

Virtuelni sistem za skladištenje električne energije realizovan pomoću stanice za punjenje električnih vozila

Dejan Ivić, Željko Đurišić
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Republika Srbija
dejan.ivic@yahoo.com; djurisic@etf.rs;

Nikola Ćubić
Elektroprenos A.D.
Banja Luka, Bosna i Hercegovina
cubicnikola@gmail.com;

Sažetak—Savremeni distributivni sistemi, naročito u urbanim okruženjima, često su veoma opterećeni ili pak rade na granici preopterećenja. Integracija distribuiranih generatora u distributivni sistem vrlo često može i dodatno opteretiti sistem. Koncept predložen u ovom radu u svojoj osnovi obuhvata koordinaciju rada distribuiranih generatora i stanica za punjenje električnih vozila (kontrolabilne potrošnje) s ciljem optimalnog rada sistema u pogledu minimizacije gubitaka aktivne snage i/ili rasterećenja vodova u distributivnoj mreži. Optimizacioni okvir predložen u ovom radu primjenjiv je bez obzira na korišćenu metodu optimizacije i ukupan broj generatora i kontrolabilnih potrošača u mreži. Osim toga, predloženi algoritam podrazumijeva primjenu višekriterijumske optimizacije te se shodno tome omogućava održavanje više značajnih parametara mreže u dozvoljenim okvirima.

Ključne riječi—virtuelno skladištenje energije; distribuirano generisanje; kontrolabilna potrošnja; upravljački algoritmi; stanice za punjenje električnih vozila;

I. UVOD

Koncept „pametnih mreža“ (*Smart Grid*) i penetracija obnovljivih izvora energije donose značajne promjene koje se najviše manifestuju u mrežama srednjeg i niskog napona. Integracija većeg broja generatora, pretežno manjih kapaciteta, suštinski mijenja „tradicionalni“ koncept distributivnih mreža te se javlja potreba za novim upravljačkim algoritimima koji će omogućiti rad sistema sa što je moguće većom proizvodnjom distribuiranih generatora a da se istovremeno ne naruše kriterijumi stabilnosti i sigurnosti sistema [1]. Funkcionisanje sistema u ovakvim uslovima podrazumijeva da se u sistemu vrši upravljanje svim komponentama sistema koje imaju tu mogućnost a sve sa ciljem ostvarenja optimalnog stanja u mreži. Uzimajući u obzir veliku dimenzionalnost distributivnih sistema, veliki broj potrošača te potencijalno veliki broj distribuiranih generatora upravljački algoritmi koji se koriste moraju omogućiti nesmetan rad sa velikim brojem promjenjivih te istovremeno biti robusni i što je moguće jednostavniji za implementaciju. Prethodni zahtjevi su po

svojoj prirodi protivrječni te je realizacija upravljačkih algoritama zasnovana na kompromisu između zahtjevanih performansi sa jedne i složenosti i dostupnih resursa sa druge strane.

Osim poteškoća pri integraciji distribuiranog generisanja [2], distributivni sistemi vrlo često su suočeni sa problemima preopterećenja i visokih gubitaka. Kao jedno od potencijalnih rješenja ovih problema javlja se primjena virtuelnih sistema za skladištenje energije u kombinaciji za adekvatnim upravljačkim algoritimima. Virtuelni sistemi za skladištenje električne energije zasnivaju se na mogućnosti upravljanja određenim grupama potrošača s ciljem rasterećenja mreže ili pojedinih dijelova mreže kada je to neophodno. Realizacija ovakvih sistema prevashodno zavisi od tipa i karakteristika potrošnje koja čini virtuelni sistem za skladištenje električne energije. Aktuelna istraživanja i praktične primjene virtuelnih sistema za skladištenje električne energije najviše su orijentisana ka sistemima zasnovanim na termogenim potrošačima [3] ili potrošačima čija se primarna uloga ogleda u sistemima za grijanje/hlađenje i ventilaciju [4].

Zahvaljujući svojim karakteristikama, različitim kapacitetima i načinu povezivanja na mrežu stanice za punjenje električnih vozila izuzetno su pogodne za realizaciju virtuelnih sistema za skladištenje električne energije. Uključivanjem stanica za punjenje električnih vozila u virtuelni sistem za skladištenje električne energije djelimično se kompenzuje stohastička priroda potrošnje pri radu stanica u režimu punjenja što se konačnici manifestuje kroz rasterećenje mreže i funkcionisanje sistema u normalnim radnim režimima.

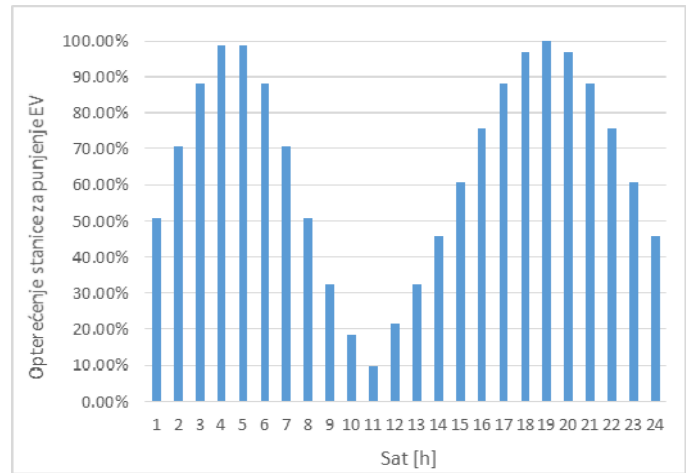
U poglavljima koja slijede opisani su načini modelovanja virtuelnog sistema za skladištenje električne energije kao i njegova interakcija sa ostatkom sistema. Modeli koji su razvijeni omogućavaju inkorporiranje virtuelnog sistema za skladištenje električne energije u algoritme za proračune tokova snaga i dalje u složenije upravljačke algoritme. Predloženi modeli inkorporirani su proračune tokova snaga i optimizacioni postupak te testirani na IEEE 33 test mreži.

II. MODELOVANJE STANICE ZA PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA

U svrhu realizacije virtuelnog sistema za skladištenje električne energije stanica za punjenje električnih vozila modelovana je kao potpuno kontrolabilna potrošnja konstantne snage. Za analize opisane u nastavku rada nije neophodno detaljno modelovanje samih baterija u električnim vozilima. Detaljne karakteristike baterija, njihovo modelovanje kao i interni upravljački algoritmi koji omogućavaju rad stanice za punjenje, posmatrano od mjesta konekcije stanice na mrežu ka pojedinim vozilima, opisani su u [5].

Pri modelovanju u proračunima tokova snaga stanica za punjenje električnih vozila modeluje se u zavisnosti od režima rada. Pri punjenju električnih vozila, stanica za punjenje se modeluje kao negativna snaga injektiranja – potrošnja. Realizacija virtuelnog sistema za skladištenje električne energije vrši se na način da kada je to neophodno potrošnja stanice za punjenje električnih vozila može biti smanjena. Ovakvo smanjenje potrošnje suštinski predstavlja pandan ograničenju vršne potrošnje u konvencionalnim distributivnim sistemima (*peak shadding*). Pri smanjenju potrošnje stanice za punjenje električnih vozila moraju se uvažiti i minimalni zahtjevi korisnika električnih vozila te se punjenje vozila i u ovom slučaju nastavlja ali sa znatno manjim intenzitetom. Uobičajeno je da se u slučaju preopterećenja mreže potrošnja stanice smanjuje na 20-30%. Osnovni problem pri realizaciji prethodno opisanog sistema predstavlja stohastička priroda potrošnje električne energije u samoj stanici za punjenje električnih vozila. Naime, prisustvo vozila na stanici za punjenje kao i količina energije koja se pri njihovom punjenju uzima iz mreže su u opštem slučaju slučajne promjenjive.

Uprkos stohastičkoj prirodi, dolazak vozila na punjenje i količina neophodne energije mogu se u određenoj mjeri predvidjeti na osnovu navika korisnika električnih vozila ili još bolje, na osnovu dostupnih podataka mjerenih tokom određenog vremenskog perioda. Za potrebe analiza provedenih u poglavljima koja slijede, prisustvo vozila na stanici za punjenje (a samim tim i ukupna potrošnja stanice) modelovano je pomoću Gausove raspodjele vjerovatnoće [6]. Ovakvo modelovanje primjenjeno je nezavisno za dva intervala tokom jednog dana i to: 08:00h -18:00h i 18:00h – 08:00h. Usvojeni model ilustriran je grafički na Sl. 1. Dijagram prikazan na Sl.1 polazni je osnov za analizu uticaja stanice za punjenje električnih vozila na stanje u distributivnoj mreži. Posmatrano iz ugla upravljanja potrošnjom, i algoritma predloženog u ovom radu, prethodni dijagram predstavlja i osnovu za određivanje dostupnih kapaciteta za eventualno rasterećenje mreže. U slučaju prisustva većeg broja stanica za punjenje električnih vozila u mreži, svaku od stanica neophodno je modelovati zasebnim dijagramom opterećenja. Upravljački algoritam predložen u ovom radu funkcioniše bez obzira na broj stanica za punjenje električnih vozila u mreži i bez obzira na oblike dijagrama potrošnje za svaku od razmatranih stanica. Optimizacija stanja u mreži vrši se koristeći dostupne kapacitete te shodno tome dijagram potrošnje odnosno dostupan kapacitet za rasterećenje mreže u optimizacionom algoritmu figuriše kao jedno od definisanih ograničenja.



Slika 1. Dnevni dijagram opterećenja stanice za punjenje električnih vozila

III. OPTIMIZACIONI OKVIR

Prisustvom stanice za punjenje električnih vozila u distributivnoj mreži (upravljiva potrošnja) omogućava se djelimično upravljanje tokovima snaga u mreži. Zavisno od lokacije stanice za punjenje električnih vozila, njenog kapaciteta i karakteristika same mreže, adekvatnim upravljanjem moguće je izvršiti rasterećenje mreže u trenucima kada je to neophodno. Algoritam predložen u ovom radu podrazumijeva centralizovano upravljanje potrošnjom stanice za punjenje električnih vozila i distribuiranim generatorima u mreži. Shodno tome optimizacioni okvir formira se za razmatranu distributivnu mrežu kao cjelinu. U paragrafima koji slijede jasno su definisani ciljevi optimizacije, modusi koji omogućavaju ostvarenje tih ciljeva (upravljačke promjenjive) kao i ograničenja tj. uslovi koji moraju biti ispunjeni tokom normalnih radnih režima u mreži.

A. Upravljačke promjenjive

Vektor upravljačkih (nezavisnih) promjenjivih obuhvata sve veličine korišćene za uspostavljanje optimalnog stanja u mreži. U razmatranom slučaju ovaj vektor sastoji se od: vrijednosti aktivne snage dostupne za rasterećenje mreže (smanjenje potrošnje stanice za punjenje električnih vozila) i vrijednosti injektiranja snaga za svaki od generatora u mreži. Važno je napomenuti da se pri formiranju vektora nezavisnih promjenjivih moraju uvažiti režimi rada svakog od generatora u mreži ponaosob. Shodno tome u vektoru nezavisnih promjenjivih, zavisno od režima rada generatora, mogu figurisati i aktivne i reaktivne snage injektiranja. U najjednostavnijem slučaju sa samo jednom stanicom za punjenje električnih vozila i samo jednim generatorom u mreži koji proizvodi samo aktivnu snagu vektor nezavisnih promjenjivih ima oblik:

$$x = \begin{pmatrix} P_s \\ P_g \end{pmatrix}, \quad (1)$$

gdje P_s označava neophodno smanjenje potrošnje stanice za punjenje električnih vozila a P_g proizvodnju generatora. U

slučaju n stanica za punjenje električnih vozila i m generatora u mreži teoretski maksimalan broj nezavisnih promjenjivih iznosi $n+2m$.

B. Ograničenja optimizacionog postupka

Ograničenja pri optimizaciji definisana su uslovima neophodnim za rad sistema u normalnom radnom režimu. U razmatranom slučaju distributivne mreže sa distribuiranim generatorima i stanicom za punjenje električnih vozila ograničenja optimizacionog postupka mogu se podijeliti u tri grupe: ograničenja mreže, ograničenja generatora i ograničenja stanice za punjenje električnih vozila.

Ograničenja mreže definisana su karakteristikama vodova i razvodnih postrojenja u mreži kao i jednačinama za proračun tokova snaga. Ograničenja mreže dijele se u dvije grupe: ograničenja tipa jednakosti i ograničenja tipa nejednakosti. Ograničenja mreže tipa jednakosti suštinski su jednačine balansa snaga u mreži koje se mogu zapisati kao:

$$P_i^{gen} - P_i^p = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + V_j B_{ij} \sin(\theta_{ij})), \quad (2)$$

$$Q_i^{gen} - Q_i^p = V_i \sum_j (V_j G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - V_j B_{ij} \cos(\theta_{ij})), \quad (3)$$

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 .

Termička ograničenja vodova i ograničenja napona u čvorovima mreže predstavljaju ograničenja mreže tipa nejednakosti koja se mogu zapisati kao:

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{max}, \quad (4)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad (5)$$

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

Ograničenja generatora u mreži definisana su nominalnom snagom generatora tj. maksimalnom mogućom proizvodnjom generatora u razmatranom trenutku. Ograničenja generatora su takođe tipa nejednakosti i mogu se definisati koristeći izraz (6):

$$S_g \leq S_g^{dostupno} \leq S_g^{no\ min\ a\ ln\ o}, \quad (6)$$

gdje S_g označava trenutnu prividnu snagu generatora.

Ograničenja stanice za punjenje električnih vozila definisana su dijagramom potrošnje stanice za punjenje električnih vozila odnosno dozvoljenim smanjenje potrošnje stanice za punjenje električnih vozila. U praktičnom dijelu rada minimalna potrošnja stanice za punjenje električnih vozila definisana je kao 20% vrijednosti definisanih dijagramom potrošnje. Shodno tome dostupno smanjenje potrošnje stanice za punjenje električnih vozila pri izvođenju simulacija

definisano je kao 80% od vrijednosti definisanih dijagramom potrošnje.

C. Kriterijum optimizacije i kriterijumska funkcija

Kriterijum optimizacije definiše cilj optimizacionog postupka tj. omogućava kvalitativno rangiranje potencijalnih rješenja. Zavisno od željenog cilja kriterijumi optimizacije mogu biti različiti. Dva kriterijuma koja se najčešće koriste u praksi a razmatrana su i u ovom radu su kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage u mreži i kriterijum optimalnog opterećenja vodova u mreži.

Kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage može se definisati kao:

$$\min(F_g) = \min(P_{gubitaka}^{mreze}) = \min\left(\sum_{k=1}^L P_k^{gubitaka}\right), \quad (7)$$

gdje L označava ukupan broj vodova u mreži.

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

$$LI_k = \left(I_k / I_k^{nominalno}\right)^2, \quad (8)$$

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

$$\min\left(\sum_{k=1}^L LI_k\right). \quad (9)$$

Nakon definisanja kriterijuma optimizacije neophodno je formirati kriterijumsku funkciju koja mora uvažavati i ograničenja definisana u prethodnom odjeljku. Ograničenja tipa jednakosti u optimizacioni postupak integrisana su kroz proračune tokova snaga. Integracija ograničenja tipa nejednakosti u kriterijumsku funkciju vrši se pomoću penalnih funkcija nezavisno definisanih za svako od ograničenja. Penalna funkcija u slučaju narušavanja termičkih ograničenja vodova može se definisati kao:

$$PF_I = \sum_{k=1}^L \Delta I_k, \quad (10)$$

gdje je:

$$\Delta I_k = \begin{cases} I_k - I_k^{max}, & \text{za } I_k > I_k^{max} \\ 0, & \text{za } I_k \leq I_k^{max} \end{cases}. \quad (11)$$

Penalna funkcija za ograničenja vrijednosti modula napona u svakom od m čvorova mreže može se izraziti na sljedeći način:

$$PF_V = \sum_{i=1}^m \Delta V_i, \quad (12)$$

gdje je:

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_i^{\max} & V_i > V_i^{\max} \\ V_i^{\min} - V_i & V_i^{\min} > V_i \\ 0 & \text{za ostale vrednosti } V_i \end{cases} \quad (13)$$

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

$$PF_{gen} = \sum_{h=1}^{ng} \Delta S_h, \quad (14)$$

gdje je:

$$\Delta S_h = \begin{cases} S_h - S_h^{\text{dostupno}} & S_h > S_h^{\text{dostupno}} \\ 0 & S_h \leq S_h^{\text{dostupno}} \end{cases}, \quad (15)$$

a ng označava ukupan broj distribuiranih generatora u mreži.

Na osnovu zadatog kriterijuma optimizacije i penalnih funkcija, definisanih za svako od ograničenja, moguće je formirati kriterijumsku funkciju kao:

$$F_1 = P_{gubitaka}^{mreze} + \lambda_I PF_I + \lambda_V PF_V + \lambda_g PF_{gen}, \quad (16)$$

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

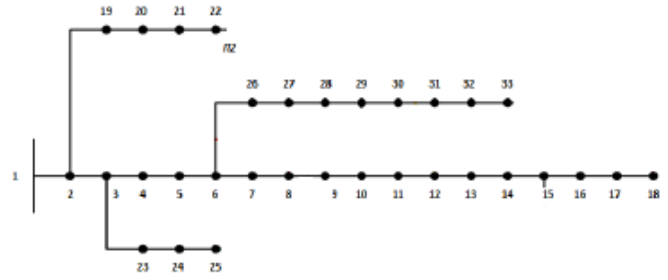
$$F_2 = \sum_{k=1}^L LI_k + \lambda_I PF_I + \lambda_V PF_V + \lambda_g PF_{gen}, \quad (17)$$

u slučaju da je za kriterijum optimizacije definisan optimalni balans opterećenja po granama mreže. Koeficijenti λ_I , λ_V , λ_g predstavljaju penalizacione faktore kojima se modeluje uticaj definisanih ograničenja na kriterijumsku funkciju. Adekvatnim izborom ovih faktora praktično se eliminišu rješenja optimizacije koja ne zadovoljavaju definisana ograničenja [7].

Optimizacioni postupak, koji je prethodno opisan, 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 upravljački algoritam implementiran je i testiran na IEEE 33 test mreži prikazanoj na Sl. 2. Pri simulacijama razmatran je slučaj sa jednim generatorom – solarnom elektranom i jednom stanicom za punjenje električnih vozila povezanim na razmatranu mrežu. Lokacije generatora i stanice za punjenje vozila izabrane su proizvoljno a simulacije su vršene u slučaju kada je električna udaljenost između stanice za punjenje električnih vozila i solarne elektrane mala i u slučaju kada je ta udaljenost velika.

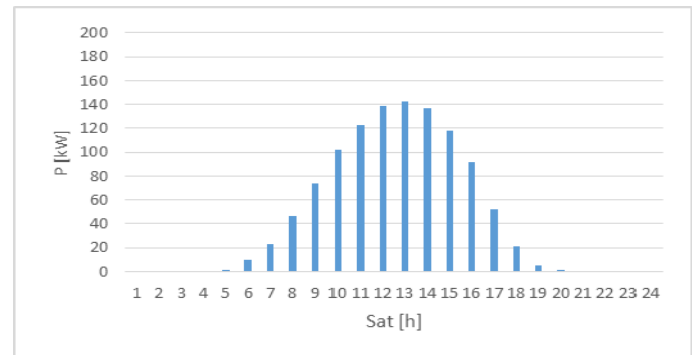


Slika 2. IEEE test mreža

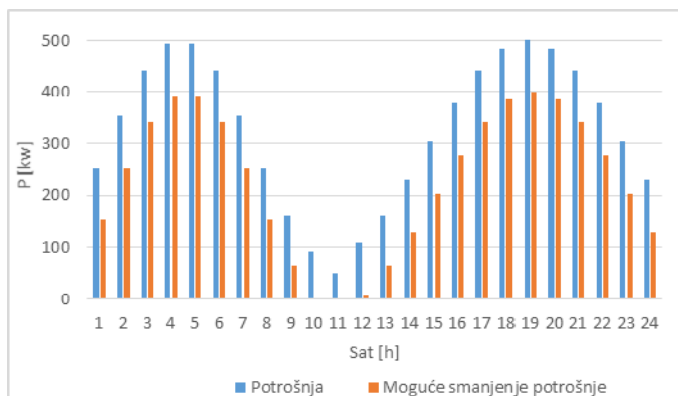
Simulacije su vršene za period od jednog dana (24 časa) sa satnom diskretizacijom. Stanica za punjenje električnih vozila modelovana je shodno Sl.1 a solarna elektrana modelovana je na osnovu izmjerenog intenziteta sunčeve insolacije na području Beograda tokom jednog julskog dana.

Kao metoda optimizacije, korišćena pri simulacijama, odabrana je optimizacija zasnovana na algoritmu sivih vukova – *Grey Wolf Optimizer*. Navedena metoda optimizacije detaljno je opisana u [8]. 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 [9]. 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.

U prvom simuliranom slučaju stanica za punjenje električnih vozila, nominalne snage 500 kW, locirana je u čvoru 12 a fotonaponska elektrana, nominalne snage 200 kW, locirana je u čvoru 10. Dijagram proizvodnje solarne elektrane i dijagram potrošnje stanice za punjenje električnih vozila prikazani su na Sl. 3 i Sl. 4 respektivno. Kao kriterijum optimizacije razmatrani su sumarni gubici aktivne snage u mreži. Pokretanje optimizacije uslovljeno je prekoračenjem dozvoljenog opterećenja grane 1-2. Ovo opterećenje, u pokazne svrhe, pri simulacijama je ograničen na 4.75 MVA. Rezultati simulacija u prvom slučaju prikazani su u Tabeli 1.



Slika 3. Proizvodnja solarne elektrane

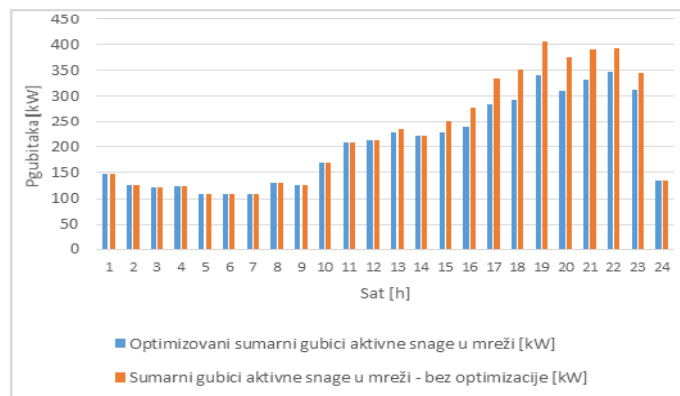


Slika 4. Potrošnja stanice za punjenje električnih vozila

Ukupni gubici u mreži u slučaju sa i bez optimizacije prikazani su na Sl. 5. Analizirajući rezultate simulacija prikazane u Tabeli 1 evidentno je da e optimizacioni postupak izvršava samo u definisanim intervalima tj. kada opterećenje grane 1-2 prekorači dozvoljenu vrijednost.

TABELA I. REZULTATI SIMULACIJA – PRVI SLUČAJ

Sat	Ukupna potrošnja mreže [MVA]	Dostupno smanjenje Pstanice [kW]	Optimalno smanjenje Pstanice [kW]	Dostupna proizvodnja PV [kW]	Optimalna proizvodnja PV [kW]
1	3,9743	153,1500	0,0000	0,0000	0,0000
2	3,5581	253,3000	0,0000	0,0000	0,0000
3	3,4162	341,2500	0,0000	0,0000	0,0000
4	3,4126	393,1000	0,0000	0,0000	0,0000
5	3,1918	393,1000	0,0000	1,2175	1,2175
6	3,3063	341,2500	0,0000	9,8979	9,8979
7	3,4071	253,3000	0,0000	22,5534	22,5534
8	3,8312	153,1500	0,0000	46,0581	46,0581
9	3,8379	62,3500	0,0000	74,1124	74,1124
10	4,2020	0,0000	0,0000	102,2367	102,2367
11	4,5682	0,0000	0,0000	122,9020	122,9020
12	4,7342	8,1500	0,0000	138,5477	138,5477
13	4,7972	62,3500	62,3500	142,6417	142,6417
14	4,6674	128,9000	0,0000	136,6867	136,6867
15	4,8013	203,2500	203,2500	118,3701	118,3701
16	4,9160	277,4000	277,4000	91,1977	91,1977
17	5,2625	341,2500	341,2500	51,6851	51,6851
18	5,2850	384,6000	384,6000	21,2843	21,2843
19	5,5979	400,0000	400,0000	4,8078	4,8078
20	5,5179	384,6000	384,6000	0,1716	0,1716
21	5,7485	341,2500	341,2500	0,0000	0,0000
22	5,8127	277,4000	277,4000	0,0000	0,0000
23	5,5531	203,2500	203,2500	0,0000	0,0000
24	3,7643	128,9000	0,0000	0,0000	0,0000



Slika 5. Sumarni gubici aktivne snage u mreži

Optimalne vrijednosti nezavisnih varijabli u ovom slučaju jednake su maksimalnim vrijednostima proizvodnje fotonaponske elektrane i smanjenja potrošnje stanice za punjenje električnih vozila. Ovakvi rezultati su direktna posljedica izabranih lokacija fotonaponske elektrane i stanice za punjenje električnih vozila kao i njihovih relativno malih nominalnih snaga u odnosu na ukupnu potrošnju u mreži. Kao što je vidljivo sa Sl. 5 u satima kada se vrši optimizacija smanjenje gubitaka u mreži je značajno. Maksimalno smanjenje gubitaka koje se postiže optimizacijom iznosi 17,14 %.

U drugom slučaju simuliran je rad stanice za punjenje električnih vozila nominalne snage 2500 kW i fotonaponske elektrane nominalne snage 1000 kW. Stanica za punjenje električnih vozila locirana je u čvoru 12 dok je fotonaponska elektrana locirana u čvoru 33. Kao kriterijum optimizacije definisano je optimalno opterećenje vodova u mreži. Cilj simulacija sa ovako definisanim parametrima jeste da se pokaže situacija u kojoj se na distributivnu mrežu priključuju distribuirani generatori i potrošači većih kapaciteta. Rezultati simulacija u ovom slučaju prikazani su u Tabeli 2.

Razmatrajući rezultate simulacija prikazane u Tabeli 2 lako se može zaključiti kako u ovom slučaju fotonaponska elektrana nije u mogućnosti plasirati svu dostupnu snagu. Ovakav zaključak posljedica je definisanih termičkih ograničenja vodova i definisane lokacije fotonaponske elektrane. Takođe u nekim satima kada je neophodno vršiti optimizaciju smanjenje potrošnje stanice za punjenje električnih vozila je znatno manje u odnosu na dostupno smanjenje snage za potrebe optimizacije opterećenja vodova u mreži.

Kao dodatak rezultatima simulacija u oba razmatrana slučaja važno je napomenuti da se naponi u čvorovima mreže shodno ograničenjima optimizacije održavaju u definisanim granicama tokom cjelokupnog simuliranog intervala od 24 časa. Takođe, zahvaljujući definisanim ograničenjima optimizacije, u satima kada se optimizacija vrši ne dolazi do preopterećenja vodova u mreži a optimizacionim postupkom vrši se smanjenje gubitaka u prvom simuliranom slučaju odnosno balans opterećenja vodova u drugom simuliranom slučaju. Slučajevi koji su razmatrani (simulirani) zapravo predstavljaju dva ekstremna slučaja, s obzirom na lokacije i snage generatora i stanice za punjenje električnih vozila te se

TABELA II. REZULTATI SIMULACIJA - DRUGI SLUČAJ

Sat	Ukupna potrošnja mreže [MVA]	Dostupno smanjenje Pstanice [kW]	Optimalno smanjenje Pstanice [kW]	Dostupna proizvodnja PV [kW]	Optimalna proizvodnja PV [kW]
1	4,7500	765,7500	269,7742	0,0000	0,0000
2	4,7501	1266,5000	317,2010	0,0000	0,0000
3	4,7500	1706,2500	562,6198	0,0000	0,0000
4	4,7502	1965,5000	771,6939	0,0000	0,0000
5	4,7500	1965,5000	590,4225	6,0873	0,6963
6	4,7500	1706,2500	480,1117	49,4895	1,2067
7	4,7500	1266,5000	206,8729	112,7670	1,5278
8	4,7501	765,7500	182,9690	230,2905	0,1110
9	4,2183	311,7500	0,0000	370,5618	370,5618
10	4,1894	0,0000	0,0000	511,1835	511,1835
11	4,3184	0,0000	0,0000	614,5098	614,5098
12	4,6503	40,7500	0,0000	692,7385	692,7385
13	4,7500	311,7500	311,7500	713,2083	619,6492
14	4,7500	644,5000	644,5000	683,4333	333,1414
15	4,7564	1016,2500	1016,2500	591,8503	591,8503
16	4,9656	1387,0000	1387,0000	455,9883	455,9883
17	5,4532	1706,2500	1706,2500	258,4253	258,4253
18	5,5856	1923,0000	1923,0000	106,4215	106,4215
19	5,9546	2000,0000	2000,0000	24,0390	24,0390
20	5,9116	1923,0000	1923,0000	0,8580	0,8580
21	6,1464	1706,2500	1706,2500	0,0000	0,0000
22	6,2070	1387,0000	1387,0000	0,0000	0,0000
23	5,9470	1016,2500	1016,2500	0,0000	0,0000
24	4,7098	644,5000	0,0000	0,0000	0,0000

prethodni zaključci mogu primjeniti i na ostale moguće lokacije i broj generatora i stanica za punjenje električnih vozila u mreži.

V. ZAKLJUČAK

Integracija stanica za punjenje električnih vozila u distributivnu mrežu omogućava formiranje virtuelnog sistema za skladištenje energije na način da je potrošnjom stanice moguće upravljati s ciljem obezbjeđenja optimalnog stanja u mreži. Suštinski, stanica za punjenje električnih vozila predstavlja potpuno kontrolabilnu potrošnju konstantne snage. Adekvatnim upravljačkim algoritmom moguće je koordinisati rad stanice za punjenje električnih vozila i distribuiranih generatora te na taj način vršiti kontrolu tokova snaga u mreži.

Predloženi upravljački algoritam primjenjiv je bez obzira na broj generatora i stanica za punjenje električnih vozila u mreži kao i bez obzira na to koji se optimizacioni metod i metod za proračun tokova snaga koriste. Osnovna prednost algoritma opisanog u ovom radu jeste njegova jednostavnost i širok spektar primjenjivosti. Glavni nedostatak algoritma jeste

centralizovan pristup optimizaciji prilika u mreži koji u slučajevima mreža velikih dimenzija može iziskivati dodatne resurse i dodatno procesorsko vrijeme neophodno za izvršavanje algoritma.

Primjena metodologije predložene u ovom radu usko je povezana sa istraživanjem navika vlasnika električnih vozila, u pogledu dolaska vozila na punjenje, kao i sa detaljnijim modelovanjem baterija za pogon električnih vozila. Ove oblasti u budućnosti će poslužiti autorima kao ideje vodilje za daljnji naučni rad i proširenje koncepta predloženog u ovom radu.

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] A.Nohtolt, „Germany’s New Code for Generation Plants connected to Medium-Voltage Networks and its Repercussion on Inverter Control“, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Valencia, Spain 2009.
- [3] X. Jin, Y.Mu, H.Jia, T. Jiang, H. Chen, R. Zhang, „An Optimal Scheduling Model for a Hybrid Energy Microgrid Considering Building Based Virtual Energy Storage System“, Applied Energy Symposium and Summit 2015: Low carbon cities and urban energy systems
- [4] M.Cheng, S.Sami, J. Wu, „Virtual Energy Storage System for Smart Grids“, Applied Energy Symposium and Summit 2015: Low carbon cities and urban energy systems
- [5] A.Jenkins, C. Patsios, „Creating Virtual Energy Storage Systems from aggregated smart charging electric vehicles“, 24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Glasgow, 2017.
- [6] T. Zhang, W. Chen, Z. Han, and Z. Cao, “Charging scheduling of electric vehicles with local renewable energy under uncertain electric vehicle arrival and grid power price,” IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. 63, no. 6, pp. 2600–2612, Jul. 2014.
- [7] 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
- [8] D. Šošić, „Metode određivanja raspoloživog prenosnog kapaciteta u visokonaponskim prenosnim mrežama elektroenergetskog sistema“, doktorska disertacija, ETF Beograd 2015.
- [9] 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.

ABSTRACT

The integration of distributed generators and large-scale loads into modern distribution systems could face some obstacles or even appear unavailable. On the other hand, the distributed generation and controllable loads could ensure power flow control and increase controllability of whole system. Virtual energy storage systems are one more step forward to this goal. The methodology proposed in this paper is based on coordination between operation of distributed generators and electric vehicles charging stations in order to ensure optimal operating mode of considered system. The proposed optimization frame is applicable independently on used optimization procedure and power flow calculation method.

VIRTUAL ENERGY STORAGE SYSTEM BASED ON ELECTRICAL VEHICLES CHARGING STATIONS

Dejan Ivic, Zeljko Djurisic, Nikola Cubic