(сс) _{ВҮ} УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПРОВОДАМИ ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ НА ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ

Р.У. Галеева, А.В. Назаров, А.А. Хасаншин

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Представлен метод расчета начального значения периодической слагающей тока короткого замыкания двухцепной воздушной линии электропередачи с использованием многофазных схем замещения. Метод учитывает электромагнитные связи между проводами двухцепной воздушной линии и поверхностью земли на переходные режимы. Расчетная модель позволит учесть влияние внутренних свойств двухцепной воздушной линии при расчетах токов трехфазного короткого замыкания на стадии проектирования, что значительно повысит точность выбора уставок релейной защиты и автоматики линий. Модель протестирована в программном комплексе Matlab Simulink.

Ключевые слова: двухцепная воздушная линия, трехфазное короткое замыкание, начальный ток короткого замыкания, метод фазных координат, многопроводная схема замещения, матрица сопротивлений, программный комплекс Matlab Simulink.

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-67-76.

Для цитирования: Галеева Р.У., Назаров А.В., Хасаншин А.А. Влияние электромагнитных связей между проводами двухцепной воздушной линии и поверхностью земли на переходные режимы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 67-76. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-67-76.

THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC COUPLING BETWEEN WIRES DOUBLE-CIRCUIT OVERHEAD LINE AND THE GROUND ON TRANSIENTS

R.U. Galeeva, A.V. Nazarov, A.A. Khasanshin

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract. A method is proposed for calculating the initial value of the periodic term of the shortcircuit strength of a dual-circuit overhead transmission line using multiphase replacement circuits. The method takes into account the electromagnetic connections between the wires of the dual-circuit overhead line and the ground to transient modes. The calculation model will allow to take into account the influence of the internal properties of the dual-circuit overhead line when calculating the three-phase short-circuit currents at the design stage, which will significantly improve the accuracy of the choice of relay protection settings and line automation. The model was tested in Matlab Simulink.

Key words: double-circuit overhead line, three-phase short circuit, initial short-circuit current, phase coordinate method, multi-wire replacement circuit, resistance matrix, Matlab Simulink software package.

For citation: R.U. Galeeva, A.V. Nazarov, A.A. Khasanshin. The effect of electromagnetic coupling between wires double-circuit overhead line and the ground on transients. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. pp. 67-76. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-67-76.

Параметры электроэнергетической системы (ЭЭС), подвергаясь внешним и внутренним возмущениям, постоянно изменяются. Изменение параметров режима зависит от внешних факторов: вида, величины и скорости возмущения; места его возникновения и характера проявления и внутренних факторов: схемы, параметров элементов ЭЭС и регулирующих устройств. Для обеспечения надежности электроснабжения потребителей электропитание осуществляется от двух независимых источников питания. При этом электропередача производится по двухцепным воздушным линиям (ДВЛ), которые выполняются на одной несущей опоре.

Расчет токов трехфазного короткого замыкания (ТКЗ) является одной из основных задач, решаемых в процессе управления ЭЭС. Наличие информации о влиянии внутренних факторов (собственных свойств элементов сети) на чувствительность ЭЭС к внешним возмущениям позволит улучшить свойства ЭЭС при ее проектировании и эксплуатации.

К настоящему времени достаточно хорошо разработаны методы расчета аварийных режимов в условиях синусоидальности и симметричности параметров сети и режима. Так, в частности, построен метод симметричных составляющих (МСС). При расчете режимов линий электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения используют упрощенные однолинейные схемы замещения (ОСЗ) Т- и П-образные с сосредоточенными параметрами без учета геометрии сети. Учет внутренних свойств ЛЭП, приводящей к появлению принципиальной несимметрии трехфазной воздушной линии (ВЛ), позволит повысить точность конечного результата расчета аварийного режима. Для учета влияния собственных свойств сети применяют метод фазных координат (МФК) [1-3]. Фазные координаты также применяются для моделирования несинусоидальных и несимметричных режимов [4-8], моделирования аварийных режимов и различных элементов ЭЭС [9-13]. На практике этот метод сталкивается с рядом трудностей, особенно для ДВЛ небольшой протяженности без транспозиции проводов (до 20-25 км), которые препятствуют его широкому распространению. Таким образом, проблема расчета параметров аварийного режима нетранспонированных ДВЛ при несимметричности ее геометрии является актуальной.

Данная статья является продолжением работы [14] и посвящена совершенствованию метода расчета токов ТКЗ в ДВЛ при фазной несимметрии ее конструктивных параметров, что особенно важно при выборе уставок срабатывания токовой отсечки линий.

Новизна работы заключается в создании математической модели ДВЛ, учитывающей электромагнитные связи между конструктивными элементами линии, на базе многопроводной схемы замещения (МСЗ) при исследовании переходного процесса ТКЗ. В качестве тестируемой модели была рассмотрена сеть с ДВЛ, выполненная проводом марки AC-300/39 с параметрами: активное сопротивление провода $R_{\rm np} = 0,0958$ Ом/км; радиус провода $R_{\rm np} = 12$ мм; эквивалентный радиус провода $R_{\rm 3\kappa} = 11,4$ мм; напряжение 220 кВ; длина между подстанциями (ПС) 500кВ «Киндери» и ПС 220кВ «Центральная» L=25,80км, опоры типа П220-2 (рис. 1).

В качестве расчетного эксперимента принят аварийный режим трехфазного КЗ на шинах приемной ПС «Центральная», с последующим моделированием в программном комплексе *Matlab Simulink*. Проведен анализ полученных экспериментальных и расчетных результатов.



Рис.1. Расчетная принципиальная схема электрической сети

Для формирования матричного уравнения состояния аварийного режима ДВЛ использовалось табличное представление полной МСЗ на основе матрицы расстояний между проводами различных фаз, матрицы взаимных и собственных сопротивлений [5], а также матрицы взаимных и собственных ёмкостей.

Для вычисления начального периодического ТКЗ были созданы три расчетные модели: 1) однолинейная схема замещения, сформированная в виде продольных и поперечных частей ДВЛ; 2) однолинейная схема замещения, сформированная в виде продольных частей ДВЛ с учетом взаимоиндукция проводников; 3) МСЗ с продольной и поперечной частями ДВЛ, сформированная в виде квадратной матрицы с учетом емкостных связей между проводами и тросом. Расчётная часть по влиянию взаимоиндукции соседних фаз на величины токов КЗ была достаточно полно описана в работе [14].

Полное сопротивление Z_{Π} и емкостная проводимость b_{Π} линии с достаточной для практики точностью определено как:

$$Z_{L} = (R_{\rm np} + j0, 145 \lg \frac{D_{\rm cp}}{R_{\rm av}})L;$$
(1)

$$b_L = b_0 L = (\frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\rm cp}}{R_{ab}}})L;$$
⁽²⁾

где $R_{\rm np}$ – удельное активное сопротивление провода; $R_{_{\rm ЭК}}$ – эквивалентный радиус провода; $R_{\rm np}$ - радиус провода; $D_{\rm cp}$ – междуфазное среднегеометрическое расстояние одной цепи.

Сопротивление взаимоиндукции для варианта 2 определено аналогично (1), где среднее геометрическое расстояние между цепями I и II ДВЛ $D_{cp} = D_{I-II}$ и определено по выражению

$$D_{\rm cp} = \sqrt[15]{d(AB) \cdot d(BC) \cdot d(AC) \cdots d(ab) \cdot d(bc) \cdot d(ac)};$$
(3)

где А, В, С, а, d, с – условное обозначение фаз I цепи ДВЛ; фаз II цепи ДВЛ соответственно.

Расчетные схемы замещения для рассматриваемых вариантов 1 и 2 показаны на рис. 2 и 3; с учётом ёмкостных токов – на рис. 4.



Рис.2. Расчетная схема замещения ДВЛ без учета взаимоиндукции проводников фаз

Ток КЗ без учета ёмкостных токов $I_{\rm k}$ в соответствии с расчетной схемой замещения (рис. 2) определен методом симметричных составляющих по выражению

$$I_{\kappa} = \frac{U_{\Phi}}{Z}; \tag{4}$$

Емкостной ток, генерируемый ВЛ, определен по выражению

$$I_C = \frac{U_{\Phi} \cdot b_{\pi}}{2},\tag{5}$$

тогда ток КЗ с учётом ёмкостных токов в соответствии с расчетной схемой замещения (рис. 5) составит



Рис.3. Расчетная схема замещения ДВЛ с учетом взаимоиндукции проводников фаз



Рис.4. Схема для расчета ёмкостной составляющей тока КЗ ДВЛ

Результаты расчетов для двух вариантов расчетных схем представлены в табл. 1.

Таблица 1

(6)

Номер варианта, расчетная схема замещения	<i>D</i> _{ср,} м	<i>Z</i> , Ом	<i>b</i> _{л,} См	<i>I</i> _{C,} A	I_{K} A	$I_{ m KC,}$ A
1. OC3	9,18	2,47+ <i>j</i> 10.87	0,0000679	4,314	11394,6	11390,32
2. ОСЗ с учетом поперечной составляющей ДВЛ	10,695	2,47+ <i>j</i> 11.12	0,0000664	4,217	11150,6	11146,42

Результаты расчетов тока КЗ ДВЛ по двум вариантам расчетных схем

© Р.У. Галеева, А.В. Назаров, А.А. Хасаншин

Для реализации модели сети, учитывающей несимметрию свойств цепей ДВЛ, составлена МСЗ на базе матрицы Z, состоящая из собственных $Z_{i,i}$ и взаимных $Z_{i,j}$ фазных сопротивлений; собственных и взаимных ёмкостных проводимостей $b_{ci,i}$ и $b_{ci,j}$ в соответствии с рис. 5. На главной диагонали матрицы сопротивлений Z располагаются собственные активно-индуктивные сопротивления фаз, рассчитанные по выражению (7), недиагональные элементы представляют сопротивления взаимоиндукции проводов ДВЛ, рассчитанные по выражению (8):

$$Z_{L} = (R_{\rm IIIp} + R_{\rm 3} + j0,145 \lg \frac{D_{\rm 3}}{R_{\rm 3K}})L;$$
⁽⁷⁾

$$Z_M = (R_3 + j0, 145 \lg \frac{D_3}{d})L,$$
(8)

где $D_3 = 1000$ м — глубина залегания фиктивного обратного провода при f=50 Гц; $R_3 = 0,05$ Ом/км — удельное сопротивление земли; d—расстояние между двумя линиями «провод-земля».

Фазные токи определены решением матричного уравнения состояния аварийного режима ДВЛ по МСЗ в Z-форме без учета ёмкостных токов в виде

$$I| = |Z|^{-1}|E|; (9)$$

где E – матрица трехфазной системы напряжений источников питания; Z – матрица полных сопротивлений фаз ДВЛ с учетом взаимовлияния от расположения цепей на опорах ЛЭП и грозозащитного троса.



Рис.5. Продольная часть МСЗ ДВЛ в Z-форме с взаимными индуктивными связями фаз и троса

Частичные емкости находятся из потенциальных коэффициентов первой группы формул Максвелла

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 + \dots + \alpha_{16}\tau_6 \\ \dots \\ U_6 &= \alpha_{61}\tau_1 + \alpha_{62}\tau_2 + \dots + \alpha_{66}\tau_6 \end{aligned}$$
 (10)

Потенциальные коэффициенты рассчитывались по выражениям

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon} \ln \frac{2H}{R_{\rm up}},\tag{11}$$

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon} \ln\frac{D}{d}, \qquad (12)$$

где H – высота провода над землей, м; D, d – расстояния от провода i до изображения провода j, м.

Матрица потенциальных коэффициентов обращается, затем вычисляются собственные и взаимные частичные ёмкости. В узлы схемы по половине с каждой стороны добавляются шунты и формируются дополнительные ветви с половинами взаимных ёмкостей.

Используя встроенную утилиту Matlab Powergui Compute RLC Line Parameters, в соответствии с [12] были получены матрицы сопротивлений и емкостей (рис. 6 и 7), аналогичные рассчитанным в работе [15].

eneral				Line Geo	ometry					
Units: metric	~				Num	iber of phase con	ductors (bundle	s): 6		_
Frequency (Hz):	50			Condu	ct Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Cond. type	J
		190	1	p1		-3.5000	30	20		
Ground resistivit	ty (onm.m):	100		pz n2		2 -6.4000	23 5000	14 5000		1
Comments:				ps n4		3 -4.2000	22.5000	14.5000		•
Расчет собственных и взаимных		p4		4 5.5000 5 6.4000	30	20	-			
двухцепной ли	сопротивлении и проводимостей двухцепной линии напряжением 220 «В. Расщепленных проводов нет.			po -C		5 6.4000 C 4.2000	23	14 6000		
кВ. Расщеплени				po		6 4.2000	22.5000	14.5000		
марка АС-300/.	39. Onopii 112	20-2				Number of groun	id wires (bundle	s): 0		
				Condu	ct Phase	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Cond. type	T
-			~							
nductor and E Number of cond	Bundle Char	acteristic:	•	Conductor in	nternal inducta	nce evaluated fro	m 🔽	Include conduc	ctor skin effect	t
nductor and E Number of cond	Bundle Chara	acteristic:	•	Conductor in Geometric I	nternal inducta Mean Radius (C	nce evaluated fro	m 🔽	Include conduc	ctor skin effect	t
nductor and E Number of cond Conductor ((bundle) type	Bundle Chara ductor types [Conductor outside diameter (cm)	acteristics 1 Conducto T/D ratio	r C	Conductor in Geometric 1 conductor C GMR (cm)	nternal inductar Mean Radius (C Conductor DC resistance (Ohm/km)	nce evaluated fro SMR) Conductor relative permeability	Mumber of conductors per bundle	Include conduc Bundle diameter c (cm) i	Ctor skin effect Angle of conductor 1 (degrees)	t
nductor and E Number of cond Conductor C (bundle) type	Bundle Char ductor types Conductor outside diameter (cm) 2.4000	acteristics 1 Conducto T/D ratio 0.50	v r C 00	Conductor in Geometric I conductor C GMR (cm) 1.2000	nternal inductar Mean Radius (C Conductor DC resistance (Ohm/km) 0.0958	nce evaluated fro SMR) N Conductor relative permeability 1	m Number of conductors per bundle	Include conduct Bundle diameter c (cm) 1	ctor skin effect Angle of conductor 1 (degrees) 1	t
nductor and E Number of cond Conductor (bundle) type	Bundle Char. ductor types Conductor outside diameter (cm) 2.4000	acteristics 1 Conducto T/D ratio 0.50	r C	Conductor in Geometric I Conductor C GMR (cm) 1.2000	nternal inductar Mean Radius (C Conductor DC resistance (Ohm/km) 0.0958	nce evaluated fro SMR) Conductor relative permeability 1	m Number of conductors per bundle 1 1	Bundle diameter c (cm) i	Ctor skin effect Angle of conductor 1 (degrees) 1	t

Рис. 6. Окно ввода исходных данных для расчёта распределённых параметров ДВЛ

	Display RLC Values		
RLC line parar	neters:		
Frequency (Hz)			^
Ground resistivi 180	:y (ohm.m):		
Resistance mat	rix R matrix (ohm/km):		
0.14355 0.04 0.047162 0.1 0.047408 0.04 0.0469 0.04 0.047158 0.0 0.047158 0.0	7162 0.047408 0.0469 0.047158 0.047405 4408 0.047676 0.047158 0.047672 0.047672 17676 0.14485 0.047405 0.047672 0.047672 17676 0.14485 0.047405 0.047672 0.047676 17576 0.14458 0.047405 0.047672 0.047605 17676 0.144705 0.047162 0.047676 0.047676 17672 0.0477927 0.047408 0.447676 0.14458 <th></th> <th></th>		
nductance mat	rix L matrix (H/km):		
0.0023193 0.1 0.0010288 0.1 0.00091207 0. 0.0010456 0.0 0.00093474 0.0 0.00088418 0.0	010288 0.00091207 0.0010456 0.00093474 0.00088418 0023174 0.0010467 0.00093474 0.00092292 0.00092781 0010467 0.0023156 0.0008418 0.00092781 0.0010053 0093474 0.00088418 0.0023193 0.0010288 0.00091207 10092292 0.00092781 0.0010288 0.0023174 0.0010467 10092781 0.0010053 0.00091207 0.0010467 0.0023156		
2apacitance m 7.4011e-09 -1.: 1.2277e-09 7.: 5.2725e-10 -1.: -1.386e-09 -6.6 6.6096e-10 -5.: 4.0536e-10 -5.:	titix C matrix (F/km): 12776-09 -5.27256-10 -1.3866-09 -6.60966-10 -4.05366-10 (6466-09 -1.22616-09 -6.60966-10 -5.48286-10 -5.36456-10 12616-09 7.65756-09 -4.05366-10 -5.36456-10 -9.34346-10 0966-10 -4.05366-10 7.40116-09 -1.22777e-09 -5.27256-10 18286-10 -5.36456-10 -1.22776-09 7.56466-09 -1.2251e-09 6456-10 -9.3434e-10 -5.27256-10 -1.2251e-09 7.65756-09		~
Send RLC para	meters to block:		
		Selected bl	ock
Download:	RLC Matrices OF Sequences		

Рис.7. Результаты расчёта распределённых параметров ДВЛ

© Р.У. Галеева, А.В. Назаров, А.А. Хасаншин

На основе полученных результатов в программном комплексе *Matlab Simulink* был рассчитан матричным методом по выражению (8), а затем смоделирован расчетный эксперимент (рис. 8), результаты которого получили взаимное подтверждение. В части моделирования результаты представлены в форме осциллограмм фазных токов ТКЗ в начале линии, проходящих через релейную защиту (рис. 9), и в точке короткого замыкания (рис. 10). Иследования подтвердили возможность использования предложенного метода. На осциллограмме фазных токов КЗ показаны пиковые (максимальные) значения. Результаты проделанных опытов (действующих значений токов) представлены в табл. 2.



Рис.8. Электромагнитная модель ТКЗ на базе МСЗ для начального участка исследуемой ДВЛ в программном комплексе *Matlab Simulink*



Рис.9. Осциллограмма фазных токов ТКЗ в начале ДВЛ



Рис.10. Осциллограмма фазных токов ТКЗ в конце ДВЛ

Таблица 2

Номер варианта, расчетная схема,	Фазные	Ток в месте КЗ без учета емкостной проводимости	С учётом емкостной проводимости		
метод расчета	токи	<i>I</i> ⁽³⁾ _{к ф.по.} А	$I_{C \phi_{}} A$	<i>I</i> ⁽³⁾ _{кС ф.по,} А	
1. OC3, MCC	$I_A = I_B = I_C$	11395	4,3	11390,7	
2. ОСЗ с учетом	$I_A = I_B = I_C$	11151	4,2	11146,8	
поперечной					
составляющей,					
MCC					
3. МСЗ, МФК	I_A	10010,2			
	I_B	11942,5	-	-	
	I_C	10850,1			
Результаты модели в	I_A	9842,9	6,8	9836,1	
Matlab Simulink	I_B	11999,6	5,4	11994,2	
	I_C	10797,5	7,1	10790,4	
Результаты модели в	I_A	10674,82			
Matlab Simulink c		(3147,0885 - <i>j</i> 10200,3720)	7,07	10667,75	
использованием	I_B	12691,66			
Compute RLC Line		(-12227,3953 + <i>j</i> 3401,3503)	7,16	12684,5	
Parameters	I_C	11456,02		11449,3	
		(9198,0569 + <i>j</i> 6829,0619)	6,72		

Начальная составляющая периодического тока КЗ с учётом и без учёта емкостной составляющей

Выводы: Приведенные исследования с использованием МФК показали, что пренебрежение взаимовлиянием цепей ДВЛ, линий и тросов при расчете переходных режимов приводит к возникновению знакопеременных погрешностей в оценке начального значения тока ТКЗ в фазных проводах, достигающих в среднем 20,01 % по абсолютному значению в классе напряжений 220 Кв, с использованием утилиты *Compute RLC Line Parameters* – 18,89 %.

Использование встроенной утилиты *Powergui RLC Line Parameters* в тестируемой модели позволило повысить точность расчета начального тока КЗ в фазах на 5–8%. Величины ёмкостных токов фаз достаточно малы и составляют не более 0,07%, поэтому в расчетах токов КЗ для ДВЛ напряжением до 220 кВ ими можно пренебречь. Однако можно заметить, что ёмкостные токи уменьшают величины фазных токов КЗ ДВЛ в начале линий, проходящих через устройства релейной защиты. Данный фактор может негативно сказываться на надежности срабатывания устройств защиты ВЛ напряжением 330 кВ и выше и длиной более 100 км.

Литература

1. Альмендеев А.А. Математическая модель для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий // Вестник СамГТУ. 2009. № 2(24).

2. Плотников М.П. Распределение электрической энергии вдоль неоднородного участка двухцепной линии электропередачи / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 1. С. 14–20.

3. Плотников М.П. Математическая модель трехфазной двухцепной ВЛ / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XI (XXXIII) Всероссийской научно-технической конференции. Братск: Изд.-во БрГУ, 2012. 183с.

© Р.У. Галеева, А.В. Назаров, А.А. Хасаншин

4. Плотников М. П. Моделирование несинусоидальных режимов двухцепных воздушныхлиний электропередачи : дис. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВПО Братский государственный университет. Братск, 2015.

5. Babak B. Designing passive harmonic filters for an aluminium smelting plant / B.Babak // IEEE Transactions on industry application. 2011. Vol. 47, No. 2. P. 973–983.

6. Khrushchev Y.V. The Analysis of the sensitivity of an overhead line parameter identifying algorityms to the highest harmonics in the current and voltage instantaneous values / Y.V. Khrushchev, N.L. Barseva, L.V. Abramochkina, A.V. Pankratov // IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Publication Year, 2014. P. 79–82.

7. Насыров Р.Р. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220–500 кВ / Р.Р. Насыров, И.И. Карташев, Б.В. Олексюк, М.Г. Симуткин, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // Электричество. 2013. № 1. С. 13–18.

8. Шишков Е.М., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. Влияние несимметрии параметров воздушной линии электропередачи // Электричество. 2013. №4.

9. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions // The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. P. 52.

10. Svenda G.S., Nahman J.M. Transformer phase coordinate models extended for grounding system analysis, in IEEE Transactions on Power Delivery. Oct 2002. Vol. 17, No. 4. P.1023–1029, doi:10.1109/TRWRD. 2002.803799.

11. Izudin Džafić, Rabih A. Jabr, Hans-Theo Neisius. Transformer Modeling for Three-phase Distribution Network Analysis // IEEE Trans. Power Syst. 2015. V. 30, No. 5. P. 2604–2611.

12. Qiong Wu, Saeed Jazebi. Francisco de Leon. Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements // IEEE Trans. Magnetics. 2017. V. 53, No. 7. P. 1–8.

13. Khrushchev Y.V. The Analysis of the sensitivity of an overhead line parameter identifying algorityms to the highest harmonics in the current and voltage instantaneous values / Y.V.Khrushchev, N.L. Barseva, L.V. Abramochkina, A.V. Pankratov // IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Publication Year, 2014. P. 79–82.

14. Назаров А.В., Галеева Р.У. Учет влияния параметров двухцепных ЛЭП при симметричных коротких замыканиях при коррекции уставок релейной защиты // Мировая наука. 2017. №7(7).

15. Тартак Л. А., Иманакунова Ж.С. Решение прикладных задач электроэнергетики в MatLab // Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2014. № 31.

Авторы публикации

Галеева Раиса Усмановна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Назаров Александр Валерьевич – студент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Хасаншин Айдар Азатович – студент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Almendeev A.A. Mathematical model for calculation of steady-state regimes of double-circuit overhead lines // Bulletin of SamSTU. 2009. № 2 (24).

2. Plotnikov M.P. Distribution of electrical energy along a non-uniform section of a two-circuit power transmission line. / M.P. Plotnikov, G.A. Bolshanin // Electrotechnical complexes and control systems. 2013.

№ 1. P. 14–20.

3. Plotnikov M.P. Mathematical model of a three-phase two-chain overhead line. / M.P. Plotnikov, G.A. Bolshanin // Natural and engineering sciences - development of the regions of Siberia: materials of the XI (XXXIII) All-Russian Scientific and Technical Conference. Bratsk: Publishing house of BrSU, 2012. 183c

4. Plotnikov M.P. Simulation of non-sinusoidal modes of two-chain overhead transmission lines : Thesis for a Candidate of Technical Sciences Degree / FGBOU VPO Bratsk State University. Bratsk, 2015.

5. Babak B. Designing passive harmonic filters for an aluminium smelting plant / B.Babak // IEEE Transactions on industry application. 2011. Vol. 47, No. 2. P. 973–983.

6. Khrushchev Y.V. The Analysis of the sensitivity of an overhead line parameter identifying algorityms to the highest harmonics in the current and voltage instantaneous values / Y.V. Khrushchev, N.L. Barseva, L.V. Abramochkina, A.V. Pankratov // IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Publication Year, 2014. P. 79–82.

7. Nasyrov R.R. Investigation of the influence of higher harmonic sources on the quality of electric power in electric power systems 220-500 kV / R/R. Nasyrov, I./I. Kartashev, B.V. Oleksyuk, M.G. Simutkin, V.N. Tulsky, R.G. Shamonov // Electricity. 2013. № 1. P. 13–18.

8. Shishkov E.M., Vedernikov A.S., Goldstein V.G. Influence of asymmetry of parameters of an overhead power line // Electricity. 2013. №4.

9. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions // The Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2010. P. 52.

10. Svenda G.S., Nahman J.M. Transformer phase coordinate models extended for grounding system analysis, in IEEE Transactions on Power Delivery. Oct. 2002. Vol.17, No. 4. P.1023–1029, doi:10.1109/TRWRD. 2002.803799.

11. Izudin Džafić, Rabih A. Jabr, Hans-Theo Neisius. Transformer Modeling for Three-phase Distribution Network Analysis // IEEE Trans. Power Syst. 2015. V.30, No. 5. P. 2604–2611.

12. Qiong Wu, Saeed Jazebi, Francisco de Leon. Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements // IEEE Trans. Magnetics. 2017. V.53, No. 7. P. 1–8.

13. Khrushchev Y.V. The Analysis of the sensitivity of an overhead line parameter identifying algorityms to the highest harmonics in the current and voltage instantaneous values / Y.V.Khrushchev, N.L. Barseva, L.V. Abramochkina, A.V. Pankratov // IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Publication Year. 2014. P. 79–82.

14. Nazarov A.V., Galeeva R.U. Accounting for the influence of parameters of dual-circuit power lines for symmetrical short circuits with correction of relay protection settings // World Science. 2017. No. 7 (7).

15. Tartak L.A., Imanakunova G.S. Solving applied problems of power industry in MatLab // News KGTU им. I.Razzakova. 2014. № 31.

Authors of the publication

Raisa U. Galeeva - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexander V. Nazarov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aydar A. Khasanshin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

02 октября 2018 г.