Broj rada: R3-09
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-09_152

IMPLEMENTACIJA AUTOMATSKE REGULACIJE NAPONA U PROGRAMABILNOJ LOGICI MIKROPROCESORSKOG ZAŠTITNO-UPRAVLJAČKOG UREĐAJA

IMPLEMENTATION OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION IN THE PROGRAMMABLE LOGIC OF AN INTELIGENT ELECTRONIC DEVICE

Pavle KRIČKA, PowerGrid Engineering d.o.o. Beograd, Republika Srbija*
Miljana TODOROVIĆ, PowerGrid Engineering d.o.o. Beograd, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Broj solarnih elektrana priključenih na distributivnu mrežu je poslednjih godina u stalnom porastu, što donosi nove izazove u pogledu eksploatacije distributivne mreže na koje su iste priključene. Distributivne transformatorske stanice se tipično eksploatišu sa jednim aktivnim izvorom napajanja na VN strani transformatora, dok se SN izvodi smatraju pasivnim. Transformatori u TS 110/x kV/kV u distributivnoj mreži Srbije su najčešće opremljeni regulacionom sklopkom sa mogućnošću regulacije pod opterećenjem i funkcijom automatske regulacije napona (ARN). Vrlo česta je upotreba funkcije Z-kompenzacije ili LDC-kompenzacije u ARN uređajima kako bi se napon u mreži posmatranog trafo reona kvalitetnije i tačnije regulisao. Priključivanje aktivnog izvora (npr. solarna elektrana) na distributivnu mrežu takvog trafo reona uzrokuje da ARN uređaj, koji meri samo struju transformatora, ne može precizno da radi neku od pomenutih kompenzacija jer merena struja ne predstavlja struju opterećenja tog trafo reona. U radu je prikazana implementacija ARN funkcije sa Z-kompenzacijom u programabilnoj logici mikroprocesorskog zaštitno-upravljačkog uređaja (MPZU) koja uvažava, kako struju transformatora, tako i struje aktivnih izvoda.

Ključne reči: automatska regulacija napona, programabilna logika, Z-kompenzacija

ABSTRACT

The number of solar power plants connected to the distribution network has been steadily increasing in recent years, introducing new operational challenges for the distribution network. Distribution substations are typically operated with a single active power source on the HV side of the power transformer, while MV feeders are considered passive. Power transformers in 110/x kV/kV substations in the distribution network of Serbia are usually equipped with an OLTC and an automatic voltage regulation (AVR) function. It is very common to use either Z-compensation or line drop compensation (LDC) function in AVR devices to achieve more accurate voltage regulation in the network supplied by the considered transformer. However, the connection of an active source (e.g. solar power plant) to the distribution network of such transformers causes the AVR device, which typically measures only transformer current, to be

* Pavle Krička pavle.kricka@powergrid-e.com

unable to accurately perform these compensations, since the measured current no longer represents the actual load current. The paper presents the implementation of the AVR function with Z-compensation in the programmable logic of a microprocessor-based intelligent electronic device (IED), which considers both the transformer current and the currents of active feeders.

Keywords: automatic voltage regulation, programmable logic, Z-compensation

UVOD

Iz godine u godinu, udeo električne energije iz solarnih elektrana u ukupnoj proizvodnji elektroenergetskih sistema značajno raste. Osnovni razlozi za takav trend su smanjenje troškova investicije usled smanjenja cene solarnih panela, uvođenje podsticajnih regulatornih okvira, kao i politika smanjenja emisije gasova koji uzrokuju efekat staklene bašte, čime ovi elektroenergetski objekti postaju sve konkurentniji i privlačniji, pogotovo privatnim investitorima koji žele da uzmu svoje učešće na tržištu električne energije. Solarne elektrane instalisane snage do 10 MW se po pravilu priključuju direktno na distributivni sistem. Integracijom obnovljivih izvora energije direktno u distributivni sistem, menja se način planiranja i eksploatacije istog. Tokovi snaga u distributivnoj mreži više nisu jednoznačno određeni, odnosno, distributivna mreža se više ne može apriori smatrati radijalnom, već sadrži više aktivnih izvora u sistemu direktnog redosleda.

Generalno u elektroenergetskom sistemu, porast struje opterećenja dovodi do pada napona, i obrnuto. Transformatori u TS 110/x kV/kV u distributivnoj mreži Srbije obično su opremljeni regulacionom sklopkom sa mogućnošću regulacije napona pod opterećenjem. Kako bi se napon u SN mreži održavao u prihvatljivom opsegu, što predstavlja jedan od zahteva u pogledu kvaliteta električne energije, u posmatranim TS se primenjuje ARN funkcija koja automatski deluje na regulacionu sklopku transformatora u cilju održavanja napona mreže u zadatom opsegu. Radi uvažavanja struje opterećenja i unapređenja regulacije napona u mreži trafo reona regulisanog transformatora, ARN funkcija poseduje dodatnu podfunkciju za kompenzaciju pada napona usled opterećenja: Z-kompenzaciju (Z-comp) ili LDC-kompenzaciju (LDC-comp). U distributivnoj mreži Srbije se najčešće koristi Z-kompenzacija koja je i implementirana u programabilnoj logici MPZU i prikazana u ovom radu.

1 TEORIJSKA OSNOVA

Funkcija ARN ima zadatak da delovanjem na regulacionu sklopku transformatora koriguje napon u mreži i održava ga u prihvatljivim vrednostima u pogledu kvaliteta električne energije. Regulacija radi na *step-by-step* principu, odnosno, jedna komanda ARN funkcije (uređaja), tj. jedan korak regulacione sklopke transformatora, uzrokuje diskretnu, a ne kontinualnu promenu vrednosti napona. Regulisani napon može da bude mereni napon, obično napon SN sabirnica na koje je povezan regulisani transformator, ili kompenzovani napon „dublje“ u mreži. U prvom slučaju se ne primenjuje nikakav vid kompenzacije (nije neophodno merenje struje potrošnje), dok se u drugom slučaju mora primeniti neki vid kompenzacije (neophodno merenje struje potrošnje) – Z-kompenzacija ili LDC-kompenzacija. U radu će biti obrađena samo Z-kompenzacija, koja je i implementirana u programabilnoj logici MPZU.

1.1 Regulacija napona bez kompenzacije (samo na osnovu merenog napona)

Moderni MPZU, pored predefinisanih zaštitnih i upravljačkih funkcija, nude i veoma fleksibilnu programabilnu logiku. Ona podrazumeva korišćenje vremenskih elemenata, binarnih i matematičkih promenljivih, flip-flopova i brojača. Korišćenje merenog napona kao kriterijumske veličine za odlučivanje o podizanju ili spuštanju napona u mreži predstavlja relativno jednostavan zadatak za programabilnu logiku MPZU. Kako bi se podesila ARN funkcija bazirana isključivo na merenom naponu sabirnica, neophodan je relativno mali set ulaznih podataka: naznačeni napon namotaja transformatora koji je povezan na sabirnice čiji se napon reguliše – *nominalvoltage* [V], korak regulacije regulacione sklopke transformatora – *tapstep* [%], vrednost željenog napona na sabirnicama – *setpointvoltage* [V] i vrednost „mrtve zone“ regulatora – *setpoint* [%]. Prva dva podatka se očitavaju sa natpisne pločice regulisanog transformatora, dok se preostala dva podatka određuju proračunom ili podešavaju na osnovu iskustva. Na primer, ukoliko je naznačeni napon transformatora 20 kV sa korakom regulacije 1,6% i ukoliko želimo da održavamo napon na sabirnicama na 20,5 kV sa „mrtvom zonom“ od ±1,5%, proračunatu „mrtvu zonu“ regulatora dobijamo iz:

$$bandwidth = \pm 1{,}5\% \times 20{,}5kV = \pm 307{,}5\,V \tag{1}$$

što u našem slučaju daje:

$$setpoint = \frac{bandwith \times 10000}{tapstep \times nominalvoltage} = 96{,}1\% \tag{2}$$

Ukoliko razlika između merenog i željenog napona sabirnica pređe vrednost mrtve zone (u primeru ±307,5 V), ARN funkcija (uređaj) treba da izda upravljačku komandu ka regulacionoj sklopci transformatora. Ukoliko razliku između merenog i željenog napona svedemo na *bandwidth*, možemo izračunati devijaciju napona u relativnim jedinicama:

$$voltagedeviation = \frac{measuredvoltage - setpointvoltage}{bandwidth} \tag{3}$$

Negativan broj označava da je mereni napon sabirnica manji od željenog napona. Ukoliko devijacija napona padne ispod -1 r.j., ARN funkcija treba da izda komandu za podizanje napona. Analogno važi i za povišen napon na sabirnicama.

Pored komparatora napona, neophodno je i vremensko odlaganje izdavanja komande. Vremensko odlaganje izdavanja komande daje vremena regulacionoj sklopci da se resetuje između uspešnih odrada i sprečava delovanje za vreme tranzijenata, kao što su uključenje velikih potrošača ili odrada relejne zaštite u mreži. Ukoliko se izda nalog za odradu regulacione sklopke za vreme kvara u mreži, velika struja može da ošteti kontakte u samoj regulacionoj sklopci. Neki ARN uređaji (funkcije) koriste fiksno vreme odlaganja delovanja, a neki dva ili više vremenskih elemenata u zavisnosti koliko je mereni napon odstupio od željenog. Kako je u našem slučaju devijacija napona svedena na relativne jedinice, jednostavno je primeniti inverznu vremensku karakteristiku odlaganja delovanja:

$$timetotap = \frac{maximumtime}{voltagedeviation^2} \tag{4}$$

gde je *maximumtime* podešenje maksimalnog vremena odlaganja delovanja. Npr. ukoliko je *maximumtime* podešeno na 60 s, za devijaciju napona od 1 r.j. vreme delovanja će biti 60 s, za devijaciju napona od 2 r.j. vreme delovanja će biti 15 s, itd.

1.2 Z-kompenzacija (Z-comp)

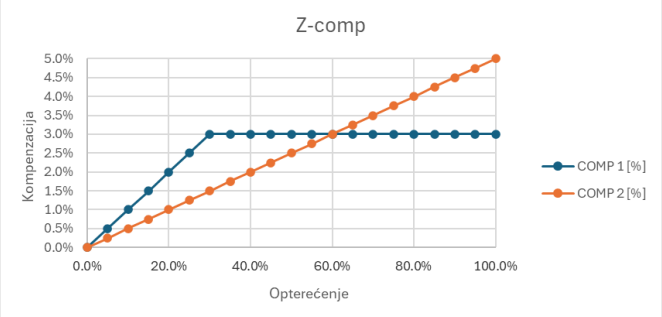
Z-kompenzacija omogućava estimaciju pada napona „dublje“ u mreži regulisanog transformatora i najčešće se koristi kada je faktor snage potrošnje regulisanog transformatora konstantan, što je u SN distributivnoj mreži Srbije najčešće i slučaj ($|\cos\varphi|\leq 0{,}9$). Regulacija napona bez kompenzacije, koja radi samo na osnovu merenog napona sabirnica, ne uvažava konfiguraciju mreže trafo reona i potencijalne kritične tačke u pogledu naponskih prilika. To bi se moglo rešiti postavljanjem željene vrednosti napona na sabirnicama u TS na višu vrednost kako bi se obezbedilo da te kritične tačke u mreži, pri većim opterećenjima mreže, budu sa prihvatljivom vrednošću napona, ali u tom slučaju se praktično napon na sabirnicama u TS konstantno održava na visokom nivou. Z-kompenzacija praktično dinamički menja željenu vrednost napona sabirnica u odnosu na opterećenje mreže trafo reona. Podešavanje Z-kompenzacije zahteva proračun (procenu) pada napona u najkritičnijoj tački mreže trafo reona transformatora koji se reguliše pri maksimalnom opterećenju. Proračunati (procenjeni) pad napona pri maksimalnom opterećenju predstavlja maksimalnu vrednost kompenzacije koju će Z-kompenzacija koristiti. Ovde treba napomenuti da je tačnija LDC-kompenzacija koja uvažava i rezistivnu i reaktivnu komponentu struje opterećenja, ali je ona primenljiva samo na aplikacije gde regulisani transformator napaja samo jedan vod (potrošač) ili više identičnih vodova (potrošača) što u SN distributivnoj mreži Srbije praktično nikad nije slučaj. Stoga se umesto LDC-kompenzacije češće koristi Z-kompenzacija koja ceo trafo reon ekvivalentira ekvivalentnim vodom i pokušava da reguliše napon na kraju tog ekvivalentnog voda. Naravno, ovakva aproksimacija unosi grešku, ali je u najvećem broju slučajeva ta greška prihvatljiva. U tabeli I je prikazano poređenje različitih metoda za regulaciju napona.

Tabela I – Komparativna analiza različitih metoda regulacije napona

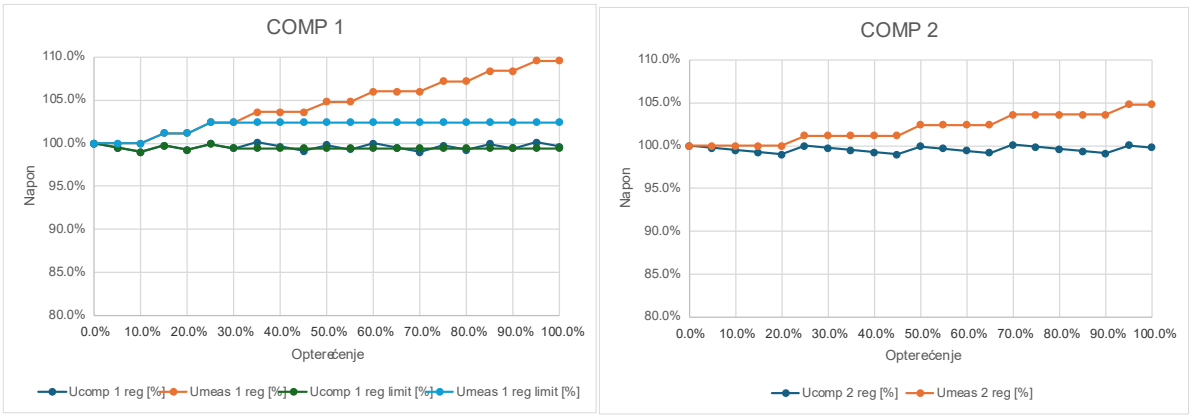
Karakteristika	Bez kompenzacije	Z-kompenzacija	LDC-kompenzacija
Merenje napona	Da	Da	Da
Merenje struje(a)	Ne	Da	Da
Proračun tokova snaga i naponskih prilika	Ne	Da	Da
Jednostavnost šema delovanja i vezivanja	Da	Da*	Da
Regulacija napona po dubini mreže	Ne	Da	Da
Primena u TS sa raznovrsnim izvodima	Da	Da	Ne
Regulacija pri praralelnom radu transformatora	Da	Da	Da

* u zavisnosti od kompleksnosti aplikacije, odnosno, da li se uvažavaju aktivni izvodi

Pored toga, kako je regulisani napon u stvari proračunati (procenjeni) napon „dublje“ u mreži, mora se voditi računa o merenom naponu sabirnica kako on ne bi porastao na nedozvoljenu vrednost. Na slikama 1 i 2 su prikazani primeri Z-kompenzacije.



Slika 1 – Primer Z-comp za različite parametre podešavanja
(COMP 1) Z-comp[%] = 10, Z-comp_limit[%] = 3; (COMP 2) Z-comp[%] = 5, Z-comp_limit[%] = 6



Slika 2 – Regulisani i merni napon pri COMP 1 i COMP 2 podešenjima

Tradicionalno, Z-kompenzacija za procenu opterećenja transformatora koristi moduo struje SN transformatorskog polja VN/SN transformatora. Ovaj pristup je primenljiv na tradicionalne radijalne distributivne mreže, odnosno, na mreže koje u sistemu direktnog redosleda imaju samo jedan izvor – prenosnu mrežu „iza“ VN/SN transformatora. Sa sve većom integracijom obnovljivih izvora energije u distributivnoj mreži, pre svega solarnih elektrana, merenje samo struje SN transformatorskog polja VN/SN transformatora po pravilu više ne predstavlja ukupno opterećenje trafo reona. Stoga se u savremenim rešenjima u ARN uređaj uvode i merenja sa svih SN izvoda koji potencijalno mogu imati proizvodnu ulogu u sistemu direktnog redosleda, kao što su direktno povezani proizvodni kapaciteti, kao i SN izvodi na koje su u mreži priključeni proizvodni kapaciteti. Kako je sama regulacija napona trafo reona relativno spor proces, mehanizmi za prikupljanje tih merenja mogu biti različiti, kao što su na primer direktno ožičavanje struje aktivnih SN izvoda ili preuzimanje merenja komunikacionim putem – GOOSE porukom sa MPZU aktivnog SN izvoda. U ovom radu su obrađena oba slučaja: struje aktivnih SN izvoda koji se nalaze na istoj sekciji sabirnica kao i regulisani transformator se uzimaju direktnim ožičavanjem na ARN uređaj, dok se struje sa aktivnih SN izvoda koji se nalaze na drugoj sekciji sabirnica u odnosu na regulisani transformator uzimaju GOOSE mehanizmom sa MPZU tih izvoda. Kako Z-kompenzacija već podrazumeva aproksimaciju homogenog opterećenja, odnosno, opterećenja kome je $|\cos\varphi| \leq 0{,}9$, struje aktivnih SN izvoda i SN transformatorskog polja VN/SN transformatora koji se reguliše se algebarski sabiraju ukoliko je aktivni SN izvod „proizvođač“ u sistemu direktnog redosleda, odnosno, oduzimaju ukoliko je aktivni SN izvod „potrošač“ u sistemu direktnog redosleda. Ovo algebarsko sabiranje struja, naravno, unosi neku grešku, ali je ona prihvatljiva. Na slici 3 je prikazana ta greška:

XFMR_AMPS [pu]	DER_AMPS [pu]					
0.050	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.100	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.150	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.200	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.250	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.300	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.350	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.400	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.450	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.500	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.550	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.600	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.650	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.700	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300
0.750	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	
0.800	0.050	0.100	0.150	0.200		
0.850	0.050	0.100	0.150			
0.900	0.050	0.100				
0.950	0.050					
1.000						

LOAD_AMPS, cosφ=1 [pu]						
0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	
0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	
0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	
0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500	
0.300	0.350	0.400	0.450	0.500	0.550	
0.350	0.400	0.450	0.500	0.550	0.600	
0.400	0.450	0.500	0.550	0.600	0.650	
0.450	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	
0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750	
0.550	0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	
0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	
0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900	
0.700	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	
0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	1.000	
0.800	0.850	0.900	0.950	1.000		
0.850	0.900	0.950	1.000			
0.900	0.950	1.000				
0.950	1.000					
1.000						

LOAD_AMPS, cosφ=0,9 [pu]						
0.097	0.147	0.196	0.246	0.296	0.346	
0.147	0.195	0.244	0.293	0.343	0.392	
0.196	0.244	0.292	0.341	0.391	0.440	
0.246	0.293	0.341	0.390	0.439	0.488	
0.296	0.343	0.391	0.439	0.487	0.536	
0.346	0.392	0.440	0.488	0.536	0.585	
0.396	0.442	0.489	0.537	0.585	0.634	
0.446	0.492	0.539	0.587	0.634	0.683	
0.495	0.542	0.589	0.636	0.684	0.732	
0.545	0.592	0.638	0.686	0.733	0.781	
0.595	0.641	0.688	0.735	0.783	0.830	
0.645	0.691	0.738	0.785	0.832	0.880	
0.695	0.741	0.788	0.835	0.882	0.929	
0.745	0.791	0.838	0.884	0.931	0.979	
0.795	0.841	0.887	0.934	0.981		
0.845	0.891	0.937	0.984			
0.895	0.941	0.987				
0.945	0.991					
0.995						

ERROR LOAD AMPS [%]					
2.60%	2.30%	1.93%	1.64%	1.42%	1.25%
2.30%	2.60%	2.49%	2.30%	2.11%	1.93%
1.93%	2.49%	2.60%	2.54%	2.43%	2.30%
1.64%	2.30%	2.54%	2.60%	2.56%	2.49%
1.42%	2.11%	2.43%	2.56%	2.60%	2.58%
1.25%	1.93%	2.30%	2.49%	2.58%	2.60%
1.11%	1.77%	2.17%	2.40%	2.52%	2.58%
1.00%	1.64%	2.04%	2.30%	2.45%	2.54%
0.91%	1.52%	1.93%	2.20%	2.38%	2.49%
0.84%	1.42%	1.82%	2.11%	2.30%	2.43%
0.77%	1.33%	1.73%	2.01%	2.22%	2.37%
0.72%	1.25%	1.64%	1.93%	2.14%	2.30%
0.67%	1.18%	1.56%	1.85%	2.07%	2.23%
0.63%	1.11%	1.49%	1.77%	2.00%	2.17%
0.59%	1.05%	1.42%	1.70%	1.93%	
0.56%	1.00%	1.36%	1.64%		
0.53%	0.96%	1.30%			
0.50%	0.91%				
0.48%					

ΔU, cosφ=1, Zcomp=5% [%]					
0.50%	0.75%	1.00%	1.25%	1.50%	1.75%
0.75%	1.00%	1.25%	1.50%	1.75%	2.00%
1.00%	1.25%	1.50%	1.75%	2.00%	2.25%
1.25%	1.50%	1.75%	2.00%	2.25%	2.50%
1.50%	1.75%	2.00%	2.25%	2.50%	2.75%
1.75%	2.00%	2.25%	2.50%	2.75%	3.00%
2.00%	2.25%	2.50%	2.75%	3.00%	3.25%
2.25%	2.50%	2.75%	3.00%	3.25%	3.50%
2.50%	2.75%	3.00%	3.25%	3.50%	3.75%
2.75%	3.00%	3.25%	3.50%	3.75%	4.00%
3.00%	3.25%	3.50%	3.75%	4.00%	4.25%
3.25%	3.50%	3.75%	4.00%	4.25%	4.50%
3.50%	3.75%	4.00%	4.25%	4.50%	4.75%
3.75%	4.00%	4.25%	4.50%	4.75%	5.00%
4.00%	4.25%	4.50%	4.75%	5.00%	
4.25%	4.50%	4.75%	5.00%		
4.50%	4.75%	5.00%			
4.75%	5.00%				
5.00%					

ΔU, cosφ=0,9, Zcomp=5% [%]					
0.49%	0.73%	0.98%	1.23%	1.48%	1.73%
0.73%	0.97%	1.22%	1.47%	1.71%	1.96%
0.98%	1.22%	1.46%	1.71%	1.95%	2.20%
1.23%	1.47%	1.71%	1.95%	2.19%	2.44%
1.48%	1.71%	1.95%	2.19%	2.44%	2.68%
1.73%	1.96%	2.20%	2.44%	2.68%	2.92%
1.98%	2.21%	2.45%	2.69%	2.93%	3.17%
2.23%	2.46%	2.69%	2.93%	3.17%	3.41%
2.48%	2.71%	2.94%	3.18%	3.42%	3.66%
2.73%	2.96%	3.19%	3.43%	3.67%	3.91%
2.98%	3.21%	3.44%	3.68%	3.91%	4.15%
3.23%	3.46%	3.69%	3.92%	4.16%	4.40%
3.48%	3.71%	3.94%	4.17%	4.41%	4.65%
3.73%	3.96%	4.19%	4.42%	4.66%	4.89%
3.98%	4.21%	4.44%	4.67%	4.91%	
4.23%	4.46%	4.69%	4.92%		
4.48%	4.71%	4.94%			
4.73%	4.95%				
4.98%					

ERROR ΔU [%]					
2.60%	2.30%	1.93%	1.64%	1.42%	1.25%
2.30%	2.60%	2.49%	2.30%	2.11%	1.93%
1.93%	2.49%	2.60%	2.54%	2.43%	2.30%
1.64%	2.30%	2.54%	2.60%	2.56%	2.49%
1.42%	2.11%	2.43%	2.56%	2.60%	2.58%
1.25%	1.93%	2.30%	2.49%	2.58%	2.60%
1.11%	1.77%	2.17%	2.40%	2.52%	2.58%
1.00%	1.64%	2.04%	2.30%	2.45%	2.54%
0.91%	1.52%	1.93%	2.20%	2.38%	2.49%
0.84%	1.42%	1.82%	2.11%	2.30%	2.43%
0.77%	1.33%	1.73%	2.01%	2.22%	2.37%
0.72%	1.25%	1.64%	1.93%	2.14%	2.30%
0.67%	1.18%	1.56%	1.85%	2.07%	2.23%
0.63%	1.11%	1.49%	1.77%	2.00%	2.17%
0.59%	1.05%	1.42%	1.70%	1.93%	
0.56%	1.00%	1.36%	1.64%		
0.53%	0.96%	1.30%			
0.50%	0.91%				
0.48%					

Slika 3 – Greška algebarskog sabiranja struja aktivnog SN izvoda i SN transformatorskog polja VN/SN transformatora

Slika 3 prikazuje razliku računice kada se struja aktivnog SN izvoda aproksimira da je u fazi sa strujom SN transformatorskog polja VN/SN transformatora i algebarski se sabere sa njom u odnosu na neaproksimiran slučaj kada je struja aktivnog SN izvoda pomerena u odnosu na struju SN transformatorskog polja VN/SN transformatora za ugao čiji je cosφ=0,9 i kada se njih dve saberu vektorski. Sa slike 3 možemo videti da je najveća greška procenjenog pada napona nastala zbog uprošćavanja računice oko 2,6% što se preslikava na najveću grešku kompenzovane željene vrednosti napona od 0,11% (što je 22 V za naponski nivo 20 kV). Odavde možemo zaključiti da je greška nastala zbog uprošćavanja računice praktično zanemariva.

Vrednost procenjenog pada napona u najkritičnijoj tački mreže u odnosu na mereni napon na sabirnicama u TS se izračunava kao:

$$\Delta U_{Z_{COMP}} = \frac{Z_{COMP} \times I_{LOAD}}{100} [pu] \quad (5)$$

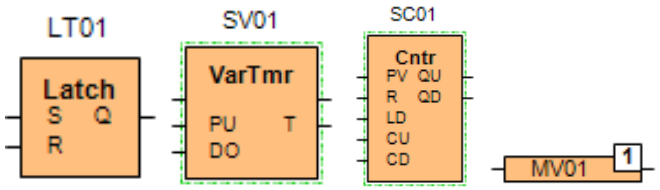
gde je Z_{COMP} podešenje u %, a I_{LOAD} ukupna struja potrošnje u r.j. u odnosu na naznačenu struju regulisanog VN/SN transformatora. Ovo znači da za npr. podešenje Z_{COMP} od 4% i opterećenje regulisanog VN/SN transformatora od npr. 40% naznačenog (0,4 r.j.) imamo pad napona u najkritičnijoj tački mreže u odnosu na mereni napon na sabirnicama u TS od 0,016 r.j. tj. 1,6%. Logika za izdavanje automatskih komandi za podizanje i spuštanje napona data je sa:

$$raisetap = presentcountervalue > timetotap\ AND\ voltagedeviation \leq -1 \quad (6)$$

$$lowertap = presentcountervalue > timetotap\ AND\ voltagedeviation \geq 1 \quad (7)$$

2 REALIZACIJA U PROGRAMABILNOJ LOGICI MPZU

Za realizaciju ARN funkcije u programabilnoj logici MPZU, korišćeni su *latch*-evi, binarne promenljive sa vremenskim elementom, brojači i matematičke promenljive, koji su prikazani na slici 4.



Slika 4 – Latch, binarna promenljiva sa vremenskim elementom, brojač i matematička promenljiva u MPZU

Prvo je neophodno napomenuti da su struja regulisanog transformatora, kao i struja aktivnog izvoda koji se nalazi na istoj sekciji sabirnica kao i regulisani transformator, bile direktno ožičene na uređaj, dok je struja aktivnog izvoda koji se nalazi na suprotnoj sekciji sabirnica od regulisanog transformatora u uređaj dovedena GOOSE mehanizmom (*Analogs via GOOSE*). Takođe, status prekidača snage regulisanog transformatora je direktno ožičen na uređaj, dok su statusi prekidača spojnog polja, kao i prekidača snage transformatora koji se nalazi na suprotnoj sekciji sabirnica, u uređaj dovedeni GOOSE mehanizmom (*Digitals via GOOSE*).

Latch-evi su iskorišćeni za promenu režima rada LOKALNO/DALJINSKI, promenu režima rada RUČNO/AUTOMATSKI i (DE)AKTIVACIJU naponske redukcije. Promena režima rada se može izvršiti samo lokalno sa MPZU, dok se ostale stvari mogu menjati i lokalno i daljinski u zavisnosti od toga u kom režimu je MPZU. Većina logike ARN funkcije je urađena u matematičkim promenljivama. Deo matematičkih promenljivih je iskorišćen za unošenje neophodnih podešenja ARN funkcije, kao što su *bandwidth* u % koraka regulacione sklopke transformatora, željeni napon (*center band*), parametar kompenzacije pada napona od opterećenja i maksimalne dozvoljene kompenzacije, itd. Drugi deo matematičkih promenljivih je iskorišćen za formiranje izvedenih veličina neophodnih za rad ARN funkcije kao što su struja opterećenja trafo reona (u zavisnosti od položaja prekidača snage drugog transformatora i spojnog polja i smera struja transformatora i aktivnih izvoda), pad napona u zavisnosti od struje opterećenja i kompenzovani napon, odstupanje kompenzovanog napona od željenog napona, itd. Binarne promenljive sa vremenskim elementom su iskorišćene za formiranje različitih uslova i/ili blokada kao što su određivanje smera struja transformatora i/ili aktivnog izvoda kako bi se odredio predznak modula struje pri određivanju ukupne struje opterećenja trafo reona, određivanje izlaska kompenzovanog napona iz *bandwidth*-a željenog napona, formiranje uslova za nalog za izdavanje komandi NAPON GORE i NAPON DOLE, formiranje blokadnih uslova za automatsku i/ili ručnu regulaciju (podnaponska, nadnaponska, prekostrujna blokada, i sl), itd. Brojač je iskorišćen za integralno merenje vremena do izvršenja automatskih komandi NAPON GORE i NAPON DOLE.

Logika ARN funkcije u programabilnoj logici MPZU je urađena u formi strukturnog teksta i neki od primera logičkih jednačina su:

SET01 := PB01_PUL AND NOT LT01 # ARN u lokalnom režimu rada (LT01=1)

RST01 := PB01_PUL AND LT01 # ARN u daljinskom režimu rada (LT01=0)

SET02 := (PB02_PUL AND LT01 OR RB01 AND NOT LT01) AND NOT LT02 # ARN u automatskom režimu rada (LT02=1)

RST02 := (PB02_PUL AND LT01 OR RB02 AND NOT LT01) AND LT02 # ARN u ručnom režimu rada (LT02=0)

SV08IN := MV10 <= -1.00 # Trenutna devijacija napona unutar *low-band*

SV09IN := MV10 > 1.00 # Trenutna devijacija napona unutar *high-band*

SV12IN := (MV25 > -85.00) AND (MV25 < 85.00) # Aktivna snaga na transformatoru ka potrošnji

SV17IN := 52A AND VB001 AND NOT (VB002 OR VB003 OR VB004) # Transformator napaja obe sekcije sabirnica

SV31IN := (SC01 > MV12 AND SV08) AND LT02 AND NOT (SV64 OR SV21T) # Automatska komanda NAPON GORE

SV32IN := (SC01 > MV12 AND SV09) AND LT02 AND NOT (SV64 OR SV20T) # Automatska komanda NAPON DOLE

SV60IN := MV11 >= 1.00 AND NOT SV60T # 1-sec pulsiranje vremenskog brojača kad je odstupanje izvan granica, *count-up*

SV61IN := MV11 < 1.00 AND NOT SV61T # 1-sec pulsiranje vremenskog brojača kad je odstupanje u granicama, *count-down*

SV64IN := 50B1P OR 27PP1 OR 59PP1 OR NOT LT02 OR VB002 OR VB004 OR SV18T OR SV22T OR 52B # Blokada automatske regulacije

SC01CU := SV60T # Brojanje vremena (uvećavanje brojača) kada je odstupanje izvan granica

SC01DO := SV61T # Brojanje vremena (umanjenje brojača) kada je odstupanje u granicama

MV10 := ((MV23 - MV08 * 1000.00) / MV09) * NOT SV64 # Trenutna devijacija napona [pu]

MV22 := (MV21 * NOT SV07 + MV20 * SV07) * NOT SV64 # Trenutni pad napona od opterećenja sa ograničenjem [pu]

MV23 := VAB_MAG * MV63 * (1.00 - MV22) # Kompenzovani mereni napon [V]

MV31 := (MV29 * 52A + MV30 * SV17) * NOT SV64 # Struja opterećenja trafo reona [A"]

MV51 := 6.00 # Maksimalna Z-kompenzacija pada napona od opterećenja [%]

MV52 := 10.00 # Podešena Z-kompenzacija pada napona od opterećenja [%]

MV57 := 20.50 # Podešenje željenog napona „center band“ [kV]

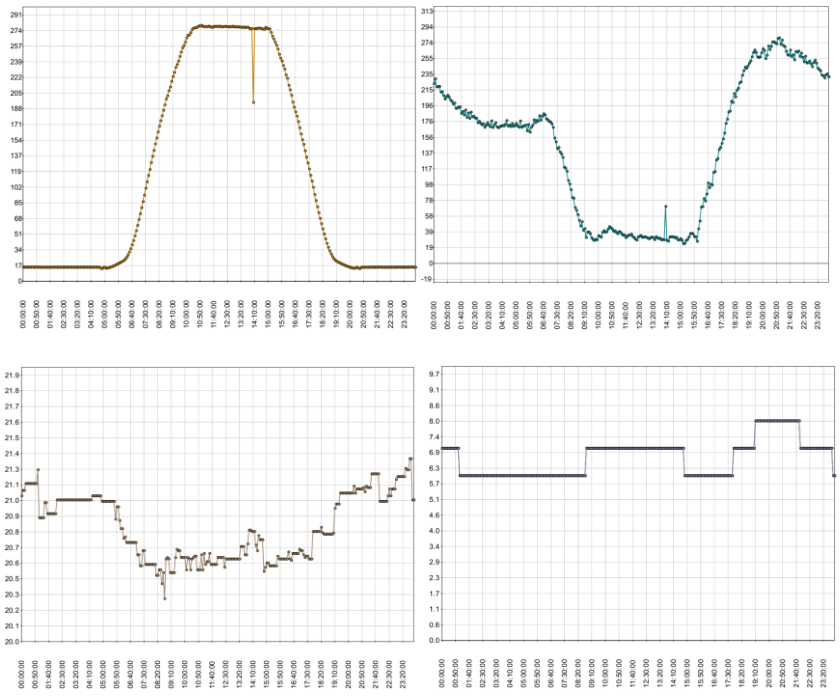
MV58 := 87.50 # Podešenje mrtve zone *„bandwidth“* u % koraka regulacije transformatora [%]

MV59 := 1.60 # Korak regulacije transformatora [%]

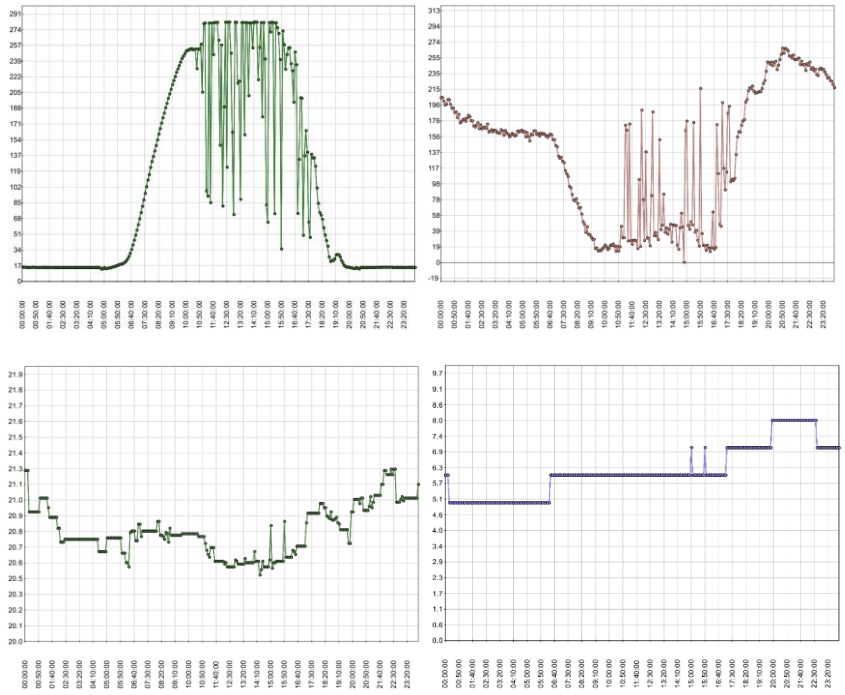
3 TESTIRANJE PROGRAMABILNE LOGIKE MPZU

ARN funkcija realizovana u programabilnoj logici MPZU je prvo testirana u laboratorijskim uslovima koristeći uređaj za sekundarno testiranje. Prvo je urađeno testiranje dela algoritma za regulaciju napona bez kompenzacije (samo na osnovu merenog napona), kako sa povišenim, tako i sa sniženim naponom. Nakon toga je proverena Z-kompenzacija samo sa aktivnim izvodima na sabirnicama na kojima je i transformator sa testiranom ARN funkcijom (ožičene struje izvoda), a onda i sa uključenim spojnim poljem i dodatnim aktivnim izvodima na sabirnicama na kojima nije transformator sa testiranom ARN funkcijom (struje izvoda dolaze GOOSE mehanizmom u ARN uređaj). Na kraju su proverene i sve blokade – prekostrujna, podnaponska i nadnaponska blokada.

Nakon uspešnog laboratorijskog testiranja, programirani i laboratorijski testirani MPZU sa ARN funkcijom su ugrađeni u TS i izvršeno je testiranje na terenu gde su se izračunati parametri, kao što je npr. mrtva zona *bandwidth*, izmerili i fino korigovali pre finalnog puštanja uređaja u probni rad. U probnom radu je praćeno ponašanje ARN uređaja u različitim uslovima u sistemu i pokazalo se da algoritam u potpunosti radi u skladu sa prethodno definisanim i usaglašenim uslovima rada. Na slikama 5 i 6 su prikazana merenja sa SCADA-e struja aktivnog izvoda, struja transformatora, napon na sabirnicama i položaj regulacione sklopke za jedan sunčan i jedan oblačan dan. Možemo videti da je napon na sabirnicama bio u opsegu 20,3-21,3 kV kao i da je regulaciona sklopka imala 8-9 odrada u toku dana, odnosno, da je programirana ARN funkcija sa Z-kompenzacijom, koja uvažava i struju aktivnog izvoda, uspešno održavala napon u granicama.



Slika 5 – Struja aktivnog izvoda, struja transformatora, napon na sabirnicama i položaj regulacione sklopke za dan bez oblaka



Slika 6 – Struja aktivnog izvoda, struja transformatora, napon na sabirnicama i položaj regulacione sklopke za oblačan dan

4 ZAKLJUČAK

Konstantno napredovanje tehnologije MPZU omogućava napredno korišćenje programabilne logike istih. Prednost ovog pristupa je što se za realizaciju raznih upravljačkih funkcija, kao što je ARN funkcija opisana u radu, ne moraju koristiti fabrički predefinisane funkcije sa svojim ograničenjima i principima rada, već korisnik može osmisliti sopstveni algoritam. Za korišćenje programabilne logike u ovako napredne svrhe, poželjno je koristiti MPZU kod kojih je procesni interval izvršavanja programabilne logike poznat i nepromenljiv (deterministički određen). Što je brži proces kojim se želi upravljati ili koji se želi nadzirati, to je ovaj zahtev striktniji. Mana ovog pristupa (programabilna logika MPZU) je to što zahteva da osoba koja realizuje logiku ima dovoljno znanja i iskustva u programiranju konkretnog MPZU. Takođe, poželjno je da se nakon programiranja izvrši detaljno ispitivanje funkcije i na kraju izradi odgovarajuća tehnička dokumentacija, što svakako iziskuje dodatno vreme. Prednost je što se to uradi samo jednom i nakon toga korisnik ima gotovo rešenje koje može primenjivati u narednim elektroenergetskim objektima. Korišćenje programabilne logike za realizaciju ovakvih funkcija dodatno povećava fleksibilnost jer se logika može lako menjati kada se za tim ukaže potreba, kao i unapređivati u skladu sa novim zahtevima, uslovima i/ili funkcionalnostima (npr. uvažavanje paralelnog rada transformatora).

LITERATURA

[1] *Power System Operation and Control Solutions Using IEC 61850*, Brett Hampson (Schweitzer Engineering Laboratories, Inc), 22nd Conference of the Electric Power Supply Industry, Kuala Lumpur, Malaysia, September 17–22, 2018
[2] *Siprotec 5 Transformer Differential Protection 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87 Manual*, Siemens, June 2024
[3] *SEL-751 Feeder Protection Relay Instruction Manual*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, August 1, 2025