

Mr.sc. Kruno Trupinić
HEP – ODS d.o.o., Elektra Slavonski Brod
kruno.trupinic@hep.hr

VOĐENJE SREDNENAPONSKE DISTRIBUTIVNE MREŽE SA ASPEKTA POBOLJŠANJA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

SAŽETAK

U referatu je prikazan postupak vremenskog i prostornog optimiranja pogonskog napona u nižoj srednjenaponskoj mreži sa aspekta poboljšanja energetske učinkovitosti odnosno smanjenja gubitaka. Postupak se temelji na proračunu tokova snaga sa promjenjivim ulaznim podacima o opterećenju i pogonskom naponu. Cilj je određivanje minimuma složene funkcije ovisnosti gubitaka o opterećenju i naponu.

Ključne riječi: pogonski napon, opterećenje, proračun tokova snaga, energetska učinkovitost

MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK MANAGEMENT IN TERMS OF ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT

SUMMARY

The paper presents the method of temporal and spatial optimization of the operating voltage to a lower medium-voltage network in terms of energy efficiency improvement and losses reduction. The method is based on load flow calculation with variable input data on load and operating voltage. The objective is to determine the minimum values of complex functions dependence losses on the load and operating voltage.

Key words: operating voltage, load, load flow calculations, energy efficiency

1. UVOD

Regulacija napona u srednjenaponskoj distributivnoj mreži od velikog je značaja iz dva aspekta. Prvi je vezan uz energetske učinkovitost distribucije električne energije duž mreže, kada se većim iznosom pogonskog napona smanjuje iznos struje kroz vodiče vodova i namote energetskih transformatora, ali se istodobno povećavaju stalni gubici u jezgrama energetskih transformatora i izolaciji srednjenaponskih kabela. Drugi aspekt vezan je uz prostornu i vremensku regulaciju napona u svrhu zadovoljenja uvjeta na minimalno i maksimalno dozvoljene iznose napona u mreži i kod korisnika mreže, kako u srednjenaponskoj, tako i u niskonaponskoj mreži. Promatra se fiksna regulacija napona

regulacionim preklopkama na energetskim transformatorima SN/SN i SN/NN, te automatska regulacija napona na energetskim transformatorima VN/SN.

1.1. Područje proračuna i analize

U referatu se analiziraju rezultati proračuna tokova snaga u nižoj srednjenaponskoj mreži 10(20) kV, ovisno o promjenama opterećenja mreže i iznosa napona u mreži. Područje proračuna tako je kompletna niža srednjenaponska mreža sa svim galvanski povezanim elementima od sekundarnog namota energetskih transformatora SN/SN (35/10(20) kV) ili VN/SN (110/10(20) kV) preko 10(20) kV vodova do jezgri i primarnih namota energetskih transformatora SN/NN (10(20)/0,4(0,42) kV). Gubici u jezgri i primarnom namotu energetskih transformatora SN/SN (35/10(20) kV) ili VN/SN (110/10(20) kV) kao i gubici u sekundarnom namotu energetskih transformatora SN/NN (10(20)/0,4(0,42) kV) nisu predmet proračuna jer se mijenjaju ovisno o podešenju regulacione preklopke na ovim transformatorima, pa njihov iznos ne ovisi isključivo o naponskim prilikama u promatranoj nižoj srednjenaponskoj mreži 10(20) kV.

Ovisnost gubitaka radne snage u vodičima vodova i namotima energetskih transformatora o opterećenju općenito se prikazuje izrazom (1):

$$P_{gl} = f(I^2) \approx f\left(\frac{1}{U^2}\right) \text{ [W]} \quad (1)$$

gdje su P_{gl} - gubici radne snage uzrokovani protjecanjem struje u promatranom elementu mreže (dionica voda između dva čvorišta, primarni ili sekundarni namot energetskog transformatora), I – struja kroz promatrani element, U – napon na početku promatranog elementa.

Ovisnost gubitaka neovisnih o opterećenju koji nastaju u jezgrama energetskih transformatora SN/NN i u izolaciji srednjenaponskih kabela [1] općenito se prikazuje izrazom (2):

$$P_{gU} = f(U^2) \text{ [W]} \quad (2)$$

gdje su P_{gU} - gubici radne snage uzrokovani narinutim pogonskim naponom u promatranom elementu mreže (dionica kabela između dva čvorišta, jezgra energetskog transformatora), U – napon na početku promatranog elementa.

Uspoređujući ova dva izraza, vidljivo je da će osnova optimalne regulacije napona sa aspekta povećanja energetske učinkovitosti tj. pogona sa minimalnim gubicima u srednjenaponskoj mreži biti kompromis između ova dva suprotstavljena zahtjeva, drugim riječima pronalaženje minimuma ukupnih gubitaka radne snage kao sume P_{gl} i P_{gU} za konkretnu mrežu, njenu topologiju i opterećenje.

Izuzetna važnost optimalne regulacije napona najbolje se vidi u sljedećim podacima. Povećanje gubitaka P_{gl} uzrokovano sniženjem pogonskog napona sa maksimalno dozvoljenog $1,1 U_n$ na minimalno dozvoljeni $0,9 U_n$ iznosi oko 50 %. Jednako tako, povećanje gubitaka P_{gU} uzrokovano povišenjem pogonskog napona sa minimalno dozvoljenog $0,9 U_n$ na maksimalno dozvoljeni $1,1 U_n$ iznosi također oko 50 %. Zbog toga za svaku konkretnu SN mrežu na jednom području fiksne regulacije napona treba odrediti međusobni odnos ovih dvaju gubitaka i shodno tome odabrati optimalan iznos pogonskog napona. U drugom koraku treba odrediti granice i način automatske regulacije napona prema opterećenju koja dodatno poboljšava postupak optimiranja vremenski promjenjivog pogonskog napona sa aspekta minimalizacije gubitaka u SN mreži.

Ovisnost gubitaka (pada) napona na promatranom elementu srednjenaponske mreže o opterećenju tog elementa općenito se prikazuje izrazom (3):

$$\Delta U = f(I) \approx f\left(\frac{1}{U}\right) \text{ [V]} \quad (3)$$

Gdje su ΔU – gubici (pad) napona u promatranom elementu mreže (dionica voda između dva čvorišta, primarni i sekundarni namot energetskog transformatora), I - struja kroz promatrani element, U – napon na početku promatranog elementa.

Povećani gubici napona u promatranoj nižoj srednjenaponskoj mreži mogu se kompenzirati fiksnom regulacijom napona na regulacijskim preklopkama energetskih transformatora na njenom početku i kraju. Drugi način je automatska regulacija napona ovisna o iznosu napona i opterećenju, koja

se u pravilu nalazi na početku sredjenaponske distributivne mreže. Dodatni pozitivni učinak ovakve regulacije napona je smanjenje gubitaka napona povišenjem pogonskog napona sa porastom opterećenja.

2. PRORAČUN I ANALIZA KARAKTERISTIČNIH SN MREŽA

U ovom poglavlju obradit će se tri karakteristične SN mreže, dvije za 10 kV mrežu i jedna zajednička za 20 kV mrežu. Prvi primjer 10 kV mreže je kabelska mreža u urbanim područjima, dok je drugi primjer nadzemna mreža u prigradskim i ruralnim područjima. 20 kV mreža je predstavljena jednim zajedničkim primjerom zbog značajno manjeg udjela P_{gl} u odnosu na P_{gU} te je i razlika između uvjeta u kabelskoj i nadzemnoj mreži značajno smanjena.

U nastavku su navedene osnovne karakteristike ulaznih podataka za proračun 10(20) kV mreže. Tako za podatke o opterećenju elemenata mreže koristimo vrijednosti iz krivulja opterećenja, od cjelokupne mreže HEP-ODS-a do mjernih podataka iz SDV-a pojedinih TS-a VN/SN odnosno SN/SN.

- minimalno opterećenje mreže je 40% maksimalnog,
- prosječno minimalno opterećenje energetskih transformatora SN/NN iznosi 15% njihove nazivne snage, dok maksimalno opterećenje iznosi 35% njihove nazivne snage.

Primjer krivulje trajanja opterećenja dan je na Slici 1. određen je iz istih izvora kao i omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja mreže. Prosječna opterećenja energetskih transformatora određena su iz omjera opterećenja mreže i sume nazivnih snaga transformatora. Ovdje je važno napomenuti da nisu uvršteni samo transformatori u vlasništvu HEP-ODS-a, nego i svi transformatori u vlasništvu kupaca jer i oni sudjeluju u raspodjeli ukupnog opterećenja. Pri tome valja imati na umu da transformatori u vlasništvu kupaca čija su obračunska mjerna mjesta na niskom naponu sudjeluju u generiranju gubitaka u mreži HEP-ODS-a, neovisno o načinu obračuna ovih kupaca (SN ili NN).

Gubici u sekundarnim namotima energetskih transformatora VN(SN)/10(20) kV te primarnim namotima transformatora 10(20)/NN određeni su iz tvorničkih ispitnih listova proizvođača transformatora, preko podataka o izmjerenim ukupnim gubicima u namotima transformatora i izmjerenim otporima promatranih namota. Za primjer, udio gubitaka u primarnim namotima transformatora 10(20)/NN u odnosu na ukupne gubitke u oba namota kreće se od 0,5 do 0,7, ovisno o snazi, izvedbi, grupi spoja i sl. Ovdje je važno napomenuti da je, obzirom na prosječnu razinu opterećenja transformatora, tvorničke podatke o gubicima u namotima pri temperaturi 75°C koja odgovara nazivnom opterećenju transformatora potrebno reducirati na manje iznose temperature koje odgovaraju prosječnom opterećenju, dakle na manje iznose otpora namota.

Stalni gubici u jezgrama transformatora 10(20)/NN kvadratno ovise o iznosu pogonskog napona u promatranom području regulacije napona od 0,9 U_n do 1,1 U_n . Osim toga, iznos ovih gubitaka ovisi o nazivnoj snazi, godini proizvodnje, tipu i proizvođaču. Tako je u 10 kV mreži još uvijek instaliran značajan broj starijih transformatora sa većim iznosima ovih gubitaka. U 20 kV mreži situacija je povoljnija, jer ovdje najstariji transformatori datiraju iz početka osamdesetih godina prošlog stoljeća kada je započela ugradnja preklopivih 10(20)/0,4 kV transformatora.

Dielektrični gubici u izolaciji sredjenaponskih kabela su stalni gubici kvadratno ovisni o naponu, a značajno ovise o izvedbi izolacije. Najveći su u 10 kV kabelima sa PVC izolacijom, manjeg iznosa u uljnim kabelima, a najmanji u novijim kabelima 10 i 20 kV sa izolacijom od umreženog polietilena.

2.1 10 kV kabelska mreža u urbanim područjima

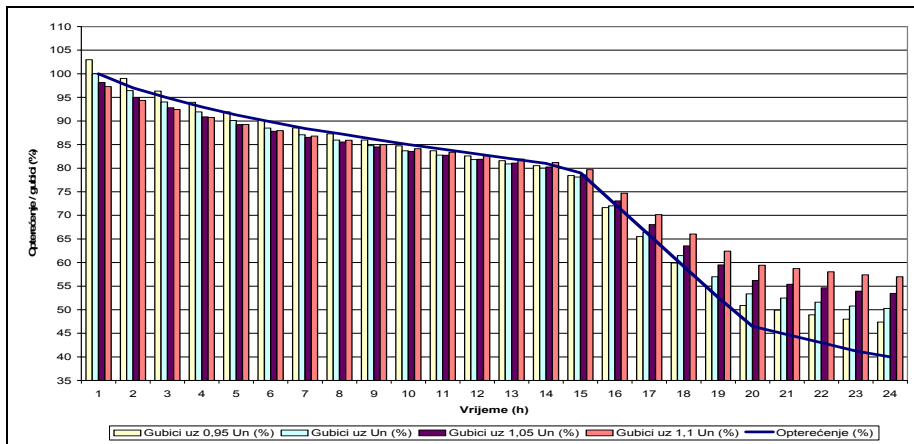
Osnovna karakteristika ovakve mreže je manji udjel gubitaka P_{gl} u odnosu na P_{gU} zbog sljedećih razloga:

- veći presjek vodiča kabela u odnosu na nadzemne vodove ($P_{gl} \downarrow$),
- značajno manje duljine dionica mreže zbog veće gustoće TS-a 10/0,4 kV ($P_{gl} \downarrow$),
- transformatori većih nazivnih snaga sa većim gubicima u jezgrama ($P_{gU} \uparrow$),
- dielektrični gubici u izolaciji kabela ($P_{gU} \uparrow$).

Nakon provedenog proračuna tokova snaga na ovakvom modelu mreže, uz promjenjive ulazne veličine opterećenja i pogonskog napona na početku mreže, rezultati se mogu prikazati na nekoliko sljedećih dijagrama.

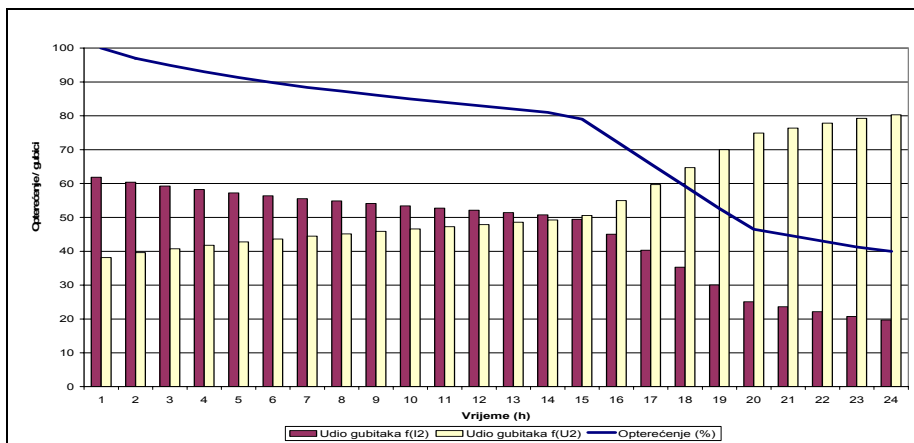
Tako je na Slici 1. prikazana dnevna ovisnost gubitaka gubitaka o opterećenju i pogonskom naponu u kabelskoj mreži. Prema zadanoj krivulji trajanja opterećenja prikazani su satni iznosi gubitaka za četiri karakteristična pogonska napona (0,95; 1; 1,05 i 1,1 U_n). Vrijednosti opterećenja su svedene na

maksimalno dnevno opterećenje (100%), a vrijednosti gubitaka za sva četiri slučaja na gubitke u maksimumu opterećenja pri U_n . Kod većih iznosa opterećenja optimalniji je veći pogonski napon i suprotno, kod manjih opterećenja optimalniji je viši pogonski napon.

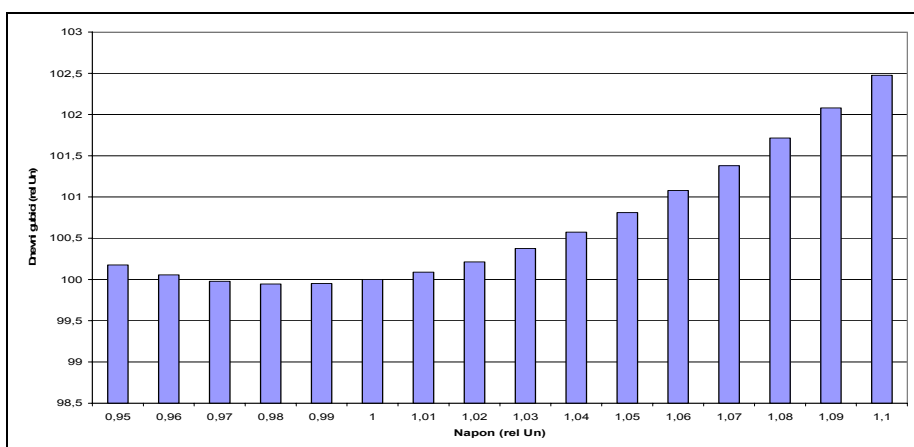


Slika 1. Ovisnost gubitaka o opterećenju i pogonskom naponu u kabelskoj mreži

Na Slici 2. prikazana je međusobna raspodjela gubitaka na P_{gl} i P_{gU} ovisno o promjeni opterećenja (ukupni gubici 100%), uz zadani pogonski napon U_n . Tako u satima s većim opterećenjem prevladavaju gubici u vodičima i namotima ovisni o opterećenju, dok u satima s manjim opterećenjem značajno prevladavaju stalni gubici u jezgrama i izolaciji.



Slika 2. Udjeli gubitaka P_{gl} i P_{gU} ovisno o opterećenju kod U_n u kabelskoj mreži



Slika 3. Ovisnost dnevnih gubitaka o pogonskom naponu u kabelskoj mreži

Zaključno, na Slici 3. prikazana je ovisnost iznosa dnevnih gubitaka o fiksnom dnevnom pogonskom naponu mreže, koji je obrađen za interval 0,95 do 1,1 U_n . Referentni su gubici pri U_n (100%).

Zbog značajnijeg udjela P_{gU} zaključuje se da je optimalnije vođenje ovakve mreže sa nižim iznosom pogonskog napona. Stoga se na ovakav način izabire referentni (najoptimalniji) napon za idući korak optimiranja uvođenjem promjenjivog pogonskog napona ovisnog o opterećenju.

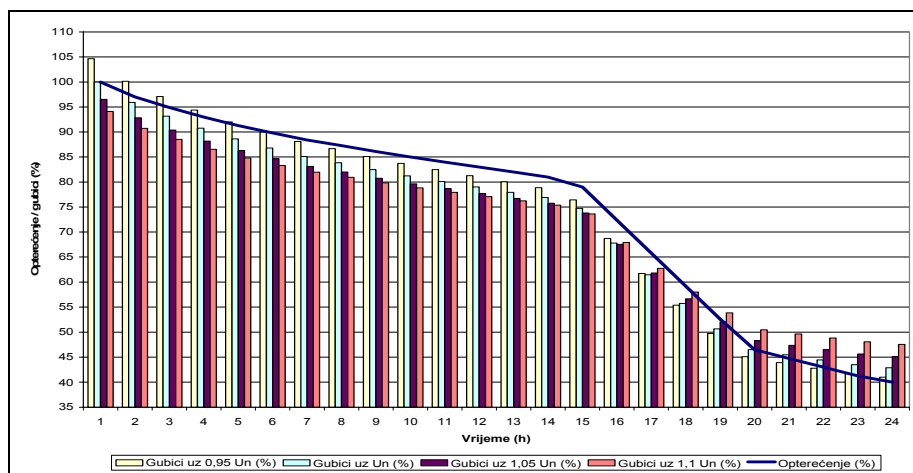
2.2 10 kV nadzemna mreža u prigradskim i ruralnim područjima

Za razliku od prethodno obrađene kableske urbane mreže, karakteristika ovakvih mreža je veći udjel gubitaka P_{gl} u odnosu na P_{gU} zbog sljedećih razloga:

- manji presjek vodiča nadzemnih vodova ($P_{gl} \uparrow$),
- značajno veće duljine dionica mreže zbog velikih prostornih udaljenosti TS-a 10/0,4 kV ($P_{gl} \uparrow$),
- prevladavajući su transformatori manjih nazivnih snaga sa manjim gubicima u jezgrama ($P_{gU} \downarrow$),
- zanemarivi su dielektrični gubici u izolaciji kabela zbog njihovog malog udjela ($P_{gU} \downarrow$).

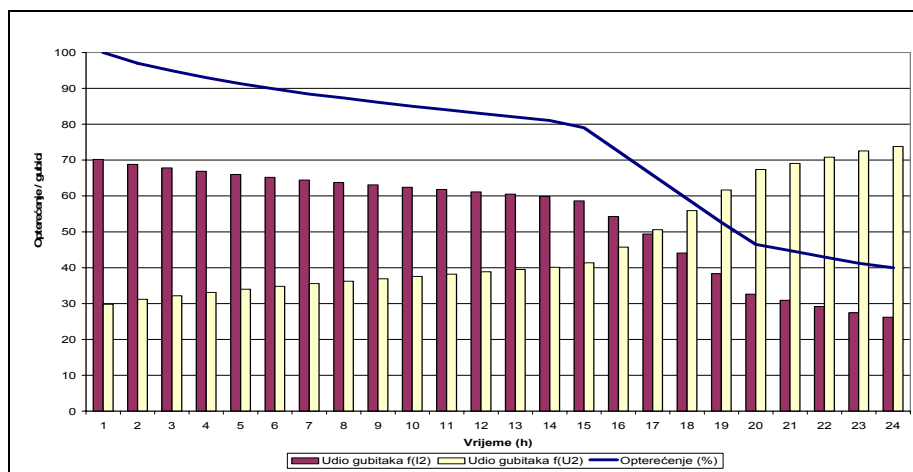
Postupak proračuna i analize isti je kao i u prethodnom slučaju, te su u nastavku rezultati prikazani sličnim dijagramima na slikama 4. do 6.

Tako je na Slici 4. prikazana dnevna ovisnost gubitaka o opterećenju i pogonskom naponu u nadzemnoj mreži. Kod većih iznosa opterećenja optimalniji je veći pogonski napon i suprotno, kod manjih opterećenja optimalniji je viši pogonski napon. Za razliku od kableske mreže, izraženiji je utjecaj povišenja pogonskog napona tijekom razdoblja većeg opterećenja na smanjenje gubitaka u mreži. Također i snižavanje napona u razdoblju manjeg opterećenja ima manji utjecaj na smanjenje gubitaka.



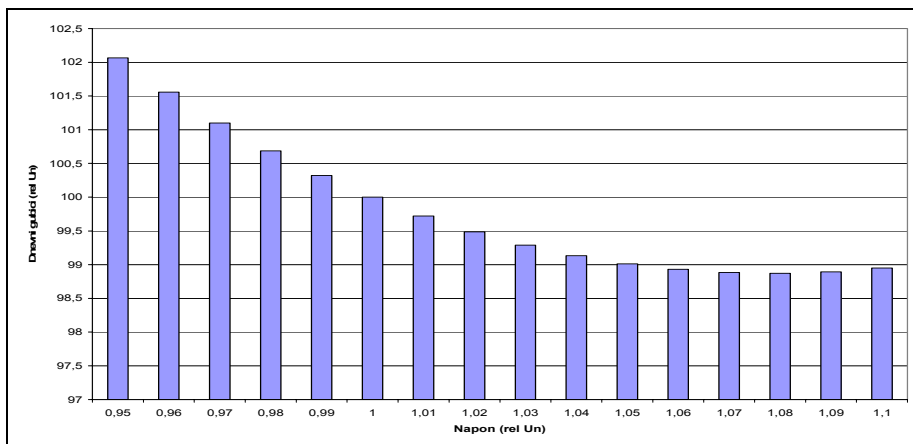
Slika 4. Ovisnost gubitaka o opterećenju i pogonskom naponu u nadzemnoj mreži

Na Slici 5. prikazana je međusobna raspodjela gubitaka na P_{gl} i P_{gU} ovisno o promjeni opterećenja (ukupni gubici 100%), uz zadani pogonski napon U_n . Izraženiji je utjecaj P_{gl} pri većem opterećenju, a manji je utjecaj P_{gU} pri manjem opterećenju.



Slika 5. Udjeli gubitaka P_{gl} i P_{gU} ovisno o opterećenju kod U_n u nadzemnoj mreži

Shodno tome, prema dijagramu na Slici 6. kojim je prikazana ovisnost iznosa dnevnih gubitaka o fiksnom dnevnom pogonskom naponu mreže zaključuje se da je optimalnije vođenje ovakve mreže sa višim iznosom pogonskog napona.



Slika 6. Ovisnost dnevnih gubitaka o pogonskom naponu u nadzemnoj mreži

2.3 20 kV mreža

Pri prelasku sa 10 na 20 kV pogonski napon dolazi do sljedećih promjena na iznose gubitaka P_{gl} i P_{gU} :

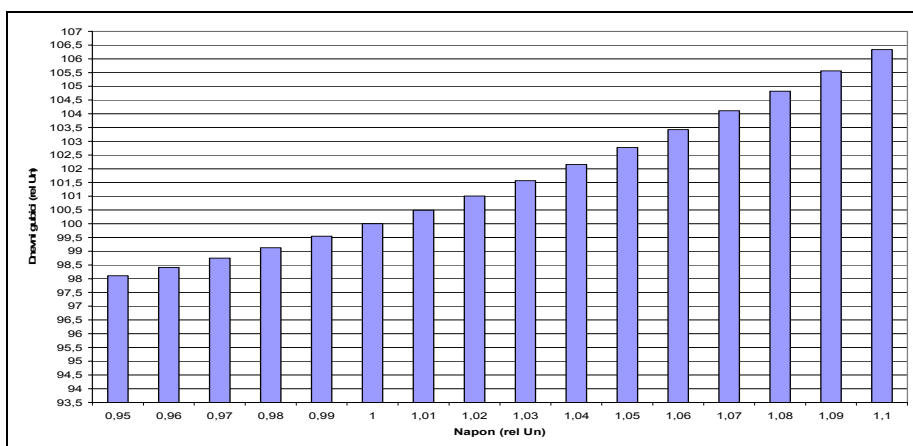
- četverostruko se smanjuju gubici u vodičima vodova zbog dvostrukog smanjenja struje ($P_{gl} \downarrow$),
- četverostruko se povećavaju dielektrični gubici u izolaciji kabela zbog dvostrukog povećanja napona ($P_{gU} \uparrow$).

Utjecaj smanjenja gubitaka u vodičima višestruko nadmašuje utjecaj povećanja dielektričnih gubitaka. Dodatni razlog leži i u činjenici da se zbog prelaska na 20 kV iz pogona izbacuju stari 10 kV kabele sa PVC i uljnom izolacijom koji su u 10 kV mreži bili glavni izvor ovih gubitaka.

Kod energetskih transformatora 10(20)/0,4(0,42) kV pri prelasku na 20 kV napon ne mijenjaju se iznosi gubitaka u jezgri i u namotima. Smanjenje gubitaka u transformatorima leži u činjenici da se stare jedinice nazivnog napona 10 kV moraju zamijeniti novim jedinicama, koje prvenstveno imaju manje gubitke u jezgri.

Temeljem svega navedenog, zaključuje se da će optimalan iznos pogonskog napona u 20 kV mreži svih vrsta biti manji od nazivnog napona.

Tako je na Slici 7. prikazana ovisnost iznosa dnevnih gubitaka o fiksnom dnevnom pogonskom naponu mreže, i to za teže uvjete odnosno nadzemnu ruralnu mrežu.



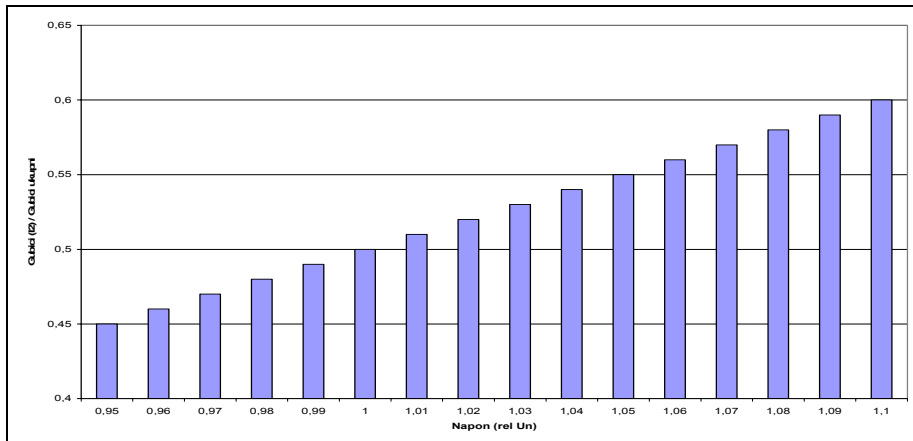
Slika 7. Ovisnost dnevnih gubitaka o pogonskom naponu u 20 kV mreži

Zaključuje se da je za sve vrste 20 kV mreža optimalnije vođenje mreže sa nižim iznosom pogonskog napona.

2.4. Općenito određivanje optimalnog napona u 10(20) kV mreži

Dijagramom na Slici 8. prikazan je sumarni rezultat proračuna za sve vrste nižih sredjenaponskih mreža, kada se njihov karakter određuje putem udjela gubitaka ovisnih o opterećenju P_{gl} u ukupnim gubicima ($P_{gl} + P_{gU}$), proračunatih pri nazivnom naponu mreže U_n . Tako nadzemne ruralne 10 kV mreže sa većim udjelom gubitaka P_{gl} zahtijevaju i veće iznose pogonskog napona za optimalni pogon, dok je suprotna situacija za 10 kV kableske mreže i 20 kV mreže. U slučaju miješanih mreža na jednom području fiksne regulacije, proračunom se odredi udjel gubitaka P_{gl} te se dijagramom sa Slike 8. odredi optimalan fiksni iznos napona.

U konačnici, ovo određivanje fiksnog optimalnog iznosa pogonskog napona kao referentnog u smislu minimaliziranja gubitaka prvi je korak u daljnjem postupku optimalizacije pogonskog napona prema opterećenju mreže u idućem poglavlju.

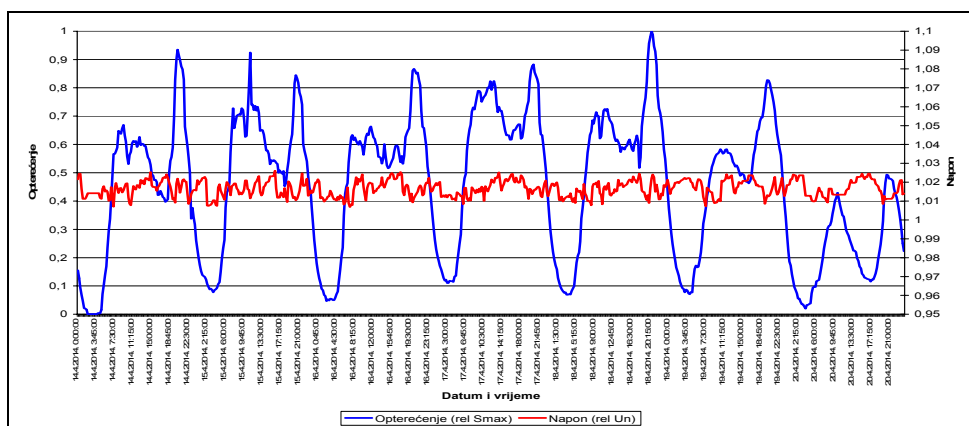


Slika 8. Određivanje optimalnog pogonskog napona temeljem omjera gubitaka

3. OPTIMIRANJE POGONSKOG NAPONA PREMA VRSTI I OPTEREĆENJU MREŽE

U ovom poglavlju proanalizirat će se rezultati proračuna tokova snaga sa promjenjivim iznosom pogonskog napona prema opterećenju mreže. Automatska regulacija napona u pravilu je smještena u energetske transformatorima VN/SN odnosno na početku distribucijske mreže. Ova regulacija pokriva više područja fiksne regulacije napona u energetske transformatorima SN/10(20) kV, gdje su prema prethodnom poglavlju određeni optimalni (referentni) iznosi pogonskog napona [2].

Dijagramom na Slici 9. prikazana je automatska regulacija napona neovisna o opterećenju za vremensko razdoblje od tjedan dana, u jednoj TS 110/35 kV. Opterećenje mreže prikazano je relativno na interval zabilježenog minimalnog i maksimalnog opterećenja u promatranom razdoblju [$S_{min} - S_{max}$], tako maksimalno zabilježenom tjednom opterećenju pripada iznos 1, a minimalnom iznos 0. Na istom dijagramu prikazana je i krivulja relativne vrijednosti reguliranog pogonskog napona u odnosu na nazivni napon (35 kV), u intervalu $[0,95 U_n - 1,1 U_n]$. Vidljivo je da se napon tijekom promatranog razdoblja održava u rasponu 1,01 do 1,025 U_n .

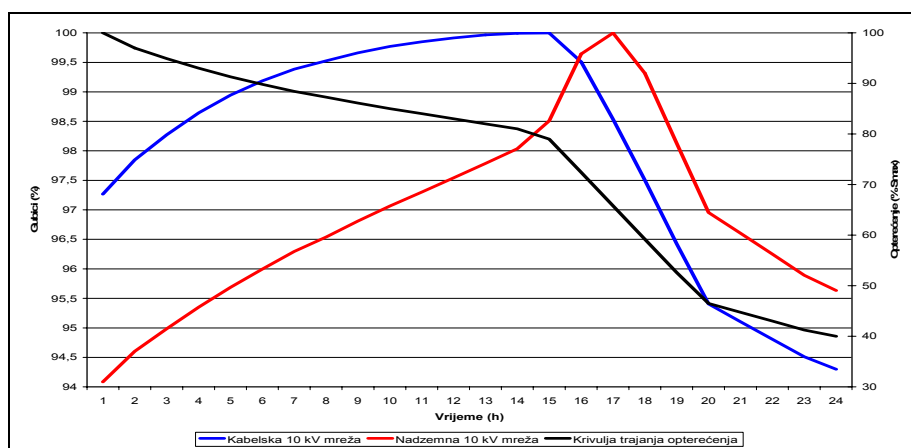


Slika 9. Primjer automatske regulacije napona neovisne o opterećenju

Primjenom automatske regulacije napona prema opterećenju u idealnom slučaju bi se krivulja napona preklopila sa krivuljom opterećenja na ovom dijagramu. Efekt ovakve regulacije napona na smanjenje gubitaka u 10 kV mreži prikazan je dijagramom na Slici 10. i to za prethodno opisane dvije karakteristične mreže, kabelsku u urbanom području i nadzemnu u prigradskom i ruralnom području. Prema krivulji trajanja opterećenja određeno je relativno smanjenje gubitaka u odnosu na fiksno reguliran napon. Povišenjem pogonskog napona u razdobljima većeg opterećenja, te snižavanjem pogonskog napona u razdobljima manjeg opterećenja postižu se značajni efekti. Povišenje pogonskog napona pri većim opterećenjima ima značajniji utjecaj kod 10 kV nadzemnih mreža zbog većeg utjecaja gubitaka ovisnih o opterećenju P_{gl} , dok sniženje pogonskog napona pri manjim opterećenjima ima veći utjecaj kod 10 kV kabelskih mreža zbog većeg utjecaja stalnih gubitaka P_{gU} . Gledajući apsolutne iznose smanjenja gubitaka, veću težinu ima smanjenje gubitaka u razdobljima većeg opterećenja mreže.

Zbog većeg iznosa pada napona u mreži tijekom razdoblja većeg opterećenja, povišenje pogonskog napona daje i sljedeće dodatne efekte na optimiranje gubitaka P_{gl} i P_{gU} :

- Početne dionice mreže su zbog radijalnog pogona više opterećene i generiraju veće gubitke, pa je pozitivan efekt povišenja pogonskog napona. Udaljene dionice su zbog pada napona na nižem pogonskom naponu, ali njima teku i značajno manje struje.
- Bliži energetski transformatori bilježe povećanje gubitaka u jezgrama zbog povišenja napona. Međutim, zbog izraženijeg pada napona duž mreže, udaljeniji transformatori su na nižem pogonskom naponu i ovaj negativni efekt nije toliko izražen.



Slika 10. Mogućnosti smanjenja gubitaka u SN mreži automatskom regulacijom napona prema opterećenju

4. POZITIVNI EFEKTI NA REGULACIJU NAPONA U SN I NN MREŽI

Automatska regulacija napona ovisna o opterećenju, osim smanjenja gubitaka daje pozitivne efekte i na mogućnosti regulacije napona, kako u promatranoj SN mreži, tako i u pripadajućim NN mrežama. Tako su u Tablicama I. i II. prikazane mogućnosti ove regulacije u odnosu na automatsku regulaciju napona neovisnu o opterećenju.

Tablica I. Regulacija napona u SN i NN mreži (transformator 10/0,4 kV)

Regulacija napona	Uvjeti	Opterećenje	110/35 kV		35 kV vod		Transformator 35/10 kV			Transformator 10/0,4 kV			
			U	ΔU	U	Preklopka	35/10 kV		10 kV vod	10 kV		10/0,4 kV	
							ΔU	U		ΔU	U	ΔU	U
Automatska regulacija neovisna o opterećenju	Najteži uvjeti	Max	1,020	0,018	1,002	5	0,012	1,040	0,125	0,915	5	0,008	0,957
		Min	1,020	0,007	1,013		0,005	1,058	0,050	1,008		0,004	1,054
	Najlakši uvjeti	Max	1,020	0,005	1,015	4	0,012	1,028	0,011	1,017	5	0,008	1,059
		Min	1,020	0,002	1,018		0,005	1,038	0,004	1,034		0,004	1,080
Automatska regulacija ovisna o opterećenju	Najteži uvjeti	Max	1,100	0,017	1,083	4	0,012	1,096	0,119	0,978	5	0,008	1,020
		Min	0,950	0,007	0,943		0,005	0,963	0,047	0,916		0,004	0,962
	Najlakši uvjeti	Max	1,100	0,005	1,095	3	0,012	1,083	0,010	1,073	4	0,008	1,090
		Min	0,950	0,002	0,948		0,005	0,943	0,004	0,939		0,004	0,960

Razdvojeni su slučajevi najtežih uvjeta (energetski najudaljeniji transformator 10/0,4(0,42) kV) i najlakših uvjeta (energetski najbliži transformator 10/0,4(0,42) kV). Promatraju se ekstremni slučajevi

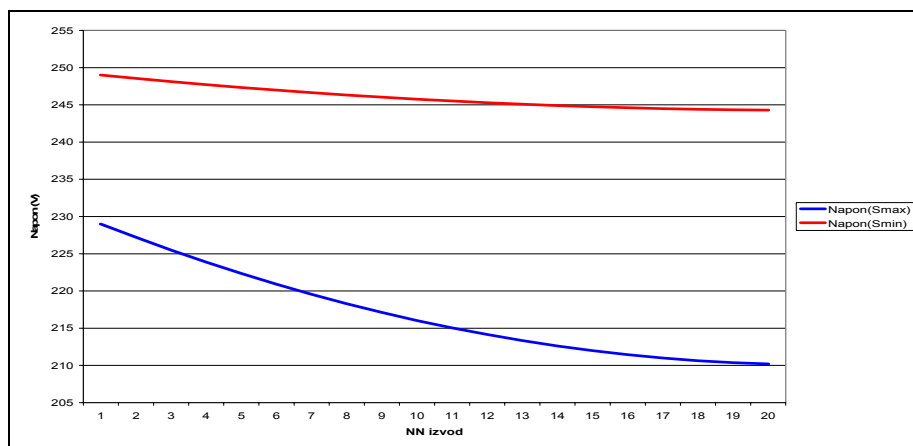
maksimalnog i minimalnog opterećenja, i prema njima određeni maksimalni i minimalni padovi napona na elementima mreža (35 i 10 kV vodovi, transformatori 35/10 i 10/0,4(0,42) kV). Izborom regulacionih preklopki na ovim transformatorima održava se napon u svim dijelovima mreže u granicama dozvoljenih iznosa. Svi su naponi (U) i padovi napona (ΔU) izraženi u per unit veličinama.

Tablica II. Regulacija napona u SN i NN mreži (transformator 10/0,42 kV)

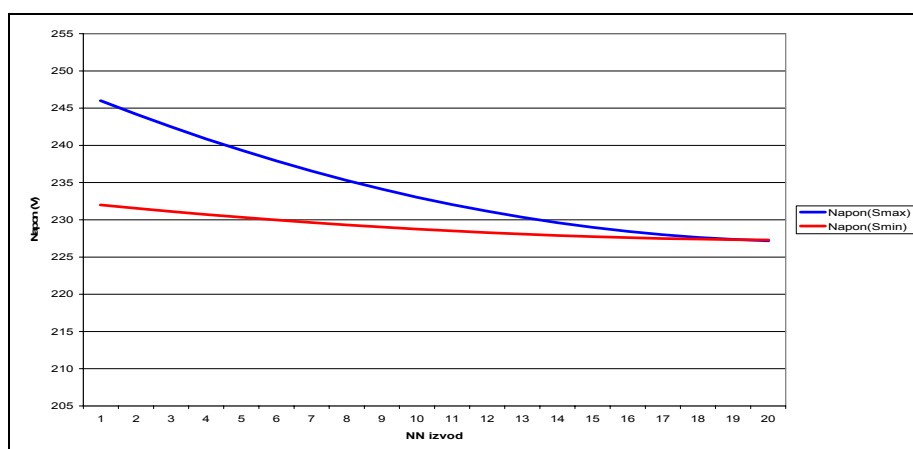
Regulacija napona	Uvjeti	Opterećenje	110/35 kV	35 kV vod	Transformator 35/10 kV				10 kV vod	Transformator 10/0,42 kV			
			U	ΔU	35 kV	Preklopka	35/10 kV	10 kV	ΔU	10 kV	Preklopka	10/0,42 kV	0,4 kV
					U		ΔU	U		ΔU		U	ΔU
Automatska regulacija neovisna o opterećenju	Najteži uvjeti	Max	1,020	0,018	1,002	5	0,012	1,040	0,125	0,915	4	0,008	0,979
		Min	1,020	0,007	1,013		0,005	1,058	0,050	1,008		0,004	1,080
	Najlakši uvjeti	Max	1,020	0,005	1,015	4	0,012	1,028	0,011	1,017	3	0,008	1,060
		Min	1,020	0,002	1,018		0,005	1,038	0,004	1,034		0,004	1,081
Automatska regulacija ovisna o opterećenju	Najteži uvjeti	Max	1,100	0,017	1,083	4	0,012	1,096	0,119	0,978	5	0,008	1,071
		Min	0,950	0,007	0,943		0,005	0,963	0,047	0,916		0,004	1,010
	Najlakši uvjeti	Max	1,100	0,005	1,095	3	0,012	1,083	0,010	1,073	2	0,008	1,092
		Min	0,950	0,002	0,948		0,005	0,943	0,004	0,939		0,004	0,956

Vidljivo je da se regulacijom napona ovisnom o opterećenju postiže značajno ravnomjernija dnevna raspodjela napona na početku NN mreže. Ova činjenica dodatno je prikazana dijagramima na Slikama 11. i 12. za slučaj TS 10/0,4 kV sa najtežim uvjetima.

Tako je na Slici 11. prikazan napon duž NN izvoda jednostavne radialne topologije sa dvadeset čvorišta i ravnomjernom raspodjelom opterećenja duž izvoda. Prikazana su dva ekstremna slučaja, maksimalno i minimalno opterećenje. Primijenjena je automatska regulacija napona u TS 110/35 kV neovisna o opterećenju.



Slika 11. Naponi u NN mreži sa regulacijom napona neovisnom o opterećenju



Slika 12. Naponi u NN mreži sa regulacijom napona ovisnom o opterećenju

Općenit je slučaj da se prema maksimalnom noćnom naponu tj. naponu u minimumu opterećenja podešava regulaciona preklopka transformatora 10/0,4(0,42) kV kako isti ne bi prešao maksimalno

dozvoljeni fazni iznos od 253 V. Usljed toga je napon pri maksimalnom opterećenju značajno manji, pa dodatni pad napona u NN izvodu opasno ruši iznos napona na kraju NN izvoda, često i ispod minimalno dozvoljene vrijednosti. Kupci pri kraju NN izvoda imaju najveće dnevne promjene napona (210 – 244 V).

Primjenom automatske regulacije napona ovisne o opterećenju u TS 110/35 kV situacija se značajno mijenja, prema dijagramu na Slici 12. Napon u minimumu opterećenja više nije ograničavajući faktor pri izboru položaja regulacione preklopke na transformatoru 10/0,4(0,42) kV jer regulacija snižava ovaj napon. S druge strane, pozitivni efekt povišenja napona pri većim opterećenjima ublažava povećani pad napona u NN izvodu. Stoga se i kupcima pri kraju NN izvoda poboljšavaju naponske prilike i smanjuje dnevna varijacija napona.

5. ZAKLJUČAK

Postupak optimizacije pogonskog napona u SN mreži s aspekta povećanja energetske učinkovitosti u suštini se svodi na traženje minimuma složene funkcije gubitaka $f(U^2; 1/U^2)$. Uz obrađenu nižu SN mrežu 10(20) kV, isti efekt se postiže i u višoj SN mreži 35(30) kV. Prema obrađenim primjerima zaključuje se da se smanjenje gubitaka u SN mreži temeljem ovog postupka može procijeniti na 2 do 6%, ovisno o udešenju postojeće regulacije, vrsti mreže i njenom opterećenju.

Dodatni pozitivni efekt ovog postupka je ravnomjernija vremenska i prostorna raspodjela napona duž SN i pripadne NN mreže, što je u skladu sa današnjim trendom naponske optimizacije (voltage optimisation) krajnjim korisnicima u svrhu učinkovitijeg korištenja električne energije.

Pri provedbi ovog postupka svakako treba voditi računa i uključiti u proračun efekt povećanja gubitaka zbog nelinearnog opterećenja, koje značajnije povećava gubitke ovisne o opterećenju, prvenstveno u namotima energetskih transformatora. Jednako tako, ne treba zanemariti povećanje udjela distribuirane proizvodnje koja smanjuje opterećenje u SN mreži.

5. LITERATURA

- [1] E. Mihalek, L. Wagmann, T. Baričević, T. Gelo, K. Trupinić, "Gubici električne energije u distribucijskim mrežama", 4. simpozij o elektrodistribucijskoj djelatnosti HRO CIGRE, Zbornik radova, Pula, Hrvatska, svibanj 2002., referat R2.
- [2] E. F. Piga, A. Geschiere, "Optimisation of the voltage regulation in the Dutch MV-grid" 18th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Torino, Italija, lipanj 2005.