

ПРОРАЧУН ТОКОВА СНАГА ИНТЕГРИСАНИХ ПРЕНОСНО-ДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА

POWER FLOW PROCEDURE FOR INTEGRATED TRANSMISSION-DISTRIBUTION NETWORKS

Коста Јоцић, Никола Војновић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – У овом раду предложена је процедура за прорачун токова снага интегрисано преносно-дистрибутивних мрежа. Представљени су модели различитих типова мрежа и проблема токова снага и поступци за њихово решавање, као вид одвојеног приступа при анализи стааионарног стања мреже. Дат је предлог заједничког, јединственог поступка над интегрисаном мрежом уз приложене резултате прорачуна над конкретним примером мреже и дискусију резултата.

Кључне речи: интегрисана преносно-дистрибутивна мрежа, Њутн-Рафсонов поступак, поступак сумирања струја и корекција напона, токови снага

Abstract – This paper proposes one solution for an integrated power flow calculation procedure over an integrated transmission-distribution networks. Models of different types of network and power flow problems, as well as the methods for their solution, are introduced as a form of the separated approach to a steady-state network analysis. Building upon these foundations, an integrated, unified, procedure applicable to the integrated network is proposed. The validation of the approach is given through calculations performed on a representative test network, followed by a discussion of the obtained results.

Keywords: integrated transmission-distribution network, Newton-Raphson procedure, Backward/Forward Sweep, load flow

1. УВОД

Прорачуни токова снага устаљених режима спадају у основне прорачуне у дистрибутивним и електроенергетским менаџмент системима. На њиховим резултатима се базира велики број других прорачуна, услед чега је неопходно развити погодне алгоритме који ће на што поузданији и што ефикаснији начин обезбедити резултате тих прорачуна у сваком захтеваном моменту. Услед моделовања мрежа нелинеарним моделима, поступци којима се врши анализа стања система су итеративни. У раду су представљени различити типови алгоритама, намењених за прорачуне токова снага различитих типова мрежа, као и комбинација истих за анализу

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Никола Војновић, ванред. проф.

стања интегрисаних мрежа. За преносне мреже представљен је Њутн-Рафсонов, а за дистрибутивне поступак сумирања струја и корекција напона. Ово решење представља најпогоднији избор, услед упетљане структуре преносних, односно радијалних структура и великих димензија дистрибутивних система. Сами модели токова снага разматраних мрежа писани су сходно методу независних напона (за пренос) и методу независних струја (за дистрибуцију). Софтверски пакет MKL, библиотеке компаније Intel [1] и Гаус-Зајделов нумерички метод употребљени су као алати за нумеричке прорачуне.

Услед раста утицаја децентрализације ЕЕС-а долази појаве реверзибилних токова снага, од дистрибутивних ка преносним деловима система, као и преношење несиметрије режима у истом смеру. Те појаве додатно усложњавају међусобни утицај ова два дела система и мотивишу потребу за развојем процедуре која би у реалном времену вршила прорачун токова снага у целокупној мрежи.

Предложени поступак се заснива на интеграцији претходно описана два поступка у један, који се примењује над јединственом преносно-дистрибутивном мрежом.

Математичка подлога, као и тестирање предложеног интегрисаног поступка изложени су у главама 2 и 6, респективно.

2. ЕЛЕМЕНТИ МАТЕМАТИКЕ

Модели проблема токова снага исказују се кроз системе нелинеарних једначина, чија се решења добијају решавањем њихове линеаризоване форме. Резултати добијени таквим приступом су само апроксимације решења почетног система. Што је околина линеаризације ужа, то су апроксимације тачније. Сходно горе наведеном, поступци за решавање таквих система су итеративни.

У наставку се, применом два поступка поменути у уводу, кроз делове 2.1 и 2.2, решава следећи систем нелинеарних алгебарских једначина:

$$\begin{aligned} b_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ b_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ &\vdots \\ b_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (1)$$

2.1. Њутн-Рафсонов поступак

Њутн-Рафсонов поступак се ослања на прва два члана развоја нелинеарне функције у Тејлоров ред, у околини разматране тачке. Тиме се добија линеарна апроксимација разматране функције. Решавање почетне нелинеарне се своди на решавање линеарне функције, чиме добијено решење није тачно, већ апроксимирано [2], [3]. На примеру система датог релацијама (1), Њутн-Рафсонов поступак се примењује кроз следеће кораке:

1. Развити све функције $f_k(\mathbf{X})$ у Тејлоров ред у околини h - те апроксимације решења. Након тога се врши линеарна апроксимација узимањем само прва два члана, за сваку независно променљиву, чиме се добија релација:

$$f_k^h(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_k(x_1^h, x_2^h, \dots, x_n^h) + \frac{1}{1!} \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial f_k(x_1^h, x_2^h, \dots, x_n^h)}{\partial x_i} \right|_{x_j=x_j^h, j=1,2,\dots,n} \cdot (x_i - x_i^h), \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, n.$$

2. С обзиром да се решава линеаризовани облик (дат претходном релацијом) почетног нелинеарног система (1), релација (2), након сређивања, добија следећу форму:

$$\Delta b_k^h = \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial f_k(x_1^h, x_2^h, \dots, x_n^h)}{\partial x_i} \right|_{x_j=x_j^h, j=1,2,\dots,n} \cdot \Delta x_i^h, \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots, n,$$

где су:

$$\Delta b_k^h = b_k - f_k(x_1^h, x_2^h, \dots, x_n^h), \quad (4)$$

$$\Delta x_i^h = x_i^{h+1} - x_i^h, \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

3. Ако се чланови суме из релације (3) обележе са a_{ki}^h , тада се тој релацији може дати следећа матрична форма:

$$\begin{bmatrix} \Delta b_1^h \\ \Delta b_2^h \\ \vdots \\ \Delta b_n^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^h & a_{12}^h & \dots & a_{1n}^h \\ a_{21}^h & a_{22}^h & \dots & a_{2n}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^h & a_{n2}^h & \dots & a_{nn}^h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1^h \\ \Delta x_2^h \\ \vdots \\ \Delta x_n^h \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где је матрица из релације јакобијан функција ($J(\mathbf{X}^h)$) с десних страна система, датог релацијама (1), израчунат за текућу (h - ту) апроксимацију његовог решења \mathbf{X}^h .

4. Разматрани систем линеарних једначина треба решити по вектору корекција текућих апроксимација решења система $\Delta \mathbf{X}^h$.
5. На основу добијеног вектора из претходне тачке, долази се до наредне апроксимације, која се узима за решење система, услед веће тачности:

$$\mathbf{X}^{h+1} = \mathbf{X}^h + \Delta \mathbf{X}^h. \quad (7)$$

6. Проверава се задовољење критеријума конвергенције:

$$|x_k^{h+1} - x_k^h| \leq \varepsilon_x \wedge$$

$$|b_k - f_k(x_1^{h+1}, x_2^{h+1}, \dots, x_n^{h+1})| \leq \varepsilon_f, \quad (8)$$

$$h = 1, 2, 3, \dots; \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

7. Уколико је постигнуто задовољење критеријума, рачуна се наредна апроксимација решења и она се узима као крајње решење поступка. У супротном, поступак се наставља у наредној итерацији.

2.2. Гаус-Зајделов метод

Разматрани систем нелинеарних једначина дат релацијама (1) се, за потребе примене овог метода, трансформише у погоднији облик. Ако се познаје h -та апроксимација решења, коригована $(h+1)$ -ва апроксимација решења, сходно Гаус-Зајделовом методу гласи [3], [4]:

$$\begin{aligned} x_1^{h+1} &= \Phi_1(x_1^h, x_2^h, x_3^h, \dots, x_{n-1}^h, x_n^h), \\ x_2^{h+1} &= \Phi_2(x_1^{h+1}, x_2^h, x_3^h, \dots, x_{n-1}^h, x_n^h), \\ &\vdots \\ x_n^{h+1} &= \Phi_n(x_1^{h+1}, x_2^{h+1}, x_3^{h+1}, \dots, x_{n-1}^{h+1}, x_n^h). \end{aligned} \quad (9)$$

Задовољење критеријума конвергенције се проверава следећом релацијом:

$$|x_k^{h+1} - x_k^h| \leq \varepsilon_x \wedge$$

$$|b_k - f_k(x_1^{h+1}, x_2^{h+1}, \dots, x_n^{h+1})| \leq \varepsilon_f, \quad (10)$$

$$h = 1, 2, 3, \dots; \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

3. ПРИМЕНА ЊУТН-РАФСОНОВОГ ПОСТУПКА У ПРОРАЧУНУ ТОКОВА СНАГА

Математички модел произвољне преносне мреже (приказане погонским колом на слици 1) може се исказати са две реалне релације биланса снага, написаних у складу са методом независних напона, и то у адмитантној форми (релације (11) и (12)). Тим релацијама се могу описати сви чворови система, односно њихове инјектиране снаге и снаге које од тих чворова отичу у остатак система:

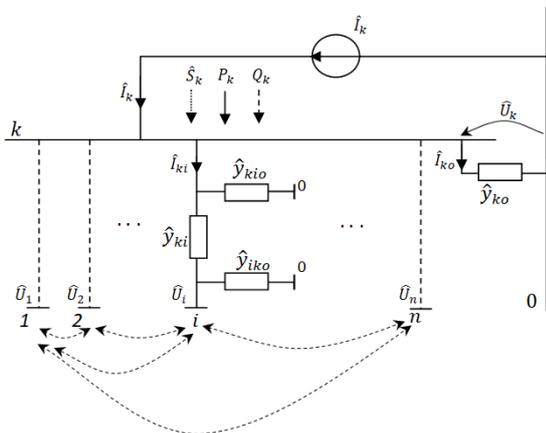
$$P_k = \operatorname{Re} \left\{ \hat{U}_k^* \sum_{i=1}^n \hat{Y}_{ki} \cdot \hat{U}_i \right\} \quad (11)$$

$$Q_k = -\operatorname{Im} \left\{ \hat{U}_k^* \sum_{i=1}^n \hat{Y}_{ki} \cdot \hat{U}_i \right\} \quad (12)$$

Сходно класичној класификацији чворова, независне променљиве овог модела су модули и углови напона (или само углови) чворова, а вредности инјектираних снага (или бар активних) су познате вредности. Почетне апроксимације, у чијој околини се врше линеаризације, су претпостављене вредности, дате „flat-start“ приступом. Парцијалним изводима десних страна тих релација по свим (могућим) независним променљивама добијају се елементи матрице Јакобијана. Тиме се комплетира матрична форма модела токова снага, исказана релацијом (13). Неким од солвера заснованих на Гаусовој редукцији, или неком сличном нумеричком методу, се долази до решења система [3], [5].

$$\Delta S_{(2n-2-p) \times 1}^h = J_{(2n-2-p) \times (2n-2-p)}^h \Delta X_{(2n-2-p) \times 1}^h \quad (13)$$

Са леве стране модела су одступања инјектираних снага, као познате вредности. Решење система чини вектор корекција апроксимација непознатих величина стања у текућој итерацији h , приказан вектор колоном на десној страни релације (13). Након задовољења критеријума, рачунају се непознате стања, на основу добијених корекција, и наредна апроксимација се проглашава решењем. Након тога је могуће реконструисати целокупни режим мреже.



Слика 1. Опште поједностављено погонско коло дела преносне мреже

4. ПРИМЕНА ПОСТУПКА СУМИРАЊА СТРУЈА И КОРЕКЦИЈА НАПОНА У ПРОРАЧУНУ ТОКОВА СНАГА

Дистрибутивне мреже, услед, махом, радијалне структуре и димензија модела, захтевају другачији тип алгоритма за прорачун токова снага. Дистрибутивна радијална мрежа (приказана на слици 2) моделована је „Г-сегментима“ и нумерисана по слојевима. Тиме је извршена неопходна припрема за сам поступак [5].

Поступак описан у овој глави рада заснива се на сумирању струја од последњих слојева мреже ка корену, те корекцији напона чворова, у обрнутом смеру, посредством падова напона израчунатих на основу нових апроксимација струја редних грана. Поступак сумирања струја и корекција напона (*BFS – Backward Forward Sweep*) може се представити следећим корацима:

1. Сумирање струја:

$$\hat{I}_k^{h+1} = \frac{\hat{S}_k}{\hat{U}_k^{*h}} + \hat{y}_{ok} \hat{U}_k^h + \sum_{j \in \alpha_k} \hat{I}_j^{h+1}, \quad (14)$$

$$k = n, n-1, \dots, 3, 2;$$

2. Корекција напона:

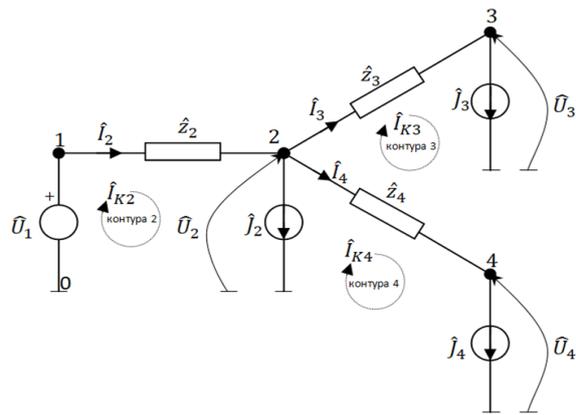
$$\hat{U}_k^{h+1} = \hat{U}_k^{h+1} - \hat{z}_k \hat{I}_k^{h+1} \quad (15)$$

$$k = 2, 3, \dots, n;$$

3. Провера задовољења критеријуме конвергенције:

$$|\Delta \theta_k^h| \leq \varepsilon_1 \wedge |\Delta U_k^h| \leq \varepsilon_2. \quad (16)$$

Решења модела су комплексни напони чворова, на основу којих се врши реконструкција режима мреже.



Слика 2. „Г-сегменти“ дела радијалне мреже

5. ТОКОВИ СНАГА ИНТЕГРИСАНИХ ПРЕНОСНО-ДИСТРИБУТИВНИХ МРЕЖА

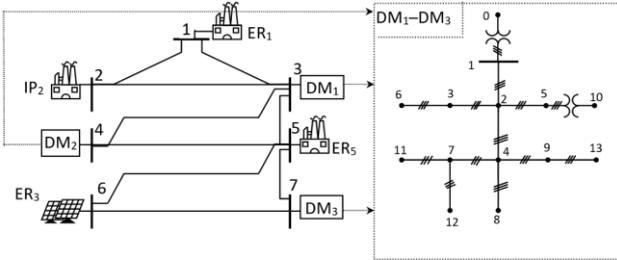
Поступак предложен у овом раду представља једну од две различите подврсте метода раздвајања. Прва прописује да једна субпроцедура размењује резултате са другом, тек након конвергенције по својим критеријумима. Комплетан прорачун се завршава задовољењем додатног критеријума конвергенције, услед постојања још једне итеративне шеме, поред већ постојеће две. Друга подврста (којој припада предложени поступак) прописује да се размена (међу)резултата врши у току једне итерације. То значи да постоји само једна итеративна шема и истовремена провера критеријума конвергенције за обе субпроцедура. Њутн-Рафсонов поступак (Глава 3) и „*BFS*“ поступак (Глава 4) представљају те субпроцедура. Поступак се излаже над уопштеним примером интегрисане мреже, састављене из дела преносне мреже од n чворова у чијих су неколико чворова прикључене дистрибутивне мреже од по t чворова. Претпоставља се да је целокупна интегрисана мрежа уравнотежена и да је режим симетричан.

Припреме свих мрежа, као почетак поступка, су независне. Итеративни део почиње кораком сумирања струја дистрибутивних подручја. Он резултује, у вредностима снага потрошње тих подручја. Те снаге представљају улазе за Њутн-Рафсонов поступак. Након извршења целе итерације те субпроцедура, добијају се нове апроксимације модула и угла напона чворова преносне мреже. Са тим вредностима поступак се наставља од дела намењеног дистрибуцији. Извршава се корекција напона, након које се располаже новим апроксимацијама величина стања целокупне интегрисане мреже. Следећим кораком се проверава задовољење критеријума конвергенције. Врши се за сваки део поступка независно. Када се критеријуми задовоље, врши се реконструкција режима. У супротном, прелази се наредну итерацију, те се понављају описани кораци. Једна од кључних особина предложеног поступка јесте моменат размене (међу)резултата. Таква интеракција између два дела поступка даје чвршћу међузависност, него код метода раздвајања првог типа. Такође, битна особина овог поступка јесу ефикасности одабраних алгоритама који га сачињавају [2], [3], [4].

6. НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР

У овој глави врши се тестирање предложеног поступка, на примеру интегрисане преносно-дистрибутивне мреже, приказане на слици 3 [9]. Подсистем преноса јесте напонског нивоа 110 [kV], док је остатак података дат у табелама 1, 2 и 3. Потрошње чворова дистрибутивних подручја јесу 200 [kW] и 67 [kVAR], редом. Режим дистрибутивне мреже је апроксимиран симетричним режимом, са једнаким потрошњама по чворовима и искључиво радијалне структуре.

Поступак је обрађен у програмском језику Фортран. Резултати прорачуна, изложени у наставку, су неке очекиване вредности и понашања, с обзиром да се ради о једноставној валидацији предложеног поступка.



Слика 3. Пример интегрисане преносно-дистрибутивне мреже

У табели 4 приказане су вредности напона чворова преносне мреже, након конвергенције прорачуна, а на слици 4 вредности инјектираних снага по чворовима и токови снага по водовима. Процентуалне вредности снага губитака су испод 1 [%]. Чвор 2 има највећу потрошњу и активне и реактивне снаге, те је и оправдан најнижи модуло и угао напона на његовим сабирницама. Чвор 6 има највећу вредност модула напона, без обзира што се највише снаге инјектира у чвору 5, јер је чвор 6 типа PV (вредност задатог модула напона, из табеле 2). Исти закључак се може уочити и на примеру токова снага у једној од дистрибутивних мрежа (слика 5). Са графика, датог сликом 6, може се приметити да је највећи пад напона присутан између чворова 1 и 2. Разлог томе јесте што се у другом слоју налази само једна грана, тј. са ње се напаја највећа количина потрошње. Променом топологије (уз исте остале факторе: профил потрошње, радијална структура, параметри) се могу променити напонске прилике у мрежи. Сваки од тих појединачних фактора, или њихова комбинација, мења напонске прилике.

Табела 1. Параметри преносног и дистрибутивних подсистема

	r^+ [Ω]	x^+ [Ω]	g^+ [nS]	b^+ [μ S]	l [km]
ПМ	0,01	0,336	2,6	0,33	60
ДМ	0,3465	1,0179	0,0	6,2998	0.6096

Табела 2. Управљачке стратегије енергетских ресурса

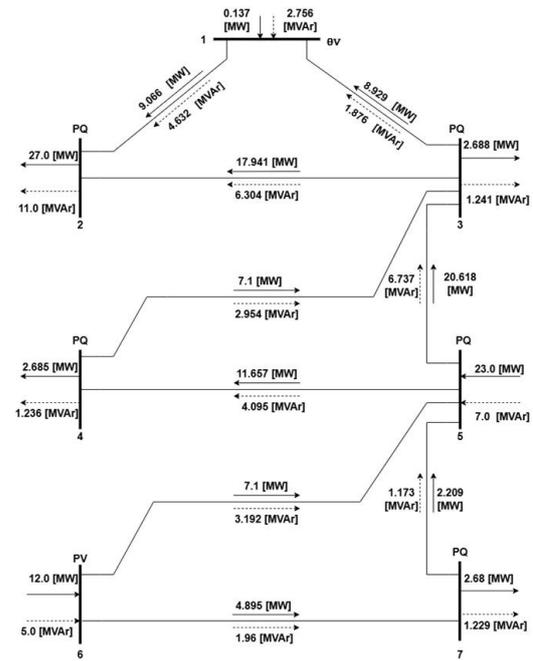
Енергетски ресурс/индустријска потрошња	$P_{inj}^{3\sim}$ [MW]	$Q_{inj}^{3\sim}$ [MVAR]	Модул напона [kV]
IP ₂	-27,0	-11,0	/
ER ₅	23,0	7,0	/
ER ₆	12,0	/	112,364

Табела 3. Подаци о трансформаторима

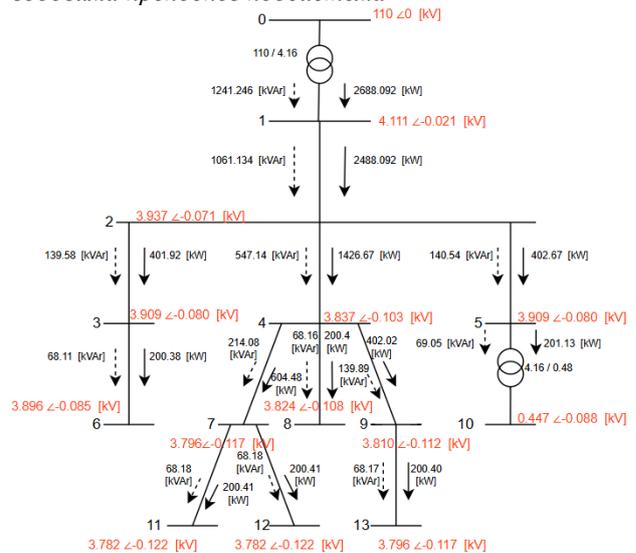
	V_{n1} [kV]	V_{n2} [kV]	R [%]	X [%]	S_n [kVA]
TR 1	110,0	4,16	1,0	8,0	5000,0
TR 2	4,16	0,48	1,1	2,0	500,0

Табела 4. Напонски профили чворова преносне мреже

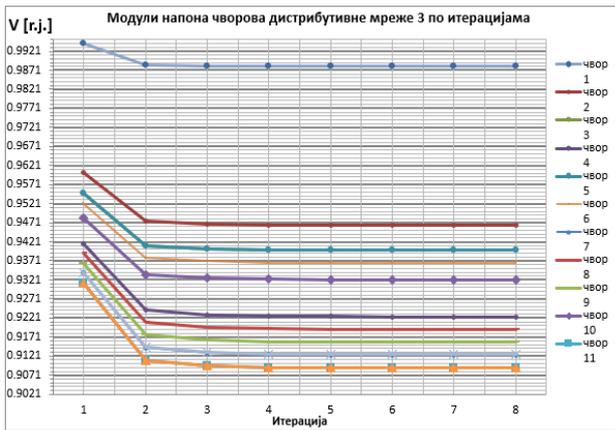
Чвор	Модуло напона		Угао [rad]
	[kV]	[r.j.]	
1	110,00000	1,00000	0,00000
2	109,09184	0,99174	-0,01499
3	110,38258	1,00347	0,01474
4	110,96073	1,00873	0,02935
5	111,76524	1,01604	0,04811
6	112,36400	1,02149	0,05937
7	111,96713	1,01788	0,05162



Слика 4. Инјектиране снаге чворова и токови снага по водовима преносног подсистема



Слика 5. Напонски профили и токови снага једне дистрибутивне мреже



Слика 6. Модули напона чворова дистрибутивне мреже кроз итерације

7. ЗАКЉУЧАК

Прорачуни токова снага заузимају централно место међу прорачунима у електроенергетским и дистрибутивним менаџмент системима. Неопходност поузданости и ефикасности њихових резултата је на високом нивоу, што чини њихову област истраживања стално отвореном за нове предлоге и решења.

Традиционални приступ проблему токова снага, који диктира независан приступ анализама стања преносних и дистрибутивних мрежа, актуелан је већ деценијама. С друге стране, децентрализација електроенергетских система, у последње време, добија на значају и све више утиче на природу токова снага у мрежи. Тај утицај усложњава међузависности дистрибутивних и преносних подсистема, и тиме ствара потребу за развојем неких нових алгоритама који ће веродостојније анализирати стање мреже. Тај развој је мотивисао настанак целокупне нове области истраживања, која нуди предлоге интегрисаних поступака прорачуна токова снага над интегрисаним преносно-дистрибутивним мрежама.

У овом раду предложено је једно решење за прорачун токова снага интегрисаних преносно-дистрибутивних мрежа. Развијена процедура настала је синтезом два традиционална поступка: Њутн-Рафсоновог и поступка сумирања струја и корекција напона. Први поступак је оптималан за обраду преносних, док је други оптималан за обраду дистрибутивних мрежа.

Предложени интегрисани поступак је тестиран на једноставном примеру преносно-дистрибутивне мреже. Резултати добијени тим прорачуном одсликавају очекиване вредности, с обзиром на улазне податке и пример мреже. Вредности модула и угла напона чворова, након прорачуна, налазе се у очекиваним границама. Један од мноштва могућих тема за даља истраживања би могла бити развој и тестирање овог поступка на примеру несиметричних режима у интегрисаним мрежама.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/tools/oneapi/onemkl.html> (приступљено у марту 2025.)
 - [2] Стрезоски Ц. Владимир, *Основни прорачуни електроенергетских система*, Том I. Нови Сад, Србија: ФТН издаваштво, 2017.
 - [3] Војновић Никола, „Прорачун токова снага неуравнотежених мрежа са енергетским ресурсима прикљученим на мрежу преко уређаја енергетске електронике“, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2018.
 - [4] Стрезоски В. Реља, „Теоријска заснованост прорачуна симетричних токова снага радијалних дистрибутивних мрежа“, дипломски рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2011.
 - [5] Стрезоски Ц. Владимир, *Основни прорачуни електроенергетских система*, Том II. Нови Сад, Србија: ФТН издаваштво, 2017.
- DOI: <https://doi.org/10.24867/34BE21Jocic>
 DOI: <https://doi.org/10.24867/34BE21Jocic>
 DOI: <https://doi.org/10.24867/34BE21Jocic>
- [9] IEEE Test feeder, <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. 13-bus feeder. (приступљено у марту 2025.)

Кратка биографија:



Коста Јоцић рођен је у Новом Саду 1996. год. Дипломирао је на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи 2019. године.



Никола Војновић рођен је у Новом Саду, 1987. год. Дипломирао је, мастерирао и докторирао на Факултету техничких наука у Новом Саду из области Електротехнике и рачунарства.