

ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ БРОЈА И ЛОКАЦИЈЕ ДАЉИНСКИ КОНТРОЛИСАНИХ ПРЕКИДАЧА ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ ДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА**OPTIMAL PLACEMENT OF REMOTE-CONTROLLED SWITCHES IN AUTOMATED DISTRIBUTION NETWORKS**Биљана Татар, Невен Ковачки, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО**

Кратак садржај – У овом раду представљена је метода заснована на симулираном каљењу за одређивање оптималног броја и локације даљински контролисаних прекидача за аутоматизацију дистрибутивних мрежа. Основни циљ представљене методе јесте унапређење поузданости дистрибутивних мрежа. Представљена метода верификована је на примеру дистрибутивне мреже која садржи 31 чвор, а резултати су приказани и коментарисани у раду.

Кључне речи: дистрибутивна мрежа, поузданост, аутоматизација мреже, даљински контролисани прекидачи, симулирано каљење.

Abstract – This paper presents a method for optimal placement of remote-controlled switches in automated distribution networks which is based on simulated annealing. The aim of the presented method is to improve reliability of distribution network. The presented method is verified on the distribution network that consists of 31 nodes and the results are presented and discussed in the paper.

Keywords: distribution network, reliability, network automation, remote-controlled switches, simulated annealing.

1. УВОД

Основна функција електроенергетског система (ЕЕС) је континуално напајање потрошача електричном енергијом одговарајућег квалитета. У пракси се показује да су најчешћи узрок прекида напајања потрошача кварови у дистрибутивним мрежама (ДМ). Разлози за то су њихова величина, као и опрема лошијег квалитета која се у њих уграђује. Једна од најефективнијих мера за унапређење поузданости је аутоматизација ДМ, јер се на тај начин смањује како време трајања прекида напајања, тако и број корисника погођених кваром [1].

Одређивање оптималног броја и локације даљински контролисаних (аутоматизованих) прекидача за унапређење поузданости ДМ је комплексан оптимизациони проблем за чије решавање су током година дате различите методе и приступи. У овом раду је за ту сврху развијена метода на бази симулираног каљења, која спада у мета-хеуристичке оптимизационе методе. Као критеријумска функција узета је минимализација укупних трошкова током периода планирања, а који обухватају инвестиционе трошкове даљински контро-

лисаних прекидача и трошкове неиспоручене електричне енергије.

2. ПОУЗДАНОСТ ДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА

Поузданост рада је својство система да обави задату функцију у задатом обиму при унапред дефинисаним условима рада [2].

2.1. Индекси поузданости

Постоје три основна индекса поузданости [1]:

- интензитет отказа – квара,
- трајања прекида напајања,
- расположивост електричне енергије.

Применом основних индекса није могуће стећи укупну слику о поузданости дистрибутивне мреже (ДМ), јер не узимају у обзир потрошњу електричне енергије и број потрошача који су остали без напајања. Због тога, постоји скуп додатних индекса који се могу користити при оцени поузданости мреже који могу бити оријентисани на [3]: снагу и енергију потрошача, број потрошача погођених кваром и економске ефекте. У овом раду у разматрање је узет индекс очекиване годишње неиспоручене енергије ENSI, који спада у индексе поузданости оријентисане на снагу и енергију потрошача.

2.2. Мере за унапређење поузданости

Поузданост ДМ се може повећати смањењем интензитета и броја кварова, што углавном захтева велике инвестиције у елементе мреже. Такође, поузданост ДМ се може повећати смањењем трајања прекида напајања, што се постиже ефикаснијом идентификацијом места квара, као и бржом променом уклопног стања мреже при изолацији квара и рестаурацији напајања [4]. Наведени циљеви се постижу управо увођењем даљински контролисаних прекидача. Трећи начин за повећање поузданости је смањење броја корисника погођених кваром, што се може постићи одговарајућим планирањем и конфигурацијом ДМ, као и аутоматизацијом ДМ.

2.3 Методологија за анализу поузданости

Алгоритам за прорачун годишње очекиване неиспоручене енергије се базира на прорачуну интензитета квара и трајању прекида напајања након квара. Код прорачуна интензитета кварова потребни подаци се односе на тип разматраног елемента, док је за прорачун трајања прекида напајања потребно располагати са више података: топологијом (тј. конфигурацијом) ДМ, размештајем расклопних уређаја у мрежи, као и временом потребним за приступање појединим деловима мреже [4].

НАПОМЕНА:

Овај чланак проистекао је из мастер рада чији ментор је био доцент др. Невен Ковачки

Алгоритам прорачуна очекиване годишње неиспоручене енергије састоји се из три корака [4]:

Корак 1 – Прорачун интензитета кварова грана разматране дистрибутивне мреже. За гране добијене од кабловских и ваздушних водова, као и за трансформаторске гране. Интензитети кварова (λ_i) су:

$$\lambda_i = \lambda_{i,pod} \cdot l_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_{gr}, \quad (1)$$

где су $\lambda_{i,pod}$ подужни интензитет квара гране (i) [kvar/km], l_i дужина гране (i) (за трансформаторске гране $l = 1$ [km]) и n_{gr} укупан број грана разматране дистрибутивне мреже.

Корак 2 – Прорачун очекиваног годишњег трајања прекида напајања чворова услед кварова на гранама мреже:

$$\tau_j = \sum_{i \in \Delta_j} \lambda_i \cdot T_{j,i}, \quad j = 1, 2, \dots, n_{cv} \quad (2)$$

где су τ_j очекивано годишње трајање прекида на напајању чвора j , $T_{j,i}$ трајање прекида напајања чвора j , услед квара гране i , Δ_j скуп индекса грана које се налазе на истом изводу као грана j и n_{cv} укупан број чворова разматране дистрибутивне мреже.

Трајање прекида напајања чвора j услед квара гране i ($T_{j,i}$) се израчунава на следећи начин:

$$T_{j,i} = (T_{j,i})_{loc} + (T_{j,i})_{izo} + (T_{j,i})_{obn}, \quad (3)$$

где су $(T_{j,i})_{loc}$ време трајања прекида напајања чвора j због налажења локације квара на грани i , $(T_{j,i})_{izo}$ време трајања прекида напајања чвора j због изолације квара на грани i , $(T_{j,i})_{obn}$ време трајања прекида напајања чвора j због обнављања напајања (рестаурације) када је квар на грани i .

Корак 3 - Прорачун индекса поузданости- очекиване годишње неиспоручене енергије помоћу следеће релације:

$$ENSI = \sum_{j=1}^{n_{cv}} P_j \cdot \tau_j, \quad (4)$$

где су P_j просечна годишња активна снага потрошње чворова (j), τ_j очекивано годишње трајање прекида напајања чвора (j) које је израчунато у претходном кораку.

3. АУТОМАТИЗАЦИЈА ДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА

Аутоматизација дистрибутивне мреже (ДМ) је један од најбољих начина којим се може побољшати поузданост ДМ, јер се тиме смањује трајање прекида напајања, као и број потрошача погођених кваром.

Систем за аутоматизацију чине аутоматизовани расклопни уређаји, систем за надзор и прикупљање података у реалном времену (SCADA) и систем за управљање дистрибутивним мрежама (ДМС).

Расклопни уређаји је заједнички термин за опрему која се користи за прекидање и успостављање струјног кола струјног кола [1]. У овом раду, уређаји који су коришћени за унапређење поузданости су: прекидач, реклозер и склопка растављач.

Прекидач је уређај чији је главни задатак да успостави, проводи или прекине радну струју у нормалном режиму рада као и да прекине струју кратког споја.

Реклозер је заштитни уређај који има свој заштитни релеј и систем за аутоматско поновно укључење (АПУ).

Он утиче на смањење броја корисника погођених кваром као и на смањење времена трајања прекида напајања.

Склопка растављач је уређај који може да успостави, проводи и прекине радну струју али не и струју кратког споја. Има важну улогу при изолацији квара.

SCADA (*eng Supervisory Control and Data Acquisition*) је основа система за управљање у реалном времену и важна компонента система за аутоматизацију [1]. Она прикупља податке из система (мерења и сигнализација) што диспечеру омогућава да види стање у систему и на основу тога донесе одлуку о спровођењу управљачке команде. ДМС је софтвер намењен за управљање дистрибутивним мрежама. Овај софтвер обезбеђује многе погодности и пружа разне могућности и функције, од токова снага, естимације стања, анализе поузданости, управљање кваровима и других основних функција па све до напредних као што су реконфигурација мреже, аутоматизације, планирање и развој итд.

4. ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ БРОЈА И ЛОКАЦИЈЕ ДАЉИНСКИ КОНТРОЛИСАНИХ ПРЕКИДАЧА

Проблем одређивања оптималног броја и локације даљински контролисаних прекидача може се преставити следећом критеријумском функцијом:

$$\min \{ TC = c_{inv} + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+d)^t} \cdot c_{ensi} \}, \quad (5)$$

где су c_{inv} инвестициони трошкови даљински контролисаних прекидача, c_{ensi} годишњи очекивани трошкови неиспоручене енергије, d интересна стопа и T период разматрања.

4.1. Оптимизационе методе

За решавање проблема оптималне аутоматизације дистрибутивне мреже могу се користити следеће методе [5]:

- математички засноване методе,
- хеуристички методе,
- мета-хеуристичке методе.

У математички методама највише су заступљене оне које су засноване на мешовитом целобројном линеарном програмирању (МИЛП). Ове методе гарантују глобални оптимум, међутим због своје комплексности и димензиалности нису практичне за примену у реалним дистрибутивним мрежама.

За разлику од њих, хеуристичке методе дају довољно добро решење за мреже реалних димензија уз коришћење мало рачунарских ресурса. Њихова мана је та што с обзиром да траже само локални оптимум зависе претежно од почетног решења, па не можемо знати да ли је то сигурно најоптималније решење.

Да би се унапредио квалитет оваквог решења, пре свега превазилажење проблема локалног оптимума, предложени су алгоритми који користе неку врсту стохастичког претраживања који су засновани на аналогiji са природним процесима и они се називају мета-хеуристички алгоритми [5]. Мета-хеуристичка метода која је изабрана у овом раду је симулирано каљење .

4.2. Метода симулираног каљења

На почетку алгоритма бира се почетно решење и поставља се температура на неку довољно велику вредност да би се обезбедило да сва решења буду прихватљива. Даље се сам процес каљења извршава итеративно. У свакој итерацији се бира ново суседно решење случајним избором и затим се проверава да ли је оно боље или горе од претходног. Уколико је боље оно се прихвата као ново текуће решење, а ако није оно се може прихватити са неком вероватноћом која зависи од контролног параметра T и деградације решења ΔE . На овај начин СК алгоритам дозвољава деградацију решења како би се изашло из локалног оптимума и како би се дошло у глобални оптимум. Вероватноћа да се прихвати лошије решење ће бити велика на великим температурама, а како температура пада ће бити све мања и мања јер би тада требало да се већ налази у околини оптималног решења (као што ће атоми заузимати положај само у стању са минималном енергијом кад је температура мала). Ова вероватноћа генерално прати Болтзманову расподелу [5]:

$$P(\Delta E, T) = e^{-\frac{f(s') - f(s)}{T}}$$

На свакој температури генерише се више суседних решења, а температура се смањује према дефинисаном програму хлађења када се генерише довољан број суседних решења. Алгоритам симулираног каљења представља генеричку методу за решавање било каквог оптимизационог проблема Модификован псеудо код СК коришћен у овом раду гласи:

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. За почетно решење узима се ДМ без икаквих аутоматизованих уређаја */

$T_k = T_{max}$; /* Почетна температура */
 $k = 1$;

Понављати /*Глобална итерација, k */

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

Генерисање суседног (блиског) решења s' тако што се дода или склони неки аутоматизован уређај;

$\Delta E = f(s') - f(s)$; /* Разлика циљних функција, тј. остварених укупних трошкова из формуле 4.1 */

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:

$$e^{-\Delta E / T_k} > rand[0,1];$$

Ако је $f(s') - f(s_{best})$ /* Прихватити s' као најбоље решење до сад (s_{best}) */

Док Услов заустављања /* Дефинисан је број итерација $n = 500$ на одређеној температури*/

$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$ /* Темпо (брзина) хлађења, где је $\alpha = 0,9$ */

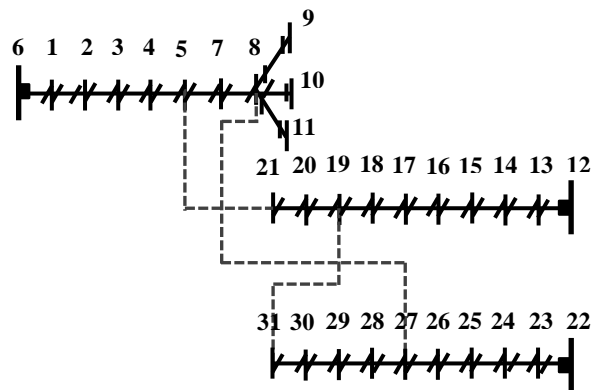
$k = k + 1$;

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

Излаз: Најбоље нађено решење (s_{best})

5. ВЕРИФИКАЦИЈА АЛГОРИТМА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

У овој глави је извршена верификација алгоритама који су коришћени за прорачун поузданости и за оптималну аутоматизацију дистрибутивне мреже (ДМ). За ову сврху изабрана ја ДМ која се састоји од три средњенапонска извода и приказана је на слици 1.



Слика 1. Приказ тест ДМ [6]

Трансформаторске станице СН/НН међусобно су повезане надземним и подземним кабловима чији су параметри дати у литератури [6]. Ту су такође наведене и вредности активног оптерећења за сваки од чворова ДМ. Ова мрежа има само обичне растављаче на гранама, испрекидане линије представљају нормално отворене растављаче и квадратићи су изводни прекидачи који су једини аутоматизовани.

У овом делу су дати резултати прорачуна оптималне аутоматизације мреже за период од 15 година, за два различита типа потрошача, а то су домаћинства и комерцијални корисници.

Ово је урађено како би се видело колико цена неиспоручене енергије утиче на број постављених уређаја литературе у мрежи. Параметри као што су цена неиспоручене електричне енергије и цена уређаја преузети су из [1].

У табели 1 приказани су резултати када се сматра да су потрошачи домаћинства.

Редом су приказане локације на којима је постављен реклозер (Р), секционер (С), аутоматизација НО растављача (НО) (у форми грана (чвор1 – чвор2)), цена неиспоручене енергије у разматраном периоду T (C_{ENSI}), цена инвестиција (C_{INV}) и укупни трошкови (TC)

У табели 2 приказани су резултати прорачуна оптималне аутоматизација када су потрошачи комерцијални корисници. Резултати су приказани на исти начин као у табели 1.

Из приложених резултата може се видети да се аутоматизацијом ДМ укупни трошкови за разматрани период планирања значајно смањују. За случај домаћинстава то смањење износи 1,7 пута, а за случај комерцијалних корисника чак 7,6 пута

Табела 1. Резултати прорачуна када су потрошачи типа: домаћинства

	P	C	HO	C _{ENSI} [\$]	C _{INV} [\$]	TC [\$]
Почетно решење	/	/	/	78399,2	0	78399,2
Оптимально решење	6(5-7), 15(14-15)	2(1-2), 23(22-23), 29(28-29)	11(5-21), 12(8-27)	18823,74	26600,00	45423.7

Табела 2. Резултати прорачуна када су потрошачи типа: комерцијални корисници

	P	C	HO	C _{ENSI} [\$]	C _{INV} [\$]	TC [\$]
Почетно решење	/	/	/	2438220	0	2438220
Оптимально решење	7(7-8), 20(19-20)	3(2-3), 5(4-5), 15(14-15), 18(17-18), 21(20-21), 21(20-21), 25(24-25), 26(25, 26), 27(26-27), 28(27-28), 30(29-30), 30(29-30)	11(5-21), 12(8-27), 22(19-31)	254872,83	64900	319773

6. ЗАКЉУЧАК

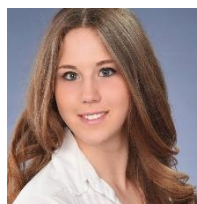
Аутоматизација ДМ је један од најефикаснијих начина за унапређење поузданости ДМ. У овом раду је предложена метода заснована на мета-хеуристици за одређивање оптималног броја и локација аутоматизованих прекидача како би се цена неиспоручене енергије у неком разматраном периоду смањила. Показано је да се у свим случајевима исплати убацивање аутоматизованих уређаја па чак и када је цена неиспоручене енергије мала. Такође, може се приметити када је цена неиспоручене енергије већа исплативо је убацивати више аутоматизованих уређаја него када је цена мања.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Б.Браклић: *Одређивање оптималног броја, типа и локације уређаја за аутоматизацију електродистрибутивних мрежа*, докторска дисертација; Факултет техничких наука, Нови Сад, 2018.
- [2] М.Д.Нимрихтер: *Електродистрибутивни системи*; ФТН издаваштво, Нови Сад, 2009.
- [3] Г.Швенда: *Специјализовани софтвери у електроенергетици*, скрипта са предавања из истоименог предмета, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2019.
- [4] Д.Поповић, Д.Бекут, В.Дабић: *Специјализовани ДМС Алгоритми*; Просвета, Нови Сад, 2011.
- [5] Ж.Поповић: *Планирање развоја дистрибутивних мрежа у присуству неизвесности*; докторска дисертација; Факултет техничких наука, Нови Сад, 2011.

- [6] Ching-Tyong Su, Chu-Sheng Lee: Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution; *IEEE Trans. on. Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, July 2003; pp. 1022-1027; DOI: [10.1109/TPWRD.2003.813641](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813641)

Кратка биографија



Биљана Татар рођена је у Новом Саду 1996. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи одбранила је 2019. године.



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