

Martin Bolfek  
HEP ODS d.o.o. Elektra Koprivnica  
[martin.bolfek@hep.hr](mailto:martin.bolfek@hep.hr)

Iva Širić  
HEP ODS d.o.o. Sektor za tehničke poslove  
[iva.siric@hep.hr](mailto:iva.siric@hep.hr)

Marin Bošković  
HEP ODS d.o.o. Sektor za tehničke poslove  
[marin.boskovic@hep.hr](mailto:marin.boskovic@hep.hr)

Mato Baotić, Branimir Novoselnik  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[mato.baotic@fer.hr](mailto:mato.baotic@fer.hr) [branimir.novoselnik@fer.hr](mailto:branimir.novoselnik@fer.hr)

## SMANJENJE GUBITAKA U SN MREŽI UZ POMOĆ NAPREDNOG UPRAVLJANJA DISTRIBUIRANIM IZVORIMA

### SAŽETAK

DYMASOS (Dynamic Management of Physically Coupled Systems of Systems) europski je projekt u sklopu FP7 europskog programa za istraživanje i tehnološki razvoj. Kao aktivan član toga projekta HEP ODS d.o.o. iskorištava priliku da kroz rad s poznatim europskim sveučilištima, kao i industrijskim partnerima, a u bliskoj suradnji s Fakultetom elektrotehnike i računarstva, pokuša primijeniti određene metode iz područja numeričke optimizacije na rješavanje problema vezanih za sve veći udio obnovljivih izvora u elektroenergetskoj mreži.

Radom će se predstaviti DYMASOS projekt, uloga i ciljevi HEP ODS-a u projektu, suradnja s FER-om, presjek kroz i konceptualni opis korištenih metoda kao i rezultati dosadašnjeg rada.

**Ključne riječi:** DYMASOS, FER, distribuirani izvori, HEP ODS, optimizacija

## MEDIUM VOLTAGE NETWORK LOSS REDUCTION THROUGH ADVANCED MANAGEMENT OF DISTRIBUTED GENERATION

### SUMMARY

DYMASOS (Dynamic Management of Physically Coupled Systems of Systems) is a project funded by FP7 European Union's Seventh Programme for research, technological development and demonstration. As an active member of the project, HEP ODS Ltd. uses the opportunity to work with the well-known European universities and industry members, as well as cooperation with the Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER) and attempts to apply certain methods in the field of numerical optimization to solve problems related to the increase in distributed generation in the electricity distribution network.

The work will present the DYMASOS project, the role and objectives of HEP ODS in the project, cooperation with FER, give a brief description of the methods used and the results of previous work.

**Key words:** DYMASOS, FER, distributed generation, HEP ODS, optimization

## 1. UVOD

### 1.1. Značajke DYMASOS projekta

Dynamic Management of Physically Coupled System of Systems (dalje DYMASOS) europski je projekt u sklopu FP7 europskog programa za istraživanje i tehnološki razvoj.

U slobodnom prijevodu, DYMASOS znači dinamičko upravljanje fizikalno spregnutim sustavima sustava. To je projekt, čiji su predmet proučavanja složeni, međusobno povezani sustavi, građeni od manjih autonomnih cjelina međusobno povezanih određenom fizikalnom, odnosno "opipljivom" veličinom, poput struje električnog naboja, vodene pare, sirovina u tvornici i sličnog. Cilj je projekta pronalaženje i razvoj novih metoda za upravljanje spomenutim sustavima i korištenja pritom različitih pristupa, poput tržišnih mehanizama, populacijskog upravljanja i koalicijskih igara.

Više o projektu može se saznati na službenoj internetskoj stranici iz literature[1].

Tablica I. Popis sudionika projekta DYMASOS

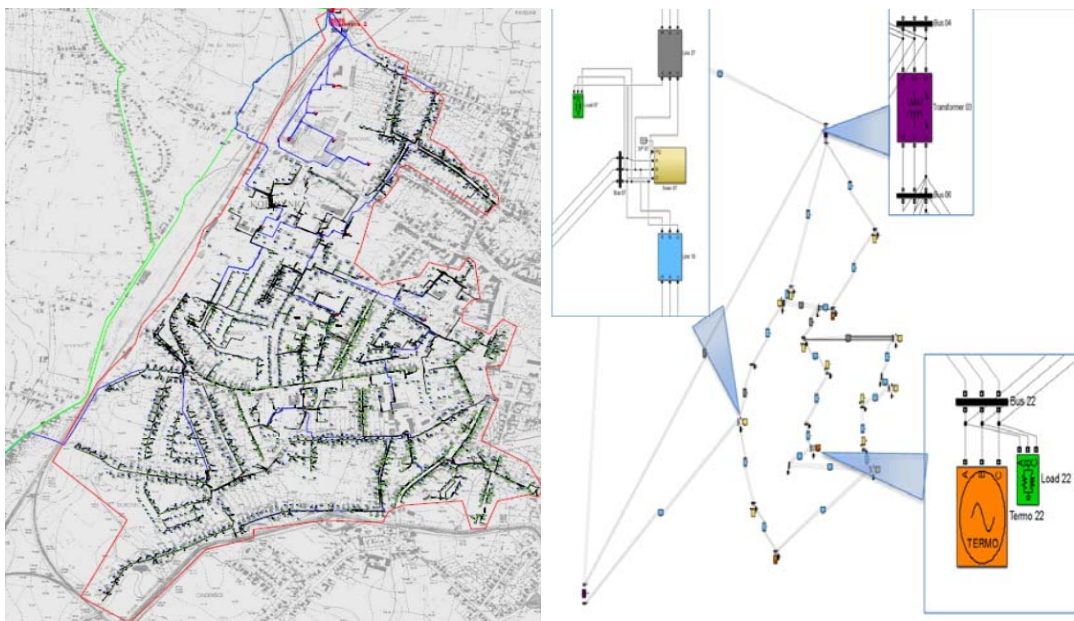
Naziv sudionika projekta	Skraćeni naziv	Država
Technische Universität Dortmund	TUDO	Njemačka
BASF SE	BASF	Njemačka
HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o	HEP	Hrvatska
INEOS Köln GmbH	INEOS	Njemačka
University of Seville	USE	Španjolska
University of Zagreb – Faculty of Electrical Engineering and Computing	UNIZG-FER	Hrvatska
ETH Zürich	ETH	Švicarska
RWTH Aachen University	RWTH	Njemačka
inno TSD	inno	Francuska
Optimizacion Orientada a la Sostenibilidad SL	IDENER	Španjolska
euTeXoo GmbH	TEX	Njemačka
Ayesa Advanced Technologies SA	Ayesa AT	Španjolska

## 2. ULOGA HEP ODS-A U PROJEKTU

S obzirom na sve veći utjecaj distribuiranih izvora energije (dalje DI) na prilike u distribucijskoj mreži, ali i pojavu novih tehnologija poput punionica električnih vozila, optimalno vođenje distribucijske mreže postaje sve veći izazov. Ipak, uz pomoć određenih optimizacijskih metoda, kao i uz upotrebu novih tehnologija, moguće je uspješno i bez značajnih ulaganja odgovoriti na nadolazeće izazove. Cilj HEP ODS-a je razvoj metoda za smanjenje gubitaka u mreži te analiza utjecaja distribuirane proizvodnje i dinamike vezane za punjenje električnih vozila, na distribucijsku mrežu.

Doprinos kolega s Fakulteta elektrotehnike i računarstva pronalaženje je i implementacija tehničkih rješenja. U prvoj fazi projekta odabran je dio distribucijske mreže za koji se smatra da je dovoljno reprezentativan sa stajališta udjela DI, mogućnosti promjene topologije srednjenaponske (dalje SN) mreže i broja punionica električnih vozila (slika 1.). Uzimajući u obzir stvarne vrijednosti opterećenja mreže, proizvodnje iz DI te različite parametre, razvijen je model mreže u programskom paketu Matlab. Model je potrebno testirati i eventualno usporediti s drugim programskim alatima, prije svega NEPLAN-om. U prvoj je fazi bilo dovoljno modelirati 35 i 10 kV mrežu, dok će se ostatak (NN mreža i kupci) modelirati ovisno o daljnjim potrebama u drugim fazama projekta.

Projektom su definirani i testni scenariji za potrebe kojih se mijenja udio DI i punionica električnih vozila u mreži, dodaju elektrane sa sinkronim i asinkronim generatorima kao i sustavi za pohranu električne energije. Ideja je spomenutih scenarija testirati rad optimizacijskih algoritama na modelu distribucijske mreže kakva bi ona mogla izgledati u bliskoj budućnosti.



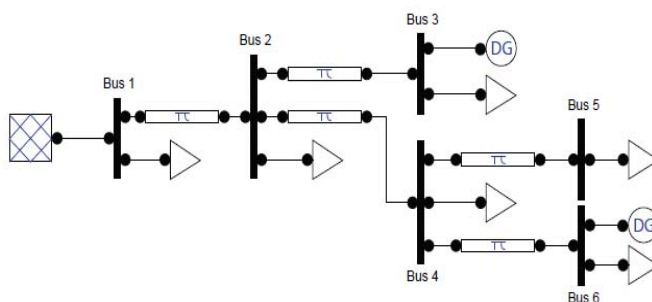
Slika 1. Topografski prikaz razmatranog dijela distribucijske mreže grada Koprivnice i pripadajući Matlab model

### 3. OPTIMALNI TOKOVI SNAGA

Sa stajališta operatora distribucijskog sustava postoje dva velika problema vezana za distribuirane izvore. Porast udjela DI na mreži, u određenim i nerijetkim prilikama, dovodi do povećanja gubitaka u distribucijskoj mreži [2]. S druge strane, već se kod relativno malog udjela DI mogu javiti problemi zbog previsokog napona posebice u njihovoj neposrednoj okolini. Ta su dva problema, ovisno o stanju mreže, često suprotstavljena, tako da se često mora raditi kompromis između te dvije veličine.

Kako bi se doskočilo tom problemu, trebala bi se razmotriti mogućnost upravljanja jalovom snagom DI-a. To znači mijenjati faktor snage proizvodnog postrojenja, unutar određenih granica, kako bi održali napon mreže unutar zadanih granica od  $\pm 10\%$  nazivnog napona. Takav je način regulacije najučinkovitiji kod bioplinskih elektrana zbog korištenja sinkronih generatora visoke te na SN mreži gdje je omjer parametara mreže  $R/X < 1$  [3].

Operator distribucijskog sustava mogao bi odrediti koliki bi morao biti faktor snage proizvodnog postrojenja, u svrhu istovremenog poštivanja uvjeta ograničenja iznosa napona te smanjenja gubitaka u mreži. Naravno, u slučaju kada postoji veći broj DI-a ovakvog tipa, problem je u svodi na rješavanje optimalnih tokova snaga - jedan od osnovnih problema vođenja elektroenergetskog sustava koji se do sada i nije toliko ticao vođenja distribucijskog sustava.



Slika 2. Shema dijela distribucijske mreže korištene modelirane u Matlab-u

Tablica II. Parametri vodova, iznos opterećenja i ograničenja za dio mreže sa slike 2.

	Line Data	Load Data	Constraints
$z_{21}$	$0.0025 + 0.0318i$	$S_1^D$	$0.031 + 0.023i$
$z_{32}$	$0.0284 + 0.0193i$	$S_2^D$	$\bar{S}_3$
$z_{42}$	$0.0268 + 0.0177i$	$S_3^D$	$\bar{S}_6$
$z_{53}$	$0.0061 + 0.0059i$	$S_4^D$	$\underline{S}_3, \underline{S}_6$
$z_{63}$	$0.0207 + 0.0144i$	$S_5^D$	$\bar{V}$
		$S_6^D$	$\underline{V}$

Tablica III. Rezultati proračuna za dio distribucijske mreže sa slike 2.

$V_1^{\text{opt}}$	$1.0500/0.0000^\circ$
$V_2^{\text{opt}}$	$1.0468/-0.2948^\circ$
$V_3^{\text{opt}}$	$1.0455/-0.3503^\circ$
$V_4^{\text{opt}}$	$1.0445/-0.3063^\circ$
$V_5^{\text{opt}}$	$1.0441/-0.3142^\circ$
$V_6^{\text{opt}}$	$1.0469/-0.3100^\circ$
$S_1^{\text{Gopt}}$	$0.2160 + 0.1152i$
$S_3^{\text{Gopt}}$	$0.0342 + 0.0342i$
$S_6^{\text{Gopt}}$	$0.1344 + 0.1172i$

Problem optimalnih tokova snaga (dalje OTS) formuliran je još 1962. god [4]. Slika 2. prikazuje, na primjeru male distribucijske mreže, osnovnu ideju iza OTS-a. Promatrani dio distribucijske mreže sastoji se od vodova i opterećenja čiji su podaci prikazani lijevom tablicom II. Treći stupac tablice sadrži ograničenja pojedinih parametara iz kojeg se vidi da, primjerice, napon u cijeloj mreži ne smije prelaziti granice od  $\pm 5\%$  vrijednosti nazivnog napona. Pravilno formuliran optimizacijski problem u ovom slučaju daje odgovor na pitanje koliko snagu moraju utisnuti u sustav izvori na sabirnicama 6 i 3 kako bi se poštovala zadana ograničenja te istovremeno smanjili ukupni gubici mreži. Iz tablice III. vidimo da je iznos jalove snage na DI na sabirnici 6 promijenjen, što znači da bi, u cilju smanjenja gubitaka u mreži, taj izvor trebao adekvatno promijeniti faktor snage.

Ovaj optimizacijski problem je općenito teško razriješiti. Tradicionalno se, u prijenosnoj mreži, ovaj problem rješava tako da se određeni izrazi u formulaciji pojednostave, što se može učiniti zbog specifičnosti parametara same mreže ili se primjenjuju nelinearni algoritmi u slučajevima kada prethodno spomenuta aproksimacija nije dovoljna. Nelinearni algoritmi pak pronalaze lokalni minimum, u mnogim slučajevima brzo i uspješno, no u tom slučaju algoritam, čak i u slučaju da konvergira, ne pruža nikakvu informaciju o globalnom optimumu. Stoga je za rješavanje ovog problema, s obzirom na specifičnosti distribucijskog sustava, odabran pristup tzv. konveksne relaksacije koja posjeduje brojne prednosti pred prije navedenim metodama. Detaljnije o spomenutom pristupu može se naći u literaturi [5-8].

#### 4. IMPLEMENTACIJA U MATLAB-U

S ciljem evaluacije spomenutog algoritma dio distribucijske mreže grada Koprivnice modeliran je u programskom alatu Matlab-u. U mrežu su, pored već instaliranih kapaciteta, dodana proizvodna postrojenja kako bi se simulirali slučajevi za različite udjele DI u mreži. Za potrebe proučavanja tranzijentnih pojava u sustavu, ali i za lakše modeliranje u budućnosti, napravljena je skripta koja temeljem ulaznih podataka u tabličnom obliku (tablice III, IV, V) generira odgovarajući Simulink model.

Za potrebe rješavanja OTS-a programirane su odgovarajuće skripte, ali je za rješavanje istih potrebno instalirati YALMIP, programski jezik za modeliranje (ne)konveksnih optimizacijskih problema koji pojednostavljuje formulaciju problema [9], te neki od tzv. "solvera" poput SDPT3, MOSEK i dr. [10-12] koji izvode sam proračun.

Tablica III,IV,V. Primjer ulaznih podataka za simulaciju u Matlab-u

Bus No.	$P_D$ [MW]	$Q_D$ [MVar]	$V_{nom}$ [kV]	$V_{max}$ [p.u.]	$V_{min}$ [p.u.]
1	-	-	110	1.05	0.95
2	-	-	35	1.05	0.95
3	-	-	35	1.05	0.95
4	-	-	35	1.05	0.95
5	-	-	10	1.05	0.95
6	-	-	10	1.05	0.95
7	0.0532	0.0128	10	1.05	0.95
8	0.0220	0.0725	10	1.05	0.95
9	0.0866	0.0529	10	1.05	0.95

From bus	To bus	$R$ [ $\Omega$ /km]	$X$ [ $\Omega$ /km]	$L$ [km]	$I_{max}$ [A]
2	3	0.0870	0.1160	0.3224	450
2	4	0.1380	0.1160	0.1360	450
3	4	0.0870	0.1160	0.2658	450
5	7	0.2060	0.1220	0.1350	345
6	8	0.2060	0.1220	0.6807	345
8	9	0.1930	0.1000	0.4705	255
9	10	0.1930	0.1000	0.0868	255

Bus No.	$V_{nom}$ [kV]	$P_{min}$ [MW]	$P_{max}$ [MW]	$Q_{min}$ [MVar]	$Q_{max}$ [MVar]
9	10	0	1	0	1
14	10	0	1	0	1
22	10	0	1	0	1

Kao rezultat dobivamo one iznose snaga svakog od proizvodnih postrojenja za koje će napon u mreži biti unutar unaprijed i proizvoljno definiranih granica, a gubici u mreži najmanji mogući. Ukoliko pak program ne može naći rješenje, odnosno globalni minimum optimizacijskog problema, dobivamo za to odgovarajuću poruku.

## 5. DALJNI RAZVOJ

Kako bi se gore spomenuto rješenje moglo, barem u nekom obliku, implementirati u sustav, potrebno je napraviti nekoliko daljnjih koraka.

### 5.1. Razvoj estimatora stanja

Veliki problem u točnosti izračuna ne proizlazi iz nedostataka koje su inherentne samoj metodi rješavanja, već prije iz nepoznavanja određenih parametara sustava. Svakako najveća nepoznanica, posebice ako se uspoređuje s prijenosnom mrežom, jest nedostatak pouzdanih mjerenja u stvarnom vremenu koje su na raspolaganju u distribucijskoj mreži. Tek odnedavno, s povećanjem stupnja automatizacije distribucijske mreže, na raspolaganju je i nešto veći broj mjerenja napona i snage.

Kako bi se prevladale ove poteškoće, potrebno je izraditi i implementirati estimator stanja mreže, pomoću kojeg bi se, koristeći mjerenja koja postoje u sustavu, poput mjerenja u trafostanicama 35/10 kV, moglo lakše procijeniti one varijable koje mogu značajno utjecati na rad i konačno rješenje optimizacijskog problema.

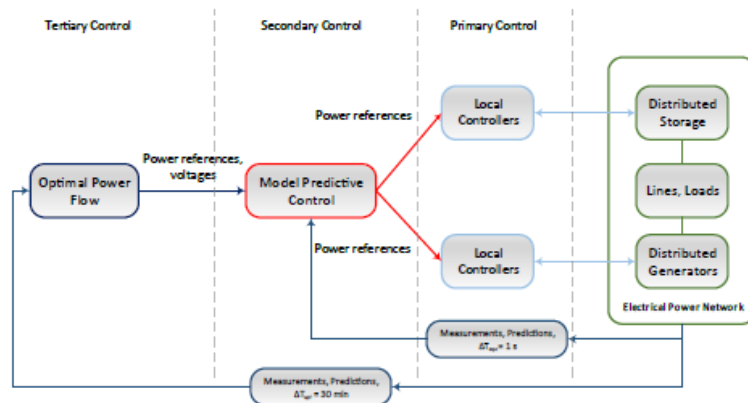
### 5.2. Performanse

Preliminarno testiranje pokazuje kako vrijeme potrebno za rješavanje problema raste gotovo kvadratno s povećanjem broja sabirnica. Osim broja sabirnica, problem predstavlja i ponekad velika varijacija tereta unutar nekog mjernog intervala.

Rješenje problema s brzinom izvođenja ponekad se može riješiti dodatnim podešavanjem određenih mogućnosti u Matlabu poput aktiviranja dodatnih jezgri na procesoru za potrebe paralelnog

računanja za što su potrebne manje izmjene u programskom kodu. Ipak, ovakav tip rješenja, iako relativno jednostavan, rijetko je dovoljno podatan da bi se na taj način postigli značajni pomaci. Osim navedenog postoji i mogućnost promjene tzv. “solvera” i odabira onog koji daje najbolje rezultate.

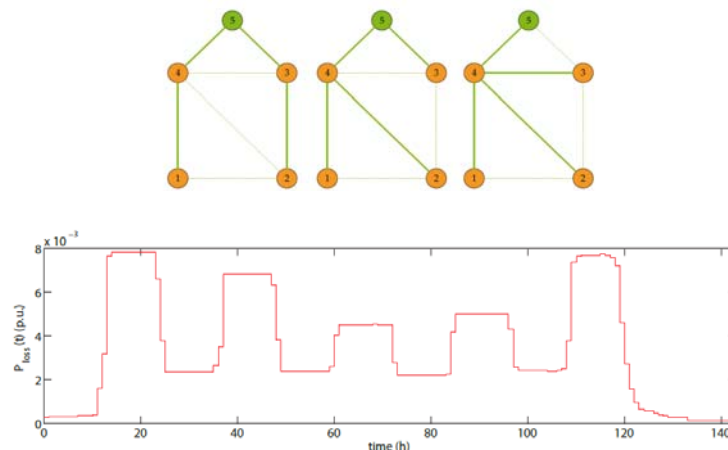
Usprkos svemu spomenutom, velika je vjerojatnost kako rezultati neće biti zadovoljavajući. Stoga su kolege s fakulteta predložili u sklopu referata iz literature [13] troslojnu kontrolnu strukturu (slika 3.) u kojoj se na jednoj razini računa rješenje gore spominjanog problema optimalnih tokova snaga, a zatim u drugoj, brži, tzv. modelno-prediktivni kontroler (eng. model predictive control ili MPC) računa odstupanja od rezultata OTS iz prethodne razine koji proizlaze iz promjenjivosti opterećenja. Rezultati proračuna na primjeru iz poglavlja 3 su obećavajući.



Slika 3. Shema hijerarhijske kontrolne strukture

### 5.3. Promjena topologije mreže

Iako je distribucijska mreža radijalna, pojedini dijelovi mreže, pogotovo u područjima gdje je potrebno osigurati veću pouzdanost napajanja, imaju mogućnost prespajanja, odnosno promjene topologije mreže. S obzirom na promjenjivost u opterećenju, ali i proizvodnji određenih tipova DI-a, odgovarajućom promjenom topologije moguće je potencijalno smanjiti gubitke u sustavu.



Slika 4. Utjecaj promjene topologije mreže na iznos ukupnih gubitaka

Slika 4. prikazuje princip rekonfiguracije na primjeru male distribucijske mreže. Narančasti čvorovi predstavljaju TS dok čvor 5 predstavlja sučelje s prijenosnom mrežom. S druge se slike vidi kako promjena konfiguracije utječe na sveukupne gubitke u mreži.

Stvari se računski bitno kompliciraju kada se dodaju DI i sustavi za pohranu električne energije. Za razliku od OTS-a, ovaj problem je tzv. „MISOCP“ (mixed-integer second order cone) problem koji je i računski zahtjevniji, tako da će poseban fokus prilikom implementacije biti upravo na performansama.

## 6. ZAKLJUČAK

Radom je prezentiran rad na DYMASOS projektu s posebnim naglaskom na dio koji bi potencijalno mogao biti od velike koristi u distribuciji, posebice s rastućim udjelom distribucijskih izvora u mreži. Koristeći metode iz područja numeričke optimizacije, koje tradicionalno, barem do nedavno, nije bilo usko vezano uz područje energetike, kao i programska rješenja poput Matlab-a, kroz projekt će se pokušati analizirati mogućnosti algoritama i potencijalno konkretizirati njihova primjena na dijelu distribucijske mreže.

Iako postoji cijeli spektar različitih metoda koje su manje ili više uspješne u rješavanju spomenutih problema, metode korištene u projektu imaju značajnu prednost utoliko što jamče pronalaženje globalnog optimuma. Postojeći su rezultati obećavajući, iako će proći još neko vrijeme dok će mreža i proizvodni objekti biti opremljeni infrastrukturom uz pomoć koje će se spomenute metode moći i primijeniti. Pored toga, neka se rješenja još ne mogu implementirati jer ne postoji propisani zakonski ili ini okvir kojim bi se omogućila njihova primjena.

## 5. LITERATURA

- [1] Dynamic Management of Physically Coupled Systems of Systems, December 20th, 2013 <http://www.dymasos.eu/>
- [2] Víctor H. Méndez Quezada et al, "Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 2, MAY 2006
- [3] Mate Lasić, "Kameni temeljci u ostvarenju sigurnog i pouzdanog pogona distribucijskog sustava", HO CIREĐ, Seminar- Pogon distribucijskog sustava, Zagreb, 12. ožujak 2015. godine
- [4] J. Carpentier, Contribution to the economic dispatch problem, Bulletin de la Societe Francoise des Electriciens, 3 (1962), pp. 431 - 447.
- [5] J. Lavaei and S. H. Low, "Zero duality gap in optimal power flow problem," IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, pp. 92 – 107, Feb. 2012.
- [6] S. H. Low, "Convex relaxation of optimal power flow – part I: Formulations and equivalence," IEEE Trans. Control Network Syst., vol. 1, pp. 15 – 27, Mar. 2014.
- [7] S. H. Low, "Convex relaxation of optimal power flow – part II: Exactness," IEEE Trans. Control Network Syst., vol. 1, pp. 177 – 189, June 2014.
- [8] X. Bai, H. Wei, K. Fujisawa, and Y. Wang, „Semidefinite programming for optimal power flow problems“, Int. J. Elect. Power Energy Syst., 30 (2008), pp. 383 - 392.
- [9] J. L'ofberg, "YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in Matlab," in Proc. IEEE Conference on Computer Aided Control System Design (CACSD'04), (Taipei, Taiwan), 2004.
- [10] K. C. Toh, M. J. Todd, and R. H. Tutuncu, "SDPT3: Matlab software for semidefinite programming," Optimization Methods and Software, vol. 11, no. 1 – 4, pp. 545 – 581, 1999.
- [11] J. F. Sturm, "Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones," Optimization Methods and Software, vol. 11 – 12, pp. 625 – 653, 1999.
- [12] E. D. Andersen and K. D. Andersen, "MOSEK: High performance software for large-scale LP, QP, SOCP, SDP and MIP, version 7.0.0.127," Aug. 2014
- [13] Branimir Novoselnik, Mato Baotić, „Dynamic Management of Electrical Power Networks With Distributed Generation and Storage“, 2015 20th International Conference on Process Control (PC), pp. 72 – 77, 9-12 June 2015, Strbske Pleso