

Одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у радијалним дистрибутивним мрежама применом симулираног каљења

Determination of Optimal Locations and Sizes of Capacitor Banks in Radial Distribution Networks Using Simulated Annealing

Марија Михајловић, Невен Ковачки, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – У овом раду је приказан алгоритам за одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у средњенапонским дистрибутивним мрежама. Као критеријумска функција разматрана је минимизација укупних трошкова, који обухватају инвестиционе трошкове кондензаторских батерија и трошкове губитака електричне енергије. У раду је представљен алгоритам заснован на симулираном каљењу за решавање овог проблема. Представљени алгоритам је верификован на примеру дистрибутивне мреже која се састоји од 100 чворова.

Кључне речи: дистрибутивна мрежа, оптимизација, кондензаторска батерија, симулирано каљење

Abstract – This paper presents an algorithm for determining the optimal locations and sizes of capacitor banks in medium-voltage distribution networks. The objective function is defined as the minimization of total costs, including investment costs of capacitor banks and electrical energy loss costs. A simulated annealing-based algorithm is proposed for solving this problem. The algorithm is verified on a distribution network consisting of 100 buses.

Keywords: distribution network, optimization, capacitor bank, simulated annealing

НАПОМЕНА: Овај рад произтекао је из мастер рада чији ментор је био др Невен Ковачки, доцент

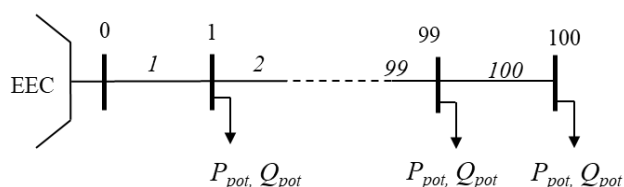
1. УВОД

Компензација реактивне снаге представља једну од основних мера за унапређење енергетске ефикасности и квалитета електричне енергије у дистрибутивним системима. Токови реактивних снага у дистрибутивним водовима доводе до повећања губитака снаге и падова напона у чворовима мреже. Применом кондензаторских батерија могуће је локално, тј. на месту потрошње, обезбедити реактивну снагу, чиме се смањује оптерећење дистрибутивних водова, смањују губици и побољшавају напонске прилике у мрежи.

У овом раду најпре је, ради сагледавања ефеката компензације реактивне снаге, анализиран утицај уградње једне кондензаторске батерије на смањење губитака у дистрибутивној мрежи. Затим је формулисан оптимизациони проблем за одређивање оптималних локација и снага произвољног броја кондензаторских батерија. Као критеријумска функција дефинисана је минимизација трошкова кондензаторских батерија и трошкова губитака електричне енергије. За решавање овог проблема примењен је алгоритам заснован на симулираном каљењу, који омогућава ефикасно претраживање простора могућих решења. При томе су, у циљу поједностављења прорачуна, анализирани само фиксне кондензаторске батерије, без могућности регулације напона, фактора снаге и сл. Предложени алгоритам је верификован на примеру радијалне дистрибутивне мреже која се састоји од 100 чворова.

2. АНАЛИЗА УГРАДЊЕ ЈЕДНЕ КОНДЕНЗАТОРСKE БАТЕРИЈЕ

У овом поглављу се анализира утицај уградње једне кондензаторске батерије на напонске прилике и губитке снаге у дистрибутивној мрежи. Разматра се надземна радијална дистрибутивна мрежа називног напона 20 kV, приказана на слици 1. Разматрана мрежа се састоји од 100 чворова, при чему је оптерећење у свим чворовима једнако и износи $P_{pot} = 80$ kW и $Q_{pot} = 60$ kVAr. Дужине свих грана су једнаке и износе 0,1 km, док су подужни параметри грана редом $r = 0,3 \Omega/\text{km}$ и $x = 0,35 \Omega/\text{km}$. Сматра се да је напон на почетку мреже константан и износи 20,5 kV. Оваква поједностављена мрежа омогућава јасно сагледавање утицаја локације кондензаторске батерије на губитке и напонске прилике.

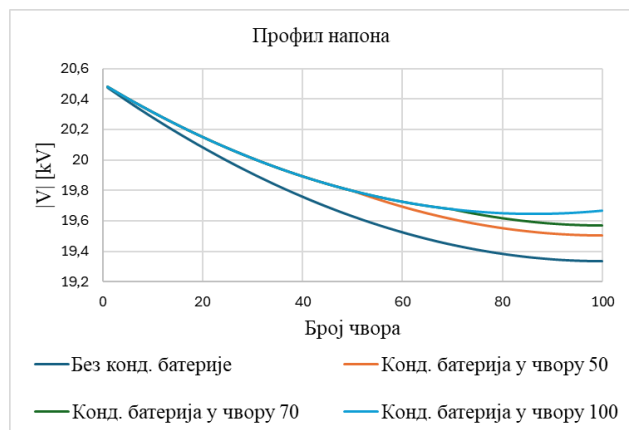


Слика 1. Разматрана дистрибутивна мрежа

Анализирају се три локације кондензаторске батерије снаге $Q_c = 2 \text{ MVar}$ у разматраној мрежи:

- на средини мреже, тј. у чвору 50,
- на 2/3 мреже гледано са почетка, тј. у чвору 70 и
- на крају мреже, тј. у чвору 100.

За наведене локације кондензаторске батерије су прорачунати токови снага у дистрибутивној мрежи. На слици 2 приказан је напонски профил мреже за разматране случајеве, као и за случај када у мрежи није уграђена кондензаторска батерија. С друге стране, у табели 1 су приказане вредности напона на крају мреже, као и губици снаге за разматране случајеве.



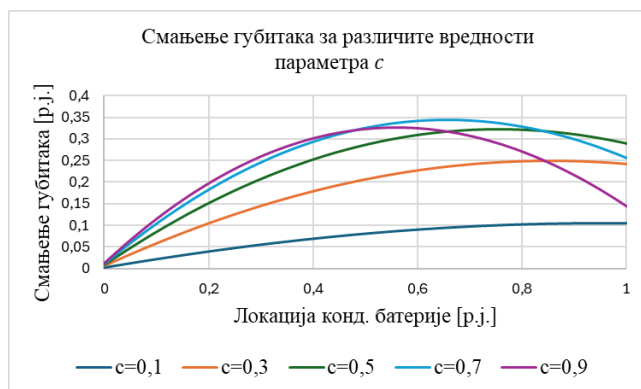
Слика 2. Напонски профил за разматране случајеве

Резултати приказани на слици 2 показују да уградња кондензаторске батерије значајно смањује падове напона и губитке у разматраној дистрибутивној мрежи. Најбољи резултати су добијени за случај када је кондензаторска батерија уграђена на крају дистрибутивне мреже. У том случају је пад напона у односу на почетак дистрибутивне мреже смањен са 5,6 % (када нема кондензаторске батерије) на 4 %, док су губици снаге смањени са 0,26 MW на 0,20 MW, тј. за 23 %. Добијени резултати показују да локација кондензаторске батерије утиче на ефикасност режима дистрибутивне мреже.

Како би се истовремено испитали утицаји локације и снаге кондензаторске батерије, извршена је анализа смањења губитака у дистрибутивној мрежи приказана на слици 3. На овој слици је приказана зависност смањења губитака од локације кондензаторске батерије и параметра c .

Табела 1. Резултати за разматране случајеве

Разматрани случај	Напон на крају мреже	Губици
Без кондензаторске батерије	19,34 kV	0,2651 MW
Кондензаторска батерија у чвору 50	19,51 kV	0,2099 MW
Кондензаторска батерија у чвору 70	19,57 kV	0,2009 MW
Кондензаторска батерија у чвору 100	19,67 kV	0,2007 MW



Слика 3. Утицај уградње кондензаторске батерије на смањење губитака

Параметар c представља степен компензације реактивне снаге, тј. однос реактивне снаге кондензаторске батерије и укупне реактивне снаге оптерећења за целу дистрибутивну мрежу, односно:

$$c = \frac{Q_c}{Q_{pot}}. \quad (1)$$

На основу резултата са слике 3 може се закључити да на смањење губитака у дистрибутивној мрежи истовремено утичу и локација и снага кондензаторске батерије која се уграђује. Најповољнији ефекат у овом случају, тј. највеће смањење губитака, постиже се када је кондензаторска батерија постављена на 2/3 дужине мреже гледано од почетка и при степену компензације 0,7.

Међутим, оптималан избор локације и снаге кондензаторских батерија се не може одредити једноставном анализом појединачних случајева, већ захтева систематичан приступ који истовремено узима у обзир техничке и економске аспекте рада мреже.

3. ФОРМУЛАЦИЈА ОПТИМИЗАЦИОНОГ ПРОБЛЕМА

У овом поглављу је формулисан оптимизациони проблем за одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија које је потребно уградити у разматраној дистрибутивној мрежи како би се минимизирали укупни трошкови кондензаторских батерија и губитака електричне енергије. Разматрају се три типа кондензаторских батерија чије су снаге редом 600 kVar, 900 kVar и 1200 kVar, а инвестициони трошкови редом 10000 €, 18000 € и 25000 €.

Критеријумска функција представља укупни трошак система, који обухвата инвестиционе трошкове уградње кондензаторских батерија и трошкове губитака електричне енергије и дата је формулом:

$$F = C_{cap} + C_{loss}. \quad (2)$$

Укупни трошкови губитака одређују се за цео експлоатациони период кондензаторских батерија, при чему се за сваку годину узима у обзир очекивани раст оптерећења. Добијени трошкови губитака затим се свде на садашњу вредност применом усвојене стопе свођења. Трошкови губитака рачунају се на основу израза:

$$C_{loss} = \sum_{t=1}^T \frac{E_{loss,t} \cdot c_e}{(1+i)^t}, \quad (3)$$

где је $E_{loss,t}$ годишња енергија губитака у години t , c_e цена електричне енергије, а i стопа свођења.

При решавању оптимизационог проблема неопходно је задовољити одређена техничка и експлоатациона ограничења, која обухватају ограничење расположивог буџета за инвестирање, дозвољене границе напона у чворовима мреже, као и термичка ограничења грана дистрибутивне мреже.

4. АЛГОРИТАМ СИМУЛИРАНОГ КАЉЕЊА

Решавање постављеног оптимизационог проблема спроводи се применом алгоритма симулираног каљења, који је приказан у наставку. Алгоритам се заснива на стохастичком претраживању простора решења, при чему се у раним итерацијама омогућава прихватање и неповољнијих решења, ради избегавања локалних минимума.

Поред основног механизма претраживања, значајну улогу у ефикасности алгоритма има избор параметара хлађења, као што су почетна температура, коефицијент хлађења и број итерација по температури. Правилан избор ових параметара омогућава постизање равнотеже између брзине конвергенције и квалитета добијеног решења.

Такође, начин генерисања суседних решења има значајан утицај на ток оптимизације. У овом раду суседна решења добијају се изменом локације или снаге једне кондензаторске батерије.

Стопа прихватања представља однос броја прихваћених и укупно генерисаних суседних решења за дату температуру и указује на степен истраживања простора решења алгоритма.

Модификовани метод симулираног каљења за потребе решавања проблема оптималне расподеле кондензаторских батерија у дистрибутивној мрежи може се представити следећим псеудокодом:

Улаз: Програм (распоред) хлађења: /*Почетна температура(T_{max}), Крајња температура(T_{min}), Темпо

(брзина) хлађења, Број итерација на одређеној температури*/.

$s = s_0$; /*Генерисање почетног допустивог решења, тј. почетног решења, нпр. без кондензаторских батерија у мрежи*/

$T_k = T_{max}$; /*Почетна температура*/

$k=1$;

Понављати /*Глобална итерација, k */

Понављати /*На одређеној температури T_k , односно у глобалној итерацији k */

На основу текућег решења s на случајан начин генерисати суседно (блиско) решење s' , тј. нови скуп кондензаторских батерија, додавањем једне или променом локације или снаге постојеће кондензаторске батерије;

$\Delta E = f(s') - f(s)$; /*Разлика критеријумских функција, тј. трошкова у ова два решења*/

Ако је $E \leq 0$ **Онда** $s = s'$ /*Прихватити s' као текуће решење*/

У супротном Прихватити s' са вероватноћом $e^{-\Delta E/T_k}$, односно прихватити s' ако важи: $e^{-\Delta E/T_k} > \text{rand}[0,1]$;

Ако је $f(s') - f(s_{best}) < 0$ **Онда** $s_{best} = s'$; /*Прихватити s' као најбоље решење до сада (s_{best})*/

Док Услов заустављања /*Док није испитан задати број суседних решења на температури T_k */

$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$; /* Темпо (брзина) хлађења, $\alpha \in [0,5 - 0,99]$ */

$k=k+1$;

Док Критеријум заустављања /* $T_k < T_{min}$ */

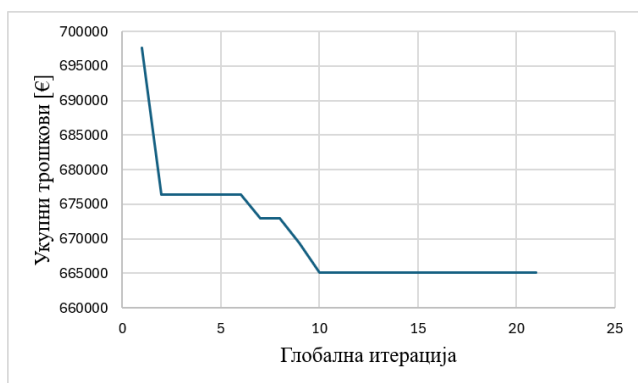
Изаз: Најбоље пронађено решење (s_{best})

Приказани алгоритам је тестиран за три случаја, за буџет од 25000 €, 50000 € и 100000 €. Резултати оптимизације су приказани у табели 2, док је ток предложеног алгоритма представљен дијаграмима на сликама 4 и 5.

Са дијаграма на слици 4 уочава се да алгоритам у почетним итерацијама доводи до значајног смањења вредности критеријумске функције, након чега долази до постепене стабилизације, што указује на приближавање оптималном решењу.

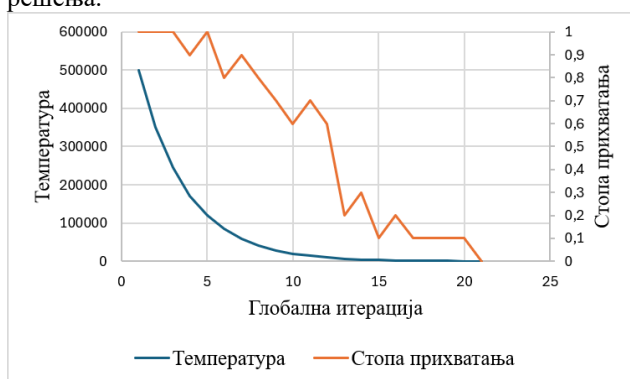
Табела 2. Резултати оптимизације

Резултати	Буџет од 0 €	Буџет од 25000 €	Буџет од 50000 €	Буџет од 100000 €
Чворови у којима је уграђена кондензаторска батерија снаге 600 kVAr	-	-	-	35, 47, 62, 67, 73, 81, 97
Чворови у којима је уграђена кондензаторска батерија снаге 900 kVAr	-	-	-	-
Чворови у којима је уграђена кондензаторска батерија снаге 1200 kVAr	-	92	73, 91	-
Инвестициони трошкови	0	25000 €	50000 €	70000 €
Трошкови губитака	883075 €	743688 €	670056 €	623841 €
Укупни трошкови	883075 €	768688 €	720056 €	693841 €



Слика 4. Конвергенција критеријумске функције за буџет од 50000 €

Промена температуре и стопе прихватања, приказана на слици 5, указује на постепено смањење вероватноће прихватања неповољнијих решења, чиме се алгоритам усмерава ка стабилизацији добијеног решења.



Слика 5. Температура и стопа прихватања за буџет од 50000 €

Резултати оптимизације приказани у табели 2 показују да повећање расположивог буџета доводи до смањења укупних трошкова система, пре свега услед смањења губитака електричне енергије. Такође, добијена решења указују на тенденцију постављања кондензаторских батерија на ограниченом броју локација већих снага, чиме се постиже повољан однос између инвестиционих трошкова и уштеда у губицима.

На овај начин се указује на значај примене оптимизационих метода у планирању компензације реактивне снаге.

5. ЗАКЉУЧАК

Анализа утицаја кондензаторских батерија показује да њихова примена значајно доприноси побољшању напонских прилика и смањењу губитака снаге у радијалној дистрибутивној мрежи. Поред локације, значајан фактор представља и степен компензације, чијим повећањем долази до додатног смањења губитака снаге. Међутим, уочено је да повећање снаге кондензаторских батерија не доводи увек до пропорционалног побољшања, што указује на потребу за оптималним избором параметара. У циљу одређивања најповољније конфигурације,

формулисан је оптимизациони проблем заснован на минимизацији укупних трошкова система, који обухватају инвестиционе трошкове и трошкове губитака електричне енергије. Применом алгоритма симулираног каљења добијена су решења која обезбеђују повољан баланс између улагања и уштеда. Добијени резултати потврђују да оптимално планирање компензације реактивне снаге представља ефикасан приступ за унапређење рада дистрибутивних мрежа, како са техничког, тако и са економског аспекта.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] T. Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill, 2007.
- [2] Н. Рајаковић, Д. Тасић, Дистрибутивне и индустријске мреже, Академска мисао, Београд, 2008.
- [3] М. Ј. Миловановић, Ј. Н. Радосављевић, Б. Д. Перовић, „Одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у дистрибутивним мрежама применом генетског алгоритма“, Техника, 2017.
- [4] Н. Рајаковић, Д. Тасић, Н. Арсенијевић, М. Стојановић, Збирка задатака из дистрибутивних и индустријских мрежа, Београд, 2005.
- [5] Д. Кањо, Реконфигурација дистрибутивних мрежа применом математичких и хеуристичких оптимизационих метода, мастер рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2021.

Кратка биографија:



Марија Михајловић рођена је у Зрењанину 1997. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетика – Дистрибуирани енергетски ресурси одбранила је 2026.год.

Контакт: marijas.mih@gmail.com



Невен Ковачки рођен је 1987. године у Зрењанину. Дипломирао је на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи 2010., 2011. и 2018. године.

Контакт: kovackin@uns.ac.rs