

Primjena DC portova pri zatvaranju petlji u distributivnim mrežama

Dejan Ivić, Darko Šošić, Predrag Stefanov

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija
dejan.ivic@yahoo.com, sosic@etf.rs, stefanov@etf.rs

Sažetak—Savremeni distributivni sistemi, osim osnovne uloge snabdjevanja potrošača dovoljnom količinom kvalitetne električne energije, imaju ulogu obezbijediti što efikasniju integraciju obnovljivih izvora energije kao i njihovo nesmetano učešće na deregulisanom tržištu električne energije. U takvom okruženju, prilagođenje postojećih sistema, iskorišćenje postojećih resursa i odgađanje investicija predstavljaju jedan od osnovnih zadataka pri eksploataciji distributivnih sistema. U ovom radu predložena je metodologija za zatvaranje petlji u distributivnim mrežama korišćenjem uređaja energetske elektronike. Predložena metodologija u svojoj osnovi podrazumjeva koordinaciju lokalnog upravljanja pretvaračima energetske elektronike i centralizovanog upravljanja na nivou DMS-a a sve s ciljem adekvatnog određivanja referentnih vrijednosti neophodnih za efikasno upravljanje uređajima energetske elektronike. Upravljački algoritmi, predloženi u ovom radu, testirani su pomoću računarskih simulacija na standardnoj IEEE 33 test mreži. Rezultati simulacija i izvedeni zaključci predstavljaju polaznu osnovu pri analizama efikasnosti i isplativosti primjene uređaja energetske elektronike pri zatvaranju petlji u distributivnim mrežama.

Ključne riječi—petljaste distributivne mreže; primjena DC portova u distributivnim mrežama; upravljački algoritmi u distributivnim sistemima;

I. UVOD

Koncept inteligentnih elektroenergetskih mreža sve više se realizuje u distributivnim mrežama srednjeg i niskog napona. Visok stepen automatizacije savremenih distributivnih sistema omogućava efikasnu integraciju distribuiranog generisanja i prilagođenje upravljačkih sistema promjenama nastalim usljed integracije distribuiranih generatora [1]. Primjena savremenih uređaja energetske elektronike omogućila je da se ponovo razmatraju petljaste topologije distributivnih mreža te da se zatvaranjem petlji na srednjem pa čak i niskom naponu izvrši rasterećenje distributivnih vodova i omogući plasman energije proizvedene pomoću distribuiranih generatora.

U konvencionalnim distributivnim mrežama (bez distribuiranog generisanja), radikalne topologije i sa samo jednim smjerom snage – od napojnog čvora ka potrošačima, zatvaranje petlji je izbjegavano prevashodno zbog povećanja struje kvara i pojave inverznih tokova snaga. S obzirom da integracija distribuiranih generatora neminovno donosi promjenu smjera tokova snaga po distributivnim vodovima neophodno je izvršiti prilagođenje upravljačkih algoritama i relejne zaštite. Sa tog aspekta, prilagođenjem mreže integraciji distribuiranih generatora, istovremeno je omogućeno i

upravljanje sistemom sa zatvorenim petljama [2]. Problem povećanja struja kvara usljed zatvaranja petlji u mreži efikasno se može riješiti primjenom uređaja energetske elektronike koji ograničavaju struju kvara ili čak u potpunosti sprečavaju njenu propagaciju.

U nastavku rada opisan je metod za zatvaranje petlji u distributivnim sistemima koji omogućava potpunu kontrolu tokova snaga između čvorova u mreži čijim povezivanjem se dobija razmatrana petlja. Ovakav način zatvaranja petlji u svojoj osnovi podrazumjeva primjenu energetskih pretvarača tj. *back to back* konvertora. Primjenom ovih uređaja omogućava se kontrola tokova snaga između poveznih čvorova te rasterećenje pojedinih distributivnih vodova, a sa druge strane javljaju se dodatni gubici u pretvaračima koje je nemoguće izbjeći [3], [4].

II. PRIMJENA PRETVARAČA ENERGETSKE ELEKTRONIKE PRI ZATVARANJU PETLJI U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Kao što je već spomenuto, primjenom uređaja energetske elektronike eliminišu se neželjeni efekti zatvaranja petlji u mrežama srednjeg i niskog napona. U tu svrhu najčešće se koriste takozvani *back to back* konvertori pomoću kojih se formiraju tzv. DC portovi. Detaljni principi rada kao i interni upravljački algoritmi za ovu vrstu konvertora mogu se pronaći u referencama [5],[6].

Za adekvatnu primjenu uređaja energetske elektronike neophodno je lokalnim kontrolerima obezbijediti referentne vrijednosti na osnovu kojih se postižu željeni režimi rada pretvarača kao i željeno stanje u distributivnoj mreži. Određivanje navedenih referentnih vrijednosti upravljačkih promjenjivih nemoguće je bez modelovanja uređaja energetske elektronike i inkorporiranja dobijenih modela u algoritme za proračune tokova snaga. Modelovanje uređaja energetske elektronike za potrebe proračuna tokova snaga detaljno je opisano u nastavku ovog poglavlja.

A. Modelovanje DC portova pri proračunima tokova snaga

S obzirom na karakteristike konvertora i činjenicu da njihova primjena omogućava nezavisno upravljanje aktivnom snagom u jednom od poveznih čvorova i reaktivnom snagom u oba povezna čvora pri proračunima tokova snaga DC port najlakše je modelovati pomoću injektiranja snaga u poveznim čvorovima. Za jasnije objašnjenje korišćenog modela potrebno je analizirati uprošćenu blok-šemu DC porta koje povezuje dva nezavisna distributivna fidera prikazanu na Sl. 1.

Uvažavajući analizu rada pretvarača opisanu u [5] i [7] reaktivna snaga se ne prenosi kroz razmatrano DC kolo te su injektiranja reaktivne snage u poveznim čvorovima, l i m nezavisna dok za injektiranja aktivnih snaga važi relacija:

$$P_m + P_l + P_{mgub} + P_{lgub} = 0, \quad (1)$$

gdje P_{mgub} i P_{lgub} predstavljaju gubitke u pretvaračima povezanim u čvorove m i l , respektivno. Imajući u vidu da reaktivna snaga injektiranja u poveznim čvorovima zavisi samo od odgovarajućih vektora napona, termička ograničenja pretvarača mogu se uvažiti kao:

$$\sqrt{P_l^2 + Q_l^2} \leq (S_{konvertora}^{nominalno})^2, \quad (2)$$

$$\sqrt{P_m^2 + Q_m^2} \leq (S_{konvertora}^{nominalno})^2.$$

Prethodne jednakosti (1) i (2) predstavljaju osnovni model DC porta u proračunima tokova snaga. Za efikasnu primjenu ovako definisanog modela neophodno je poznavati gubitke u pretvaračima. Gubici u pretvaračima detaljnije su razmatrani u narednom paragrafu.

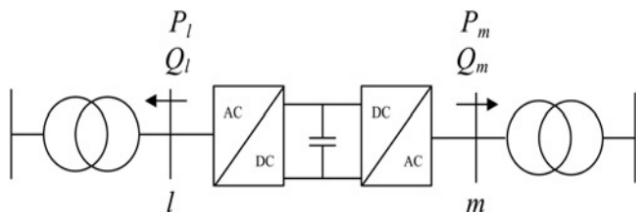
B. Modelovanje gubitaka u pretvaračima

Egzaktno modelovanje gubitaka u pretvaračima predstavlja kompleksan problem za čije rješavanje je neophodno koristiti softverske alate koji bi omogućili modelovanje tranzijentnih pojava u tranzistorima i diodama. Egzaktno modelovanje gubitaka u pretvaračima zahtijeva i angažovanje značajnih računarskih resursa što je još jedan od razloga zbog koga se precizni modeli pretvarača ne koriste za potrebe analize rada i upravljanja distirbutivnim sistemima.

Umjesto egzaktnih modela gubitaka u pretvaračima u praksi se najčešće koriste modeli gubitaka koji reprezentuju zavisnost gubitaka aktivne snage u pretvaračima od struje kroz prekidačke elemente. Jedan od najčešće korišćenih modela može se formulisati pomoću relacije (3):

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

gdje I predstavlja faznu struju kroz prekidačke elemente (par tranzistor-dioda). Koeficijenti a, b , i c prevashodno zavise od karakteristika prekidačkih elemenata korišćenih za realizaciju pretvarača. Većina proizvođača ove koeficijente daju kao kataloške podatke. S obzirom da se jedan trofazni pretvarač sastoji od šest parova tranzistor-dioda [8] prethodnu jednakost neophodno je dopuniti pa se dobija:



Sl. 1. Uprošćena blok-šema DC porta

$$P_{gubitaka} = 6(aI^2 + bI + c) \quad (4)$$

Pri računanju ukupnih gubitaka u DC portu neophodno je imati u vidu da broj pretvarača u portu zavisi od broja fidera koje se želi povezati u petlju. Shodno tome, za računanje ukupnih gubitaka u DC portu, prethodnu jednačinu neophodno je pomnožiti sa ukupnim brojem pretvarača.

Osim prethodno opisanog modela gubitaka u pretvaračima u praksi se vrlo često koristi i njegova uprošćena forma dobijena linearizacijom. Linearizovani model gubitaka u pretvaraču može se izraziti kao:

$$P_{gubitaka} = kI + c, \quad (5)$$

gdje je:

$$k = (P_{gubitaka}^{nominalno} - c) / I_{nominalno}, \quad (6)$$

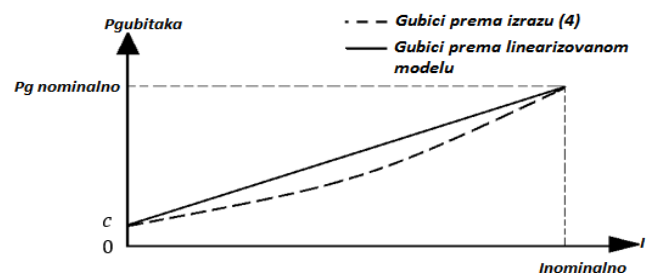
a c predstavlja gubitke u pretvaraču nezavisne od opterećenja. Razlika između linearizovanog modela gubitaka i modela definisanog jednačinom (4) ilustrovana je na Sl. 2. Pri daljnjim analizama i simulacijama u sklopu ovog rada uvažavan je linearizovani model gubitaka u pretvaračima. S obzirom na dimenzije i karakteristike mreže te karakteristike potrošača, ovakvo pojednostavljenje ne utiče na kvalitativne zaključke dobijene na osnovu rezultata simulacija.

III. OPTIMIZACIJA – FORMULACIJA PROBLEMA

Zatvaranjem petlji pomoću DC portova u distributivnoj mreži dobija se mogućnost djelimičnog upravljanja tokovima snaga po pojedinim vodovima. Adekvatnim definisanjem referentnih vrijednosti snaga koje se injektiraju u čvorovima na koje je povezan DC port može se postići željeno stanje u mreži. Pri postavljanju problema optimizacije neophodno je jasno definisati cilj koji se želi postići optimizacijom (kriterijumska funkcija), ograničenja koja moraju biti ispunjena u normalnim radnim režimima kao i modalitete kojima je moguće postići postavljeni cilj tj. željeno stanje u mreži.

A. Upravljačke promjenjive

Analizirajući model pretvarača opisan u prethodnom poglavlju kao i detaljne modele opisane u [5] lako se može zaključiti da su injektiranja reaktivnih snaga iz DC porta nezavisna kao i jedna od aktivnih snaga injektirana u mrežu. Injektiranje aktivne snage na drugom kraju porta (drugi povezni čvor) lako se izračunava pomoću relacije (1).



Sl. 2. Razmatrani modeli gubitaka u pretvaračima

Prethodno navedene nezavisne promjenjive neophodno je uključiti u proračune tokova snaga a dalje i u optimizacione algoritme u kojima figurišu kao upravljачke promjenjive. U slučaju DC porta koji spaja dva distributivna fidera (prikaz na Sl.1) vektor upravljачkih promjenjivih ima oblik:

$$x = \begin{bmatrix} P_l \\ Q_l \\ Q_m \end{bmatrix}. \quad (7)$$

U slučaju da DC port povezuje n fidera u petlju razmatranja su analogna te u vektoru upravljачkih promjenjivih figuriše ukupno $2n$ injektiranja reaktivnih snaga i $2n-1$ injektiranja aktivnih snaga u poveznim čvorovima.

B. Ograničenja pri optimizaciji

Kao što je već spomenuto pri optimizacionom postupku moraju se definisati ograničenja koja će biti zadovoljena u svakom od normalnih radnih režima. U razmatranom slučaju ograničenja se mogu podijeliti u dvije grupe: ograničenja mreže i ograničenja konvertora korišćenih za realizaciju DC porta.

Ograničenja mreže proizilaze iz karakteristika razmatrane mreže (karakteristike vodova i razvodnih postrojenja) i jednačina za proračun tokova snaga. Ograničenja mreže se dalje mogu klasifikovati u dvije grupe: ograničenja tipa jednakosti i ograničenja tipa nejednakosti. U ograničenja mreže tipa jednakosti spadaju jednačine za proračune tokova snaga koje se mogu prikazati kao:

$$P_i^{gen} - P_i^p = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + V_j B_{ij} \sin(\theta_{ij})), \quad (8)$$

$$Q_i^{gen} - Q_i^p = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - V_j B_{ij} \cos(\theta_{ij})), \quad (9)$$

gdje $i, j=1, 2, 3, \dots, m$ označavaju čvorove u mreži, P_i^{gen}, Q_i^{gen} označavaju proizvodnju a P_i^p, Q_i^p potrošnju aktivne i reaktivne snage u i -tom čvoru. Oznake G_{ij}, B_{ij} , odnose se na realni i imaginarni dio elementa matrice admitansi čvorova na poziciji i, j a $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ označava razliku faznih stavova napona čvorova i i j . Suštinski jednačine (8) i (9) predstavljaju jednačine balansa snaga u čvorovima mreže koje u svakom momentu moraju biti ispunjene.

Ograničenja mreže tipa nejednakosti odnose se na termička ograničenja vodova kao i na ograničenja napona u čvorovima mreže. Ograničenja mreže tipa nejednakosti mogu se predstaviti izrazima:

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{max}, \quad (10)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad (11)$$

gdje $I_{ij}^{max}, V_i^{min}, V_i^{max}$ označavaju granične vrijednosti struja po vodovima i napona u čvorovima mreže respektivno.

Ograničenja konvertora odnose se na termička ograničenja konvertora i ograničenje balansa aktivne snage u DC portu. Termička ograničenja konvertora su ograničenja tipa nejednakosti i mogu se predstaviti izrazom (2). Uslov balansa aktivne snage u DC portu (kroz DC link) predstavlja ograničenje tipa jednakosti i predstavljeno je jednačinom (1).

C. Formiranje kriterijuma optimizacije i kriterijumske funkcije

Uloga kriterijuma optimizacije jeste da se nedvosmisleno definiše cilj optimizacionog postupka tj. da se na osnovu definisanog kriterijuma da kvalitativna ocjena svakog od potencijalnih rješenja. Zavisno od željenog cilja kriterijumi optimizacije mogu biti različiti a za potrebe analiza rada distributivnih mreža sa DC portovima razmatrani su kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage i kriterijum optimalne raspodjele opterećenja po vodovima u mreži.

Kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage može se definisati kao:

$$\min(F_g) = \min(P_{gubitaka}^{mreze} + P_{gubitaka}^{konvertora}). \quad (12)$$

U slučaju da se kao kriterijum optimizacije razmatra optimalno opterećenje vodova u razmatranoj mreži za svaki od vodova potrebno je naći indeks opterećenja kao:

$$LI_k = (I_k / I_k^{nominalno})^2, \quad (13)$$

gdje $k=1, 2, 3, \dots, n$ broj grana (vodova u mreži). Nakon računanja indeksa opterećenja vodova u mreži kriterijum optimalne raspodjele opterećenja može se definisati kao:

$$\min\left(\sum_{k=1}^n LI_k\right). \quad (14)$$

Nakon definisanja kriterijuma optimizacije slijedi formiranje kriterijumske funkcije koja mora uvažavati i ograničenja tipa nejednakosti definisana u prethodnom odjeljku dok se ograničenja tipa jednakosti uvažavaju kroz proračune tokova snaga u mreži. Integracija ograničenje tipa nejednakosti u kriterijumsku funkciju vrši se pomoću penalnih funkcija definisanih za svako od ograničenja ponaosob. Penalna funkcija u slučaju narušavanja termičkih ograničenja vodova može se definisati kao:

$$PF_I = \sum_{k=1}^n \Delta I_k, \quad (15)$$

gdje je:

$$\Delta I_k = \begin{cases} I_k - I_k^{max}, & \text{za } I_k > I_k^{max} \\ 0, & \text{za } I_k \leq I_k^{max} \end{cases}. \quad (16)$$

Penalna funkcija za ograničenja vrijednosti modula napona u čvorovima mreže može se izraziti na sljedeći način:

$$PF_V = \sum_{i=1}^m \Delta V_i, \quad (17)$$

gdje je:

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_i^{\max} & V_i > V_i^{\max} \\ V_i^{\min} - V_i & V_i^{\min} > V_i \\ 0 & \text{za ostale vrednosti } V_i \end{cases} \quad (18)$$

Kada je riječ o penalnoj funkciji vezanoj za termička ograničenja konvertora, ona se može zapisati kao:

$$PF_{konvertora} = \sum_{h=1}^p \Delta S_h, \quad (19)$$

gdje je:

$$\Delta S_h = \begin{cases} S_h - S_h^{nominalno} & S_h > S_h^{nominalno} \\ 0 & S_h \leq S_h^{nominalno} \end{cases} \quad (20)$$

a p označava ukupan broj pretvarača koji formiraju DC port.

Poznavajući kriterijum optimizacije i penalne funkcije, definisane za svako od ograničenja, moguće je formirati kriterijumsku funkciju kao:

$$F_1 = (P_{gubitaka}^{mreze} + P_{gubitaka}^{konvertora}) + \lambda_I PF_I + \lambda_V PF_V + \lambda_C PF_{konvertora}, \quad (21)$$

u slučaju da je kao kriterijum optimizacije definisana minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage odnosno:

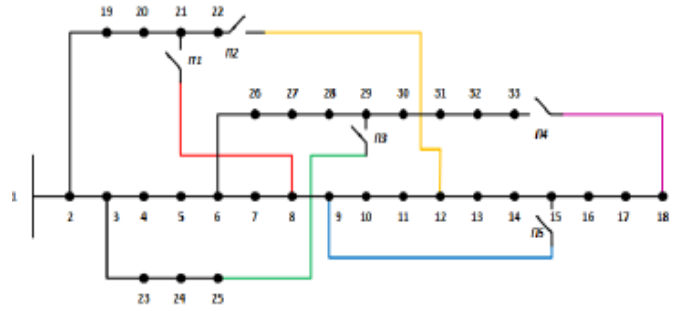
$$F_2 = \sum_{k=1}^n LI_k + \lambda_I PF_I + \lambda_V PF_V + \lambda_C PF_{konvertora}, \quad (22)$$

u slučaju da je za kriterijum optimizacije definisan optimalni balans opterećenja po granama mreže. Koeficijenti λ_I , λ_V , λ_C predstavljaju penalizacione faktore kojima se modeluje uticaj narušavanja definisanih ograničenja na kriterijumsku funkciju. Adekvatnim izborom ovih faktora praktično se eliminišu rješenja optimizacije koja ne zadovoljavaju definisana ograničenja [9].

Model opisan u prethodnim paragrafima moguće je implementirati korišćenjem neke od meta-heurističkih optimizacionih metoda. Važno je napomenuti da izbor optimizacione metode ne zavisi od definisanog modela već isključivo od željenih performansi te u ovom slučaju optimizaciona metoda predstavlja alat za implementaciju i testiranje predloženog modela.

IV. REZULTATI SIMULACIJA

Predloženi model primjene DC porta u distributivnim mrežama testiran je na IEEE 33 test mreži prikazanoj na Sl. 3. Prikazana mreža modifikovana je na način da su na mjesta normalno otvorenih prekidača postavljeni DC portovi. Ovakav izbor lokacije DC portova je opravdan s obzirom da je u praksi najjednostavnije instalirati DC portove u dijelovima razvodnih postrojenja koji su namijenjeni za rekonfiguraciju mreže. Nominalna prividna snaga konvertora (a samim tim i DC porta) fiksirana je na vrijednos od 3 MVA. Ovako usvojena vrijednost u skladu je sa parametrima realnih konvertora koji se trenutno nude na tržištu.



Sl. 3. IEEE 33 distributivna test mreža

Zbog pojednostavljenja analiza pri modelovanju gubitaka u konvertorima korišćen je linearizovani model.

Kao metoda optimizacije, korišćena pri simulacijama, odabrana je optimizacija zasnovana na algoritmu sivih vukova – *Grey Wolf Optimizer*. Navedena metoda optimizacije detaljno je opisana u [10]. Metoda optimizacije bazirana na algoritmu sivih vukova predstavlja kompromis između performansi i preciznosti sa jedne, i jednostavnosti i neophodnih računarskih resursa sa druge strane. Izbor metode optimizacije ne utiče na krajnje zaključke te je za implementaciju modela moguće koristiti i neku drugu optimizacionu metodu. Za proračun tokova snaga u mreži korišćen je modifikovani algoritam, baziran na matrici impedansi čvorova mreže, detaljno opisan u [11]. Slično kao i pri izboru metoda optimizacije, izbor algoritma za proračun tokova snaga zavisi od željenih performansi i preciznosti te se umjesto navedenog algoritma mogao koristiti i neki drugi algoritam razvijen za proračune tokova snaga u distributivnim mrežama [12].

Pri izvođenju simulacija razmatrana su oba opisana kriterijuma optimizacije, a variran je i broj DC portova u mreži. Dobijeni rezultati poređeni su kako međusobno tako i sa baznim stanjem u mreži (potpuno radijalna topologija). Za svaki od vodova u mreži definisana su termička ograničenja a ograničenja napona usvojena su kao: $V_{\min}=0,9$ r.j. i $V_{\max}=1,05$ r.j.

A. Minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage

U prvom slučaju kao kriterijum optimizacije usvojena je minimizacija ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži. Razmatrane su tri konfiguracije mreže: jedan DC link između čvorova 22 i 12, dva DC linka i to jedan između čvorova 12 i 22 i drugi između čvorova 25 i 29. Kao treći, granični, slučaj razmatrano je prisustvo 5 DC portova u mreži odnosno slučaj kada su sve petlje u mreži zatvorene koristeći DC linkove. Rezultati simulacija prikazani su u tabeli 1.

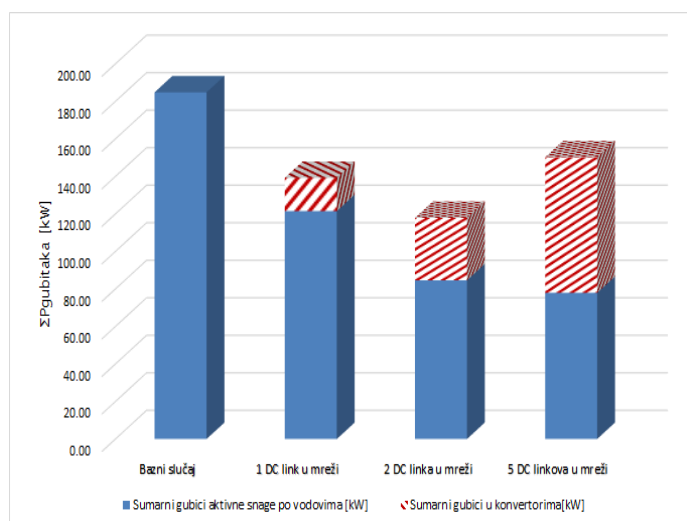
Analizirajući rezultate prikazane u tabeli 1 jasno se uočava kako dodavanjem petlji zatvorenih pomoću DC linkova opadaju gubici u distributivnim vodovima a javljaju se gubici u konvertorima. Struktura ukupnih gubitaka aktivne snage za razmatrane karakteristične slučajeve prikazana je na Sl. 4. Zatvaranjem jedne petlje u mreži ukupni gubici aktivne snage smanjuju se za više od 24% u odnosu u na bazni slučaj. Udio gubitaka u konvertorima u ukupnim gubicima u ovom slučaju iznosi 14,6%.

TABELA I. REZULTATI SIMULACIJA – MINIMIZACIJA SUMARNIH GUBITAKA AKTIVNE SNAGE

	Bazni slučaj	1 DC link u mreži	2 DC linka u mreži	5 DC linkova u mreži
Sumarni gubici aktivne snage po vodovima [kW]	184,7572	121,5028	84,5903	77,8684
Sumarni gubici u konvertorima [kW]	-	17,7192	33,2780	72,2986
Minimalna vrijednost napona u mreži	0,9176 r.j. čvor 18	0,9381 r.j. čvor 33	0,9641 r.j. čvor 33	0,969 r.j. čvor 32

Također, iz rezultata simulacija vidljivo je značajno poboljšanje naponskog profila u mreži. Minimalni napon sa 0,9176 r.j. u baznom slučaju povećava se na 0,969 r.j. u slučaju sa 5 DC linkova u mreži. Maksimalna vrijednost napona u svim simuliranim slučajevima ne prelazi 1,00 r.j. (vrijednost održavana u napojnom čvoru) što je direktna posljedica ograničenja usvojenih pri simulacijama. Povećanjem broja petlji u mreži tj. povećanjem broja DC portova u mreži ukupni gubici aktivne snage u mreži i dalje se smanjuju ali dolazi do značajnog porasta gubitaka u konvertorima. Ovakav rezultat je i očekivan s obzirom da porastom broja petlji raste i broj konvertora neophodnih za njihovo zatvaranje te gubici u konvertorima imaju značajne vrijednosti. Kao granični slučaj analizirana je topologija sa 5 petlji u mreži tj. 5 DC portova jedinične nominalne snage 3 MVA. U ovom slučaju gubici u vodovima su značajno manji u odnosu na bazni slučaj. Na uštrb smanjenja gubitaka po vodovima za više od 57% povećani su gubici u konvertorima koji su približno jednaki gubicima u distributivnim vodovima.

Iz prethodno navedenih rezultata mogu se generalizovati sljedeći zaključci. Dodavanjem petlji u mreži pomoću DC portova moguće je značajno smanjiti gubitke u distributivnim vodovima i na taj način izvršiti neophodna rasterećenja. Međutim, usljed dodavanja DC portova javljaju se gubici u konvertorima koji utiču na sumarne gubitke u mreži.



Sl. 4. Struktura ukupnih gubitaka aktivne snage

U slučaju velikog broja konvertora smanjenje gubitaka u vodovima vrši se na način da se dio tih gubitaka eliminiše usljed rasterećenja vodova a istovremeno rastu gubici u konvertorima koji mogu biti jednaki ili čak i veći od gubitaka u vodovima. Pri ovoj analizi važno je napomenuti da gubici u konvertorima zavise i od nominalne snage samih konvertora te se adekvatnim dimenzionisanjem konvertora ovi gubici mogu redukovati. Izbor tipa konvertora i njegovi parametri prevashodno zavise od željenih performansi sa jedne i finasijskih ograničenja sa druge strane te nisu tema ovog rada.

B. Preraspodjela opterećenja vodova u mreži

Drugi dio simulacija realizovan je uvažavajući balans opterećenja distributivnih vodova kao kriterijum optimizacije. Za svaki od vodova u mreži usvojene su termičke granice te je relativno opterećenje vodova računato za svaki od prethodno navedenih slučajeva (bazni slučaj, 1 DC link u mreži, 2 DC linka i 5 DC linkova u mreži). Rezultati simulacija prikazani su u tabeli 2. Iz rezultata prikazanih u tabeli 2 lako se uočava da se značajno rasterećenje vodova postiže već dodavanjem samo jednog DC linka u mreži. Zatvaranjem petlji pomoću DC linkova u mreži dobija se potpuna preraspodjela opterećenja te se opterećenje sa napojne grane (između čvorova 1 i 2) rapodjeljuje na ostale grane u mreži. Pri tome, grane koje su direktno povezane sa čvorovima na koje su vezani DC linkovi postaju najopterećenije grane u mreži.

Preraspodjelom opterećenja vodova u mreži značajno se poboljšava i naponski profil mreže što je ilustrovano na Sl. 5. Poboljšanje naponskih prilika u mreži direktna je posljedica rada DC portova a osim snage koja se injektira ka mreži značajno zavisi i od lokacije DC porta kao i od karakteristika potrošača u mreži.

V. ZAKLJUČAK

Primjenom uređaja energetske elektronike omogućava se zatvaranje petlji u distributivnim mrežama uz mogućnost kontrole tokova snaga u određenim dijelovima mreže. Predložena upravljačka strategija omogućava integraciju DC portova u proračune tokova snaga bez detaljnog modelovanja energetskih pretvarača što značajno smanjuje neophodne računarske resurse i znatno olakšava implementaciju upravljačkog algoritma.

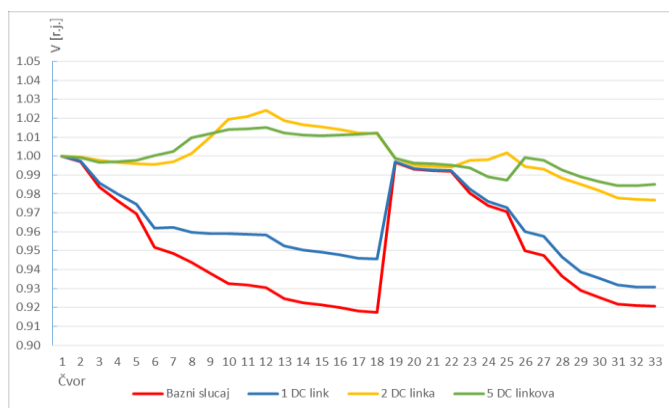
Optimizacioni okvir opisan u prethodnim poglavljima primjenjiv je bez obzira na to koja se metoda optimizacije koristi za njegovu realizaciju. Kriterijumi optimizacije postavljeni su na način da se prikažu različiti efekti koji se mogu postići zatvaranjem petlji pomoću DC linkova u distributivnim mrežama.

Na osnovu računarskih simulacija demonstriran je uticaj DC linkova na prilike u mreži. Kao glavna prednost primjene DC linkova javlja se značajno rasterećenje distributivnih vodova te povećanje efikasnosti distributivne mreže. Rasterećenjem postojećih resursa odgađaju se investicije u proširenje distributivne mreže te se otvara mogućnost eventualnog plasmana dodatne energije proizvedene iz distribuiranih generatora.

TABELA II. RELATIVNA OPTEREĆENJA VODOVA

Grana (vod)		Bazni slučaj	1 DC link u mreži	2 DC linka u mreži	5 DC linkova u mreži
Čvor 1	Čvor 2	I [%]	I [%]	I [%]	I [%]
1	2	92.41%	82.80%	21.62%	27.16%
2	3	81.88%	70.63%	11.50%	17.40%
3	4	58.81%	47.44%	10.34%	3.75%
4	5	55.88%	44.62%	8.55%	6.61%
5	6	54.46%	43.21%	7.81%	8.00%
6	7	25.54%	22.74%	14.68%	28.06%
7	8	20.63%	20.04%	19.28%	32.49%
8	9	15.69%	18.26%	23.90%	9.13%
9	10	14.30%	17.79%	25.22%	5.88%
10	11	12.99%	17.43%	26.54%	7.03%
11	12	11.87%	17.50%	27.63%	8.13%
12	13	10.53%	10.44%	10.30%	6.95%
13	14	9.09%	9.00%	8.86%	6.14%
14	15	5.91%	5.91%	5.93%	5.19%
15	16	4.76%	4.73%	4.68%	5.48%
16	17	3.44%	3.41%	3.37%	6.19%
17	18	2.24%	2.17%	2.05%	7.07%
2	19	26.24%	32.54%	26.14%	24.10%
19	20	19.69%	26.49%	19.58%	18.01%
20	21	13.13%	20.74%	13.01%	12.42%
21	22	6.51%	15.62%	6.45%	8.44%
3	23	42.63%	42.66%	3.58%	38.37%
23	24	38.26%	38.30%	4.87%	34.47%
24	25	19.38%	19.38%	23.24%	18.13%
6	26	68.35%	68.02%	46.04%	46.00%
26	27	65.39%	65.06%	43.12%	43.02%
27	28	62.30%	62.00%	40.25%	40.07%
28	29	59.61%	59.30%	37.41%	37.16%
29	30	53.16%	52.85%	51.00%	40.33%
30	31	23.19%	23.23%	23.48%	21.42%
31	32	14.92%	14.96%	15.21%	15.54%
32	33	2.77%	2.80%	3.00%	10.88%

Kao osnovni nedostatak primjene DC linkova u distributivnim mrežama figurišu gubici u energetskim pretvaračima. Gubici u pretvaračima zavise kako od karakteristika pretvarača tako i od njihovog opterećenja i od željenog režima rada. Povećanjem broja DC linkova u mreži dolazi do značajnog porasta gubitaka u pretvaračima (usljed porasta neophodnog broja energetskih pretvarača), poskupljuje realizaciju sistema, a sa druge strane ne dovodi do značajnijeg smanjenja ukupnih gubitaka. Odabir broja DC linkova u mreži i njihovo pozicioniranje predstavlja složenu problematiku te može poslužiti kao proširenje naučno-istraživačkog rada u ovoj oblasti.



Sl. 5. Naponski profil mreže

VI. LITERATURA

- [1] 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.
- [2] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, T. Green, „Operating principle of Soft Open Points for electrical distribution network operation“, Applied Energy no. 164, 2016, pp. 245-257.
- [3] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, T. Green, „Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation“, Applied Energy no. 165, 2016, pp. 36-47.
- [4] C. Wang, G. Song, P. Li, H. Ji, J. Zhao, J. Wu, „Optimal Configuration of Soft Open Point for Active Distribution Network Based on Mixed-integer Second-order Cone Programming“, Applied Energy Symposium and Forum, REM2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid, Maldives April 2016.
- [5] A. Yazdani and R. Iravani, „Voltage-sourced Converters in Power Systems“. Wiley-Blackwell, 2010.
- [6] 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.
- [7] E. Romero-Ramos, A. Gómez-Expósito, A. Marano-Marcolini, and J. Maza-Ortega, „Assessing the loadability of active distribution networks in the presence of DC controllable links“, Generation, Transmission and Distribution, IET, vol. 5, no. 11, pp. 1751–8687, Nov. 2011.
- [8] Branko Dokić, „Energetska elektronika – pretvarači i regulatori“, Akademiska misao, Beograd 2007.
- [9] 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
- [10] D. Šošić, „Metode određivanja raspoloživog prenosnog kapaciteta u visokonaponskim prenosnim mrežama elektroenergetskog sistema“, doktorska disertacija, ETF Beograd 2015.
- [11] 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.
- [12] D. Shirmohammadi, H. M. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, "A Compensation based Power Flow for weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 3, pp. 753-762, 1988.

ABSTRACT

Except the basic role, to deliver enough quantity of electric energy at proposed quality level, modern distribution systems have to enable easy integration of distributed generators and their participating in deregulated energy market. In that circumstances, adjusting and exploiting existing resources in order to avoid and postpone reinforcement investments are classified as main goals during distribution system's exploitation. Methodology for closing loops using power electronics devices is proposed in this paper. Coordination between local control of power electronics devices and centralized DMS control define a core of proposed control strategy whose main purpose is achieving referent values for power electronics local controllers. Control algorithms proposed in this paper are tested on IEEE 33 bus network using computer simulations. Conclusions derived based on simulation results can serve as starting points for future efficiency and cost-benefit analysis.

DC SOFT OPEN POINTS -IMPLEMENTATION FOR CLOSING LOOPS IN DISTRIBUTION NETWORKS

Dejan Ivic, Darko Sosic, Predrag Stefanov