. Rezultati estimacije su pokazali da se dinamičkom kompenzacijom reaktivne snage elektrolučne peći emisija flikera može značajno smanjiti, ali da iznos smanjenja zavisi od realnih performansi STATCOM-a, odnosno od zaostale reaktivne snage.

Tabela 2 - Estimirani efekti STATCOM-a na smanjenje flikera napona u tački priključenja peći

Zaostala reaktivna snaga	$P_{st95\%}$	
	bez pozadinskog flikera	sa pozadinskim flikerom*
potpuna kompenzacija $Q_{REZ}=0$	0,484	0,523
$Q_{REZ} < 5\%$ reaktivne snage ELP	0,587	0,615
$Q_{REZ} < 8\%$ reaktivne snage ELP	0,655	0,677
$Q_{REZ} < 10\%$ reaktivne snage ELP	0,715	0,734

*Sumiranje sa pozadinskim flikerom $P_{st_mreža}=0,3$ izvršeno je prema pravilima za sumiranje iz standarda [10], pri čemu je za vrednost eksponenta α usvojeno 3.

U slučaju idealne kompenzacije struje potrošača (idealno brz STATCOM) jačina flikera iznosila bi 0,484 kada u bi tački priključenja mrežni napon bio idealno stabilan tj. bez flikera. Ova vrednost predstavlja doprinos potrošača sa STATCOM-om povećanju flikera. Očigledno je da čak ni idealno brz STATCOM ne može u potpunosti eliminisati uticaj potrošača na povećanje flikera u tački priključenja, zbog varijacija aktivne snage peći, što je razumljivo. U realnom slučaju, u uslovima prisustva pozadinskog flikera od $P_{st_mreža}=0,3$, agregatna vrednost flikera u tački priključenja iznosila bi 0,523.

Ovakav scenario je idealizovan, jer stvarni odziv STATCOM-a uključuje kašnjenje i zbog obrade mernih veličina i zbog konačnog propusnog opsega regulacije, ali i pokazuje krajnje mogućnosti za smanjenje flikera putem kompenzacije reaktivne snage. Stoga vrednost od $P_{st}=0,523$ predstavlja maksimalno moguće smanjenje flikera u ovom realnom slučaju, tj. sa sigurnošću možemo zaključiti da se primenom STATCOM-a ne može postići bolji rezultat od navedenog. Ovim je određena donja granica smanjenja uticaja potrošača, što je od velikog značaja za planiranje mreže.

Predmetna metoda je simulirala nekoliko slučajeva sa radom realnog STATCOM-a koji bi ostavio zaostalu reaktivnu snagu koja ne prelazi 5%, 8% i 10% reaktivne snage elektrolučne peći, respektivno, bilo zbog kašnjenja regulacije ili nedovoljne snage. Rezultati estimacije za slučaj mreže bez i sa pozadinskim flikerom, prikazani su u Tabeli 2.

Nakon potpune kompenzacije reaktivne snage, fluktuacije napona su pretežno prouzrokovane varijacijom aktivne snage, te vrednost ekvivalentne otpornosti mreže u tački priključenja ima veći uticaj na određivanje flikera u poređenju sa režimima bez kompenzacije reaktivne snage. Iz tog razloga je u pogledu nesigurnosti prouzrokovanih modelom mreže ovaj scenario daleko nepovoljniji jer su otpornosti elemenata mreže poznate sa značajno manjom tačnošću od reaktansi.

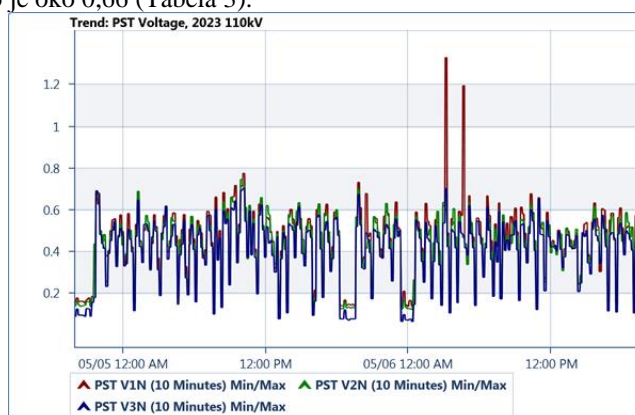
Na tačnost estimacije ukupnog nivoa flikera nakon puštanja u rad STATCOM-a značajno utiče i usvojeni način superpozicije flikera prouzrokovano radom elektrolučne peći i pozadinskog flikera koji je prisutan u mreži i prema merenjima u konkretnom slučaju iznosi oko 0,3. U konkretnom slučaju, sumiranje je izvršeno prema formuli iz standarda [10], pri čemu je za vrednost eksponenta α usvojeno 3 – takođe prema preporukama standarda [10].

U cilju verifikacije tačnosti predmetne metode za slučaj estimacije priključenja STATCOM-a, izvršen je novi set terenskih merenja na dalekovodnom polju 110 kV sa koga se napaja potrošač, a nakon ugradnje i puštanja u rad realnog STATCOM-a snage 80 MVar.

Tabela 3 - Uporedni prikaz izmerenih statističkih pokazatelja reaktivne snage pre i nakon ugradnje STATCOM-a 80 MVar.

Radni režim	Reaktivna snaga [MVar]							
	$Q_{\min 100\%}$	$Q_{\min 95\%}$	Q_{srednje}	$Q_{\max 95\%}$	$Q_{\max 100\%}$	$\Delta Q_{100\%}$	$\Delta Q_{95\%}$	STD(Q)
bez STATCOM-a	-28.85	-26.34	8.21	41.40	57.31	86.16	67.74	19.83
sa STATCOM-om	4.30	5.72	8.05	9.89	11.12	6.82	4.17	1.36
$Q_{\text{posle}} [\% Q_{\text{pre}}]$						7,91	6,16	6,87

Rezultati merenja pokazali su značajno smanjenje varijacije reaktivne snage i nivoa flikera u tački priključenja na mrežu. Poređenje statističkih podataka reaktivne snage pre i nakon ugradnje i puštanja u rad realnog STATCOM-a (Tabela 3) pokazuju da su fluktuacije reaktivne snage elektrolučne peći sa STATCOM-om smanjene na oko 8% vrednosti pre ugradnje STATCOM-a. Sa druge strane, nivo flikera u tački priključenja, u periodima u kojima je STATCOM radio, iznosio je oko 0,66 (Tabela 3).



Slika 4 - Vremenske promene P_{st} u tački priključenja nakon puštanja u rad STATCOM-a

Estimacija vrednosti flikera za STATCOM koji kompenzuje 92% reaktivne snage predmetne elektrolučne peći, primenom predmetne metode, daje vrednost flikera od 0,677 (Tabela 2). Odstupanje estimirane od izmerene vrednosti isnosi 2,51%, što je izuzetan rezultat.

Tabela 4 - Izmereni i estimirani nivo flikera nakon puštanja u rad STATCOM-a

faza	L1	L2	L3	Estimacija	Rel.greš.estim.[%]
$P_{st95\%}$	0,66	0,63	0,61	0,677	2,51

Ovim je pokazano da predmetna metoda omogućava realističnu estimaciju vrednosti flikera kako u slučaju kada potrošač radi sam, tako i u slučaju kada su u funkciji mere za smanjenje flikera. Stoga se može zaključiti da je predložena metoda primenljiva za potrebe određivanja uticaja novih potrošača na vrednost flikera, kao i za odabir tehničkih rešenja za smanjenje injekcije flikera.

7. OSETLJIVOST METODE

Na tačnost estimacije flikera predmetnom metodom utiče više faktora.

1. Ažurnost i tačnost modela mreže i modela pojedinih komponenata, kao i promene uklopnog stanja. Generalno, u radnim režimima u kojima su dominantne varijacije aktivne snage (poput gore analiziranog rada elektrolučne peći i STATCOM-a), do izražaja posebno dolazi tačnost ekvivalentne otpornosti mreže i otpornosti pojedinih komponenata mreže (transformatora, nadzemnih vodova i kablova) čije stvarne vrednosti nisu poznate sa velikom tačnošću i menjaju se sa vremenom (npr. u zavisnosti od temperature). Takođe, promena uklopnog stanja u mreži u odnosu na pretpostavljeno može biti uzrok dodatnih grešaka. Zbog toga je za primenu metode neophodno praćenje promena u mreži i redovno ažuriranje modela mreže, kao i poznavanje aktuelnog i ostalih mogućih uklopnih stanja.

2. Na estimaciju ukupnog nivoa flikera u mreži utiče pretpostavljeni način superpozicije flikera prouzrokovanih radom pojedinih potrošača i pozadinskog šuma prisutnog u mreži. Superpozicija flikera pojedinačnih potrošača zavisi od jednovremenosti rada pojedinih potrošača i od superpozicije odgovarajućih varijacija napona koje su prouzrokovane varijacijama njihovih opterećenja. Široko je prihvaćen način sumiranja flikera izložen u [10], mada je i za njegovu korektnu primenu neophodno poznavati jednovremenost i tip potrošača.

3. Pri *a priori* estimaciji flikera perspektivnih potrošača veliki uticaj ima i kvalitet modela potrošača, kao i to da li je izabran model koji je adekvatan za predstavljanje potrošača čija se emisija procenjuje. Korišćeni modeli razvijeni su na osnovu merenja koja su izvršena na potrošačima određenog tipa i snage, te je od značaja imati što veću bazu konkretnih merenja i modela. Takođe, potrebno je imati određene podatke o perspektivnom potrošaču kako bi se ispravno odabrao za njega odgovarajući model.

4. U radu je pokazano da je korišćenje predmetne metode u procesu izbora optimalnog rešenja za smanjenje injekcije flikera dalo veoma dobre rezultate sa stanovišta estimacije vrednosti flikera po ugradnji određenog rešenja. Potencijalni problem postoji kod rešenja baziranih na energetskej elektronici (aktivni filtri, STATCOM-i,...) jer algoritmi regulacije ovih rešenja nisu opšte poznati niti javno dostupni. Stoga se, u ovim slučajevima, rezultati estimacije moraju predstaviti kao opseg rezultata za različite nivoe efikasnosti regulacije. Ovo može biti izvor određenih razlika između estimiranih vrednosti i vrednosti flikera izmerenih posle ugradnje konkretnog rešenja za smanjenje injekcije.

I pored svih navedenih ograničenja, predmetna metoda je pokazala mnogo bolje rezultate nego do sada raspoložive metode, kako kod određivanja doprinosa konkretnog potrošača na fliker u tački priključenja, tako i kod estimacije uticaja pojedinih rešenja na smanjenje emisije flikera. Dalji pravci razvoja metode mogu se kretati u smeru dodatnih istraživanja gore pomenutih uticaja i daljih unapređenja tačnosti predmetne metode.

8. POTENCIJALNE PRIMENE METODE

Najveći broj potencijalnih primena ove metode predstavlja alat za operatora mreže, koji omogućava da se značajno unaprede njegove aktivnosti u čitavom nizu oblasti iz njegove nadležnosti, a sve u cilju održavanja kvaliteta napona u mreži u željenim okvirima. Neke od značajnijih primena su navedene u nastavku.

8.1 Primena metode u procesu priključenje perspektivnog potrošača

Estimacija emisije flikera od strane perspektivnog potrošača u procesu odobrenja priključenja na mrežu. Ova estimacija omogućila bi da se u okviru procedure izdavanja dozvole za priključenje odredi da li će i koliko priključenje potrošača uticati na nivo flikera u mreži i da li je taj uticaj u granicama prihvatljivog. Ukoliko se pokaže da bi njegovo priključenje nepovoljno uticalo na nivo flikera, operator bi bio u mogućnosti da mu blagovremeno naloži sprovođenje mera za smanjenje emisije flikera ili ugradnju opreme koja bi imala manji nivo emisije. Postojala bi mogućnost da se posmatra propagacija flikera kroz mrežu, tj. koliko je povećanje vrednost flikera u čvorovima po dubini mreže, kao i da se utvrdi koliki deo kapaciteta mreže za apsorpciju bi zauzeo perspektivni potrošač.

U pojedinim slučajevima moglo bi se pokazati da trenutno ne postoje uslovi za priključenje perspektivnog potrošača date snage po kriterijumu nivoa flikera u toj tački mreže. U tom slučaju, predmetna metoda bi mogla biti deo dalje procedure priključenja, tj. mogla bi da pokaže da li postoje mere za zadovoljavajuće smanjenje injekcije flikera i/ili koja su potrebna proširenja kapaciteta mreže koja bi omogućila priključenje datog potrošača.

U svim navedenim scenarijima, omogućava se da perspektivni potrošač na vreme dobije sve relevantne informacije o tome da li je priključenje na mrežu datog postrojenja moguće i pod kojim uslovima. Time bi se mogle izbeći situacije u kojima operator izda dozvolu za priključenje, kupac investira u postrojenja, a nakon priključenja se pokaže da je nivo flikera previsok i da u toj tački mreže po kriterijumu flikera možda nije ni bilo uslova za priključenje takvog potrošača.

8.2 Primena metode u procesu kontrolisanja emisije flikera postojećeg potrošača

Kontrola emisije flikera konkretnog potrošača: Određivanje emisije flikera *aposteriori* od konkretnog potrošača, a na osnovu merenja profila njegovog opterećenja. Na ovaj način omogućava se da se na osnovu samo jednog seta merenja pouzdano odredi nivo emisije flikera potrošača i utvrdi da li je on u okviru emisionih limita. Ovo bi značajno unapredilo kontrolu emisije flikera od strane operatora.

8.3 Primena metode u postupku usvajanja tehničkih rešenja za ograničenje emisije

Estimacija efekta primene određenih rešenja za smanjenje flikera. Predmetna metoda omogućila bi da se unapred predvide efekti pojedinih rešenja i njihova ograničenja, te da se izabere optimalno tehničko rešenje koje ispunjava postavljene zahteve.

8.4 Primena metode u procesu upravljanja i planiranja mreže

Raspodela kapaciteta mreže za apsorpciju flikera u procesu upravljanja, naročito u komplikovanijim slučajevima (radialne mreže sa dugačkim kablovima i većim brojem izvoda, petljaste mreže) gde postoje jaki međusobni uticaji između pojedinih čvorova i gde potrošač priključen u jednom čvoru može značajno uticati na vrednost flikera u čitavom nizu čvorova.

Planiranje razvoja mreže i investicije: za određivanje da li u određenoj tački mreže postoje mogućnosti za priključenje potrošača određenog tipa i snaga, kao i koje bi investicije u proširenje mreže omogućile priključenje u toj tački; estimacija efekata određenih investicija u mrežu na nivo flikera u mreži i na kapacitet mreže za apsorpciju flikera u različitim tačkama, poređenje više različitih rešenja i izbor optimalnog rešenja.

9. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena metoda za estimaciju doprinosa flikeru usled rada jednog ili više izvora flikera, kako u tački priključenja, tako i u čvorovima po dubini mreže. Metoda se bazira na korišćenju modela potrošača sa visokom vremenskom rezolucijom u dužem vremenskom periodu. U referatu je prikazana primena metode na realnom potrošaču sa elektrolučnim pećima priključenom na prenosnu mrežu. Rezultati estimacije flikera usled rada elektrolučne peći verifikovani su poređenjem izmerenih i estimiranih vrednosti, čime je pokazana veoma velika tačnost estimacije od 5%. Predmetna metoda je potom korišćena za estimaciju efekata pojedinih mera za smanjenje emisije flikera i odabir optimalnog rešenja. Prvo su estimirani rezultati priključenja STATCOM-a na smanjenje emisije flikera, a potom su nakon ugradnje i puštanja u rad realnog STATCOM-a, rezultati merenja upoređeni sa rezultatima estimacije. Poređenje je pokazalo izuzetno dobro slaganje realnih sa estimiranim vrednostima.

Oblast primene predmetne metode je estimacija flikera pre priključenja potrošača na mrežu, izbor parametara optimalnog tehničkog rešenja za smanjenje injekcije poremećaja, kao i određivanje limita za emisiju flikera konkretnog potrošača.

Korišćenje modela potrošača sa visokom vremenskom rezolucijom od 20ms je pokazalo izuzetno dobar rezultat. Ovo je definitivno put za sva dalja istraživanja u pogledu estimacije flikera. Dalji razvoj metode zahteva razvoj unapređenih modela potrošača i opreme za smanjenje flikera, kao i ažuriranje i proširenje modela mreže i uključivanje dodatnih uklopnih stanja.

10. LITERATURA

- [1] N. Laketić, V. Đikić, V. Krnaiski, A. Tatalović, „Propagacija naponskog flikera kroz prenosnu i distributivnu mrežu“, 2022 *CIRED Srbija*, Kopaonik, 2022..
- [2] N. Laketić, A. Tatalović, V. Đikić, V. Krnaiski, B. Čupić, „Metod određivanja limita za emisiju poremećaja konkretnog industrijskog potrošača u cilju zaštite usvojenih planskih nivoa izobličenja u prenosnoj mreži“, 2023 *CIGRE Srbija*, Zlatibor, 2023.
- [3] M. Maksic, B. Blazic, I. Papic, „Comparison of calculated and measured flicker values for two different network topologies“, 2009 *IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, 2009.
- [4] B. Blazic, I. Papic, „Analysis of flicker mitigation in a utility distribution network“, *The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool*, Ljubljana, Slovenia, 2003.
- [5] R. Horton, T. A. Haskew, R. F. Burch IV, „A Time-Domain AC Electric Arc Furnace Model for Flicker Planning Studies“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, t. 24, br. 3, pp. 1450-1457, July 2009.
- [6] X. Yang, M. Kratz, „Power System Flicker Analysis and Numeric Flicker Meter Emulation“, 2007 *IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [7] X. X. Yang and M. Kratz, „Power System Flicker Analysis by RMS Voltage Values and Numeric Flicker Meter Emulation“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, t. 24, br. 3, pp. 1310-1318, July 2009.
- [8] IEC „*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*“, IEC 61000-4-15, 2011.

- [9] IEC „*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*“, IEC 61000-4-30 ED3, Feb. 2015.
- [10] IEC „*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems*“, IEC TR 61000-3-7:2008 ED2, Feb. 2008.
- [11] K. Anuradha, B. P. Muni, A. D. R. Kumar, „*Electric Arc Furnace Modeling and Voltage Flicker Mitigation by DSTATCOM*“, 2008 *IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems*, Kharagpur, India, 2008.