

Младен М. Остојић¹, Горан С. Мамлић¹, Јана Ђ. Тохољ¹



Кварови са прекидом проводника у преносној мрежи и предлози за побољшање рада заштите

¹ Акционарско друштво „Електромрежа Србије” Нови Сад *

<https://doi.org/10.18485/epij.2024.2.2.3>

Оригинални научно-истраживачки рад

Кључне поруке

- Приказана је теоријска анализа кварова са прекидом проводника
- Разматран је конкретан квар са прекидом проводника у преносној мрежи
- Предложене су мере за побољшање постојећих подешавања заштите

Кратак садржај

У раду је извршена анализа кварова са прекидом проводника на надземним водовима у преносној мрежи. Објашњени су узроци који изазивају појаву прекида и проблеми које може изазивати оваква врста кварова. Разматрани су једнофазни и двофазни прекиди проводника, као најчешћи случајеви серијског квара који се појављују у пракси. Приказане су и објашњене еквивалентне шеме и изведене аналитичке једначине које ближе описују наведени тип серијског квара. У посебном делу дат је преглед најчешће коришћених типова заштитних релеја у преносној мрежи, са посебним нагласком на критеријуме који се користе за детекцију прекида проводника. Као илустрација, приказан је поремећај са прекидом проводника који се десио на надземном воду 110 kV напонског нивоа, а уочен је у трансформаторској станици (ТС) „Сомбор 3”. Наведени поремећај специфичан је по томе што је до прекида проводника дошло на надземном воду који није директно везан на ТС „Сомбор 3”, а остао је неопажен дужи период. Извршена је анализа постојећих подешавања заштите и струјног оптерећења надземних водова повезаних на ТС „Сомбор 3”. На основу изведених закључака, предложене су мере за унапређење рада функције за детекцију прекида проводника.

Кључне речи

Надземни водови, несиметрија струја, прекид проводника, преносна мрежа

Напомена:

Чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Анализа кварова са прекидом проводника у преносној мрежи и препоруке за подешавање заштите”, награђеног у Студијском комитету СТК-Б5 Заштита и аутоматизација на 36. Саветовању CIGRE Србија, 22-26. маја 2023.

Примљено: 17. јун 2024. Рецензирано: 3. јул 2024.
Измењено: 5. јул 2024. Одобрено: 12. јул 2024.

*Кореспондирајући аутор: Младен М. Остојић
имејл: mladen.ostojic@ems.rs

1. УВОД

Прекид проводника у преносним или дистрибутивним мрежама је појава која се знатно ређе дешава у односу на друге кварове као што су, нпр., кратки спојеви. За разлику од кратких спојева, када долази до напрезања и оштећења опреме, при појави прекида проводника систем се доводи у нежељени радни режим који је потребно детектовати и елиминисати.

Опасност од прекида фазног проводника огледа се у појави несиметрије у напонима и струјама, што за последицу има несиметрично оптерећење надземног вода, додатно загревање ротационих машина, низак квалитет напона, проблеме у раду генератора итд. Прекид проводника и појава несиметрије посебно су штетни за синхроне и асинхроне машине јер са појавом несиметрије долази до појаве инверзне компоненте струје. Инверзна компонента струје изазива инверзно магнетско поље које ротира двоструком синхронном брзином у односу на ротор. Због тога у ротору долази до индуковања струје учестаности 100 Hz и до повећања губитака у магнетском колу ротора и роторским намотајима. Као последица наведене појаве долази до додатног загревања ротора, што као крајњи исход може имати његово оштећење. Прекид проводника нарочито је опасан у урбаним срединама. Уколико након прекида дође до пада проводника, то представља опасност по околину јер директно може угрозити људе. Нису ретки ни пожари који су изазвани наведеном појавом. Због тога је потребно такав режим брзо детектовати и искључити надземни вод са прекинутим фазним проводником.

Прекид проводника је због атмосферских утицаја карактеристичан за надземне водове, међутим дешава се и код кабловских водова. Један од најчешћих узрока прекида проводника представља додатни терет који настаје услед стварања наслага леда и снега на проводнику у зимским условима. До прекида проводника може доћи и услед прегоривања струјних мостова проузрокованих лошим контактом. Нису ретки ни случајеви прекида проводника на носећим стубовима, када услед еолских вибрација током експлоатације долази до оштећења проводника. Директни прекиди проводника у распонима између стубова догађају се знатно ређе. Најчешће су проузроковани истрошеношћу материјала услед дугог експлоатационог века. Такође, квар који се манифестује као прекид проводника може настати приликом укључења или искључења прекидача уколико неки од полова прекидача остане заглављен, а заштита од несиметрије полова прекидача не одреагује.

У комерцијалним уређајима заштите, детекције прекида проводника и несиметрије струја најчешће су засноване на примени симетричних компоненти или израчунавању несиметрије из ефективних вредности фазних струја, [1-4].

Један од проблема са којим се сусрећу комерцијални уређаји заштите јесте како детектовати прекид проводника при малом струјном оптерећењу. У литератури се могу пронаћи различите методе које

имају за циљ да детектују прекид проводника унутар целог опсега оптерећења надземног вода. Неке од ових метода засноване су на примени трећег хармоника напона, [5], фазног помераја напона, [6], дискретне таласне трансформације, [7], Стоквел трансформације, [8], итд. Последњих година су популарне различите методе засноване на примени вештачке интелигенције, [9, 10]. Међутим, методе засноване на примени вештачке интелигенције још увек нису пронашле практичну примену и њихова шира примена може се очекивати у блиској будућности.

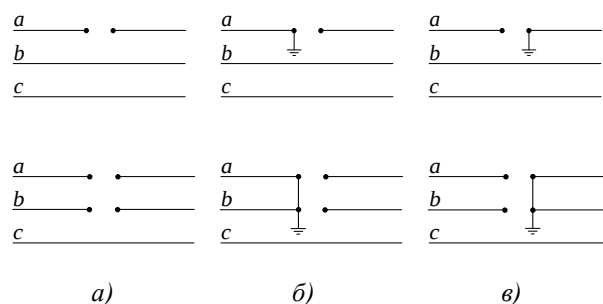
При појави прекида проводника у дистрибутивној мрежи, у зависности од конфигурације и радног режима, инверзна компонента струје може се незнатно променити. Због тога прекид проводника може остати непримећен. Да би се наведени проблем превазишао, развијене су бројне методе за детекцију прекида проводника које имају за циљ да унапреде примену симетричних компоненти, [11-13].

Такође, актуелне су и различите методе засноване на примени сензора који мере електрично и магнетско поље у непосредној близини проводника надземног вода, [14-16]. Приказане методе пронашле су практичну примену само у дистрибутивним мрежама.

2. АНАЛИЗА КВАРОВА СА ПРЕКИДОМ ПРОВОДНИКА

Прекид проводника представља серијски квар који за последицу има несиметрију струја и напона. У пракси се могу појавити различити случајеви кварова са прекидом проводника. На Слици 1а приказани су једнофазни и двофазни прекиди проводника без земљоспоја. Прекиди сва три фазна проводника су знатно ређи. Због тога је у наставку акценат стављен на једнофазни и двофазни прекид проводника.

Приликом прекида проводника може се десити да прекинути крајеви проводника додирну земљу или конструкцију стуба која је повезана са системом уземљења. На сликама 1б и 1в приказани су такви случајеви.



Слика 1. Различити случајеви прекида проводника

а) једнофазни и двофазни без земљоспоја

б) и в) једнофазни и двофазни са земљоспојем

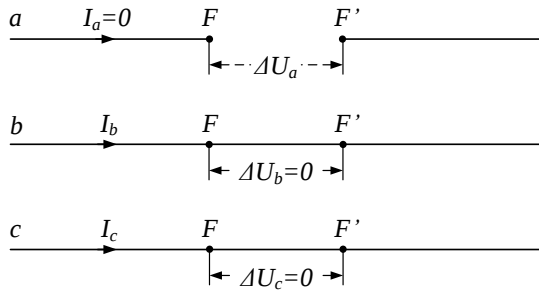
На Слици 1 могу се разликовати два случаја – прекид проводника са земљоспојем на страни заштитног релеја и прекид проводника са земљоспојем на супротној страни. При појави прекида проводника са

земљоспојем у активним мрежама квар ће са једне стране увек бити детектован као земљоспој, а са друге стране као несиметрија. Међутим, код радијалних водова могу се разликовати два случаја – када је земљу додирнуо крај на страни активне мреже и када је земљу додирнуо крај на страни потрошача.

Као што је претходно наглашено, прекид проводника са земљоспојем на страни заштите биће препознат као класичан земљоспој и због тога није разматран у наставку.

2.1 Прекид једног проводника

Прекид једног проводника представља најчешћи тип серијског квара. На Слици 2 приказан је прекид проводника фазе a [17-19].



Слика 2. Прекид проводника фазе a

На основу Слике 2 могу се поставити почетни услови за прекид проводника фазе a .

$$I_a = 0 \quad (1)$$

$$\Delta U_a \neq 0 \quad (2)$$

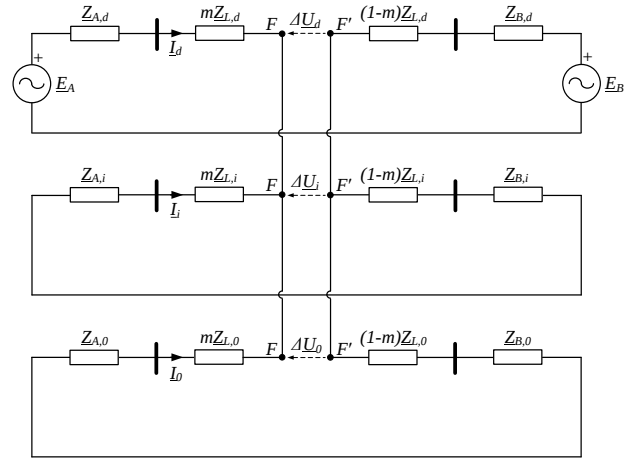
$$\Delta U_b = \Delta U_c = 0 \quad (3)$$

Ако се на једначине (1) и (2) примене симетричне компоненте, добија се:

$$I_d + I_i + I_0 = 0 \quad (4)$$

$$\Delta U_d + \Delta U_i + \Delta U_0 = \frac{1}{3} \Delta U_a \quad (5)$$

Из претходних једначина може се видети да директна, инверзна и нулта компонента струје улазе у исту тачку. Такође, директна, инверзна и нулта компонента напона на месту прекида имају исте вредности. На основу ових закључака на Слици 3 приказана је еквивалентна шема за случај прекида једног фазног проводника. Елементи еквивалентне шеме на Слици 3 имају следеће значење: E_A и E_B су електромоторне силе извора на страни мрежа А и В, Z_A и Z_B представљају еквивалентне импедансе мрежа А и В, Z_L је импеданса надземног вода, а m је процентуална удаљеност до места квара. Са Слике 3 може се видети да су директна, инверзна и нулта грана везане паралелно.



Слика 3. Еквивалентна шема за једнофазни прекид проводника

На основу Слике 3 могу се написати једначине за напоне на месту прекида:

$$\Delta U_d = E_A - E_B - (Z_{A,d} + mZ_{L,d} + (1-m)Z_{L,d} + Z_{B,d})I_d \quad (6)$$

$$\Delta U_i = -(Z_{A,i} + mZ_{L,i} + (1-m)Z_{L,i} + Z_{B,i})I_i \quad (7)$$

$$\Delta U_0 = -(Z_{A,0} + mZ_{L,0} + (1-m)Z_{L,0} + Z_{B,0})I_0 \quad (8)$$

Једначине (6)-(8) могу се написати у скраћеном облику:

$$\Delta U_d = E - Z_d I_d \quad (9)$$

$$\Delta U_i = -Z_i I_i \quad (10)$$

$$\Delta U_0 = -Z_0 I_0 \quad (11)$$

Као што је претходно наглашено, инверзна и нулта импеданса су везане паралелно. За еквивалентну импедансу за време квара добија се:

$$Z_{ek} = Z_d + \frac{Z_i Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (12)$$

На крају, директна, инверзна и нулта компонента струје добијају коначан облик:

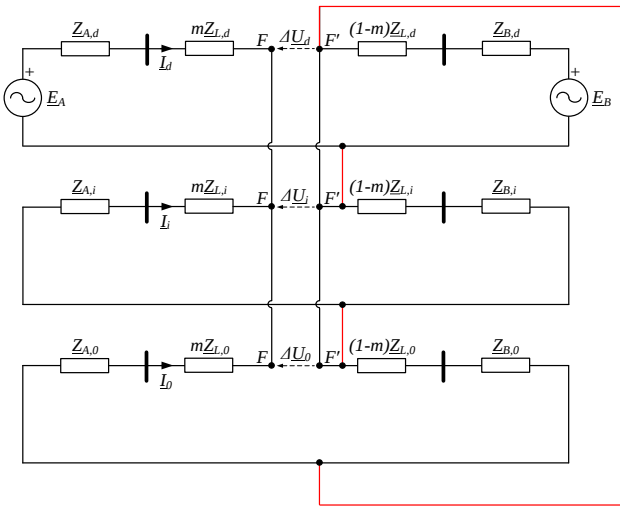
$$I_d = \frac{E}{Z_{ek}} = E \frac{Z_i + Z_0}{Z_0 Z_d + Z_0 Z_i + Z_d Z_i} \quad (13)$$

$$I_i = -I_d \frac{Z_0}{Z_d + Z_i} = -E \frac{Z_0}{Z_0 Z_d + Z_0 Z_i + Z_d Z_i} \quad (14)$$

$$I_0 = -I_d \frac{Z_i}{Z_d + Z_i} = -E \frac{Z_i}{Z_0 Z_d + Z_0 Z_i + Z_d Z_i} \quad (15)$$

2.2 Прекид једног проводника са земљоспојем

У овом делу анализиран је прекид проводника са земљоспојем на страни мреже В. Квар је посматран са стране мреже А. При формирању еквивалентне шеме за овакав тип квара шема приказана на Слици 4 допуњена је делом који описује једнофазни земљоспој. Еквивалентна шема прекида проводника са земљоспојем на страни мреже В приказана је на Слици 4. Црвеном бојом означен је део који се односи на земљоспој. Ради једноставности занемарена је прелазна отпорност на месту квара.



Слика 4. Еквивалентна шема за једнофазни прекид проводника са земљоспојем

За еквивалентну шему приказану на Слици 4 могу се написати директне, инверзне и нулте импедансе за леву и десну страну, посматрано са места квара:

$$\underline{Z}_{AL,d} = \underline{Z}_{A,d} + m\underline{Z}_{L,d} \quad (16)$$

$$\underline{Z}_{BL,d} = \underline{Z}_{B,d} + (1-m)\underline{Z}_{L,d} \quad (17)$$

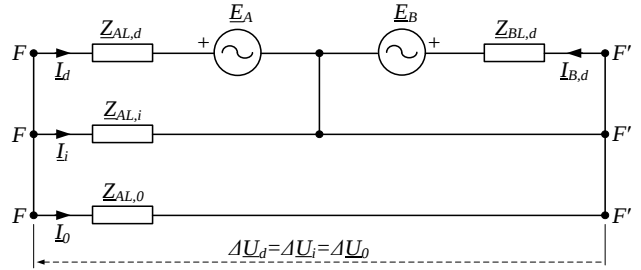
$$\underline{Z}_{AL,i} = \underline{Z}_{A,i} + m\underline{Z}_{L,i} \quad (18)$$

$$\underline{Z}_{BL,i} = \underline{Z}_{B,i} + (1-m)\underline{Z}_{L,i} \quad (19)$$

$$\underline{Z}_{AL,0} = \underline{Z}_{A,0} + m\underline{Z}_{L,0} \quad (20)$$

$$\underline{Z}_{BL,0} = \underline{Z}_{B,0} + (1-m)\underline{Z}_{L,0} \quad (21)$$

Са Слике 4 може се приметити да су инверзне и нулте импедансе на десној страни кратко спојене. Наведене импедансе представљене су једначинама (19) и (21) и могу се изоставити из даље анализе. Уважавајући претходну чињеницу и једначине (16) до (21), добија се поједностављена еквивалентна шема, као што је приказано на Слици 5.



Слика 5. Поједностављена еквивалентна шема за једнофазни прекид проводника са земљоспојем

На основу Слике 5 може се израчунати еквивалентна импеданса:

$$\underline{Z}_{A,ek} = \underline{Z}_{AL,d} + \frac{\underline{Z}_{AL,i}\underline{Z}_{AL,0}}{\underline{Z}_{AL,i} + \underline{Z}_{AL,0}} \quad (22)$$

Слично као код израчунавања једначина (13) до (15), за директну, инверзну и нулту компоненту струје добија се:

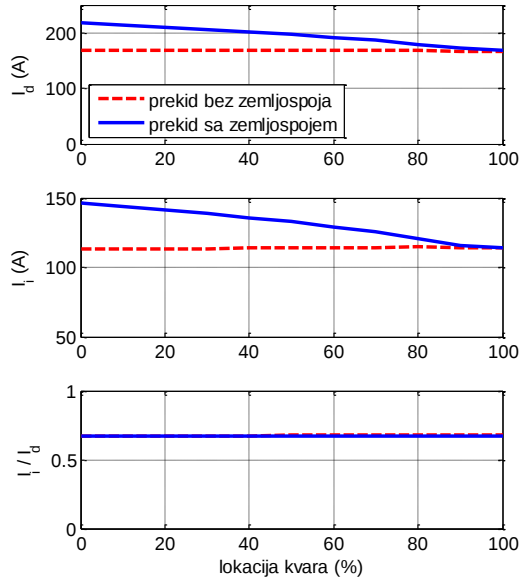
$$\underline{I}_d = \underline{E}_A \frac{\underline{Z}_{AL,i} + \underline{Z}_{AL,0}}{\underline{Z}_{AL,0}\underline{Z}_{AL,d} + \underline{Z}_{AL,0}\underline{Z}_{AL,i} + \underline{Z}_{AL,d}\underline{Z}_{AL,i}} \quad (23)$$

$$\underline{I}_i = -\underline{E}_A \frac{\underline{Z}_{AL,i}}{\underline{Z}_{AL,0}\underline{Z}_{AL,d} + \underline{Z}_{AL,0}\underline{Z}_{AL,i} + \underline{Z}_{AL,d}\underline{Z}_{AL,i}} \quad (24)$$

$$\underline{I}_0 = -\underline{E}_A \frac{\underline{Z}_{AL,0}}{\underline{Z}_{AL,0}\underline{Z}_{AL,d} + \underline{Z}_{AL,0}\underline{Z}_{AL,i} + \underline{Z}_{AL,d}\underline{Z}_{AL,i}} \quad (25)$$

Имајући у виду да многи комерцијални уређаји заштите као критеријум за детекцију несиметрије користе однос инверзне и директне компоненте струје, интересантно је размотрити како на инверзну и директну компоненту струје утичу тип и локација квара. Ако се једначине (13) до (15) упореде са једначинама (23) до (25), може се приметити да при појави прекида проводника са земљоспојем нема утицаја мреже са супротног краја. Насупрот томе, при прекиду без земљоспоја у изразу за струју фигуришу параметри мрежа са оба краја. Као илустрација, на Слици 6 приказана је зависност инверзне и директне компоненте струја од локације квара. Резултати приказани на Слици 6 добијени су симулацијом кварова на 110 kV надземном воду дужине 60 km. У тренутку настанка квара фазне струје су износиле 282 А. Након настанка прекида проводника, струја једне фазе је једнака нули, а струје друге две фазе су исте и не мењају се дуж вода. На основу Слике 6 може се видети да при прекиду проводника без земљоспоја не долази до значајније промене инверзне и директне компоненте струје при кваровима на различитим локацијама дуж вода. Међутим, при појави прекида са земљоспојем директна и инверзна компонента струје смањују се са повећањем удаљености до места квара. Наведена појава је очекивана јер до места квара постоје све три струје, а од места квара надаље су присутне само две струје. При наведеној фазној струји несиметрија која је изражена преко односа инверзне и директне компоненте струје приближно је иста за оба типа квара. Такође, може се приметити да ће при прекидима са земљоспојем који су ближи локацији релеја подешена вредност минималног струјног прага бити брже достигнута. Самим тим, за прекиде са

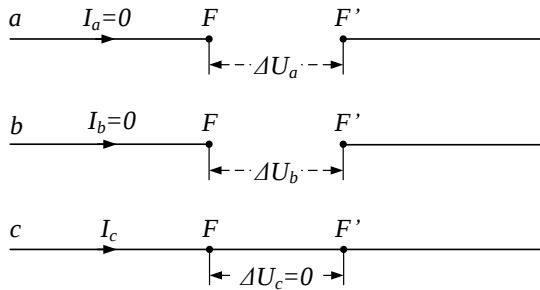
земљоспојем осетљивост заштите се смањује са повећањем удаљености до места квара.



Слика 6. Зависност инверзне и директне компоненте струје од локације квара

2.3 Прекид два проводника

Прекид два проводника догађа се знатно ређе у односу на једнофазни прекид, али је свакако могућ у пракси. Случај са прекидом два проводника, нпр. фаза a и b , приказан је на Слици 7 [17-19].



Слика 7. Прекид проводника фаза a и b

Почетни услови који описују прекид проводника фаза a и b могу се описати следећим једначинама:

$$I_a = I_b = 0 \quad (26)$$

$$\Delta U_a \neq \Delta U_b \neq 0 \quad (27)$$

$$\Delta U_c = 0 \quad (28)$$

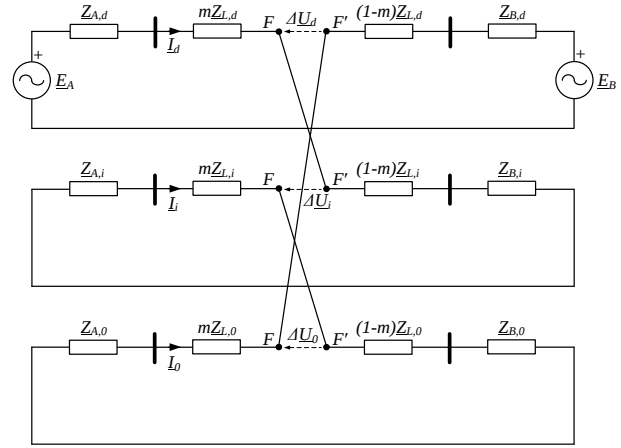
Слично као код једнофазног прекида проводника, на једначине (26) и (27) могу се применити симетричне компоненте:

$$I_d = I_i = I_0 = \frac{1}{3} I_c \quad (29)$$

$$\Delta U_d + \Delta U_i + \Delta U_0 = 0 \quad (30)$$

Из претходних једначина може се приметити да директна, инверзна и нулта компонента струје имају

исту вредност. Такође, директна, инверзна и нулта компонента напона на месту прекида једнаке су нули. Полазећи од наведених запажања, на Слици 8 приказана је еквивалентна шема за случај прекида два фазна проводника. Са Слике 8 може се видети да су директна, инверзна и нулта грана везане редно.



Слика 8. Еквивалентна шема за двофазни прекид проводника

На основу Слике 8 могу се написати једначине за еквивалентне импедансе директног, инверзног и нултог редоследа:

$$Z_d = Z_{A,d} + mZ_{L,d} + (1-m)Z_{L,d} + Z_{B,d} \quad (31)$$

$$Z_i = Z_{A,i} + mZ_{L,i} + (1-m)Z_{L,i} + Z_{B,i} \quad (32)$$

$$Z_0 = Z_{A,0} + mZ_{L,0} + (1-m)Z_{L,0} + Z_{B,0} \quad (33)$$

На крају, једначина која описује директну, инверзну и нулту компоненту струје може се написати на следећи начин:

$$I_d = I_i = I_0 = 3 \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_0} \quad (34)$$

3. ДЕТЕКЦИЈА КВАРОВА СА ПРЕКИДОМ ПРОВОДНИКА

Као што је наведено у претходном делу, при појави прекида проводника долази до несиметрије фазних струја. Функција за детекцију прекида проводника обично ради у корелацији са функцијом за надзор несиметрије струја. Задатак ове функције је да детектује прекид примарног проводника, као и прекид у секундарним струјним колима.

У Табели I приказан је преглед најчешће коришћених микропроцесорских релеја у преносној мрежи са акцентом на критеријуме које користи функција за детекцију прекида проводника. Као што се може видети, детекција прекида проводника најчешће је заснована на израчунавању струјне несиметрије на основу ефективних вредности фазних струја или на примени симетричних компоненти, [1-4].

Табела 1 Преглед најчешће коришћених серија заштитних релеја и функције за детекцију несиметрије струја

Произвођач	Серија релеја	Критеријум за рад функције
Siemens	Siprotec 4 Siprotec 5	$ I_{min} / I_{max} < \text{дозв. несим.}$
		$I_{max} > \text{мин. струјни праг}$
		временско кашњење $> t_{pod}$
Hitachi Energy (ABB)	Relion 670	$I_{ub} > \text{дозв. несим.}$
		$I_{min} < \text{мин. струјни праг} < 0,5 \times I_{min}$
		временско кашњење $> t_{pod}$
Schneider Electric	MiCOM	$I_f/I_d > \text{под. вредност}$
		временско кашњење $> t_{pod}$

У примеру квара са прекидом проводника који је анализиран у овом раду за заштиту разматраних надземних водова користе се заштитни релеји из серије Siprotec 4. У складу са тим, у наставку је посебна пажња посвећена управо функцији за надзор несиметрије струја за наведену серију релеја.

Функција за надзор несиметрије струја најпре проверава оптерећеност вода. Овај услов се подешава преко минималног струјног прага. Код слабо оптерећених водова несиметрија струја може бити већа од уобичајене вредности у току нормалног погона. Као главни разлог може се навести неравномерна расподела оптерећења по фазама или грешка мерења струјних трансформатора. Ако је испуњен услов минималног оптерећења вода, проверава се несиметрија струја. Несиметрија струја се најчешће израчунава или као однос минималне и максималне фазне струје или као однос инверзне и директне компоненте струје. Уколико су услови за минимални струјни праг и несиметрију струја истовремено задовољени дуже од подешеног временског затезања, релеј ће послати сигнал о појави поремећаја.

Према важећој техничкој регулативи „Електромреже Србије” (ЕМС) препоручују се следећа подешења наведене заштитне функције:

- минималан струјни праг: $0,1 \times I_{max}$ [A];
- дозвољена несиметрија струја:
 $|I_{min}| / |I_{max}| = 0,4 \div 0,5$;
- временско подешење: 5 секунди.

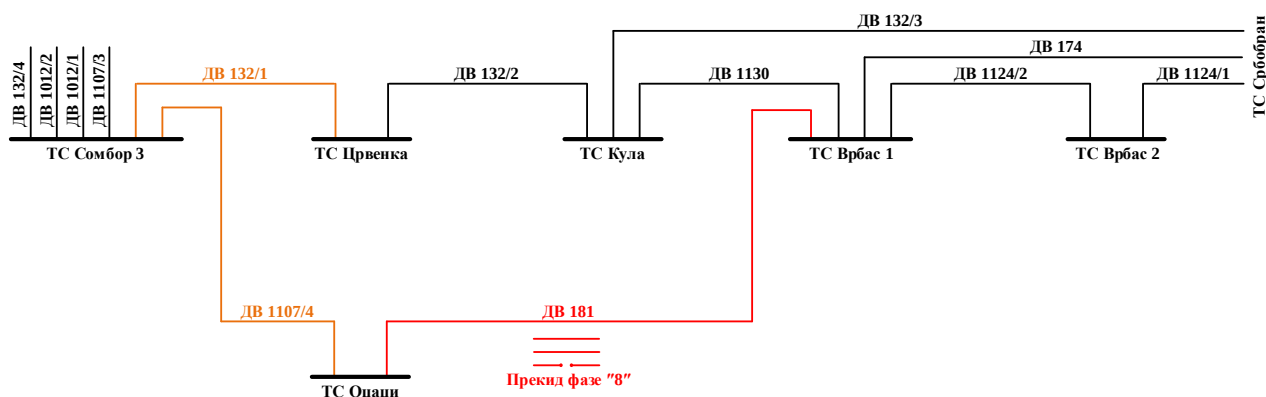
где су I_{min} – најмања фазна струја и I_{max} – највећа фазна струја.

Детекција прекида проводника нарочито је отежана на водовима који су слабо оптерећени. При таквим радним режимима струја надземног вода је мала, обично реда неколико десетина ампера. Ако је вредност минималног струјног прага подешена превисоко, у многим случајевима струја неће достићи подешену вредност. Са друге стране, уколико је минимални струјни праг превише низак, повећава се утицај грешке мерења струјних трансформатора и може доћи до лажне прораде заштите.

Проблем код прекида проводника без земљоспоја представља и чињеница да комерцијални уређаји заштите не могу одредити место прекида. Због тога проналажење и отклањање оваквог типа кvara понекад може потрајати јако дуго. Међутим, при појави прекида проводника са земљоспојем квар на страни земљоспоја биће брзо детектован дистантном или подужном диференцијалном заштитом. Такође, биће одређена и његова локација. Самим тим, прекид проводника са земљоспојем је повољнији са аспекта лоцирања.

4. ПОРЕМЕЋАЈ У ПРЕНОСНОЈ МРЕЖИ

У овом делу разматран је реалан поремећај у делу преносне мреже 110 kV напонског нивоа. Поремећај је изазвао прекид проводника на далеководу (ДВ) 181. Несиметрија се проширила на суседне водове и уочена је у трансформаторској станици (ТС) „Сомбор 3” на ДВ 132/1 и ДВ 1107/4. На Слици 9 приказан је део преносне мреже погођен поремећајем.



Слика 9. Разматрани део преносне мреже 110 kV

4.1 Хронологија догађаја

Сигнал о несиметрији струја почео је повремено да се појављује на ДВ 132/1 у ТС „Сомбор 3”. Несиметрија струја углавном је износила око 30%, а сигнал се појављивао при већим оптерећењима.

Током анализе сигнала о несиметрији струја на ДВ 132/1 примећено је да на ДВ 1107/4 струја фазе „8” има двоструко мању вредност од струја друге две фазе. Међутим, на овом воду није долазило до појаве сигнала о несиметрији струја.

Након упоређивања мерења струја на почетку и крају ДВ 1107/4 нису уочена већа одступања, а то је указивало да поремећај долази из суседног ДВ 181 у ТС „Оаци”. Увидом у мерења у ТС „Оаци” уочено је да на ДВ 181 струја фазе „8” има вредност нула.

Прегледом листа догађаја у заштитним уређајима на ДВ 132/1 и ДВ 1107/4 у ТС „Сомбор 3” примећено је да је несиметрија струја почела повремено да се појављује почев од 8. 1. 2021. године, што даје претпоставку да је до прекида проводника на ДВ 181 дошло 8. 1. 2021. године, када је наведени вод испадан услед великог поремећаја у интерконекцији.

Прекид проводника на ДВ 181 може се повезати и са погонским догађајем од 23. 1. 2021. године. Наведени вод испадан је 23. 1. 2021. године у 11.30 ч. деловањем дистантне заштите у првом степену. Локатор квара показао је 8,4 km од ТС „Оаци”. У ТС „Врбас 1” није било прораде заштите. Наведени испад изазвао је прекинути крај проводника који је дотакао конструкцију стуба.

Након извршеног прегледа ДВ 181 квар је пронађен на преплитајном стубу бр. 25. На наведеном стубу дошло је до прекида проводника. Након санирања квара на ДВ 181 струје на ДВ 132/1, ДВ 1107/4 и ДВ 181 вратиле су се у симетрично стање.

На фотографији на Слици 10 приказано је место са прекинутим проводником на ДВ 181, на месту транспонована фазних проводника. Са Слике 8 може се видети да је прекинути крај под напоном остао да виси на малој висини изнад површине земље. Овакав квар може бити изузетно опасан по људе, нарочито у урбаним срединама.

4.2 Заштита од несиметрије струја

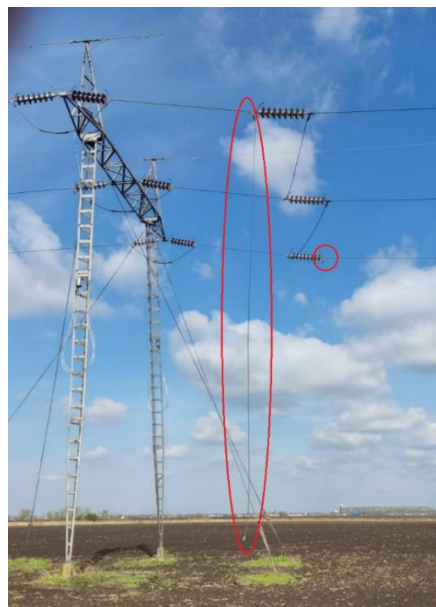
У ТС „Сомбор 3” за заштиту надземних водова користе се микропроцесорски уређаји заштите, тип 7SA611. У наведеним уређајима активна је функција за надзор несиметрије струја са задатком да детектује појаву несиметрије струја у струјним колима на основу поређења измерених ефективних вредности струја вода са подешеним вредностима. Ова функција шаље сигнал о појави струјне несиметрије, без деловања на искључење прекидача.

Функција за надзор несиметрије струја на водовима 110 kV у ТС „Сомбор 3” подешена је на следећи начин:

- минимални струјни праг: $0,25 \times I_{max}$ [A];
 - дозвољена несиметрија струја:
- $$|I_{min}| / |I_{max}| = 0,85;$$

– временско подешење: 5 секунди.

С обзиром на то да струјни трансформатори у далеководном пољу (ДВП) 110 kV у ТС „Сомбор 3” имају преносни однос 600/1 А, на основу првог подешења може се видети да је за рад ове функције неопходна примарна вредност фазне струје од 150 А. Уколико је овај услов испуњен и дође до појаве несиметрије струја која је већа од 15%, наведена функција ће након 5 секунди послати сигнал о струјној несиметрији.



Слика 10. Прекид проводника на ДВ 181

4.3 Проблеми при детекцији несиметрије

Наведени поремећај специфичан је по томе што је прекид проводника на ДВ 181 био присутан дужи период, око месец дана.

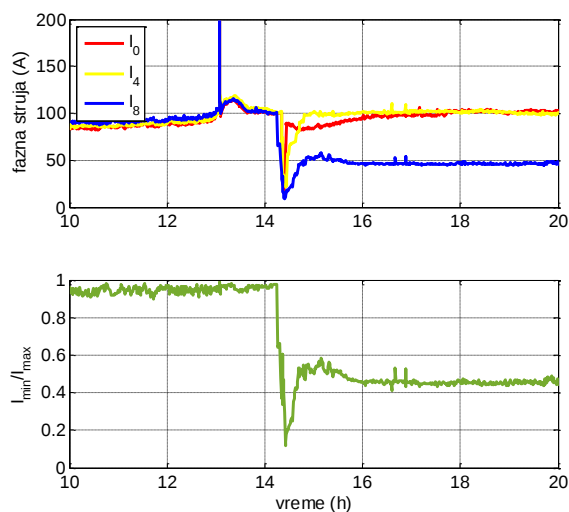
Уређаји заштите у ТС „Црвенка”, ТС „Кула” и ТС „Врбас 1” електромеханички су и немају могућност да детектују несиметрију струја. У ТС „Оаци” уграђени су микропроцесорски уређаји заштите, који имају активну функцију за надзор несиметрије струја, а подешења наведене функције слична су као у ТС „Сомбор 3”. Уређаји заштите на ДВ 132/1 и ДВ 1107/4 у ТС „Сомбор 3” имају активну функцију за надзор несиметрије струја. У Табели II приказан је преглед типова заштитних релеја и статус функције за детекцију несиметрије струја на разматраним надземним водовима.

Иако је на ДВ 132/1 и ДВ 1107/4 постојала стална несиметрија струја која је била већа од 15%, наведени водови су били слабо оптерећени. На ДВ 132/1 фазна струја повремено је достигала вредност већу од 150 А, па се у складу са тим и сигнал о несиметрији струја повремено појављивао. Са друге стране, на ДВ 1107/4 фазна струја била је испод подешених 150 А, па самим тим функција за надзор несиметрије струја није могла да препозна поремећај.

Табела II Заштитни релеји и функције за детекцију несиметрије струја

Назив ТС	Број надземног вода	Тип релеја	Детекција несиметрије струја
ТС „Црвенка”	132/1	BBC LZ3	не постоји
	132/2	BBC LZ3	не постоји
ТС „Кула”	132/2	BBC LZ3	не постоји
	132/3	BBC LZ3	не постоји
	1130	BBC LZ3	не постоји
ТС „Врбас 1”	1130	BBC LZ3	не постоји
	1124/2	BBC LZ3	не постоји
	174	BBC LZ3	не постоји
	181	BBC LZ3	не постоји
ТС „Оџаци”	1107/4	7SJ85	$I_{pod}=150\text{ A}$, $ I_{min} / I_{max} =0,85$, $t_{pod}=5\text{ s}$
	181	7SJ85	$I_{pod}=150\text{ A}$, $ I_{min} / I_{max} =0,85$, $t_{pod}=5\text{ s}$

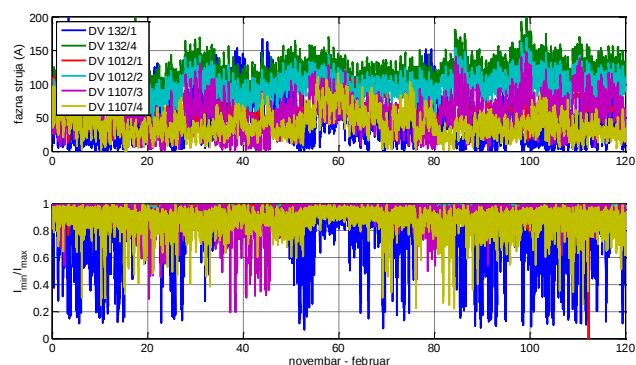
На Слици 11 приказане су фазне струје и несиметрија струја на ДВ 1107/4 за периоде пре и након појаве прекида проводника на ДВ 181.



Слика 11. Фазне струје и несиметрија струја на ДВ 1107/4

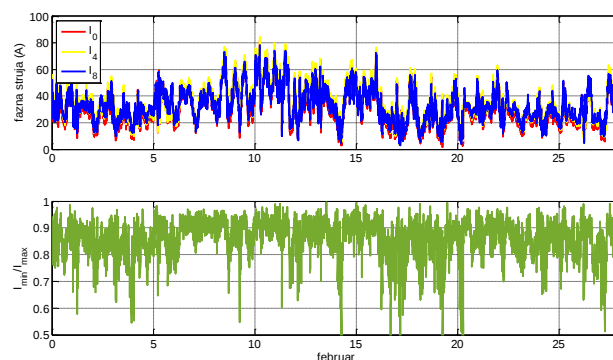
Да би се добила јаснија слика о оптерећености водова у ТС „Сомбор 3”, разматран је зимски период од новембра 2022. године до фебруара 2023. године. На Слици 12 приказане су фазне струје и струјна несиметрија свих 110 kV водова у ТС „Сомбор 3”. На основу Сlike 12 може се видети да у наведеном периоду фазне струје готово да нису прелазиле 150 А, што је подешена вредност минималног струјног прага за рад функције за надзор несиметрије струја. Такође, може се приметити значајна струјна несиметрија која

се манифестује као последица грешке мерења при малим фазним струјама.



Слика 12. Фазне струје и несиметрија струја на ДВ 110 kV у ТС „Сомбор 3”

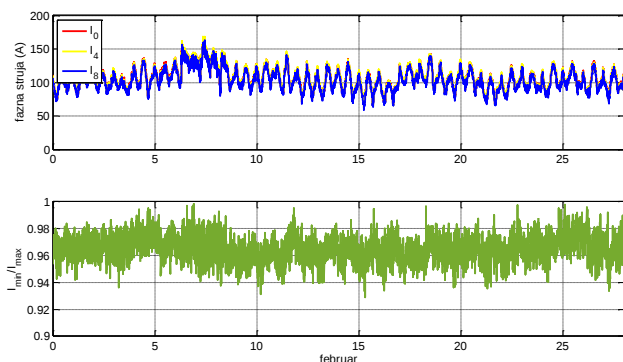
Као што је претходно наглашено, при малим фазним струјама до изражаја долази утицај грешке мерења струјних трансформатора. Грешка мерења при малим фазним струјама манифестује се кроз несиметрију струја. На Слици 13 приказан је утицај грешке мерења на струјну несиметрију. При фазним струјама испод 60 А несиметрија струја која настаје као последица грешке мерења достиже вредност до 50%.



Слика 13. Фазне струје и несиметрија струја на ДВ 1107/4 током фебруара 2023. године

При већим фазним струјама утицај грешке мерења значајно се смањује. Ово је илустровано на Слици 14. Са Слике 14 може се видети да при струјама изнад 60 А струјна несиметрија не прелази вредност од 7%, што је значајно испод подешене вредности од 15%.

На основу претходне анализе може се закључити да је препоручена вредност за подешавање минималног струјног прага од $0,1 \times I_{max}$ оправдана. Такође, због боље осетљивости може се задржати тренутно подешавање дозвољене струјне несиметрије од 0,85, као и подешавање временског кашњења од 5 секунди.



Слика 14. Фазне струје и несиметрија струја на ДВ 1012/2 током фебруара 2023. године

5. ЗАКЉУЧАК

На основу изведених аналитичких израза приказана је јаснија слика кварова са прекидом проводника. Анализом постојећих подешања заштите указано је на потенцијалне проблеме који могу утицати на осетљивост заштите при појави прекида проводника. На крају, кроз пример поремећаја из реалне мреже указано је на значај оваквог типа квара. У неким трансформаторским станицама примећено је да подешања минималног струјног прага имају високе вредности. Подешања достижу вредности чак и до 300 А. Имајући у виду да су многи надземни водови у нормалним радним условима слабо оптерећени, самим тим и поред велике несиметрије струја неће бити испуњен услов за рад наведене функције. Једна од мера за побољшање рада функције за надзор несиметрије струја може бити анализа оптерећења вода у претходном периоду и корекција постојећег подешања.

Са старих трансформаторских станица у центре управљања најчешће стиже мерење само једне струје. Једна од мера за надзор несиметрије и прекида проводника у трансформаторским станицама са електромеханичким и статичким зашитама може бити увођење мерења у све три фазе и увођење све три струје у центре управљања. Даље, на основу мерења и уочене несиметрије може се активирати функција за надзор несиметрије струја као аларм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] SIPROTEC 4 Distance Protection 7SA6, Manual, 2016.
- [2] SIPROTEC 5 Distance Protection, Line Differential Protection, and Overcurrent Protection for 3-Pole Tripping 7SA82, 7SD82, 7SL82, 7SA86, 7SD86, 7SL86, 7SJ86, Manual, 2023.
- [3] Line distance protection REL670 Version 2.2 IEC Technical manual, 2023.
- [4] EasergyMiCOM P44y (P443 & P446), Fast Multifunction Distance Protection P44y/EN M/Ph3, Technical Manual, 2024.

- [5] X. Wang, W. Xu, *A 3rd Harmonic Power Based Open Conductor Detection Scheme*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, Volume 36, Issue 2, pp.1041-1050
- [6] M. M. Ostojić, Z. N. Stojanović, *An algorithm with voltage inputs for detecting conductor breaks in radial distribution networks*, International Transaction on Electrical Energy Systems, 2021, Volume 31, e13195.
- [7] B. A. E. Rashad, D. K. Ibrahim, M. I. Gilany, A. F. El'Gharably, *Adaptive single-end transient-based scheme for detection and location of open conductor faults in HV transmission lines*, Electric Power Systems Research, Volume 182, 2020, 106252.
- [8] H. Lala, S. Karmakar, *Classification of arc fault between broken conductor and high-impedance surface: an empirical mode decomposition and Stockwell transform-based approach*, IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, Volume 14, Issue 22, pp. 5277-5286
- [9] B. M. Hasaneen, A. A. Dawood, *Detection and classification of one conductor open faults in parallel transmission line using artificial neural network*, International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, 2016, Volume 2, Issue 6, pp. 123-130.
- [10] A. Swetapadma, A. Yadav, *Fuzzy based fault location estimation during unearthed open conductor faults in double circuit transmission line*, Information Systems Design and Intelligent Applications, Proceedings of 3rd International Conference, New Delhi, India, 2016, pp. 445-456.
- [11] L. Garcia-Santander, P. Bastard, M. Petit, I. Gal, E. Lopez and H. Opazo, *Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks*, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2005, Volume 152, Issue 2
- [12] E. Bjerkan, H. K. Hoidalen, J. G. Hernes, *Reliable detection of downed and broken conductors*, Cired, Vienna, Austria, 2007, pp. 1-4
- [13] V. Lovrenčić, Z. Toroš, S. Ceferin, M. Bezjak, B. Turnšek, B. Likar, M. Dečman, *Advanced protection of overhead lines in event of interrupted conductor*, CIRED, Stockholm, 2013.
- [14] A. C. Adewole, A. Rajapakse, D. Ouellette, P. Forsyth, *Residual current-based method for open phase detection in radial and multisource power systems*, Electrical Power and Energy Systems, 2020, Volume 117, 105610.
- [15] D. V. Joao, H. G. B. Souza, M. A. I. Martins, *Broken Conductor Fault Detection using Symmetrical Components in Distribution Power Systems-An Implementation Case*, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Lima, Peru, 2021, pp. 1-5.
- [16] A. G. Al-Baghdadi, M. K. Abd, F. M. F. Flaih, *A New Detection Method for Load Side Broken Conductor Fault Based on Negative to Positive Current Sequence*, Electronics, 2022, Volume 11, Issue 6, pp. 1-12.

- [17] B. Mahamedi, J. G. Zhu, *Double-ended technique for distinguishing series faults from shunt faults on transmission lines using the sequential components of impedance*, IET Generation Transmission & Distribution, 2017, Volume 11, Issue 6, pp. 1381-1388.
- [18] D. N. Taylor, V. H. Makwana, *Analysis of faulted power system during simultaneous open conductor and ground fault*, IET Generation Transmission & Distribution, 2020, Volume 14, Issue 22, pp. 5319-5326
- [19] A. C. Adewole, A. Rajapakse, D. Ouellette, P. Forsyth, *Residual current-based method for open phase detection in radial and multisource power systems*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, Volume 117, 105610

БИОГРАФИЈЕ



Младен Остојић је рођен у Бијељини, БиХ, 1985. године. Дипломске мастер студије завршио је на Факултету техничких наука у Новом Саду. Докторирао је на Електротехничком факултету у Београду. Запослен је у компанији „Електро mreжа Србије” АД на пословима везаним за релејну заштиту и локално управљање.

Вишегодишње искуство стицао је као учесник на разним домаћим и иностраним пројектима. Рецензент је радова у више водећих научних часописа. Област рада и интересовања везани су за релејну заштиту, анализу електроенергетских система и развој нових алгоритама за заштиту и дигитализацију електроенергетских постројења.



Горан Мамлић је рођен у Новом Саду 1990. године. Дипломске мастер студије завршио је на Факултету техничких наука у Новом Саду. Запослен је у компанији „Електро mreжа Србије” АД на пословима везаним за релејну заштиту и локално управљање. Област рада везана је за релејну заштиту. Интересовања су му релејна заштита, електричне машине, енергетска електроника.



Јана Тохолъ је рођена у Љубињу, БиХ, 1996. године. Дипломске мастер студије завршила је на Факултету техничких наука у Новом Саду. Тренутно је запослена у компанији „Електро mreжа Србије” АД на позицији инжењера за релејну заштиту и локално управљање.

Mladen M. Ostojčić¹, Goran C. Mamlić¹, Jana Đ. Toholj¹



Broken Conductor Fault in the Transmission Network and Suggestions for Improving the Operation of the Protections

¹ JSC Elektromreža Srbije, Novi Sad, Serbia*

Original scientific research article

Highlights

- The theoretical analysis of broken conductor fault was presented
- A real broken conductor fault in the transmission network was considered
- Methods for improving the existing protection settings were proposed

Abstract

The paper analyses broken conductor faults in overhead lines of the transmission network. The causes of breaks and the problems that this type of break can cause, are explained. Single-phase and two-phase conductor breaks were considered as the most common cases of series faults that occur in practice. Equivalent schemes and derived analytical equations, which more closely describe the specified type of series faults, are presented, and explained. In a separate section, an overview of the most commonly used types of protection relays in the transmission network is provided, with a special emphasis on the criteria used for detection of conductor breaks. As an example, a disturbance with a conductor break that occurred on 110 kV overhead line, found in substation (SS) Sombor 3, is presented. The disturbance is specific in that the conductor break developed on an overhead line that is not directly connected to SS Sombor 3, and remained unnoticed for a long period of time. An analysis of the existing protection settings and current load of the overhead lines connected to SS Sombor 3 was performed. Based on the conclusions, some methods were proposed to improve the settings of the existing protection devices.

Keywords

Conductor break, Current asymmetry, Overhead lines, Transmission network

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Broken Conductor Fault Analysis in the Transmission Network and Protection Settings Recommendations", awarded by Expert Committee EC-B5 Protection and Automation at the 36th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 22-26, 2023

Received: June 17th, 2024

Reviewed: July 3rd, 2024

Modified: July 5th, 2024

Approved: July 12th, 2024

* Corresponding Author: Mladen M. Ostojčić

E - mail: mladen.ostojic@ems.rs

