

Панова Е.А.¹, Альбрехт А.Я.²

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

УТОЧНЕННЫЕ УДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХЦЕПНЫХ ЛЭП 110 кВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

При устранении повреждений на воздушных линиях электропередачи важным является точное дистанционное определение места повреждения (ОМП), ведь именно от него будет зависеть время, затраченное выездной бригадой на осмотр линии и обнаружение причины её отключения. Наибольшую сложность представляет дистанционное обнаружение однофазных коротких замыканий, которые, в свою очередь, являются наиболее частыми видами повреждений в сетях с эффективно заземленной нейтралью. Для точного дистанционного ОМП по параметрам аварийного режима необходимо выполнение серии расчетов режима однофазного короткого замыкания, что требует использования математических моделей линий электропередачи (ЛЭП), учитывающих электростатическое и электромагнитное взаимодействие их проводящих элементов, а также конфигурацию опор. Наиболее простым способом является использование справочных значений удельных электрических параметров ЛЭП, которые рассчитаны с учетом ограничения использования сечений проводов по уровням напряжения. В системах электроснабжения промышленных предприятий нередки случаи, когда провода сечением 300 мм² используются в распределительных сетях 110 кВ, тогда как в справочной литературе их удельные параметры приведены только для уровня напряжения 220 кВ, т.е. определены при больших габаритах опоры. Также в справочной литературе отсутствуют удельные электрические параметры для схемы замещения нулевой последовательности, что необходимо для расчета режима однофазного короткого замыкания. Другим способом определения этих величин является использование руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания для релейной защиты, но в данном документе отсутствуют выражения для определения удельных параметров двухцепной ЛЭП с одним грозозащитным тросом. Кроме того, выполнение данных расчетов «вручную» занимает значительное время, что недопустимо при авариях. Авторами предложены расчетные выражения для определения удельных сопротивлений и емкостной проводимости симметричных составляющих двухцепной ЛЭП с одним грозотросом, а также рассчитаны указанные величины для различных сечений проводников и среднегеометрического расстояния между фазами. Результаты работы могут быть использованы при составлении таблиц ОМП.

Ключевые слова: определение места повреждения, линия электропередачи, однофазное короткое замыкание, взаимная индуктивность, фазная емкость, удельное сопротивление, математическая модель, система электроснабжения, зеркальное изображение, симметричные составляющие.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных способов моделирования линий электропередачи различного класса напряжения является задание их удельным активным и индуктивным сопротивлением, а также удельной емкостной проводимостью. Такой подход используется в первую очередь для расчета параметров установившегося режима [1, 2]. Однако при решении задачи ОМП при однофазных коротких замыканиях он не дает необходимую точность. Во-первых, это связано с усреднением среднегеометрического расстояния между фазными проводами, т.е. отсутствием учета фактических геометрических характеристик опоры. Во-вторых, это обусловлено тем, что удельные сопротивления и проводимости проводов сечением 300 и 330 мм² рассчитаны только для среднегеометрического расстояния 8 м, что соответствует их использованию в сети напряжением 220 кВ. Учитывая, что провода данного сечения широко используются в сети 110 кВ, где среднегеометрическое расстояние между фазами составляет от 4 до 7 м, применение справочных данных даст завышенное значение сопротивления линии.

Также для ОМП широко используются аппаратные средства, описанные, например, в [3-5]. Их очевидным недостатком является высокая стоимость (от 70 до 500 тыс. руб. [3]).

Наиболее простым и точным является способ дис-

танционного определения места повреждения по параметрам аварийного режима (ПАР). Данный метод опирается на теорию расчета токов короткого замыкания, однако для решения задачи ОМП недопустимо использовать допущения, обычно применяемые при расчетах (например, пренебрежение поперечной емкостной проводимостью линий) [6].

Расчет ПАР основывается на математической модели системы электроснабжения, разработке которой посвящено большое число работ, однако они в основном направлены на решение обратной задачи, т.е. определение параметров схемы замещения по известным ПАР [7-9]. Данные алгоритмы реализуются в основном в устройствах ОМП.

Алгоритмы ОМП постоянно уточняются и совершенствуются. В первую очередь это касается уточнения схемы замещения, а также алгоритмов расчета [10-13].

В данной работе предлагаются расчетные выражения для определения удельных электрических параметров двухцепной ЛЭП с одним грозозащитным тросом, применимые в задаче ОМП при однофазных КЗ на линиях напряжением 110 кВ и выше. Предлагаемые выражения основаны на действующих руководящих указаниях [14], а также на работах авторов [15-22].

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В соответствии с [14] параметры схемы замещения прямой последовательности определяются одинаково

для любой конфигурации опоры и, таким образом, будут зависеть только от марки провода, расстояния между фазами и высотой подвеса фазных проводов.

Удельное продольное сопротивление прямой последовательности определяется следующим образом:

$$\dot{Z}_{1(2)} = r_n + r_3 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{3,п}}, \quad (1)$$

где r_n – активное сопротивление провода, Ом/км; r_3 – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока (0,15 Ом/км); D_3 – эквивалентная глубина расположения обратного провода (935 м); $\rho_{3,п}$ – эквивалентный радиус провода, учитывающий наличие внутреннего магнитного поля провода, м.

В свою очередь эквивалентный радиус сталеалюминиевого провода

$$\rho_{3,п} = 0,95 \cdot \rho_n, \quad (2)$$

где ρ_n – фактический радиус провода, м.

Для определения поперечной емкости Руководящими указаниями [14] рекомендуется использовать метод зеркальных изображений. Согласно этому методу земля рассматривается как поверхность с нулевым потенциалом, поэтому можно ввести так называемые «зеркальные изображения» проводов, т.е. фиктивные провода, расположенные под землей на глубине, равной высоте их подвеса. Потенциалы проводников связаны с их зарядами через потенциальные коэффициенты, которые определяются

$$\alpha_{ii} = 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ii}}{\rho_n}; \quad (3)$$

$$\alpha_{ij} = 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ij}}{D_{ij}},$$

где индексы $i, j=A, B, C, T, T'$; S_{ii} – расстояние между проводом или тросом и его зеркальным изображением; S_{ij} – расстояние между проводом или тросом i и зеркальным изображением провода или троса j ; D_{ij} – расстояние между проводами или тросами.

В (3) индекс ii относится к собственным потенциальным коэффициентам (α_c), индекс ij – к взаимным ($\alpha_{вз}$).

Емкость прямой последовательности линии электропередачи, Ф/км.

$$C_{1(2)} = \frac{1}{\alpha_c - \alpha_{вз}} = \frac{0,0241 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{cp} \cdot S_L}{\rho_n \cdot S_M}}, \quad (4)$$

где D_{cp} – среднегеометрическое расстояние между фазами; S_L – среднегеометрическое расстояние между проводом и его зеркальным изображением; S_M – среднегеометрическое расстояние между проводом одной фазы и зеркальным изображением другой.

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}};$$

$$\begin{cases} S_L = \sqrt[3]{S_{AA} \cdot S_{BB} \cdot S_{CC}}; \\ S_M = \sqrt[3]{S_{AB} \cdot S_{AC} \cdot S_{BC}}. \end{cases} \quad (5)$$

Зная емкость прямой последовательности линии, нетрудно определить её удельную емкостную проводимость, См/км

$$b_{c1(2)} = 2\pi \cdot f \cdot C_{1(2)}. \quad (6)$$

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Данная работа посвящена математическому моделированию двухцепных линий электропередачи с одним грозозащитным тросом. Опоры указанного типа широко используются в сетях 110 кВ систем электропитания промышленных предприятий. Однако для линий такой конфигурации в действующих Руководящих указаниях [14] отсутствуют расчетные выражения для определения удельных электрических параметров схемы замещения нулевой последовательности (продольного индуктивного сопротивления и поперечной емкостной проводимости).

Схема двухцепной ЛЭП, а также её схема замещения для токов нулевой последовательности приведена на рис. 1.

Так как для расчетов параметров аварийного режима предлагается использовать Т-образную схему замещения, то схема на рис. 1, б должна быть преобразована в эквивалентное продольное сопротивление:

$$\dot{Z}_0^{(T)} = \frac{\left(\dot{Z}_{0I}^{(T)}\right)^2 \dot{Z}_{0II}^{(T)} + \left(\dot{Z}_{0II}^{(T)}\right)^2 \dot{Z}_{0I}^{(T)} + 4\dot{Z}_{0I}^{(T)} \dot{Z}_{0II}^{(T)} \dot{Z}_{0T}^{(T)}}{2\left(\frac{\dot{Z}_{0I}^{(T)}}{2} + \frac{\dot{Z}_{0II}^{(T)}}{2} + 2\dot{Z}_{0T}^{(T)}\right)\left(\dot{Z}_{0I}^{(T)} + \dot{Z}_{0II}^{(T)}\right)}, \quad (7)$$

где собственное сопротивление первой цепи

$$\dot{Z}_{0I}^{(T)} = \dot{Z}_{0II}^{(T)} - \frac{\dot{Z}_{0IT}^2}{\dot{Z}_{0T}}; \quad (8)$$

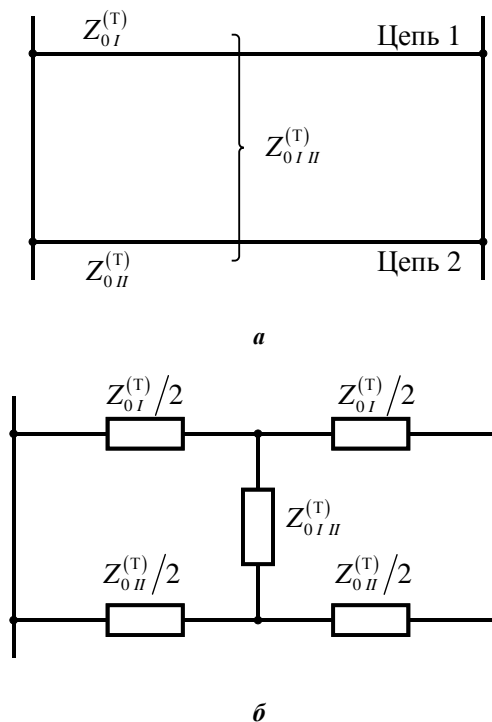


Рис. 1. К определению продольного сопротивления ЛЭП

сопротивление второй цепи определяется по (8) с индексами II вместо I; взаимное сопротивление цепей

$$\dot{Z}_{0II}^{(T)} = \dot{Z}_{0II} - \frac{\dot{Z}_{0IT} \dot{Z}_{0IT}}{\dot{Z}_{0T}} \quad (9)$$

В выражении (9) $\dot{Z}_{0II}^{(T)}$ и $\dot{Z}_{0IT}^{(T)}$ вычисляются по (1). Сопротивление троса определяется

$$\dot{Z}_{0T} = 1,5r_T + j0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{\rho_{\Sigma T}}}, \quad (10)$$

где r_T – активное сопротивление троса, Ом/км; $\rho_{\Sigma T}$ – эквивалентный радиус троса, м.

Сопротивление взаимоиндукции между цепями

$$\dot{Z}_{0II} = 1,5r_T + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{cpII}}, \quad (11)$$

где $D_{cpII} = \sqrt[9]{D_{Aa} D_{Ab} D_{Ac} D_{Ba} D_{Bb} D_{Bc} D_{Ca} D_{Cb} D_{Cc}}$.

Сопротивления цепей с учетом влияния грозозащитного троса

$$\dot{Z}_{0IT} = \dot{Z}_{0IT} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{пТ}}, \quad (12)$$

где $D_{пТ} = \sqrt[3]{D_{AT} D_{BT} D_{CT}}$.

Кроме продольного индуктивного сопротивления линии для расчетов с целью ОМП необходимо учесть емкостную поперечную проводимость ЛЭП. Согласно методу зеркальных изображений емкость нулевой последовательности можно вывести из системы уравнений, связывающих напряжения проводов относительно земли с их электрическими зарядами. Так как в схеме замещения нулевой последовательности кроме фазных проводов необходимо учесть влияние грозозащитного троса, то для него тоже составляется соответствующее уравнение, при учете, что напряжение троса равно нулю.

$$\begin{cases} \dot{U}_{0I} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{II} q_{0II} + \alpha_{IT} q_T; & (a) \\ \dot{U}_{0II} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{II} q_{0II} + \alpha_{IT} q_T; & (б) \\ 0 = 3\alpha_{IT} q_{0I} + \alpha_{IT} q_{0II} + \alpha_{IT} q_T, & (в) \end{cases}$$

Выражая из (в) заряд троса и подставляя его в (а) и (б) можно найти потенциальные коэффициенты цепей $\alpha_{II}^{(T)}$ и $\alpha_{II}^{(T)}$, а также взаимные потенциальные коэффициенты $\alpha_{II}^{(T)}$ и $\alpha_{II}^{(T)}$

$$\begin{aligned} \alpha_{II}^{(T)} &= \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT}; \\ \alpha_{II}^{(T)} &= \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT}; \\ \alpha_{II}^{(T)} &= \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT}; \\ \alpha_{II}^{(T)} &= \alpha_{II} - \Delta\alpha_{IT}, \end{aligned}$$

где α_{II} , α_{II} – собственные потенциальные коэффициенты цепей без учета влияния троса; α_{II} , α_{II} – взаим-

ный потенциальный коэффициент; $\Delta\alpha_{IT}$, $\Delta\alpha_{II}$, $\Delta\alpha_{II}$ – добавочные потенциальные коэффициенты, учитывающие влияние троса.

Собственный потенциальный коэффициент цепи

$$\alpha_{II(II)} = 41,4 \cdot 10^6 \lg \frac{D_{cp} S_L}{\rho_{п} S_M}$$

Взаимный потенциальный коэффициент

$$\alpha_{II(II)} = 124 \cdot 10^6 \lg \frac{S_{cpII}}{D_{cpII}},$$

где $S_{cpII} = \sqrt[9]{S_{AA} S_{BB} S_{CC} S_{AB}^2 S_{AC}^2 S_{BC}^2}$.

Добавочные потенциальные коэффициенты цепей

$$\Delta\alpha = \left[124 \cdot 10^6 \left(\lg \frac{S_{пТ}}{D_{пТ}} \right)^2 \right] \left[\lg \frac{S_{пТ}}{\rho_T} \right]^{-1},$$

где $S_{пТ} = \sqrt[3]{S_{AT} S_{BT} S_{CT}}$; $S_{пТ}$ – расстояние между тросом и его зеркальным изображением, м.

Тогда емкости цепей:

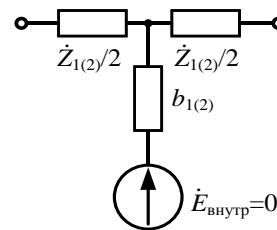
$$C_{II} = \frac{\alpha_{II}^{(T)}}{\alpha_{II}^{(T)} \alpha_{II}^{(T)} - \alpha_{II}^{(T)2}};$$

$$C_{II} = \frac{\alpha_{II}^{(T)}}{\alpha_{II}^{(T)} \alpha_{II}^{(T)} - \alpha_{II}^{(T)2}}.$$

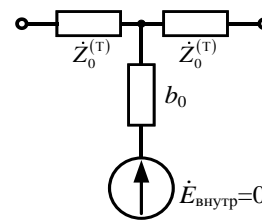
Удельная поперечная проводимость нулевой последовательности

$$b_0 = 2\pi f (C_{II} + C_{II}). \quad (13)$$

В результате линия электропередачи может быть представлена T-образной схемой замещения, показанной на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Схема замещения прямой, обратной (а) и нулевой последовательности (б) ЛЭП

УДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛЭП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя выражения (1), (6), (7) и (13), были рассчитаны удельные продольные сопротивления (Ом/км) и поперечная проводимость (См/км) двухцепных линий электропередачи напряжением 110 кВ с проводами сечением от 120 до 300 мм² при среднегеометрическом расстоянии между проводами 4, 5,6, 7,1 м. Данные величины соответствуют опорам типа ПБ110-8, У110-2 и ЦП-8 соответственно, которые широко используются в системах электроснабжения промышленных предприятий. Полученные сопротивления и проводимости сведены в табл. 1 и 2. Все значения определены при условии, что на линии используется грозозащитный трос радиусом 4,55 мм с активным сопротивлением 2,8-3,7 Ом/км.

Представленные в работе расчетные выражения позволяют определять удельное продольное сопротивление и поперечную емкость двухцепных ЛЭП с одним грозотросом. Так как в них учтено электромагнитное и электростатическое взаимодействие проводящих элементов линии, то их можно использовать при расчете несимметричного аварийного режима с целью дистанционного ОМП. На основе полученных расчетных выражений были составлены справочные таблицы со значениями удельных сопротивлений и проводимостей ЛЭП прямой, обратной и нулевой последовательностей при различном сечении фазных проводов и среднегеометрическом расстоянии между фазами.

Таблица 1

Удельные параметры прямой (обратной) последовательности

D_{cp} , м	Провод	$r_{1(2)}$, Ом/км	$x_{1(2)}$, Ом/км	$b_{1(2)} \cdot 10^{-6}$, См/км
4	АС-120	0,25	0,404	2,501
	АС-150	0,198	0,396	2,544
	АС-240	0,12	0,38	2,634
	АС-300	0,098	0,374	2,677
	М-185	0,1002	0,394	2,555
5,6	АС-120	0,25	0,424	2,347
	АС-150	0,198	0,416	2,384
	АС-240	0,12	0,402	2,463
	АС-300	0,098	0,394	2,5
	М-185	0,1002	0,4142	2,394
7,1	АС-120	0,249	0,438	2,239
	АС-150	0,198	0,43	2,274
	АС-240	0,12	0,416	2,345
	АС-300	0,098	0,41	2,379
	М-185	0,10015	0,428	2,282

Таблица 2

Удельные параметры нулевой последовательности

D_{cp} , м	Провод	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км
4	АС-120	0,532	2,422	1,697
	АС-150	0,476	2,362	1,697
	АС-240	0,4	2,23	1,697
	АС-300	0,378	2,17	1,697
	М-185	0,38	2,346	1,697
5,6	АС-120	0,51	2,07	1,525
	АС-150	0,458	2,004	1,525
	АС-240	0,38	1,87	1,525
	АС-300	0,358	1,812	1,525
	М-185	0,36	1,986	1,525
7,1	АС-120	0,524	1,798	1,5
	АС-150	0,472	1,73	1,5
	АС-240	0,394	1,598	1,5
	АС-300	0,372	1,538	1,5
	М-185	0,374	1,714	1,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет установившегося режима электрической сети в геоинформационной системе ГрафИн / С.Г. Слюсаренко, Л.Ю. Костюк, А.В. Скворцов, С.А. Субботин, Д.С. Сарычев // Вестник Томского гос. ун-та. 2002. №275. С. 64-69.
2. Паздерин А.В., Юферев С.В. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы обобщенным методом Ньютона // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. №5-6. С.68-77.
3. Бодруг Н.С., Халиков В.В., Шатравка В.В. Анализ устройств определения мест повреждения 6-750 кВ отечественного производства // Символ науки. 2016. С.14-16.
4. Домрачев Г.Р. Устройством определения места повреждения при коротких замыканиях // Развитие технических наук в современном мире: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2015. №2. С.41-43.
5. Шилин А.Н., Шилин А.А., Артюшенко Н.С. Источники погрешностей рефлектометров для определения места повреждения линий электропередач // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: матер. XII Всерос. науч.-технич. конференции с междунар. участием в рамках III Всерос. светотехнич. форума с междунар. участием. Саранск, 2015. С.474-482.
6. Малый А.С., Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / под ред. Г.М. Шалыта. М.: Энергия, 1972. 216 с.
7. Ермаков К.И. Моделирование в задачах определения места повреждения на линиях электропередач // Вестник Чувашского университета. 2011. №3. С.67-70.
8. Лебедева А.А., Грибанов А.А. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередач напряжением 220 кВ на основе двустороннего метода расчёта // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. Сals-технологии в энергетике. 2015. Т.1. С.64-70.
9. Бычков Ю.В., Павлов А.О. Определение места повреждения в схемах с многосторонним питанием // Энергетика Татарстана. 2011. №2. С.33-38.
10. Ferreira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S. Jr. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines. Electric Power System Research. 2016, no.136, pp.135-153.
11. Johns A., Jamali S. accurate fault location technique for power transmission lines. IEE Proc. C: Gener. Trans. Distrib, 1990, 136(7), pp.395-402.
12. Mazon A., Zamora I., Gracia J., Sagastabeitia K., Eguia P., Jurado F., et al. Fault location system on double circuit two-terminal transmission lines based on ANNs. Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto, vol.3, 2001, p.5.
13. Saha S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission networks of power systems. Int. J. Electr. Power Energy

- Syst., 2011, no.33(4), pp.887-900.
14. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.
 15. Панова Е.А. Повышение режимной надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в условиях аварийной несимметрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 25.05.12: утв. 10.06.13 / Панова Евгения Александровна. Магнитогорск, 2012. 205 с. Библиогр.: с. 137-157.
 16. Панова Е.А., Савельева К.С. Определение удельных электрических параметров воздушных линий электропередачи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №10. С.16-22.
 17. Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Главный энергетик. 2011. №3. С.35-39.
 18. Моделирование неполнофазных аварийных режимов в задаче расчёта и анализа работы систем промышленного электроснабжения / А.В. Малафеев, Е.А. Панова, С.В. Беляев, А.А. Емельянов, А.Я. Альбрехт, О.Ю. Биктеева // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С.119-123.
 19. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // Промышленная энергетика. 2010. №3. С.26-31.
 20. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Кондрашова, Е.А. Панова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
 21. Повышение чувствительности релейной защиты силовых трансформаторов системы промышленного электроснабжения в сложносимметричных аварийных режимах / Е.А. Панова, А.В. Малафеев, В.А. Болтачев, И.В. Иркиленко // Электротехнические системы и комплексы. 2013. №21. С. 195-198.
 22. Панова Е.А., Савельева К.С., Кочкина А.В. Оценка допустимости режимов работы синхронных генераторов собственных электростанций промышленных предприятий при пофазном ремонте электрооборудования питающих сетей в нормальном и оптимальном режимах // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 214-220.

Поступила в редакцию 26 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SPECIFIED PER-UNIT PARAMETERS OF DOUBLE-CIRCUIT 110 kV OVERHEAD LINES FOR DISTANT FAULT LOCATION

Evgeniya A. Panova

Ph.D (Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panova.ea@mail.ru

Aleksandr Ya. Al'brekht

Head of the Department, Relay Protection Department, Central Electrical Laboratory, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

When eliminating fault on overhead transmission line it is very important to locate it accurately. This will lead to a less time spent by mobile maintenance team on the line inspection and detection of a fault reason. The most difficult is a distant single phase short circuit location which are the most frequent fault in the effectively grounded network. For an accurate distant fault location basing on the emergency mode parameters it is necessary to execute a set of computations of single-phase short circuit mode. This needs the use of lines mathematical models taking into account electrostatic and electromagnetic coupling of conductors and tower configuration. the easiest way to model a line is to use referential per unit electrical parameters calculated with respect to the limitation of a wires use on different voltage levels. In industrial electric power supply system 300 mm² wires are often used in 110 kV distribution network whereas their parameters are specified for 220 kV, that is with bigger tower dimensions. Also there are no zero sequence parameters in reference books. The other way is to use relay protection guidelines for line parameters computation, but this documents doesn't contain equations for double-circuit overhead line with a single protection cable. Besides manual calculations take a lot of time which is inappropriate in accidental situation. The authors have elaborated the equations for symmetrical components of per unit resistance and capacitive susceptance calculation for double-circuit overhead line with a single protection cable. Also the authors have calculated the above mentioned parameters for

different wires cross sections and geometric mean distance between phases.

Keywords: Fault location, overhead line, single-phase short circuit, mutual induction, phase capacitance, per unit resistance, mathematical model, electric power supply system, electrical images, symmetrical components.

REFERENCES

1. Slyusarenko S.G., Kostyuk L.Yu., Skvortsov A.V., Subbotin S.A., Sarychev D.S. Electric circuit steady-state regime computation in GraphIn geoinformatic systems. *Vestnik Tomskogo gos. un-ta* [Tomsk State University Journal], 2002, no.275, pp.64-69. (In Russian)
2. Pazderin A.V., Yuferev S.V. The calculation of the steady-state mode of an electrical power system by generalized Newton method. *Izv. vuzov. Problemy energetiki* [Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems], 2008, no.5-6, pp.68-77. (In Russian)
3. Bodrug N.S., Khalikov V.V., Shatravka V.V. The Analysis of Fault-location Devices for 6-750 kV. *Simvol nauki* [The Symbol of Science], 2016, pp.14-16. (In Russian)
4. Domrachev G.R. Short-circuit location device. *Razvitie tekhnicheskikh nauk v sovremennom mire. Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of Int. Scientific conf. "Technical science development today"], 2015, no.2, pp.41-43. (In Russian)

5. Shilin A.N., Shilin A.A., Artyushenko N.S. The reason of errors of the reflector for overhead lines fault location. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoy svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki. Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkakh III Vserossiyskogo svetotekhnicheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. of XII Int. Conf. "Problems and Prospects of lighting engineering, electrotechnics and power engineering development"], 2015, pp.474-482. (In Russian)
6. Malyy A.S., Shalyt G.M., Ayzenfel'd A.I. *Opreделение mest povrezhdeniya liniy elektroperedachi po parametram avariynogo rezhima* [Fault detection on emergency operating mode parameters], under the editorship of G.M. Shalyt, Moscow, Energiya Publ., 1972, 216 p.
7. Ermakov K.I. Modeling in the Issue of Overhead Lines Fault Location. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash University], 2011, no.3, pp.67-70. (In Russian)
8. Lebedeva A.A., Griбанov A.A. 220 kV Over-Head Lines Fault Detection with Two-Side Calculation Method. *Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. Cals-tekhnologii v energetike* [Power Engineering. Innovations in Power Engineering. Cals-Technologies in Power Engineering], 2015, vol.1, pp.64-70. (In Russian)
9. Bychkov Yu.V., Pavlov A.O. Fault Location in Multi-Way Feed Schemes. *Energetika Tatarstana* [Tatarstan Power engineering], 2011, no.2, pp.33-38. (In Russian)
10. Ferreira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S. Jr. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines. *Electric Power System Research*. 2016, no.136, pp.135-153.
11. Johns A., Jamali S. accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proc. C: Gener. Trans. Distrib*, 1990, 136(7), pp.395-402.
12. Mazon A., Zamora I., Gracia J., Sagastabeitia K., Eguia P., Jurado F., et al. Fault location system on double circuit two-terminal transmission lines based on ANNs. *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto*, vol.3, 2001, p.5.
13. Saha S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission networks of power systems. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2011, no.33(4), pp.887-900.
14. Guidelines on relay protection. Iss.11. Short-circuit current calculation for relay protection and system automatics in 110-750 kV network. Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p. (In Russian)
15. Panova E.A. *Povyshenie rezhimnoy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh avariynoy nesimmetrii*. [Performance reliability enhancement in industrial electric power systems in terms of out-of-balance emergency operating conditions. PhD(Eng.) Diss.]. Magnitogorsk, 2015. 205 p.
16. Panova E.A., Savel'eva K.S. Evaluation of specific electric parameters of overhead transmission lines. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: exploitation and maintenance], 2014, no.10, pp.16-22. (In Russian)
17. Malafeev A.V., Panova E.A. The algorithm of complex out-of-balance operation mode computation in industrial electric power systems. *Glavnyy energetik* [Chief power engineer], 2010, no.3, pp.35-39. (In Russian)
18. Malafeev A.V., Panova E.A., Belyaev S.V., Emel'yanov A.A., Al'brekht A.Ya., Bikteeva O.Yu. Simulation of open-phase mode in the problem of computation and analysis of industrial electric power system operation. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Transactions of higher education institutions. Electromechanics], 2011, no.4, pp.119-123. (In Russian)
19. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigor'eva M.V. The analysis of out-of-balance short circuit mode in complex electric power supply systems with domestic power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2010, no.3, pp.26-31. (In Russian)
20. Igumenshchev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releynoy zashchity v setyakh 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluation of the 110-220 kV network relay protection effectiveness in complex electric power systems with domestic power plants]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2011. 141 p.
21. Panova E.A., Malafeev A.V., Boltachev V.A., Irklienko I.V. Power transformer relay protection sensitivity improvement in terms of industrial electric power supply system emergency complex out-of-balance mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 195-198. (In Russian)
22. Panova E.A., Savel'eva K.S., Kochkina A.V. Evaluation of operation acceptability of the industrial enterprises domestic power plants synchronous generators in case of electric equipments' incremental repair of the subtransmission network under normal and optimum operation condition. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 214-220. (In Russian)

Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.35-40. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.35-40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40