

PRIMENA DC PORTOVA KAO UPRAVLJAČKIH RESURSA ZA OPTIMIZACIJU RADA DISTRIBUTIVNIH MREŽA

APPLICATION OF DC SOFT OPEN POINTS (DCSOP) AS MANAGEMENT RESOURCES FOR OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION NETWORKS OPERATION

Dejan IVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija
Predrag STEFANOV, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Primena uređaja energetske elektronike u distributivnim elektroenergetskim mrežama značajno doprinosi lakšoj integraciji obnovljivih izvora i usavršavanju procedura operativnog upravljanja za njihovo efikasnije eksploataisanje. Jedan od reprezentativnih primera primene uređaja energetske elektronike u savremenim distributivnim mrežama je primena DC portova (DC Soft Open Points – DCSOP) kojima se omogućava rad distributivne mreže sa petljastom topologijom. Pored već poznate koristi koje donosi zatvaranje petlji u distributivnoj mreži, DC portovima sa kontrolabilnim konvertorskim uređajima na svim priključcima za AC mrežu, mogu se dodatno značajno smanjiti gubici u mreži, popraviti pokazatelji vezani za iskorišćenje obnovljivih izvora, kao i pokazatelji vezani za isporuku električne energije potrošačima. U radu je opisana primena DC porta u aktivnoj sredjenaponskoj distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima. Upravljačka strategija predložena u ovom radu obuhvata dva slučaja: prvi slučaj kada je dostupna adekvatna centralizovana upravljačka infrastruktura, kada se rad DC porta zasniva na proračunima optimalnih tokova snaga (Optimal Power Flow – OPF) kojima se određuju optimalna podešenja upravljačkih varijabli DC porta i drugi slučaj kada postoji potpuna ili delimična neraspoloživost komunikacione infrastrukture tako da rezultati proračuna optimalnih tokova snaga u mreži iz nekog razloga nisu dostupni. Tada se rad DC porta zasniva na lokalnoj obradi raspoloživih podataka - izmerenih karakterističnih veličina u mreži, pomoću algoritma zasnovanog na neuralnim mrežama. Predložena upravljačka strategija je implementirana i testirana na IEEE 33 distributivnoj test mreži sa dodatim distribuiranim generatorima. Rezultati simulacija, opisani u ovom radu, zajedno sa izvedenim zaključcima mogu da posluže ne samo kao osnova za dalje naučno istraživanje već i kao baza za praktičnu implementaciju kontrolera zasnovanog na predloženom algoritmu, u realnim distributivnim mrežama.

Ključne reči: DC portovi, neuralne mreže, optimalni tokovi snaga, optimizacija i upravljanje u distributivnim mrežama

SUMMARY

Development of power electronic devices and their implementation in power distribution networks significantly improve not only the easier integration of distributed generation into distribution networks but also the further refinement of control algorithms specialized in the application of power management procedures in distribution systems. Implementation of DC Soft Open Points (DCSOP) for closing loops in distribution networks could serve as one of the most representative examples of the use of power electronics devices as a management resources in modern distribution networks. The paper describes the possibilities of application of DCSOP used for loops closure and power flow control in medium voltage distribution networks with integrated distributed generators. Considering all benefits of loops closure and the controllability of the DCSOP, DCSOP has been considered as a management resources capable of achieving the desired/optimal state in the distribution network. The management strategy proposed in this paper covers two cases: the first case where adequate communication infrastructure is available, when all DCSOP operation is based on Optimal Power Flow (OPF) calculations, and the second case when OPF results are unavailable for some reason (most often due to communication interruptions) and DCSOP operation is based on processing available data using neural network based algorithm. The proposed management strategy has been implemented and tested on the IEEE 33 distribution test network with integrated distributed generators. The simulation results, described in this paper, can serve not only as a basis for further scientific research, but also as a basis for the practical implementation of real controller based on proposed algorithm and its application in practice, in real distribution networks.

Key words: DC soft open points (DCSOP), neural networks, optimal power flow (OPF), optimization in distribution network

dejan.ivic@yahoo.com;
stefanov@ctf.rs;

UVOD

Integracija obnovljivih izvora energije i sve veći broj kontrolabilnih potrošača doneli su značajne promene u distributivnim mrežama. Savremene distributivne mreže više nisu pasivne, a korišćenje obnovljivih izvora električne energije kojima se maksimalno iskorišćavaju raspoloživi energetske resursi, sa propratnim promenama i pravaca i smerova tokova snaga u mreži, prouzrokuje potrebu za komplikovanijim zaštitnim šemama i posebno razvijanim upravljačkim sistemima i procedurama. U okviru ovih procedura upravljanje tokovima snaga dobija novu dimenziju i primena algoritama za njihovu optimizaciju, sa ciljem adekvatnog korišćenja svih kontrolabilnih resursa, dobija sve značajniju ulogu.

Konvencionalne distributivne mreže uglavnom su okarakterisane radijalnom topologijom ili topologijom u obliku otvorenog prstena [1]. Prednosti radijalne topologije sa tokovima snaga u jednom smeru ogledaju se u jednostavnosti, relativno jednostavnim postupcima za nalaženje mesta kvara, brzom izolaciji kvara i restauraciji nakon kvara. S druge strane, ovi tipovi mreža pokazuju i neke nedostatke koji se prevashodno odnose na nemogućnost regulacije napona u svim delovima mreže, obično praćene povećanim gubicima, bez efikasnih mera rekonfiguracije u realnom vremenu kojom bi se vršilo uravnotežavanje opterećenja [2]. Dok sve veća zastupljenost obnovljivih izvora dovodi do pojave suprotnih tokova snaga, kojom se u velikoj meri gube navedene prednosti radijalne konfiguracije, razvoj uređaja energetske elektronike u fokus interesovanja vraća razmatranja mogućnosti zatvaranja petlji i iskorišćavanje svih prednosti koje ovakva topologija obezbeđuje [3]. Zahvaljujući savremenim uređajima energetske elektronike moguće je formirati petljastu konfiguraciju u distributivnim mrežama tako da se obezbedi poboljšanje naponskog profila uz smanjenje gubitaka u mreži i željena preraspodela tokova snaga, ali bez negativnih konsekvenci, koje su prepoznate kod prostih petljastih mreža. S obzirom na karakteristike uređaja koji se koriste za upetljavanje, u ovom slučaju ne dolazi do propagacije povećanih struja kvara, te je rešen osnovni problem koji je u prošlosti sprečavao širu primenu ove topologije na distributivnom nivou.

Posmatrano iz ugla upravljanja u distributivnim mrežama, zatvaranje petlji pomoću uređaja energetske elektronike suštinski predstavlja povezivanje dva izvoda uz kontrolisanu AC/DC konverziju. Najjednostavniji DC portovi (eng. DC Soft Open Point – DCSOP) obezbeđuju vezu dva izvoda preko jednosmernog međukola, kojim se vrši razdvajanje AC sistema i ograničavanje struja kvara. Primena ovog uređaja predstavlja rešenje koje integriše prednosti i radijalne i petljaste topologije mreže. Složenijim uređajima može se preko jednog DC porta povezati više izvoda i obezbediti znatno efikasnija preraspodela tokova snaga, koja bi obuhvatala veći deo mreže.

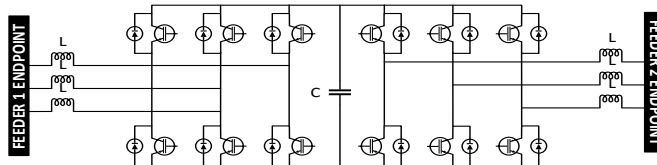
U poređenju sa razvojem hardvera DC portova, razvijali su se i različiti upravljački algoritmi dizajnirani kako bi uvažili i DC portove kao upravljačke resurse u mreži. U većini do sada objavljenih radova predloženi algoritmi se odnose na normalne uslove rada sa upravljanjem zasnovanim na proračunima optimalnih tokova snaga (OPF) [4], [5], s tim što je težište stavljeno na prilagođavanje različitih optimizacionih metoda postavljenom problemu optimizacije u distributivnim mrežama. Algoritmi koji koriste klasične metode optimizacije detaljno su opisani u [6], [7]. Njihov osnovni nedostatak je potreba za uvođenjem dodatnih relaksacija pri obuhvatanju nekonveksnih ograničenja [8]. Sa druge strane, algoritmi koji se baziraju na metaheurističkim metodama optimizacije [9], nemaju taj problem i sve češće su u primeni. Ovi radovi poslužili su kao osnova za u radu predstavljenu upravljačku strategiju za upravljanje radom DC portova u osnovnom modu. Predloženo upravljanje DC portovima se vrši centralizovano, na osnovu proračuna optimalnih tokova snaga (OPF) u svim „normalnim“ radnim režimima pune raspoloživosti DMS sistema prisutnih u savremenim upravljačkim distributivnim centrima. Međutim, kao kritični u optimalnom upravljanju uređajima energetske elektronike su sve istaknutiji problemi koji nastaju u poremećenim uslovima izazvani potpunim ili delimičnim prekidima u komunikacionoj mreži, kada na bazi dospelih podataka ili zbog nemogućnosti prenosa upravljačkih signala nije moguće vršiti centralizovano upravljanje. U ovom modu kada OPF proračuni iz nekog razloga nisu dostupni, predloženo je lokalno upravljanje DC portovima. U te svrhe mogu se koristiti estimacije bazirane na veštačkoj inteligenciji [10] ili pak na logici fazi brojeva [11], [12]. U ovom radu su u cilju primene takvih algoritama analizirani minimalni zahtevi vezani za obezbeđenje neophodnih informacija i predložen algoritam pretrage implementiran na minimalnom dostupnom skupu merenja i istorijskih podataka.

U drugom poglavlju detaljno je opisan model DC porta korišćen u optimizacionim proračunima. Treće poglavlje posvećeno je postavljanju optimizacionog problema sa DC portom razmatranim kao jedinim upravljaljivim resursom u

mreži. Algoritam pretrage, korišćen za upravljanje radom DC porta tokom prekida komunikacije detaljno je opisan u četvrtom poglavlju. Predložena upravljačka strategija je tesitrana na IEEE 33 test mreži sa integrisanim distribuiranim generatorima. Rezultati simulacija predstavljeni su u petom poglavlju. Poglavlje broj 6 donosi finalne zaključke autora te smernice za dalje istraživanje i unapređenje praktičnih rešenja.

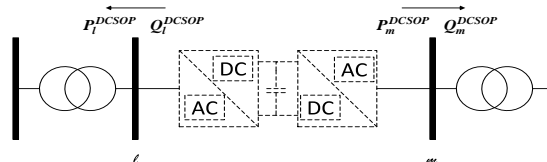
MODELOVANJE DC PORTA

Osnovu jednostavnog DC porta sa dve tačke povezivanja čine konvertori energetske elektronike u takozvanoj „back to back“ topologiji. Komponente DC porta su dva VSC konvertora (Voltage source converter), kojima je DC port povezan na distributivnu mrežu, međusobno povezana jednosmernim kolom sa kondenzatorom. Ovaj kondenzator smanjuje varijacije DC napona i obezbeđuje stabilnost komutacije polumostnih ili punomostnih punoupravljivih trofaznih pretvaračkih kola sa IGBT tranzistorima (Insulated Gate Bipolar Transistor), kao što je to prikazano na Slici 1.



SLIKA 1 ARHITEKTURA DC PORTA

Upravlјivost pretvaračkih kola, obično realizovana širinskom modulacijom, omogućava kontrolu toka aktivne snage kroz DC port, kao i naponsko-reaktivnu podršku kojom se nezavisnim generisanjem talasnih oblika napona primenjenih konvertora može nezavisno upravljati. S obzirom na brzinu upravljanja pretvaračkim kolima, kao i na najčešće primenjivan mod regulacije, gde se konvertorom reguliše aktivna i reaktivna snaga na priključku za mrežu sa upravljačkim kolima opisanim u [12] i [13], u proračunima tokova snaga DC port je moguće modelovati injektiranjima snaga u poveznim čvorovima (Slika 2).



SLIKA 2 BLOK ŠEMA DC PORTA

Jednačine balansa aktivnih snaga moraju da budu zadovoljene za sve delove kola DC porta, što znači da snage aktivnog injektiranja u modelu tokova snaga u poveznim čvorovima nisu nezavisne, pri čemu se njihova međusobna veza može izraziti pomoću relacije:

$$P_m^{DCSOP} + P_l^{DCSOP} + P_{mgubitaka}^{DCSOP} + P_{lgubitaka}^{DCSOP} = 0, \quad (1)$$

gde P_m^{DCSOP} i P_l^{DCSOP} predstavljaju injektiranja aktivne snage u poveznim čvorovima m i l . Ovom relacijom obuhvaćeni su i gubici aktivne snage $P_{mgubitaka}^{DCSOP}$ i $P_{lgubitaka}^{DCSOP}$ u konvertorima povezanim u čvorovima m i l respektivno. Kao što je navedeno, injektiranja reaktivnih snaga u poveznim čvorovima su nezavisna i pri izboru tih snaga, tj. odgovarajućih referentnih vrednosti regulatora, potrebno je voditi računa o termičkim ograničenjima konvertora koja se mogu opisati relacijom (2):

$$\begin{aligned} \sqrt{(P_l^{DCSOP} + P_{lgubitaka}^{DCSOP})^2 + (Q_l^{DCSOP})^2} &\leq (S_l^n)^2; \\ \sqrt{(P_m^{DCSOP} + P_{mgubitaka}^{DCSOP})^2 + (Q_m^{DCSOP})^2} &\leq (S_m^n)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

gde S_l^n i S_m^n označava nazivnu vrednost prividne snage konvertora povezanih u čvorove l i m respektivno. Očigledno, ovakvim modelovanjem se u proračune tokova snaga uvode tri upravljačke promenljive, koje se nezavisno zadaju pri specifikaciji čvorova, dok je četvrta promenljiva – aktivno injektiranje jednog od konvertora, zavisna promenljiva i rešava se obuhvatanjem relacije (1). Korigovanje vrednosti upravljačkih promenljivih je neophodno jedino u slučaju narušavanja ograničenja tipa (2).

U relacijama (1) i (2) figurišu gubici aktivne snage u konvertorima. Za proračun gubitaka u konvertorima koriste se različiti aproksimativni modeli, kojima se obuhvata disipacija na prekidačkim komponentama [13]. U radu su

gubici prikazani kvadratnom funkcijom opterećenja prekidačkih komponenti sa koeficijentima određenim njihovim parametrima [14], datom relacijom:

$$P_{konvertora}^{gubitaka} = aI^2 + bI + c, \quad (3)$$

gde I predstavlja struju kroz granu razmatranog konvertora.

Na osnovu prethodno izloženog, u slučaju DC porta koji povezuje dva distributivna voda (fidera), vektor upravljačkih promenljivih sadrži jedno nezavisno injektiranje aktivne snage i dva injektiranja reaktivnih snaga:

$$u = \begin{bmatrix} P_l^{DCSOP} \\ Q_l^{DCSOP} \\ Q_m^{DCSOP} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Optimalnim izborom vrednosti ovako definisanog vektora upravljačkih promenljivih postiže se i optimalna primena DC porta, tako da je njegov model dalje inkorporiran u optimizacioni postupak, o čemu će više biti reči u poglavlju koje sledi.

UPRAVLJANJE DC PORTOM U NORMALNIM USLOVIMA

U normalnim uslovima, kada je dostupna sva neophodna infrastruktura, određivanje referentnih vrednosti za rad DC porta zasniva se na proračunu optimalnih tokova snaga. Suštinski, ovaj problem može se svrstati u grupu nelinearnih optimizacionih problema. U daljem izlaganju je dat detaljniji opis optimizacionog postupka u kom je DC port tretiran kao jedini upravljački resurs u mreži.

Kriterijim optimizacije

DC portovima se u distributivnoj mreži omogućava upravljanje tokovima i aktivnih i reaktivnih snaga. Shodno tome, različitim podešavanjima ciljnih vrednosti konvertorima regulisanih promenljivih može se uticati na različite pokazatelje rada kojima se opisuje distributivna mreža. To znači da se u optimizacionim postupcima kojima se one određuju mogu primeniti različite kriterijumske funkcije optimizacije. Izborom kriterijuma optimizacije obično se daje prednost određenom pokazatelju koji ima ili najveći ekonomski značaj ili značaj sa stanovišta obezbeđenja sigurne isporuke električne energije, kojima se direktno ili indirektno postižu i ravnomerniji naponski profili pojedinih izvoda, sa što manjim varijacijama u odnosu na nominalne vrednosti, ravnomernije opterećivanje pojedinih delova mreže ili minimizuje pojava stanja kojima bi se negativno uticalo na radni vek opreme.

Bez ograničavanja opštosti dobijenih zaključaka vezanih za realizaciju i efekte predloženog upravljanja, u ovom radu razmatran je samo kriterijum minimalnih ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži, koji se formuliše relacijom:

$$\min(P_{gubitaka}) = \min(P_{gubitaka}^{mreze} + P_{gubitaka}^{DCSOP}). \quad (5)$$

gde su kriterijumskom funkcijom obuhvaćeni kako gubici na vodovima i transformatorima distributivne mreže $P_{gubitaka}^{mreze}$, tako i gubici ugrađenih DC portova $P_{gubitaka}^{DCSOP}$.

Umesto ovog kriterijuma, može se primeniti bilo koji drugi u literaturi predloženi kriterijum [9], može se kombinovanjem kriterijuma dobiti novi, sintetički kriterijum simultane optimizacije, ili se skup optimalnih rešenja može naći višekriterijumskom optimizacijom [15].

Ograničenja u optimizacionom postupku

U optimizacionom postupku neophodno je uvažiti ograničenja vezana za radni režim, iskazana relacijama tokova snaga tipa jednakosti i pogonska ograničenja kojima se obezbeđuje dobijanje realno prihvatljivih rešenja, bez narušavanja granica opteretivosti pojedinih elemenata mreže i sa tolerantnim odstupanjima napona.

Jednačine tokova snaga predstavljaju jednačine balansa aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima mreže:

$$P_i^G - P_i^L = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + V_j B_{ij} \sin(\theta_{ij})), \quad (6)$$

$$Q_i^G - Q_i^L = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - V_j B_{ij} \cos(\theta_{ij})), \quad (7)$$

gde $i, j = 1, 2, 3, \dots, n_{bus}$ označavaju čvorove mreže, P_i^G označava generisanje aktivne snage u čvoru i , odnosno generisanja koja se odnose na injektiranje u napojnim čvorovima distributivne mreže i proizvodnju u njoj priključenih obnovljivih i drugih distribuiranih izvora, Q_i^G označava generisanje reaktivne snage u čvoru i , odnosno sva regulisana generisanja reaktivnih snaga obnovljivih izvora ili bilo kog drugog regulacionog uređaja za proizvodnju/apsorpciju reaktivnih snaga u distributivnoj mreži, a P_i^L, Q_i^L potrošnju priključenih potrošača aktivne i reaktivne snage u razmatranom čvoru. Oznake G_{ij}, B_{ij} , označavaju realne i imaginarne delove admitansi Y_{ij} , elementa matrice admintanse mreže koji se nalazi na poziciji ij dok $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ označava razliku faznih stavova napona čvorova i i j . Uvažavajući izloženi model DC porta i notaciju prikazanu na Slici 2, jednačine balansa aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima koje povezuje DC port (l i m) se modifikuju jedino izmenom leve strane jednačina (6) i (7), gde su dodata injektiranja pridružena DC portu i mogu se napisati kao:

$$P_l^G + P_l^{DCSOP} - P_l^L = V_l \sum_j (V_j G_{lj} \cos(\theta_{lj}) + V_j B_{lj} \sin(\theta_{lj})), \quad (8)$$

$$Q_l^G + Q_l^{DCSOP} - Q_l^L = V_l \sum_j (V_j G_{lj} \sin(\theta_{lj}) - V_j B_{lj} \cos(\theta_{lj})), \quad (9)$$

$$P_m^G + P_m^{DCSOP} - P_m^L = V_m \sum_j (V_j G_{mj} \cos(\theta_{mj}) + V_j B_{mj} \sin(\theta_{mj})), \quad (10)$$

$$Q_m^G + Q_m^{DCSOP} - Q_m^L = V_m \sum_j (V_j G_{mj} \sin(\theta_{mj}) - V_j B_{mj} \cos(\theta_{mj})), \quad (11)$$

s tim da se ovom skupu jednačina dodaje i jednačina (1), sa gubicima DC porta opisanim jednačinom (3). Ograničenja tipa nejednakosti odnose se na termička ograničenja vodova i transformatora u mreži i ograničenja dozvoljenih odstupanja napona u čvorovima mreže. Ova ograničenja su formulisana relacijama (12) i (13):

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{\max}, \quad (12)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad (13)$$

gde $S_{ij}^{\max}, V_i^{\min}, V_i^{\max}$ predstavljaju granične vrednosti prividne snage elemenata i napona čvorova u mreži. Ovim ograničenjima pridružuju se ograničenja snage konvertora u DC portu, iskazana relacijom (2).

Rešavanje optimizacionog problema moguće je izvršiti primenom bilo kog raspoloživog klasičnog matematičkog, heurističkog ili metaheurističkog metoda optimizacije. Posmatrano sa stanovišta u radu razmatranog problema, izbor optimizacione metode je izvršen tako da bude što jednostavnija za implementaciju a da odgovori zahtevima brzine izvršavanja i tačnosti nađenog optimalnog rešenja. U radu je korišćen metaheuristički algoritam baziran na oponašanju hijerarhije sivih vukova (Grey Wolf Optimizer – GWO). Metaheuristički metod optimizacije izabran je kako bi se izbegle dodatne relaksacije ograničenja tipa nejednakosti, neophodne za realizaciju klasičnih optimizacionih metoda. Detaljan opis GWO algoritma kao i neke njegove dodatne primene mogu se pronaći u [16], dok je ovde izostavljen.

Kao što je već navedeno, u radu je pretpostavljeno da je DC port jedini kontrolabilni uređaj. To znači da su upravljačke promenljive u date u (4) i jedine upravljačke promenljive. Prema tome, usvojeno je da su opterećenja u čvorovima mreže ili poznata na osnovu merenja ili estimirana primenom DMS aplikacija, a da se u optimizaciji koriste merene vrednosti proizvodnje obnovljivih izvora. Dakle, prepodešavanje DC portova vrši se automatski, na satnom nivou, na osnovu rezultata optimizacionog algoritma. U dalje prikazanim rezultatima prikazano je koliko se na ovaj način mogu smanjiti gubici u sistemu, normalno, pod pretpostavkom dostupnosti svih neophodnih podataka za optimizaciju i raspoloživosti komunikacione mreže za obezbeđivanje ovakvog upravljanja.

RAD DC PORTA U SLUČAJU PREKIDA KOMUNIKACIJE

Centralizovan pristup upravljanju radom DC porta zahteva dostupnost velikog broja merenja u mreži te prenošenje izmerenih vrednosti kroz komunikacionu mrežu do nadređenog centra upravljanja. U slučajevima kada se dogodi prekid u komunikacionoj mreži, OPF nije moguće realizovati. Razlozi neraspoloživosti mogu biti brojni. U literaturi se sve više radova bavi ovom neraspoloživošću ne samo sa stanovišta pouzdanosti komunikacione mreže, već i različitih vidova napada na ove mreže, odnosno odgovarajuće aplikativne softwere (*cyber security*). Postavlja se pitanje kako izvršiti podešavanje DC portova u slučaju da se procedure

optimalnosti ne mogu koristiti, a kojima će se opravdati primena njihove ugradnje. Najjednostavnije rešenje bi podrazumevalo isključivanje DC porta i prekidanje odgovarajuće petlje distributivne mreže, čime se u potpunosti gube sve mogućnosti korišćenja obnovljivih izvora vezanih u tom delu sistema, kao i održavanja napona i raspodele snaga dobijene uvođenjem petlje. Prema tome, ovakvo rešenje je najjednostavnije, ali i najgore. Drugo, takođe jednostavno rešenje podrazumeva da DC port ostane da radi sa poslednjim podešenim vrednostima sve vreme prekida komunikacije. Kako ni ovo rešenje, mada znatno bolje od prethodnog, ne daje prihvatljive rezultate, posebno pri velikim varijacijama potrošnje i/ili proizvodnje obnovljivih izvora, neophodno je naći alternativnu metodu koja će obezbediti dovoljno dobre pokazatelje. U radu je pokazano da je rad DC porta u slučajevima kada OPF nije dostupan (iz bilo kog razloga) moguće ostvariti korišćenjem estimacije upravljačkih promenljivih za koju je potreban znatno manji skup dostupnih trenutnih merenja, kao i istorije istih merenja ostvarenih u dovoljno dugom prethodnom vremenskom periodu (*data history set*). Algoritam opisan u nastavku ovog poglavlja omogućava estimaciju upravljačkih promenljivih DC porta primenom algoritma pretrage, zasnovanom na veštačkoj inteligenciji sve češće korišćenoj u rešavanju problema velikog broja podataka (*big data*), posebno aktuelnih u savremenim ekлектроenergetskim sistemima.

Realizacija algoritma pretrage zasniva se na pretpostavci da će u slučaju prekida komunikacije uvek biti dostupan neki skup karakterističnih merenja u mreži. Zavisno od toga o kakvoj se komunikacionoj mreži radi, prekid komunikacije može biti delimičan (što je i najčešći slučaj) ili potpun. U slučaju delimičnog prekida, dostupna merenja u mreži predstavljaju skup merenja raspoloživih u slučaju kada se dogodi prekid komunikacije. Pokazuje se da je na osnovu dovoljnog broja dostupnih merenja (mrežnih varijabli) korišćenih za pretragu istorije rada DC porta moguće izvršiti estimaciju izlaza DC porta. Važno je napomenuti da broj elemenata ovog skupa varira zavisno od mesta prekida komunikacije i tipa komunikacione mreže [6]. U radu je umesto ovog skupa merenja koji varira u zavisnosti od vrste prekida, razmatran minimalan skup merenja koja su neophodna da bi se, sa tolerantnom merom, zadržale performanse rada DC porta, pri čemu se pretpostavlja da bi se pri prekidu komunikacije taj mali broj merenja koji su neophodni za funkcionisanje algoritma pretrage mogao preneti nekim alternativnim komunikacionim kanalom ili čak uneti ručno. Za takva merenja je neophodno i da postoji baza sa istorijskim podacima dovoljno dugačkog perioda. Ovim merenjima moraju se pridružiti upravljačke promenljive i/ili odgovarajuća merenja na krajevima samog DC porta sa svojim delom u bazi istorijskih podataka. Težnja je da se razmatranjima pokaže da su sva neophodna merenja uglavnom vezana za lokalne delove mreže, tj. da se pokaže da je dovoljna lokalna raspoloživost da bi on mogao da se implementira. Nažalost, izbor ovih merenja u velikoj meri je određen karakteristikama same mreže, ali i karakteristikama potrošača i izvora u njoj kao i samom lokacijom DC porta. U cilju određivanja minimalnog skupa ovih merenja izvršena je analiza većeg broja scenarija, sa analizom osetljivosti na dobijene pokazatelje optimalnosti. Baza istorijskih podataka (istorija merenja) obuhvata izmerene vrednosti sa svih neophodnih merenih tačaka u mreži (čvorovi u mreži) za određeni vremenski period. U zavisnosti od dostupnih memorijskih kapaciteta, ta baza može ali ne mora da sadrži i merenja ostalih merenih veličina koje u slučaju lokalne raspoloživosti mogu biti uključena u algoritam pretrage. Normalno, ono što je takođe značajno je da se u toj bazi sačuvaju svi podaci za merenja koja obuhvataju vremenski interval od nekoliko sati, dana, pa do nekoliko nedelja ili meseci. Često je dužina vremenske serije važnija za kvalitet predloženog algoritma pretrage od prikupljanja dodatnih merenja van razmatranog minimalnog skupa.

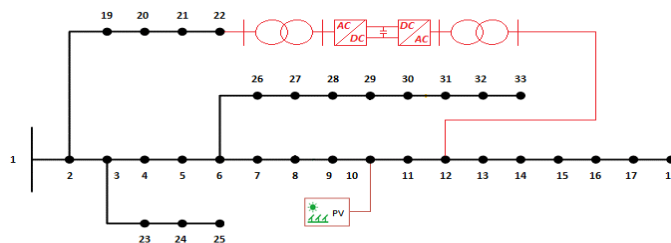
Algoritam pretrage započinje detekcijom prekida komunikacije. U sledećem koraku vrši se detekcija dostupnih merenja u mreži, bilo putem dela komunikacione mreže koji je i dalje u funkciji, putem neke alternativne komunikacije uz proveru mogućnosti ažuriranja podataka putem manuelnog unosa očitavanja izmerenih vrednosti. Na osnovu detekovanog skupa dostupnih merenja u narednom algoritamskom koraku vrši se ekstrahovanje i obrada podataka iz istorije merenja. Iz istorije merenja izdvajaju se podskupovi kompatibilni skupu dostupnih merenja. Ključni korak u algoritmu pretrage predstavlja definisanje kriterijuma pretrage. U ovom koraku vrši se poređenje skupa dostupnih merenja sa odgovarajućim podskupovima iz istorije merenja. Na osnovu definisanog kriterijuma, identifikuje se vremenski zapis u istoriji merenja sa najbližijim vrednostima arhiviranih merenja skupu izmerenih vrednosti dostupnih merenja. Pojednostavljeno rečeno, na osnovu usvojenog kriterijuma, algoritam vrši pretragu istorije stanja u mreži kako bi identifikovao stanje koje je najbližije trenutnom stanju. S obzirom na skup dostupnih merenja formiraju se vektori odstupanja izmerenih i ekstrahovanih ostvarenih stanja od n elemenata, čije se poređenje vrši korišćenjem neke od poznatih vektorskih normi [17]. Vremenski zapis istorije merenja sa skupom merenja koji je najbliži skupu trenutnih merenja proglašava se za kvazioptimalno stanje u mreži i algoritam se nastavlja. Tokom poslednjeg algoritamskog koraka na osnovu prethodno identifikovanog kvazioptimalnog stanja vrši se identifikacija izlaznih varijabli DC porta koje odgovaraju ovom stanju iz identifikovanog vremenskog zapisa. Identifikacija se realizuje jednostavnim mehanizmom indeksiranja ili nekom drugom metodom koja povezuje baze podataka istorije merenja i istorije varijabli DC porta.

TEST SISTEM

Predložene upravljačke procedure testirane su na IEEE 33 distributivnoj test mreži nominalnog naponskog nivoa 12,66 kV. Normalizovanim dijagramima potrošnje za pojedine čvorove za period od 24 sata (sa satnom diskretizacijom) obuhvaćene su tri karakteristična tipa domaćinstava, kao i komercijalna i industrijska potrošnja u mreži. U proračunima tokova snaga potrošnja je modelovana korišćenjem ZIP modela [18], s tim što su moguće slučajne varijacije potrošnje u svakom od čvorova u odnosu na njihove osnovne dijagrame u granicama od -20% do +25%. Ovom sistemu je dodata fotonaponska elektrana instalisane snage 5 MW, priključena u čvoru 10. Dijagram proizvodnja fotonaponske elektrane estimiran je na osnovu izmerene insolacije na lokaciji sa koordinatama: 44.7866° N, 20.4489° E (Beograd), sa mogućom slučajnom varijacijom u opsegu od $\pm 20\%$. Razmatrani DC port formira petlju povezivanjem čvorova 12 i 22. Usvojena nominalna prividna snaga konvertora DC porta je 3 MVA a parametri konvertora korišćeni pri modelovanju gubitaka usvojeni su na osnovu dostupnih kataloških podataka različitih proizvođača konvertora [6, 13]. Jednopolna šema opisane test mreže prikazana je na Slici 3.

REZULTATI SIMULACIJA

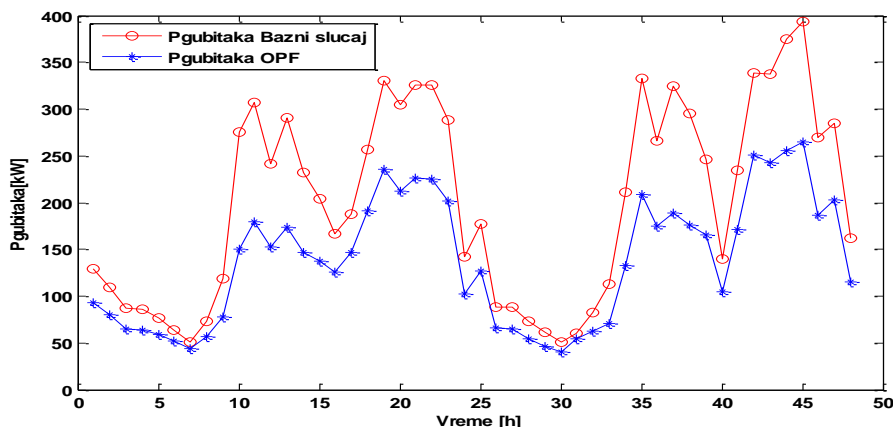
Testiranje algoritma za upravljanje DC portom je vršeno i u normalnim uslovima rada i u slučaju rada DC porta pri prekidima komunikacije. Bazni slučaj, koji je razmatran kao referentni za poređenje gubitaka aktivne snage i efekata predloženog upravljanja u normalnom modu je slučaj radijalne mreže bez DC porta, dok je u slučaju prekida komunikacije, efikasnost predloženog lokalnog upravljanja potvrđena poređenjem sa rezultatima centralizovanog upravljanja, tj. OPF proračunima.



SLIKA 3 IEEE 33 DISTRIBUTIVNA TEST MREŽA SA DC PORTOM

Rad DC porta u normalnim uslovima

Rezultati optimizacije rada DC porta baziranog na OPF proračunima, tokom razmatranog perioda od 48 časova prikazani su na Slici 4. Analizirajući rezultate prikazane na Slici 4 evidentno je da je povezivanjem DC porta moguće ostvariti značajno smanjenje ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži. Maksimalno smanjenje ukupnih gubitaka ostvareno tokom razmatranog perioda od 48h iznosi čak 45,31%.



SLIKA 4 REZULTATI SIMULACIJA – RAD DC PORTA U NORMALNIM USLOVIMA

Rad DC porta pri prekidu komunikacija

U slučaju prekida komunikacije upravljanje DC portom vrši se lokalno korišćenjem algoritma pretrage za estimaciju izlaza DC porta. Baza istorijskih podataka korišćena za testiranje algoritma obuhvata vremenski period od 31 dan (744 h). Maksimalan skup dostupnih merenja pri prekidu komunikacije usvojen je shodno Tabeli 1. Rezultati proračuna – ukupni gubici aktivne snage u mreži i izlazne promenljive DC porta prikazni su na Slici 5.

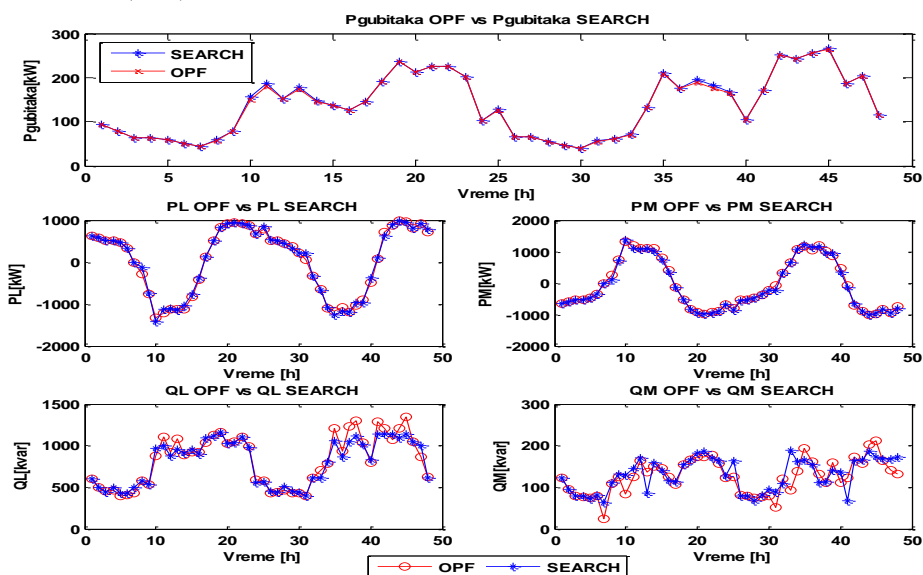
TABELA 1 - SKUP DOSTUPNIH MERENJA PRI PREKIDU KOMUNIKACIJE

Oznaka merene veličine	Opis
U_{33}	Napon u čvoru 33 – jedan od dva najniža napona u mreži
U_{17}	Napon u čvoru 17 – jedan od dva najniža napona u mreži
U_{11}	Napon u čvoru 11 – čvoru koji je električno najbliži priključku l DC porta
U_{21}	Napon u čvoru 21 – čvoru koji je električno najbliži priključku m DC porta
Q_{30}	Potrošnja reaktivne snage u čvoru 30 – najveći potrošač reaktivne snage u mreži
P_{DG10}	Generisanje aktivne snage iz distribuiranog generatora – PV postrojenje u čvoru 10

Analizom rezultata prikazanih na Slici 5 i poređenjem sa rezultatima iz prethodnog slučaja (rad DC porta u normalnim uslovima) lako se zaključuje kako u slučajevima prekida komunikacije reference upravljanja DC porta estimirane algoritmom pretrage veoma dobro prate vrednosti koje bi dali OPF proračuni. Kao direktna posledica toga, ukupni gubici aktivne snage u mreži pri prekidu komunikacija ne odstupaju više od 5% od gubitaka dobijenih na osnovu provedenih OPF proračuna u normalnim uslovima rada. Rezultati prikazani na Slici 5 su rezultati dobijeni na osnovu estimacija u na osnovu najpovoljnijih podskupova skupa dostupnih merenja (Tabela 1) i korišćenjem Euklidove norme vektora ($p=2$). Uticaj ovih parametara na kvalitet estimacije detaljnije je opisan u pragrafima koji slede.

Optimalni skup merenja za implementaciju algoritma pretrage

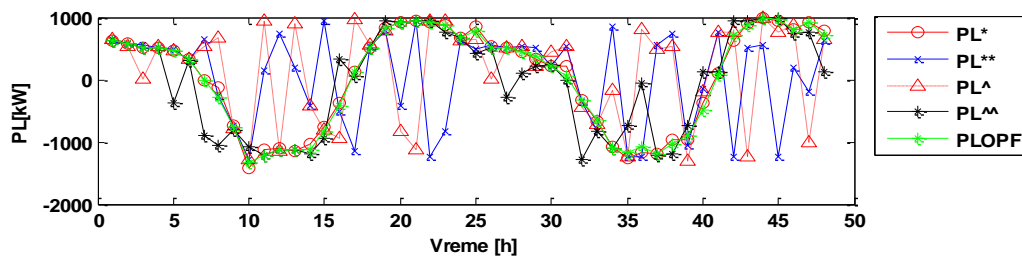
Kao što je opisano u četvrtom poglavlju, tokom algoritma pretrage vrši se poređenje skupa merenja dostupnih tokom prekida komunikacije sa odgovarajućim podskupovima iz baze podataka – istorije merenja. Pokazuje se kako je estimaciju neke od izlaznih varijabli moguće izvršiti bez upotrebe svih dostupnih merenja tj. da je moguće redukovati skup merenja koji se koristi pri estimaciji. Šta više, redukovanjem broja merenja koja se koriste pri estimaciji može se dobiti bolja tačnost estimacije izlaznih varijabli DC porta nego u slučaju kada se za estimaciju koriste sva dostupna merenja. Kao ilustrativni primer može se razmotriti estimacija aktivne snage DC porta (P_l). Od skupa dostupnih merenja (Tabela 1) moguće je formirati različite podskupove, zavisno od broja elemenata, te na osnovu njih vršiti estimaciju aktivne snage P_l . Za poređenje kvaliteta estimacija zasnovanih na različitim podskupovima dostupnih merenja korišćeno je srednje kvadratno odstupanje na celokupnom razmatranom intervalu (48 h).



SLIKA 5 REZULTATI SIMULACIJA – RAD DC PRI PREKIDU KOMUNIKACIJE

Rezultati estimacija aktivne snage DC porta P_l realizovane pomoću nekoliko različitih podskupova dostupnih merenja prikazani su na Slici 6. Grafici prikazani na Slici 6 jasno pokazuju da broj merenja koja se koriste u

postupku estimacije nema presudan uticaj na kvalitet estimacije. Analogna razmatranja i analize provedene su i za preostale izlazne varijable DC porta (reaktivne snage) te je važno napomenuti da su podskupovi koji daju najtačniju estimaciju različiti za svaku od izlaznih varijabli DC porta, kako po broju elemenata tako i po vrsti merenja koje sadrže.

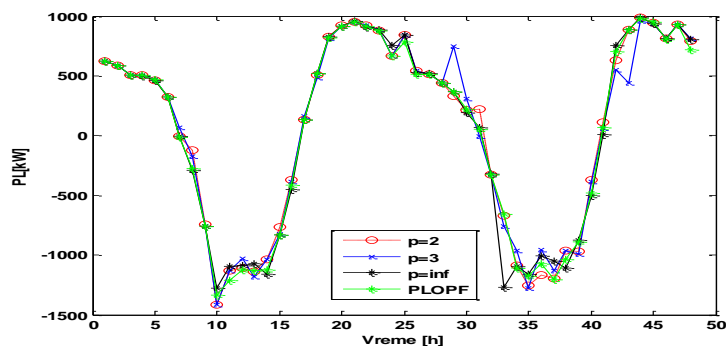


$$PL^* \in \{P_{DG10}, U_{17}, U_{11}\}; PL^{**} \in \{P_{DG10}, U_{17}, U_{11}\}; PL^{\wedge} \in \{P_{DG10}, U_{21}, Q_{30}\}; PL^{\wedge\wedge} \in \{U_{11}, U_{33}\}$$

SLIKA 6 – ESTIMACIJA AKTIVNE SNAGE DC PORTA NA OSNOVU RAZLIČITIH PODSKUPOVA MERENJA

Uticaj stepena norme na tačnost estimacije

Stepen norme korišćene u algoritmu pretrage predstavlja još jedan od algoritamskih parametara koji se može varirati kako bi se postigla što je moguće bolja tačnost estimacije. I u ovom slučaju važi da se različite norme mogu usvojiti za estimaciju pojedinih nezavisnih izlaza DC porta. Estimacija aktivne snage DC porta (PL) korišćenjem različitih vektorskih normi ilustrovana je na Slici 7. Norme ilustrovane na Slici 7 su tri najčešće korišćene norme. U razmatranom slučaju estimacija bazirana na Euklidovoj normi ($p=2$) okarakterisana je kao najbolja u poređenju sa rezultatima koje bi dali OPF proračuni.



SLIKA 7 – SNAGA PL – ESTIMACIJE NA OSNOVU RAZLIČITIH VREDNOSTI STEPENA NORME

ZAKLJUČAK

Integracijom DC portova u mrežu dobijaju se dodatni upravljački resursi čijim adekvatnim upravljanjem je moguće ostvariti kontrolu tokova snaga u mreži, smanjenje gubitaka te posledično i poboljšanje naponskog profila u mreži. Istovremeno, primena DC portova omogućava zatvaranje petlji u distributivnim mrežama bez dodatne propagacije struje kvara. Adekvatno korišćenje svih mogućnosti koje nude DC portovi u mnogome zavisi od upravljačkih algoritama koji se koriste za upravljanje DC portovima kako u normalnim uslovima rada tako i u specifičnim uslovima prekida komunikacije kada centralizovano upravljanje nije moguće realizovati. Strategija upravljanja DC portovima, opisana i testirana u ovom radu, predlaže rešenja koja pokrivaju i normalne uslove rada i rad DC porta u uslovima prekida komunikacije. Osnovna prednost predloženih algoritama jeste njihova jednostavnost koja ih čini primenjivim u praksi. Zahvaljujući algoritmu pretrage na osnovu više dostupnih merenja, rad DC porta pri prekidu komunikacije – u režimu lokalnog upravljanja neznatno se razlikuje od rada DC porta u normalnim uslovima rada. Pokazuje se da je za svaku od upravljačkih varijabli neophodno odrediti minimalan skup određen kao kompromis između željene tačnosti estimacije sa jedne i broja dostupnih merenja i raspoloživih računarskih resursa sa druge strane. Rezultati simulacija uz izvedne zaključke predstavljaju dobru polaznu osnovu ne samo za dalji naučni rad u ovoj oblasti već i za implementaciju adaptivnog upravljanja DC portovima u praksi. Poboljšanja predloženog algoritma moguća su kroz dalju analizu korelacija merenja u sistemu i dodatnih analiza osetljivosti. Tematika razmatrana u ovom radu ostaje u fokusu interesovanja autora a gore spomenuta poboljšanja predloženog algoritma ujedno predstavljaju ideje i smernice za dalji rad.

LITERATURA

- [1] James A. Momoh, *Electric Power Distribution, Automation, Protection, and Control*, CRC Press, 2007.
- [2] R. C. Dugan, „Challenges in Considering Distributed Generation in the Analysis and Design of Distribution Systems“, *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, 2008.
- [3] J. Bloemink and T. Green, “Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 2, pp. 911–919, Apr. 2013.
- [4] J. Flottesmesch and M. Rother, “Optimized energy exchange in primary distribution networks with dc links,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Utility Dereg., Restruct. Power Technol.*, Apr. 5–8, 2004, vol. 1, pp. 108–116.
- [5] N. Okada, „A method to determine the distributed control setting of looping devices for active distribution systems“, in *Proc. IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1–6.
- [6] C.Wang, G.Song, P.Li, et al., *Optimal Configuration of Soft Open Point for Active Distribution Network Based on Mixed-integer Second-order Cone Programming*, *Applied Energy Symposium and Forum, REM2016*, Maldives, April 2016.
- [7] C. Long, J. Wu, L. Thomas, N. Jenkins, *Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation*. *Appl Energy* 2016;184:427–437.
- [8] H. Ji, C. Wang, P. Li, J. Zhao, G. Song, J. Wu, *Quantified flexibility evaluation of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-ofconvex programming*. *Appl Energy* 2018;218:338–348.
- [9] E.Cuevas, E.B.Espejo, A.C.Enriquez, *Metaheuristics Algorithms in Power Systems*, Springer 2019.
- [10] S. Li, M. Fairbank, C.Johnson,D.C. Wunsch and E. Alonso, “Artificial Neural Networks for Control of a Grid-Connected Rectifier/Inverter under Disturbance, Dynamic and Power Converter Switching Conditions” *IEEE Trans. Neural Netw.and Learn. Syst.*, Vol. 25, Issue 4, pp. 738-750, Apr. 2014.
- [11] A. Luo, C. Tang, Z. Shuai, J. Tang, X. Xu, and D. Chen, “Fuzzy-PI-Based Direct-Output-Voltage Control Strategy for the STATCOM Used in Utility Distribution Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2401-2411, July 2009.
- [12] A. Yazdani and R. Iravani, „Voltage-sourced Converters in Power Systems“. Wiley-Blackwell, 2010.
- [13] Branko Dokić, „Energetska elektronika – pretvarači i regulatori“, *Akademski misao*, Beograd 2007.
- [14] W.Cao, J.Wu, N. Jenkins, C.Wang, T.Green, *Operating principle of Soft Open Points for electrical distribution network operation*. *Appl Energy* 2016;164:245–57.
- [15] Narayan S. Rau, „Optimization principles, Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry“, *IEEE Press Power Engineering Series*, A John Wiley & Sons Inc Publication
- [16] S. Mirjalilia, S. M. Mirjalilib, A. Lewisa, *Grey Wolf Optimizer*, *Advances in Engineering Software*, vol 69 pp. 46-61, 2014.
- [17] M. Čelić, *Linearna Algebra*, Glas Srpske, Banja Luka 2010.
- [18] D. Ivić, D.Macanović, D. Šošić, P. Stefanov, „Weakly meshed distribution networks with distributed generation — power flow analysis using improved impedance matrix based algorithm“, *The International Symposium on Industrial Electronics – INDEL*, Banja Luka 2016.