

Matija Zidar
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i
računarstva
matija.zidar@fer.hr

Davor Škrlec
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i
računarstva
davor.skrlec@fer.hr

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

OPTIMIRANJE SMJEŠTAJA I VELIČINE SPREMNIKA ENERGIJE KORIŠTENJEM METODE STOŠCA DRUGOG REDA

SAŽETAK

U radu je dan uvod u problem istovremenog optimiranja smještaja i veličine spremnika energije u distribucijskim mrežama te je objašnjena konveksna optimizacijska metoda kojom se taj problem može riješiti. Prikazana je aplikacija razvijena za kreiranje distribucijske mreže iz Neplana prilagođene optimizacijskom modelu u FICO Xpressu te je napravljen primjer optimalnog smještaja i optimalnih tokova snaga za jedan dio distribucijske mreže.

Ključne riječi: stožasto programiranje, spremnik energije, Neplan, Xpress

ENERGY STORAGE SYSTEM SITING AND SIZING WITH SECOND ORDER CONE PROGRAMMING

SUMMARY

This paper presents simultaneous siting and sizing problem in distribution power networks and explains second order cone programming method applied to this problem. Application which creates distribution network from Neplan adjusted for optimization in FICO Xpress is also introduced and example of optimal siting and siting and optimal power flow is given for selected part of distribution network.

Key words: second order cone programming, energy storage systems, Neplan, Xpress

1. UVOD

Liberalizacija tržišta električne energije i svijest o utjecaju proizvodnje električne energije na okoliš potiču sve veću integraciju proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE). Uz sve dobrobiti za ekonomiju i okoliš, proizvodnja iz OIE zbog svoje varijabilnosti i nesigurnosti zahtijeva promjenu koncepta održavanja ravnoteže između proizvodnje i potrošnje, ali i koncepta planiranja i vođenja sustava. Najveće promjene dešavaju se u distribucijskoj mreži koja nije planirana za prihvrat distribuirane proizvodnje, ali ni za prihvrat velikih opterećenja poput električnih vozila (EV). Promjene koje će se dogoditi je još uvijek teško predvidjeti, ali spremnici energije se često navode kao ključna karika za održavanje sigurnog i pouzdanog pogona [1], [2], [3].

Distribucijska elektroenergetska mreža je dimenzionirana prema maksimalnom opterećenju potrošnje s pretpostavkom poznavanja smjera tokova snaga. Tradicionalni potrošači, sažeti na razinu distribucijske transformatorske stanice, imaju predvidljiv smjer energije i dnevnu krivulju potrošnje te operator sustava nije imao potrebu za nadzorom i upravljanjem mreže izvan uređaja smještenih u pojnim stanicama. U distribucijskim transformatorskim stanicama nalaze se mjereni uređaji, ali su najčešće obračunskog karaktera mjesečne rezolucije te ne sadrže nikakve pokazatelje kvalitete električne energije niti omogućavaju znanje o stanju distribucijske mreže u svakom trenutku.

Sve veći broj integriranih proizvodnih sudionika priključenih nakon distribucijskih obračunskih mjerenja stvara nove izazove, posebno u kontekstu stvaranju mogućnosti aktivnog vođenja i upravljanje distribucijskom mrežom. Pri tome treba imati na umu da je proizvodnja iz OIE poticana te samim time ima pravo proizvoditi električnu energiju kad god može bez obveze planiranja proizvodnje. S druge strane električna vozila predstavljaju dodatni teret zamjetne snage koji nije bio predviđen dosadašnjim konceptom planiranja razvoja.

Operator sustava, osim što se suočava s brojnim izazovima u vođenju ovakvog sustava, ima priliku stvoriti nove koncepte vođenja i planiranja te kroz svoje planove rada i razvoje razmotriti koju tehnologiju primijeniti kako bi u novonastalom okruženju svi tehnički parametri ostali u dozvoljenim granicama [4].

1.1. Optimiranje smještaja i veličine spremnika

Određivanje lokacije je kombinatorički problem te se može rješavati iscrpnim pretraživanjem, heurističkim metodama ili cjelobrojnim programiranjem. U [5] su detaljno analiziraju postojeći modeli smještanja i dimenzioniranja spremnika električne energije u distribucijskim mrežama te su definirani nedostaci algoritama koji bi na odgovarajući način kvantificirali višestruku ulogu koju spremnici električne energije mogu imati u budućim distribucijskim mrežama [6].

Veličina spremnika energije se definira pomoću snaga punjenja i pražnjenja te kapaciteta (količina pohranjene energije). Veličina se određuje simulacijama s predefiniranim pravilima ili se rješava problem optimalnih tokova snaga. Većina radova promatra mogućnosti spremnika energije na već prethodno određenoj lokaciji. Zbog visokog troška investicije, gubitaka prilikom punjenja i pražnjenja te nedovoljne dnevne varijacije u cijeni električne energije, instalacija spremnika trenutno nije isplativa te se traže i druge usluge koje oni mogu pružiti.

Prvi rad koji istovremeno rješava problem smještaja i dimenzioniranja spremnika energije je [7] koji je proširen u [8]. U oba rada su spremnici dimenzionirani genetskim algoritmom te se koriste za smanjenje troškova operatoru mreže. U radu [9] linearnim programiranjem se dimenzioniraju i smještaju spremnici kako bi se spriječilo bacanje energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije (vjetra). U [10] autori koriste spremnike za održavanje mreže u dopuštenim tehničkim granicama i smanjenje troška proizvodnje energije. Heurističkim algoritmom odabiru lokacije dok simulacijama određuju konačnu veličinu spremnika. U [11] se stohastičko programiranje koristi kako bi se smanjio trošak pogona mreže. U [12] se spremnici smještaju genetskim algoritmom kako bi se maksimizirala proizvodnja iz vjetroelektrana. U [13] se koristi optimiranje rojem čestica za određivanje optimalne strategije razvoja mreže s obzirom na troškove investicije, pogona i pouzdanosti. Ocjena rješenja se vrši simulacijom s predefiniranim strategijama proizvodnje. Sličnom metodologijom u [14] se određuju spremnici koji se koriste za praćenje predviđene krivulje potrošnje te posljedično za smanjenje pogonskih troškova. Smanjenje gubitaka u mreži pomoću spremnika energije istražuje se u [15]. Smještaj i veličina se pretražuje heurističkom metodom umjetne kolonije pčela te, za razliku od ostalih radova, promatra samo jedan trenutak. Mogućnosti maksimizacije profita na tržištu dan unaprijed i na satnom tržištu rezervi za sustav s velikim udjelom proizvodnje iz vjetroelektrana istražuju se u [16]. Sam smještaj spremništa i njegove dimenzije optimiraju se zasebno korištenjem metode iscrpnog istraživanja i rješavanjem plana proizvodnje linearnim programiranjem. U [17] se minimiziraju pogonski troškovi mreže uz minimizaciju

troškova instalacije i održavanja spremnika energije. Lokacija i veličina spremnika se određuju istovremeno modelom koji koristi stožasto programiranje (eng. Second Order Cone Programming).

2. METODA STOŠCA DRUGOG REDA PRIMJENJENA NA TOKOVE SNAGA

2.1. Problem tokova snaga

Za rješavanje tokova snaga se osim iteracijskih mogu koristiti i optimizacijske metode koje su nelinearne zbog kvadratnih ograničenja (umnožak dviju strukturnih varijabli). Za razliku od kvadratnog programiranja (eng. Quadratic Programming) koje dozvoljava kvadratnu funkciju cilja uz linearna ograničenja, ovakav problem je izuzetno teško rješiv te su uloženi značajni naponi kako bi se prilagodio optimizacijskim metodama [18], [19].

Prvi radovi koji su koristili stožasto programiranje za rješavanje problema tokova snaga su [20], [21] da bi se metodologija u kasnijim radovima primijenila i na rješavanje problema optimalnih tokova snaga (eng. Optimal Power Flow) [22]. U tim ranijim radovima se u mreži ne nalaze distribuirani izvori niti autori razmatraju mogućnost pojave povratnih tokova snage.

Distflow model koji opisuje tokove snaga prilagođene distribucijskoj mreži je prvo prikazan u [23], [24] te je kasnije unaprijeđen u [25], [26]. Značajna karakteristika modela je mogućnost računanja tokova snaga s povratnim smjerovima koji se javljaju uslijed distribuirane proizvodnje ili pražnjenja spremnika električne energije. Prilagodba *Distflow* modela stožastom programiranju dana je u radu [17] te će unaprijeđena verzija istog biti prikazana i u ovom radu.

2.2. Matematički model metode stošca drugog reda

Ako zamislimo dva čvorišta i i j povezana impedancijom $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ između kojih teče snaga $S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$ i struja I_{ij} tada možemo koristeći *Distflow* jednadžbe napisati:

$$U_j^2(t) = U_i^2(t) - 2(P_{ij}(t)R_{ij} + Q_{ij}(t)X_{ij}) \quad (1)$$

$$I_{ij}(t) \geq \frac{1}{U_i^2(t)}(P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t)) \quad (2)$$

Dvije gornje jednadžbe tvore nelinearni i nekonveksni problem koji je potrebno modificirati kako bi se mogao lakše riješiti. Uvode se sljedeće dvije aproksimacije

$$i_{ij}(t) = I_{ij}^2(t) \quad (3)$$

$$v_i(t) = U_i^2(t) \quad (4)$$

Time jednadžbe (1) postaje linearna:

$$v_j(t) = v_i(t) - 2(P_{ij}(t)R_{ij} + Q_{ij}(t)X_{ij}) \quad (5)$$

A dodanom pretpostavkom $U_i(t) = 1$ se jednadžba (2) svodi na stožasti konveksni oblik:

$$i_{ij}(t) \geq (P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t)) \quad (6)$$

Jednadžbe (5) i (6) tvore aproksimirani konveksni oblik problema tokova snaga između dva čvorišta koji se može riješiti u većini današnjih programa za optimiranje. Iz svojstva konveksnosti slijedi jamčeni optimum što nije slučaj u inicijalnom modelu opisanom jednadžbama (1) i (2).

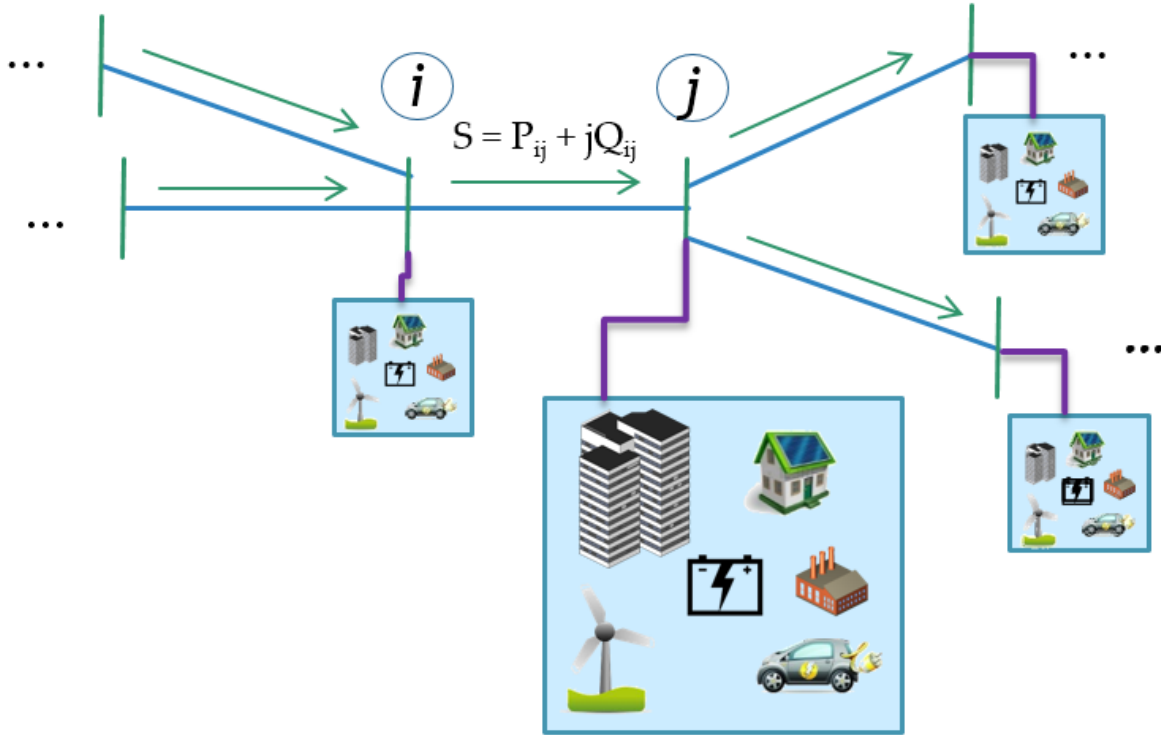
Koristeći prethodno opisan skup jednadžbi za pad napona i struju između dva čvorišta u mreži, primjenom I. Kirchoffovog zakona dobiva se skup jednadžbi kojim se opisuju strujno naponske prilike u cijeloj mreži.

$$P_{ij}(t) = P_{teret}(j) - P_{DG}(j, t) - P_{spremnik}(j, t) + i_{ij}(t)R_{ij} + \sum_{j=m} P_{m-n} - \sum_{j=n} P_{m-n} \quad (7)$$

$$Q_{ij}(t) = Q_{teret}(j) - Q_{DG}(j, t) - Q_{spremnik}(j, t) + i_{ij}(t)X_{ij} - v_i(t)Bsh_{i-j} + \sum_{j=m} Q_{mn} - \sum_{j=n} Q_{mn} \quad (8)$$

Gornjim jednadžbama definira se zakon očuvanja energije u svakom čvorištu mreže odnosno, radna snaga P_{ij} koja teče granom prikazanom na slici Slika 1 jednaka je snazi tereta, distribuirane proizvodnje,

spremnika energije u krajnjem čvorištu te odlaznim snagama u idućim granama te gubicima koji se javljaju.



Slika 1 Tokovi snaga u mreži

Model vrijedi i za dvosmjerne tokove snaga:

$$P_{ij}(t) \in (-\infty, +\infty) \quad (9)$$

$$Q_{ij}(t) \in (-\infty, +\infty) \quad (10)$$

2.2. Matematički model spremnika energije

Model spremnika koji se koristi u ovom radu je linearan. Spremnik ima mogućnost punjenja i pražnjenja i to radne i jalove energije kao što je prikazano u iduće dvije jednačbe:

$$P_{spremnik}(i, t) \in (-\infty, +\infty) \quad (11)$$

$$Q_{spremnik}(i, t) \in (-\infty, +\infty) \quad (12)$$

Jednačba (13) opisuje punjenje i pražnjenje spremnika energije pri čemu je τ trajanje jednog vremenskog perioda koji se promatra u modelu.

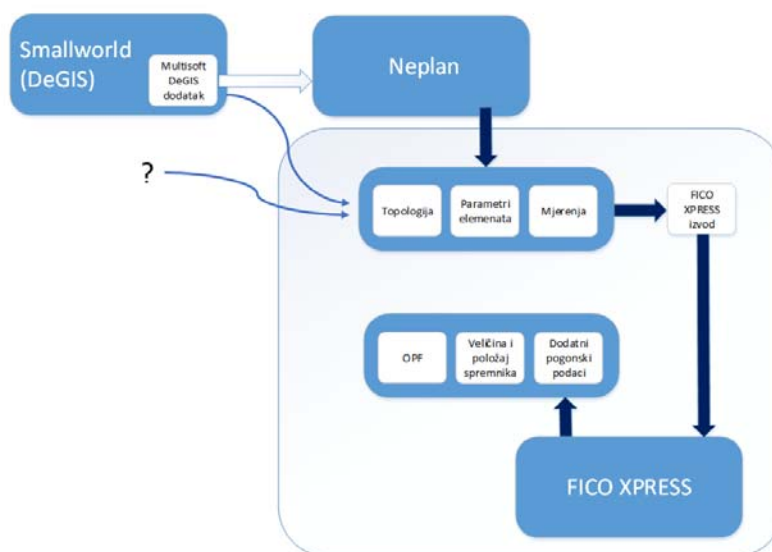
$$W_{spremnik}(i, t+1) = W_{spremnik}(i, t) + (\eta_{punjenje} P_{spremnik, punjenje} - \eta_{pražnjenje} P_{spremnik, pražnjenje}) \tau \quad (13)$$

Ovisno o tehnologiji spremnika energije koji se koristi moguće je ograničiti promjenu izlazne snage i prema gore i prema dolje.

$$P_{spremnik}(i, t+1) - P_{spremnik}(i, t) \leq R_{spremnik, up} \quad (14)$$

$$P_{spremnik}(i, t+1) - P_{spremnik}(i, t) \geq -R_{spremnik, down} \quad (15)$$

3. SUSTAV ZA PRIPREMU ULAZNIH PODATAKA IZ NEPLANA



Slika 2 Pregled pripreme podataka

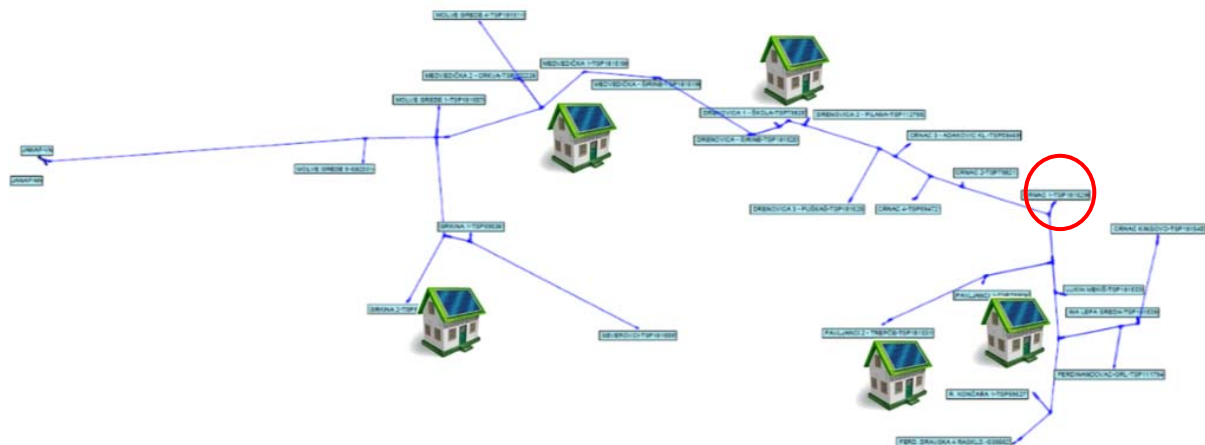
Kako bi se olakšala analiza na stvarnim distribucijskim mrežama napravljena je aplikacija koja prihvaća tekstualnu datoteku s elementima mreže i mjerenjima (opterećenjima i proizvodnjama). Tekstualna (csv) datoteka može biti kreirana u bilo kojem programu za obradu teksta, a u slučaju manjih mreža, moguće ju je kreirati i ručno. U Neplanu (aplikaciji koja sadrži mrežu, a služi elektroenergetskim proračunima) je napravljen dodatak koji kreira takve datoteke. Budući da postoji dodatak DeGIS-u, u kojem se u doglednoj budućnosti očekuje gotovo cijela hrvatska distribucijska mreža, koji generira Neplan model mreže za proračune, ovim putem je otvorena mogućnost jednostavne pripreme podataka ne samo iz postojećih Neplan modela, već i iz modela mreže pohranjenih u DeGIS-u. Radna verzija aplikacije za optimiranje spremnika energije u distribucijskoj mreži korištenjem matematičke metode opisane u poglavlju 2 dana je slikom 3.

Optimiranje se vrši u optimizacijskom okruženju FICO Xpress, a aplikacija prikazana na slici 3 automatski prenosi sve ključne parametre mreže za odabrani izvod. Prikazana aplikacija je u razvoju te će biti proširena dodatnim Neplan i FICO Xpress mogućnostima.

Slika 3 Aplikacija za optimiranje spremnika energije u distribucijskoj mreži

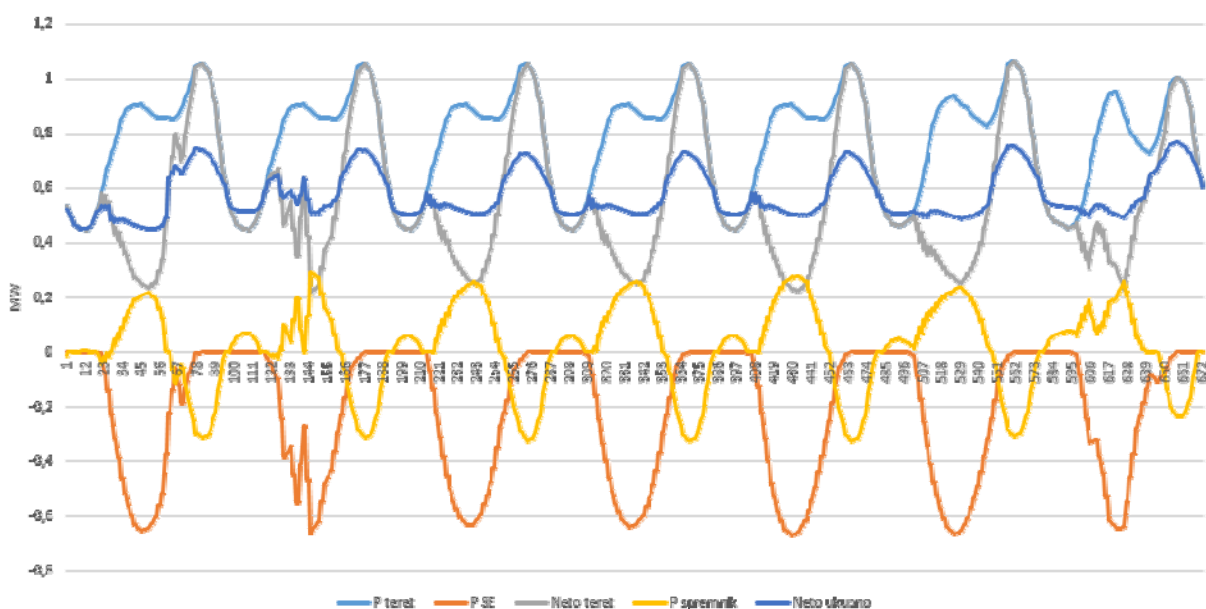
4. PRIMJER

Na primjeru izvoda Severovci iz TS 35/10 kV Janaf bit će predstavljen rad aplikacije za najjednostavniju primjenu algoritma. Traži se lokacija u mreži na koju će se instalirati spremnik energije kako bi se smanjili gubici u izvodu. U Svaku TS 10/04 kV instalirano je 30 kW sunčanih elektrana. Bitno je napomenuti da promatrani izvod ima preniske napone (manje od 90% nazivne vrijednosti) u pojedinim dijelovima dana te će se spremnikom energije održati naponi duž cijelog izvoda u dozvoljenim granicama. Navedeni izvod uz ova opterećenja nema strujnih preopterećenja, ali da postoje, algoritam bi upravljao spremnikom energije da se i ona izbjegnu.



Slika 4 Razmatrani izvod s optimalnom lokacijom spremnika energije (crvena kružnica)

Optimalno rješenje za navedeni problem je instalacija spremnika energije snage 327 kW na čvorištu prikazanom crvenom kružnicom na slici 4. Snage potrošnje (svijetlo plava linija), proizvodnje sunčanih elektrana (narančasta linija) te spremnika energije (žuta linija) prikazane su na slici 5. Siva linija predstavlja neto teret (razliku potrošnje i sunčanih elektrana). Zamjetno je očekivano ponašanje da se spremnik energije puni prilikom niskih neto opterećenja sustava, a prazni se prilikom visokih opterećenja sustava. U ovom slučaju (velik broj sunčanih elektrana), punjenje se podudara s trenucima maksimalnih proizvodnja sunčanih elektrana, a pražnjenje u dnevnim maksimumima neto potrošnje (navečer, kad nema proizvodnje iz sunčanih elektrana).



Slika 5 Pregled snaga opterećenje, proizvodnje i spremnika energije u promatranom vremenskom intervalu

5. ZAKLJUČAK

U radu je ukratko objašnjena konveksna metoda za istovremeno optimiranje veličine i lokacije spremnika energije u distribucijskim mrežama. Prikazani optimizacijski model se zasniva na metodi stošca drugog reda. Optimizacijski model je integriran u aplikaciju koja preuzima podataka iz Neplana ili nekog geoinformacijskog sustava te optimira i dohvaća rezultate iz FICO Xpress aplikacije koja se koristi za optimiranje. Navedena aplikacijom se olakšava dohvat i pripremu podataka za optimiranje postojećih mreža u Neplanu, ali aplikacija svojom izvedbom nije ograničena samo na njega, već može preuzimati podatke i iz drugih alata koji imaju podatke o mreži. Spremnik energije u navedenom primjeru smanjuje gubitke u mreži te održava strujno naponske prilike unutar dozvoljenih granica. Cijeli sustav se može iskoristiti za analizu utjecaja distribuirane proizvodnje i električnih vozila na distribucijsku mrežu te analizu mogućnosti spremnika energije u izbjegavanju njihovih negativnih utjecaja na mrežu.

6. LITERATURA

- [1] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby, and M. Milligan, "The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation," 2010.
- [2] A. Zucker, T. Hinchliffe, and A. Spisto, "Assessing storage value in electricity markets a literature review," Luxembourg, 2013.
- [3] J. Eyer and G. Corey, "Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide A Study for the DOE Energy Storage Systems Program," 2010.
- [4] D. Pudjianto, M. Aunedi, P. Djapic, and G. Strbac, "Whole-Systems Assessment of the Value of Energy Storage in Low-Carbon Electricity Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 1098–1109, Mar. 2014.
- [5] M. Zidar, P. S. P. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, T. Capuder, and D. Škrlec, "Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 645–652, 2016.
- [6] M. Zidar, N. D. Hatziargyriou, D. Škrlec, T. Capuder, and P. S. Georgilakis, "Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. In press, pp. 1–8, 2015.
- [7] G. Carpinelli and F. Mottola, "Optimal allocation of dispersed generators, capacitors and distributed energy storage systems in distribution networks," *Mod. Electr. Power Syst. (MEPS), 2010 Proc. Int. Symp.*, pp. 1–6, Sep. 2010.
- [8] J. Xiao, L. Bai, Z. Zhang, and H. Liang, "Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, pp. 1–7, 2015.
- [9] Y. Atwa and E. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1815–1822, Nov. 2010.
- [10] S. Backhaus, M. Chertkov, and K. Dvijotham, "Operations-based planning for placement and sizing of energy storage in a grid with a high penetration of renewables," vol. 98195, Jul. 2011.
- [11] H. Oh, "Optimal Planning to Include Storage Devices in Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1118–1128, Aug. 2011.
- [12] M. Ghofrani, A. Arabali, M. Etezadi-Amoli, and M. Fadali, "A Framework for Optimal Placement of Energy Storage Units Within a Power System With High Wind Penetration," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 434–442, Apr. 2013.
- [13] M. Sedghi, M. Aliakbar-Golkar, and M. Haghifam, "Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm," *Int. J. Electr. I Power Energy Syst.*, vol. 52, pp. 221–230, Apr. 2013.
- [14] Y. Zheng, Z. Dong, F. Luo, K. Meng, J. Qiu, and K. Wong, "Optimal Allocation of Energy Storage System for Risk Mitigation of DISCOs With High Renewable Penetrations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 212–220, Jan. 2014.
- [15] J. J. Jamian, M. W. Mustafa, H. Mokhlis, and M. a. Baharudin, "Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm," *Int.*

- J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 592–601, Feb. 2014.
- [16] H. Akhavan-Hejazi and H. Mohsenian-Rad, “Optimal operation of independent storage systems in energy and reserve markets with high wind penetration,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 1088–1097, Mar. 2014.
 - [17] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, “Optimal Allocation of Dispersed Energy Storage Systems in Active Distribution Networks for Energy Balance and Grid Support,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2300–2310, 2014.
 - [18] H. Hijazi, C. Coffrin, and P. van Hentenryck, “Convex Quadratic Relaxations for Mixed-Integer Nonlinear Programs in Power Systems,” *Manuscr.*, pp. 1–30, 2014.
 - [19] J. a. Taylor and F. S. Hover, “Convex models of distribution system reconfiguration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1407–1413, 2012.
 - [20] R. Jabr, “Modeling network losses using quadratic cones,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 505–506, Feb. 2005.
 - [21] R. a. Jabr, “Radial Distribution Load Flow Using Conic Programming,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1458–1459, Aug. 2006.
 - [22] R. a. Jabr, “Optimal Power Flow Using an Extended Conic Quadratic Formulation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1000–1008, Aug. 2008.
 - [23] M. Baran and F. Wu, “Optimal capacitor placement on radial distribution systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 1, pp. 725–734, Jan. 1989.
 - [24] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1417, 1989.
 - [25] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, “Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2015.
 - [26] M. Farivar and C. Clarke, “Inverter VAR control for distribution systems with renewables,” in *IEEE SmartGridComm*, 2011, pp. 457–462.