

Martin Bolfek¹
HEP ODS Elektra Koprivnica
martin.bolfek@hep.hr

Zdravko Matišić
HEP ODS Elektra Koprivnica
zdravko.matic@hep.hr

Mirna Gržanić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
mirna.grzanic@fer.hr

Tomislav Capuder
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.capuder@fer.hr

OPTIMIZACIJA UKLOPNOG STANJA I NAPONSKIH PRILIKA U 35 KV MREŽI ELEKTR E KOPRIVNICA

SAŽETAK

Aktivno vođenje distribucijskih mreža pomoću naprednih tehnologija zahtjeva precizne optimizacijske modele. Kvaliteta tih optimizacijskih modela definira se kroz računsku traktabilnost, sposobnost pronalaženja globalnog optimuma te kao vrijeme izvođenja algoritma. U radu je definiran optimizacijski model distribucijske mreže temeljen na direktnim metodama cjelobrojnog mješovitog programiranja čime je osigurana traktabilnost. Inicijalni nelinearni i nekonveksni problem nadalje je kroz relaksacije pretvoren u konveksni problem optimalnih tokova snaga čime je osigurano brže izvođenje i globalni optimum rješenja. Na primjeru 35 kV mreže Elektr e Koprivnice analizirane su mogućnosti poboljšanja naponskih prilika i smanjenja gubitaka, promjenom topologije mreže te simultanim upravljanjem rada transformatora. Usporedbom rješenja različitih optimizacijskih metoda, njihove preciznosti i vremena izvođenja, jasno su definirane prednosti i primjenjivost pojedinih metoda.

Ključne riječi: Optimalni tokovi snaga, distribucijska mreža, miješano cjelobrojno programiranje, konveksna optimizacija

VOLTAGE AND SWITCHING OPTIMIZATION OF 35 KV NETWORK OF ELEKTRA KOPRIVNICA

SUMMARY

Precise optimization models are required for active management of distribution networks with the usage of advanced technology. The quality of aforementioned optimization models is defined through its computational tractability as well as the ability of finding global optimum and algorithms' overall execution time. This paper defines optimization model of distribution network based on direct methods of mixed integer programming which ensures tractability. Initial nonlinear and nonconvex problem is transformed into a convex optimal power flow one by the means of relaxation which ensures faster execution time and global optimality of the solution. The possibility of loss reduction as well as increase in voltage quality by changing the topology of the network combined with managing parallel operation of transformers is analyzed on real 35 kV network of Elektra Koprivnica.

Key words: Optimal power flow, distribution network, mixed integer programming, convex optimization

¹ Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

1. UVOD

Stalno povećanje udjela distribuiranih izvora energije u distribucijskoj mreži, istančanja osjetljivost kupaca na kvalitetu električne energije, a s druge strane mogućnosti koje pruža razvoj tehnologije, dovode do povećanja kompleksnosti u svakodnevnom vođenju distribucijske mreže. Postupnim uvođenjem elektroenergetskih objekata u sustav daljinskog vođenja i nadzora, kao i napretkom u tehnologiji izrade sklopne opreme, otvaraju se vrata primjeni naprednih tehnologija i u distribucijskoj mreži.

Distribucijska mreža dimenzionirana je na načelu „Fit and forget“. Smjer tokova snaga bio je jednosmjernan (od prijenosne mreže prema krajnjim potrošačima na distribucijskoj razini). Potrošači su imali karakterističnu predvidivu potrošnju i čitav sustav bio je dimenzioniran prema najvećem mogućem opterećenju u sustavu (distribucijska mreža dimenzionirana je na način da može podnijeti slučaj teoretski najvećeg mogućeg opterećenja). Danas se javlja sve veći broj sudionika priključenih na distribucijsku razinu koji zahtijevaju aktivno vođenje distribucijske mreže kako bi se izbjegli veliki troškovi pojačanja mreže. Operator distribucijskog sustava suočen je s novim načinom vođenja mreže kako bi osigurao optimalan pogon mreže unutar dozvoljenih tehničkih granica. Ovim radom nastoji se upoznati čitatelja sa relativno novim područjem u optimizaciji i načinom na koji se tradicionalne ideje mogu preformulirati i integrirati u novu klasu optimizacijskih problema. Na taj način bi operator distribucijskog sustava potencijalno mogao imati dobar odgovor na nadolazeću promjenu u paradigmati funkcioniranja distribucijskog sustava.

2. OPĆENITO O KONVEKSNOJ OPTIMIZACIJI

Optimizacijski problem optimalnog uklopnog stanja općenito je teško razriješiti. Donedavno se ovaj problem rješavao isključivo uz prilično grube aproksimacije modela kao što su linearizirani tokovi snaga, primjenom heurističkih metoda ili se pak primjenjuju nelinearni algoritmi u slučajevima kada prethodno spomenuta aproksimacija nije dovoljno točna. Nelinearni algoritmi pronalaze lokalni minimum, u mnogim slučajevima brzo i uspješno, no u tom slučaju algoritam, čak i u slučaju da konvergira, ne pruža nikakvu informaciju o globalnom optimumu. Nelinearni se algoritmi primjenjuju u slučajevima kada nije potrebno nužno pronaći najbolje moguće rješenje, već kada je i bolje rješenje dovoljno dobro rješenje.

Ipak, konačan bi cilj optimizacije trebao biti pronaći globalni minimum funkcije cilja. Nužan i dovoljan uvjet da optimalno rješenje neke funkcije (lokalni minimum) bude globalni minimum jest da je problem koji se pokušava riješiti konveksan. Ukoliko je model nekonveksan, rješenje može biti lokalni minimum i javlja se odstupanje od optimalnog globalnog rješenja (optimality gap). Zbog navedenih razloga svaki se problem nastoji prikazati u konveksnom obliku (konveksna funkcija cilja i ograničenja) kako bi se garantiralo globalno optimalno rješenje. Konveksni problemi mogu biti riješeni različitim metodama. Metoda unutarnje točke (Interior Point Method) ili metoda barijere (Barrier method) su često korištene metode jer sve funkcije (linarne, kvadratne, stožaste) prikazuju kao konveksna nelinearna ograničenja.

Mješovito cjelobrojno linearno programiranje (MILP) temeljeno na Kirchhoffovim zakonima i lineariziranim padovima napona jedan je od načina proračuna tokova snaga u distribucijskoj mreži.

Za dobivanje točnijih rješenja u proračunu tokova snaga u distribucijskoj mreži koristi se stožasto programiranje (Second-Order Cone Programming-SOCP) koja se kasnije počinje upotrebljavati i za račun optimalnih tokova snaga. Uz SOCP, javlja se i SDP (Semi-Definite Programming) formulacija te Distflow model čija je prednost mogućnost računanja povratnih tokova snaga. SDP formulacije konveksnih problema mogu efikasno biti riješene u polinomnom vremenu.

3. OPTIMIZACIJSKI MODEL

Strujno naponske prilike u mreži opisuju se nelinearnim jednadžbama tokova snaga. Znajući napon po iznosu i kutu u jednom čvorištu (tzv. referentnom čvorištu) te djelatno i jalovo opterećenje u sustavu, iterativnim postupcima, kao što su Newton-Raphsonova ili Gauss-Seidel metodom, mogu se izračunati preostali naponi čvorišta te struje kroz vodove. Uz iterativne metode, postoje i optimizacijski modeli za proračun tokova snaga. Nelinearni su u svojim ograničenjima te su za njihova rješenja razvijene posebne optimizacijske metode koje garantiraju globalno optimalno rješenje.

Kako bi se ukazalo na prednosti primjene konveksne relaksacije implementirane su dvije različite formulacije problema optimalnog uklopnog stanja. Obje se u osnovi baziraju na formulaciji problema

optimalnih tokova snaga. Modelirajući uklopno stanje mreže pomoću binarnih varijabli nadograđuje se postojeća i dobro poznata formulacija problema optimalnih tokova snaga [4]. U nastavku se daje detaljan matematički opis svake od formulacija koje su preuzete, uz određene nadogradnje, iz [5].

3.1. Nelinearni model

Razmotrimo mrežu $\mathcal{N} = (\mathcal{B}, \mathcal{L})$ gdje s \mathcal{B} označavamo skup svih sabirnica (čvorova), a \mathcal{L} označava skup svih vodova (linija) u mreži. Neka \mathcal{G} označava skup svih generatora u mreži - u ovom slučaju s \mathcal{G} označavamo tzv. „slack“ sabirnice, u našem slučaju su to 110 kV sabirnice i mjesta razmjene energije s Operatorom prijenosnog sustava, kao i stvarne generatore u mreži (distribuirani izvori energije).

Neka $G_{ij}^{ser} / B_{ij}^{ser}$ predstavlja serijsku, a $G_{ij}^{sh} / B_{ij}^{sh}$ paralelnu komponentu vodljivosti / susceptancije voda ili transformatora između čvorova i, j te neka e_i i f_i predstavljaju realnu odnosno imaginarnu komponentu vektora napona V_i . Neka je x_{ij} binarna varijabla koja poprima vrijednost 1 ukoliko je vod između čvorova i, j uključen, 0 ukoliko je vod isključen ili pak ako vod između spomenutih čvorova ne postoji. Nelinearan optimizacijski problem optimalnog uklopnog stanja je prema tome:

$$\min \sum (p_{ij} - p_{ji}) \quad (1a)$$

tako da je

$$p_{ij} = x_{ij} \{ -(G_{ij}^{ser} + G_{ij}^{sh})(e_i^2 + f_i^2) + G_{ij}^{ser}(e_i e_j + f_i f_j) - B_{ij}^{ser}(e_i f_j - e_j f_i) \} \quad (1b)$$

$$q_{ij} = x_{ij} \{ (B_{ij}^{ser+} + B_{ij}^{sh})(e_i^2 + f_i^2) - B_{ij}^{ser}(e_i e_j + f_i f_j) - G_{ij}^{ser}(e_i f_j - e_j f_i) \} \quad (1c)$$

$$q_i^g - q_i^d = \sum q_{ij} \quad i \in B \quad (1d)$$

$$p_i^g - p_i^d = \sum p_{ij} \quad i \in B \quad (1e)$$

$$q_i^{min} \leq q_i^g \leq q_i^{max} \quad i \in G \quad (1f)$$

$$p_i^{min} \leq p_i^g \leq p_i^{max} \quad i \in G \quad (1g)$$

$$\underline{V}_i^2 \leq e_i^2 + f_i^2 \leq \overline{V}_i^2 \quad i \in B \quad (1h)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Jednadžba (1a) funkcija je cilja i u ovom slučaju minimiziramo ukupne gubitke u mreži, kako u vodovima, tako i transformatorima. Jednadžbe (1b-1c) opisuju tokove snaga kroz vod/ transformator, dok jednadžbe (1d-1e) kažu kako ukupna proizvodnja i konzum energije moraju u svakom trenutku biti isti. Jednadžbe (1f-1g) predstavljaju ograničenja mogućnosti proizvodnje radnje i jalove snage na generatore dok jednadžba (1h) ograničava iznos napona po svakom čvoru. U našem slučaju fiksirali smo napon na 110 kV sabirnicama na 1 p.u. dok se svim ostalim čvorovima dozvoljava kretanje napona od 0.93 do 1.05 p.u.

3.2. Miješano cjelobrojno stožasti model

Zamjenom varijabli te relaksacijom jednog od uvjeta dobivamo optimizacijski problem koji spada u grupu programa stošca drugog reda („Second order cone program“- SOCP). Uvedimo sljedeće zamjene varijabli:

$$c_{ii} = e_i^2 + f_i^2, \quad c_{ij} = e_i e_j + f_i f_j, \quad s_{ij} = e_i f_j - e_j f_i \quad (2)$$

Uvođenjem ovih zamjeni naš optimizacijski problem definiran jednadžbama (1), uz istu funkciju cilja, sada poprima sljedeći oblik:

$$p_{ij} = x_{ij} \{ -(G_{ij}^{ser} + G_{ij}^{sh})c_{ii} + G_{ij}^{ser} c_{ij} - B_{ij}^{ser} s_{ij} \} \quad (2b)$$

$$q_{ij} = x_{ij} \{ (B_{ij}^{ser+} + B_{ij}^{sh})c_{ii} - B_{ij}^{ser} c_{ij} - G_{ij}^{ser} s_{ij} \} \quad (2c)$$

$$\underline{V}_i^2 \leq c_{ii} \leq \overline{V}_i^2 \quad (2d)$$

$$c_{ij} = c_{ji}, s_{ij} = -s_{ji} \quad (2e)$$

$$c_{ij}^2 + s_{ij}^2 = c_{ii}c_{jj} \quad (2f)$$

$$(1d) - (1g)$$

Nadalje, neka je: $c_{ii}^j = c_{ii} x_{ij}$ i neka su sa $\overline{(\cdot)}$ i $\underline{(\cdot)}$ označene gornja i donja granica određene varijable. Konveksna formulacija spomenutog nelinearnog problema može se zapisati na sljedeći način:

$$p_{ij} = -(G_{ij}^{ser} + G_{ij}^{sh})c_{ii}^j + G_{ij}^{ser}c_{ij} - B_{ij}^{ser}s_{ij} \quad (3b)$$

$$q_{ij} = (B_{ij}^{ser} + B_{ij}^{sh})c_{ii}^j - B_{ij}^{ser}c_{ij} - G_{ij}^{ser}s_{ij} \quad (3c)$$

$$\underline{c_{ij}}x_{ij} \leq c_{ij} \leq \overline{c_{ij}}x_{ij} \quad (3d)$$

$$\underline{s_{ij}}x_{ij} \leq s_{ij} \leq \overline{s_{ij}}x_{ij} \quad (3e)$$

$$\underline{c_{ii}}x_{ij} \leq c_{ii}^j \leq \overline{c_{ii}}x_{ij} \quad (3f)$$

$$c_{ii} - \overline{c_{ii}}(1 - x_{ij}) \leq c_{ii}^j \quad (3g)$$

$$c_{ii} - \underline{c_{ii}}(1 - x_{ij}) \geq c_{ii}^j \quad (3h)$$

$$c_{ij}^2 + s_{ij}^2 \leq c_{ii}^j c_{jj}^i \quad (3i)$$

$$(1d) - (1g), (2d) - (2e)$$

Funkcija cilja ista je kao i u prethodnim slučajevima. Primjećujemo kako je jedina jednadžba s nelinearnostima jednadžba (3i), gdje je u odnosu na jednadžbu (2f) znak jednakost zamijenjen znakom nejednakosti. U ovoj je jednadžbi sadržana konveksna relaksacija – zamjenom znaka jednakosti znakom nejednakosti unosimo aproksimaciju u model, a s ciljem pretvaranja nelinearnog ograničenja u tzv. ograničenje stošca drugog reda.

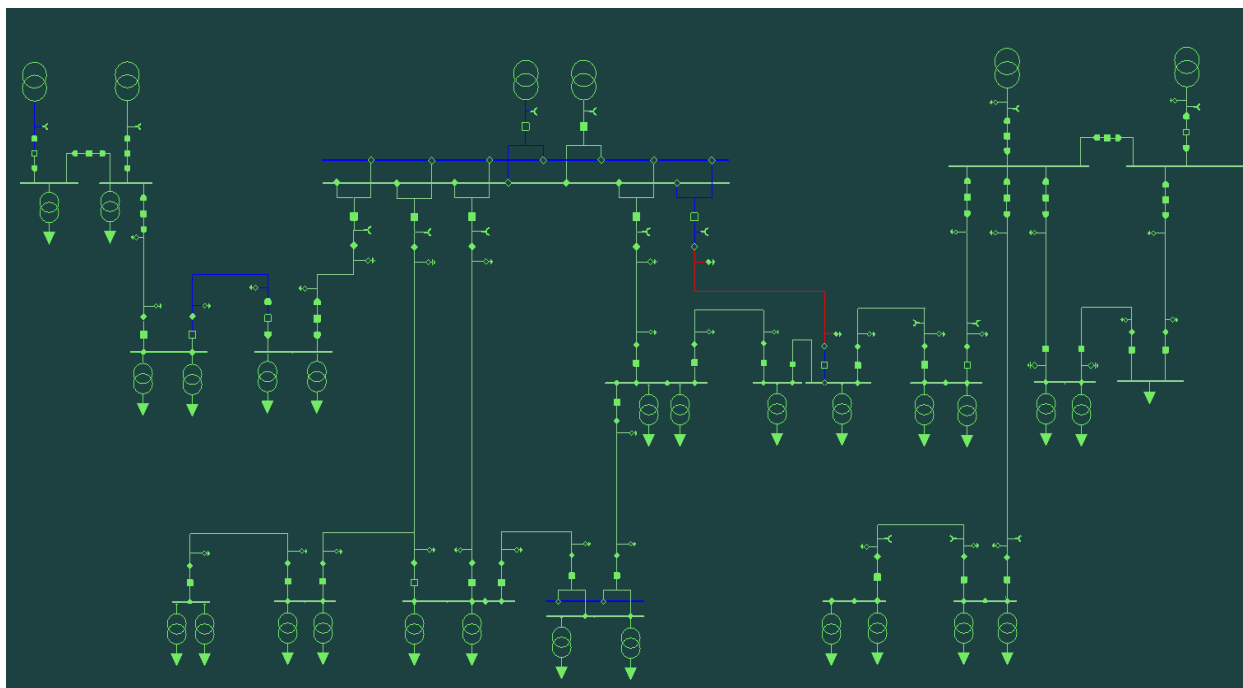
Jednadžbe (3g) – (3h) pak osiguravaju da varijabla c_{ii}^j poprimi vrijednost c_{ii} ukoliko je vod uključen dok jednadžbe (3d) – (3f) osiguravaju da jednadžbe (3b) – (3c) poprime odgovarajuće vrijednosti ovisno o uključenosti ili isključenosti pojedinog voda.

4. 35 KV MREŽA ELEKTRE KOPRIVNICA

S obzirom kako neke od metoda traženja optimuma znaju biti numerički iznimno osjetljive, analizu i testiranje algoritama poželjno je vršiti na stvarnim mrežama. U ovom radu je kao primjer odabrana 35 kV mreža Elektre Koprivnica čija je topološka struktura prikazana na slici 1. Jedan od razloga odabira 35 kV mreže leži i u stupnju uvedenosti objekata u sustav daljinskog vođenja (SDV). S obzirom da su svi ovdje analizirani objekti u daljinskom nadzoru, s tog aspekta nema zapreke za potencijalno korištenje odgovarajućih algoritama i u praksi. Jednako tako, uvedenost objekata u SDV značajno povećava osmotrivost mreže čime se umanjuje potreba za eventualni prelazak u domenu stohastičke optimizacije što bi svakako bio slučaj na nižoj naponskoj razini.

Sabirnice 110 kV, 35 kV i 10 kV prikazane su žutim kružićem i označene brojkama od 1 do 34. Plavim linijama označeni su 35 kV vodovi, dok crvene i zelene linije označavaju transformatore. Iz slike se može primijetiti kako većina transformatorskih stanica sadrži po dva transformatora (najčešće istih ili sličnih parametara) koji mogu raditi u paralelnom pogonu.

Mreža sadrži 3 TS 110/35 kV (čvorovi 1,9,25), 13 TS 35/10 te jedno 35 kV rasklopište (čvor 34). U čvoru 33, na 10 kV strani priključen je i generator bioplinke elektrane, nazivne snage 1600 kVA, koji trenutno ograničen na faktor snage 1 i radnu snagu od 1 MW. Kako bi se analizirala mogućnost regulacije napona i smanjenje gubitaka u mreži mijenjajući radnu točku generatora, prethodno spomenuto ograničenje je modificirano na način da se dopušta smanjenje radne i proizvodnja ili potrošnja jalove energije uz faktor snage od maksimalno ± 0.8 .



Slika 1. Prikaz 35 kV mreže Elektre Koprivnica iz SCADA-e

Analiza je vršena nad stvarnim podacima o opterećenju mreže za razdoblje od 16.1.2017. do 22.1.2017. god. što ukupno čini 168 15-minutnih vremenskih intervala. Podaci su preuzeti direktno iz SCADA sustava, ne mijenjajući pri tome strukturu same baze, ostavljajući na taj način mogućnost za izradu analize nad povijesnim podacima proizvoljnog vremenskog intervala.

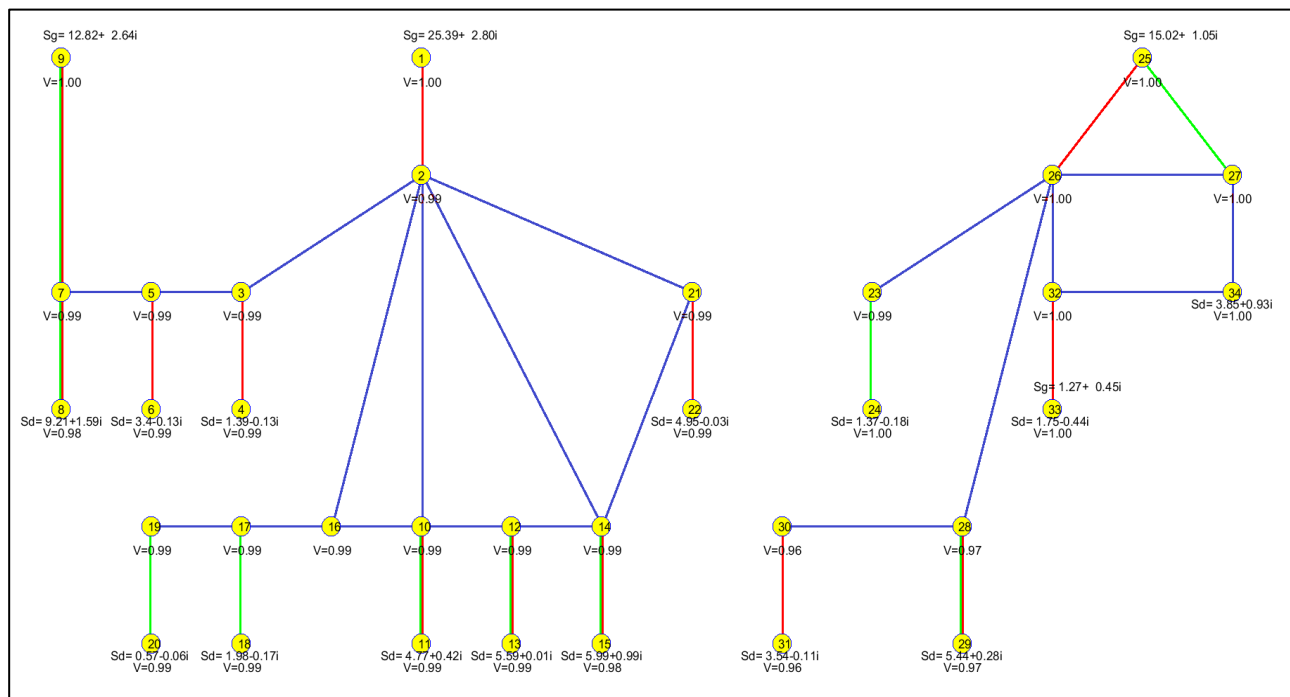
5. ANALIZA REZULTATA

5.1. Programska podrška i računalo

Implementirani algoritmi testirani su na standardnom PC računalu, s Ryzen 1600 procesorom s 8 GB RAM-a. Od programske podrške korišten je MATLAB s dodatkom zvanim YALMIP[8]. YALMIP služi kao sučelje za brzo i intuitivno pisanje optimizacijskih problema koje MATLAB nativno ne posjeduje. YALMIP služi i za jednostavno povezivanje s velikim brojem komercijalnih i nekomercijalnih „solver-a“ koji traže rješenje problema postavljenog u YALMIP-u.

Za potrebe lakšeg praćenja i verificiranja rezultata razvijen je i potprogram unutar MATLAB-a koji automatski iscrta novu topologiju mreže zajedno s podacima o trenutnim teretima po čvorištima, kao i snagama pojedinih generatora odnosno razmjena snage s Operatorom prijenosnog sustava i iznos napona u svakom čvoru mreže (p.u.). Primjer iscrtaivanja prikazan je slikom 2.

Ovdje treba napomenuti kako vremena izvođenja mogu jako varirati ovisno o postavkama svakog od „solvera“. Za potrebe ovog rada pokušalo se što je moguće manje mijenjati početne postavke „solvera“ kako bi se jasnije stekao uvid u traktabilnost samih modela, imajući pri tome na umu kako se vremena izvođenja mogu promjenom određenih postavki smanjiti i nekoliko desetaka puta. Takvo fino ugađanje određenog „solvera“, uzimajući u obzir i specifičnosti dijelova mreže, ipak nadilazi područje ovog rada.



Slika 2. Grafički prikaz rezultata proračuna u MATLAB-u

Za rješavanje nelinearnog optimalnog uklopnog stanja korišten je besplatan „solver“ BONMIN. BONMIN nativno ne podržava tehnologiju višestrukih dretvi („multithreading“) stoga je za maksimalnu iskoristivost svih jezgara procesora potrebno koristiti tzv. „parfor“ petlju nativno podržanu u MATLAB-u.

S obzirom da nema međusobne povezanosti dva vremenska intervala (barem u formulaciji koju koja je opisana ovim radom), uporabom „parfor“ petlje omogućeno je simultano rješavanje 12 (ovisno o procesoru) vremenskih intervala te se na taj način bitno skraćuje ukupno vrijeme potrebno za proračun svih 168 intervala.

Za rješavanje konveksnog (MISOCP) optimalnog uklopnog stanja korišten je CPLEX „solver“. CPLEX je komercijalan „solver“ besplatan za akademske svrhe koji, za razliku od BONMIN-a, nativno podržava „multithreading“. Relativno odstupanje od globalnog optimuma („optimality gap“) postavljeno je na 1%. Najviše dopušteno vrijeme izvođenja jedne iteracije (jednog 15 minutnog intervala) je 480 sekundi.

5.2. Usporedba performansi dviju formulacija

Tablica I. ukupne performanse svake od formulacija

Normalno uklopno stanje			Nelinearna formulacija			Miješano cjelobrojno stožasti model		
Ukupno vrijeme [s]	Ukupni gubici [MWh]	Ukupan broj manipulacija	Ukupno vrijeme [s]	Ukupni gubici [MWh]	Ukupan broj manipulacija	Ukupno vrijeme [s]	Ukupni gubici [MWh]	Ukupan broj manipulacija
50.71	25.08	-	2097.1	24.38	1136	2845	21.75	2105

Referentno stanje je normalno uklopno stanje trenutno na snazi u Elektri Koprivnica. Ovdje treba napomenuti kako je već otprije provedena statička analiza optimalnog uklopnog stanja promatrajući podatke na razini čitave godine te je optimalan rad transformatora već podešen, ali se ne mijenja.

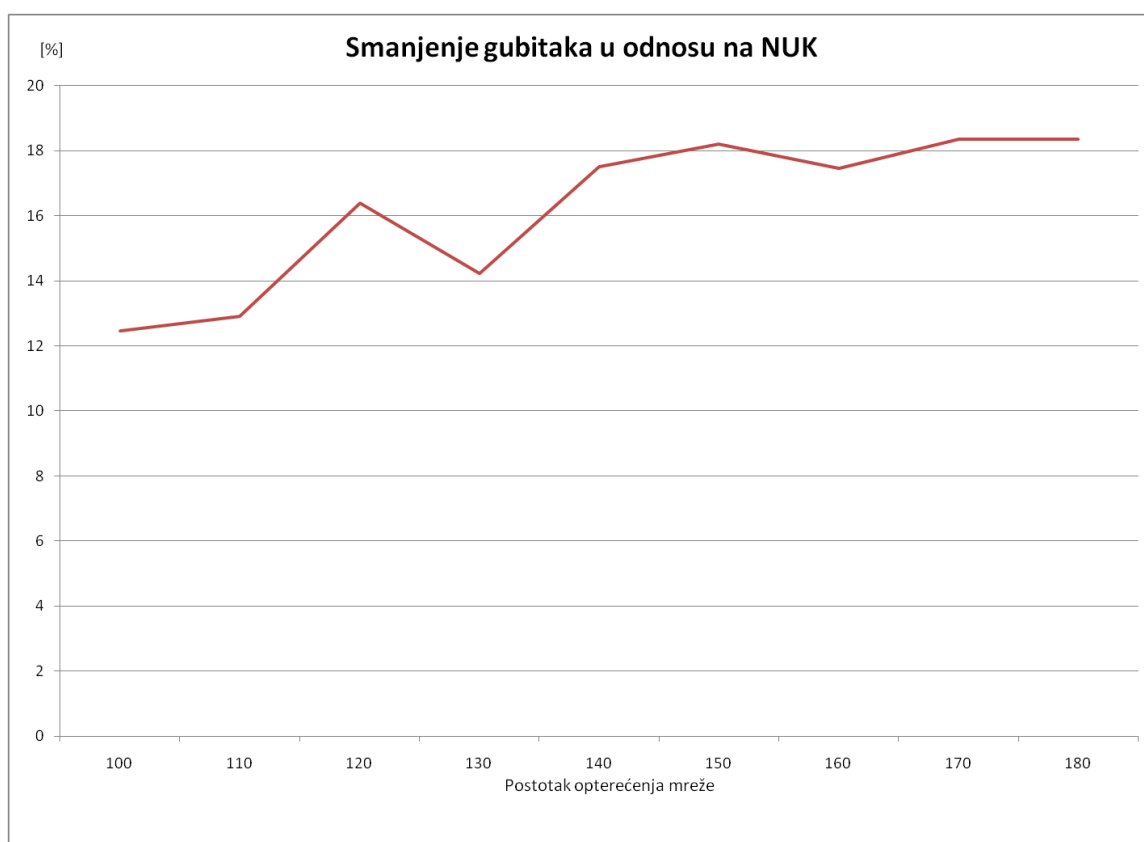
Ukupno vrijeme je vrijeme potrebno za proračun svih 168 vremenskih intervala. U referentnom je slučaju topologija fiksirana tako da je proračun izuzetno brz. Vidimo da se u slučaju nelinearne formulacije vrijeme značajno povećava i iznosi 2097 sekundi. „Solver“ korišten u nelinearnoj formulaciji je podešen na smanjenu točnost što, kao i korištenje „parfor“ petlje, uvelike doprinosi boljoj traktabilnosti. Pojedinačni rezultati su nešto lošiji u smislu da u određenim slučajevima gubici znaju biti i veći od onih u normalnom uklopnom stanju što svakako znači da „solver“ nerijetko „zapne“ u lokalnom minimumu.

Uvođenjem dodatnih ograničenja na funkciju cilja moguće je postići točnije rezultate, ali u pravilu narušavajući traktabilnost.

Ukupni gubici su gubici energije za svih 168 intervala i u ovom slučaju vidimo smanjenje gubitaka za svega 2.8% od početnog iznosa.

Ukupan broj manipulacija odnosi se na ukupan broj uključenja ili isključenja pojedinog voda ili transformatora i u ovom slučaju iznosi 1136. Iako na prvi pogled puno, podsjećamo kako se to odnosi na ukupno 52 različita voda i transformatora što znači otprilike 21 sklopna operacija po elementu, u prosjeku, u periodu od tjedan dana što i nije pretjerano puno, no opravdanost izvođenja tolikog broja manipulacija za relativno malo smanjenje u gubicima svakako je upitna. Prosječan broj manipulacija po elementu samo je okvirna brojka koja služi kako bi se stekao opći dojam o učestalosti sklopnih operacija, ali je svakako potrebno, pomoću spomenutog grafičkog sučelja, steći i uvid u frekvenciju operacija po svakom elementu pojedinačno.

Miješano cjelobrojno stožasti model donosi veće uštede na gubicima sada u iznosu od 13% uz veće vrijeme izvođenja i veći broj manipulacija. Ovaj iznos smanjenja gubitaka vrlo je blizak iznosu oko kojeg se kreću iznosi u literaturi[7]. Opet napominjemo kako je iznos gubitaka u normalnom uklopnom stanju relativno nizak i kreće se do 2%. Dodatne simulacije pokazuju korelaciju između porasta gubitaka u mreži s efektivnošću predloženih algoritama (slika 3).



Slika 3. Smanjenje gubitaka u mreži u odnosu na gubitke u normalnom uklopnom stanju u ovisnosti o opterećenju mreže

6. ZAKLJUČAK

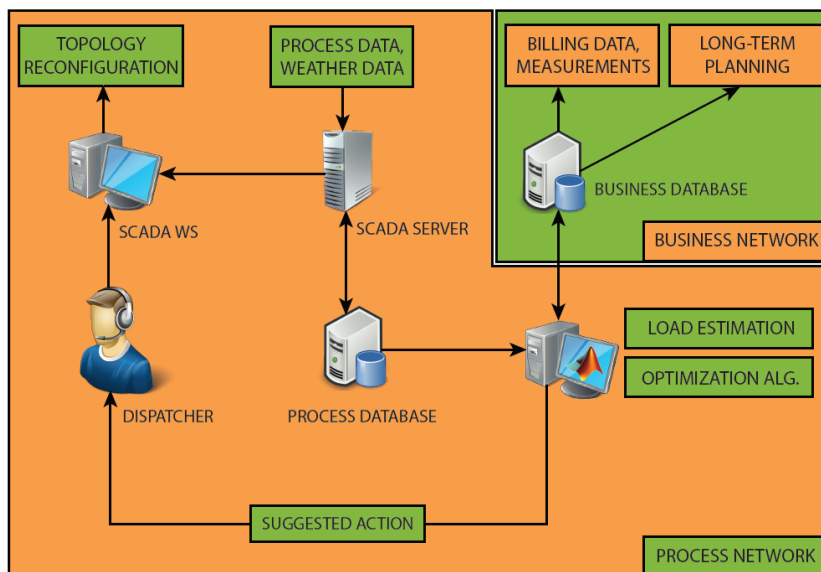
Radom su se nastojale pokazati prednosti korištenja konveksnih relaksacija na stvarnoj distribucijskoj mreži. Reformulacijom klasičnog problema optimalnih tokova snaga odnosno optimalnog uklopnog stanja u tzv. program miješanog cjelobrojnog stožastog programiranja značajno se doprinosi povećanju traktabilnosti i mogućnosti korištenja spomenutih metoda u vođenju distribucijskog sustava u stvarnom vremenu. Pri tome valja imati na umu kako je spomenuta relaksacija opet aproksimacija (osim u slučaju radijalne distribucijske mreže gdje je spomenuta relaksacija egzaktna uz manje početne pretpostavke[1]), no za razliku od često korištene linearne aproksimacije optimalnih tokova snaga ipak je

puno točnija[6], a istovremeno dovoljno traktabilna čak i za primjenu u aplikacijama u stvarnom vremenu ili barem blizu stvarnog vremena.

Rezultati prezentirani ovim radom pokazuju određena poboljšanja sa stajališta gubitaka, no s obzirom na zahtijevani broj manipulacija koje bi svakako utjecale na naprezanje opreme i potencijalno skratile njen životni vijek ili povećale učestalost redovnog održavanja, potrebne su dodatne analize isplativosti implementacije ovakvog naprednog sustava. Na dodatno smanjenje gubitaka svakako bi utjecalo i uvođenje mogućnosti regulacije napona koje ovim radom nisu razmatrane, ali koje se vrlo lako uvode u postojeće modele. Dodatni aspekt održavanja napona unutar željenih granica ovim radom nije posebno istican iz razloga što predmetna mreža nema osobitih problema s naponom, ali ovaj vid upravljanja mrežom bi svakako potencijalno mogao doprinijeti smanjenju investicija u infrastrukturu.

S obzirom da problem optimalnog uklopnog stanja spada u grupu NP-teških problema, načelno govoreći, vrijeme rješavanja ovog problema eksponencijalno raste s brojem linija u grafu, odnosno brojem vodova i transformatora. Mreža analizirana ovim radom sadrži ukupno 52 linije što se prevodi na 52 binarne varijable što svako nije ekstreman slučaj što se tiče srednjenaponskih mreža zastupljenih na području Hrvatske. Stoga je traktabilnost potrebno ispitati i na većem broju cjelobrojnih varijabli gdje se ipak očekuju slabije performanse. S druge pak strane ad hoc modeliranje točno određene mreže ili njenog dijela uvijek je najbolji oblik modeliranja jer poznavanje prilika i specifičnosti svake mreže često rezultira programskim implementacijama koje su nekoliko puta brže od generalnog pristupa.

Do sada je u tekstu nekoliko puta spominjana mogućnost implementacije razrađenog algoritma na stvarnoj mreži. Jedna od ideja kako bi se to moglo realizirati prikazana je slikom 4. Osnovna ideja jest da se podaci i trenutno topološko stanje mreže iz SCADA baze iskorištavaju kao ulazni podaci za radnu stanicu s MATALB-om. Kao rezultat proračuna optimalnog uklopnog stanja dispečeru se plasira sugestija što točno učiniti kako bi sustav doveli u optimalnu radnu točku. Temeljem sugestije, ali uzimajući u obzir istovremeno i druge prilike u mreži, dispečer vrši promjenu uklopnog stanja. Ovakva struktura bi bila dovoljna za razvoj prototipa, analizu isplativosti sustava i sl. dok bi u kasnijoj fazi razvoj aplikacije ipak trebalo prebaciti u domenu konkretnih programskih jezika (Python, C).



Slika 4. Implementacija algoritma u dispečerski centar za potrebe vođenja mreže

Radom je demonstrirana i mogućnost korištenja algoritma na način da se promjenom radne točke distribuiranih izvora u mreži potpomaže ostvarenje zadanih ciljeva. Ovim radom se prikazuje način na koji se optimalna radna točka izvora može izračunati. Ukoliko bi se pokušala realizirati stvarna implementacija bilo bi potrebno razmotriti mogućnost komuniciranja referentnih vrijednosti na siguran i efikasan način prema proizvođačima. Autori do trenutka pisanja ovog rada nemaju saznanja da je ovakav vid komunikacije uspostavljen igdje u distribucijskoj mreži, dok je sam način implementacije sustava i dalje predmet brojnih radova[2]-[3].

Možda i glavna zapreka konkretnoj implementaciji bilo bi svakako stanje primarne opreme. S obzirom na potencijalno veliki broj mogućih uklopa i isklopa, s ponekad upitnim doprinosom pojedine manipulacije u ukupnom smanjenju gubitaka, smanjuje se vijek trajanja opreme. Kako bi se doskočilo tom problemu potrebno je modificirati optimizacijski problem kako bi se ograničio broj odrada pojedine sklopke ili prekidača, a s druge strane maksimizirao učinak svake odrade. Ova modifikacija dodatno usložnjava

optimizacijski problem, ali ne na način da mijenja klasu problema, što u konačnici znači da bismo trebali vidjeti nešto smanjenu traktabilnost, ali i dalje, barem na ovom primjeru ostati u domeni gdje se može razmišljati o aplikaciji na rad sustava blizu stvarnog vremena.

Prethodno navedena modifikacija, zajedno sa dodatnim mogućnostima poput kontrole automatske regulacije napona samo su neki od vidova daljnjeg rada na primjeni ovih metoda.

7. ZAHVALE

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta SUCCESS Hrvatske zaklade za znanost, koji se financira u sklopu Programa Vlade Republike Hrvatske za poticanje istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena za razdoblje od 2015. do 2016. godine.

Istraživanje je također provedeno i u sklopu projekta 3smart DTP1-1-502-3.2 I koji su financira Europska unija kroz EFRR i IPA fond.

8. LITERATURA

- [1] Javad Lavaei, Steven H. Low, „Zero Duality Gap in Optimal Power Flow Problem“, IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 27, Issue: 1, Feb. 2012)
- [2] S. Sučić, T. Capuder, „Automation of flexible distributed multi-generation systems by utilizing optimized middleware platform“ Applied Energy, Volume 169, 1 May 2016, Pages 542–554
- [3] S. Sučić, „Optimizing OPC UA middleware performance for energy automation applications“, Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International, 13-16 May 2014
- [4] J. Carpentier, Contribution to the economic dispatch problem, Bulletin de la Societe Francoise des Electriciens, 3 (1962), pp. 431 - 447.
- [5] Burak Kocuk et al., „New Formulation and Strong MISOCP Relaxations for AC Optimal Transmission Switching Problem“, IEEE Transactions on Power Systems PP(99) · February 2017
- [6] Joshua A. Taylor, „Convex Optimization of Power Systems“, Cambridge University Press, United Kingdom, 2015
- [7] B. Novoselnik, M. Bolfek, M. Bošković, M. Baotić, „Electrical Power Distribution System Reconfiguration: Case Study of a Real-life Grid in Croatia“, IFAC 2017 World Congress / - Toulouse, Francuska, 9.-14.07.2017
- [8] J. Löfberg, „YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB“, , 2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, New Orleans, LA, USA, 2-4 Sept. 2004