

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова²Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХЦЕПНОЙ ЛЭП С ДВУМЯ ГРОЗОТРОСАМИ

В работе предложена комбинированная схема замещения двухцепной линии электропередачи с двумя грозозащитными тросами, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих. Предлагаемый подход к моделированию ЛЭП позволяет учесть взаимное расположение проводящих элементов на опоре (проводов и грозозащитных тросов), в том числе несимметричное друг относительно друга. Кроме того, за счет сочетания метода фазных координат с методом симметричных составляющих достигается упрощение схемы замещения в целом и процесса подготовки исходных данных. Использование комбинированной схемы замещения ЛЭП позволяет выполнять расчет несимметричного режима методом симметричных составляющих, при этом все элементы, кроме ЛЭП высокого напряжения, моделируются параметрами прямой, обратной и нулевой последовательности, а линии электропередачи – в фазных координатах. Предложенная модель ЛЭП ориентирована на выполнение расчетов параметров режима однофазного короткого замыкания в сети 110–220 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия с целью дистанционного определения места повреждения.

Ключевые слова: линия электропередачи, фазные координаты, симметричные составляющие, взаимоиндукция, грозозащитный трос.

ВВЕДЕНИЕ

Решение таких задач, как определение места повреждения при однофазных коротких замыканиях на линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше, требует высокой точности результатов расчета параметров режима однофазного короткого замыкания. Она во многом зависит от модели линий электропередачи. Так, в [1] описано применение П-образной схемы замещения ЛЭП, а также предложена улучшенная П-образная схема замещения. Такой способ моделирования ЛЭП применяется для протяженных ЛЭП в системообразующих сетях высокого и сверхвысокого напряжения. Авторы [2] разработали ПО, которое позволяет моделировать ЛЭП и исследовать влияние таких факторов, как частота, скин-эффект и расстояние между проводниками на собственные и взаимные сопротивления линии. В [3] авторы предложили новые уточненные уравнения для расчета сопротивления заземления ЛЭП. Однако такое усложнение модели ЛЭП имеет смысл только для расчета электромагнитных переходных процессов.

Важным является учет сопротивления взаимоиндукции между проводящими элементами ЛЭП. В [4] приведены уравнения для расчета индуктивного сопротивления взаимоиндукции транспонированных ЛЭП. Авторы [5] исследовали взаимоиндуктивное влияние параллельных линий разного напряжения при протекании по одной из них несимметричного тока аварийного режима. Аналогичную проблему решали авторы в [6]. Однако они предложили новый метод «виртуальной» линии. Предложенный авторами метод показал достаточную для расчетов параметров срабатывания устройств релейной защиты точность. В [7] исследовано взаимоиндуктивное влияние трехфазной ЛЭП и пересекающейся с ней линии связи, причем авторы предложили уравнения, которые позволяют исследовать такое влияние при различных углах пересечения линий. Авторы [8] решили данную проблему с

использованием каскадно соединенных П-образных схем замещения, которые позволяют учесть не только взаимоиндукцию многофазной ЛЭП, но и влияние частоты и отсутствия транспозиции на сопротивление.

Целый ряд работ посвящен определению параметров ЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений. В [9] авторы верифицируют значения параметров прямой и нулевой последовательности ЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений токов и напряжений по концам ЛЭП. Также в работе приведено тестирование предложенного алгоритма как на транспонированной, так и на нетранспонированной линии. В [10] предложена цепочечная модель ЛЭП, которая позволяет учесть влияние погодных факторов на определение параметров линии. Данная модель предназначена для использования ее в сетях сверхвысокого напряжения. Авторы [11] разработали алгоритм оценки параметров ЛЭП и определения места повреждения, который учитывает влияние электрической дуги и величину сопротивления заземления опоры.

При моделировании ЛЭП для повышения точности результатов расчета, в зависимости от поставленной задачи, могут быть учтены различные факторы. В работе [12] авторы разработали термоэлектрическую модель ЛЭП, которая учитывает не только электрические, но и тепловые характеристики линии. Авторы [13] дополнили модель ЛЭП параметрами изоляторов для моделирования грозовых перенапряжений. В [14] авторы предложили частотнозависимую модель ЛЭП для исследования электромагнитных переходных процессов. В [15] авторы предлагают метод точного учета неоднородности поперечного сечения проводника и влияния скин-эффекта и эффекта близости на электрические параметры ЛЭП. Авторы [16] исследуют учет взаимного влияния ЛЭП разного уровня напряжения и учет этого влияния на результаты расчета параметров режимов. В [17] авторами использован метод конечных элементов для учета транспозиции ЛЭП и влияния заземления на емкость линии. Однако для расчетов параметров аварийных режимов достаточно учесть электрические параметры ЛЭП и расстояния между

проводниками, как показано, например, в [18, 19].

Все рассмотренные методы ориентированы в первую очередь на моделирование энергосистем и не могут быть использованы в условиях промышленных систем электроснабжения. Данная работа направлена на создание гибридной математической модели двухцепной ЛЭП. Предлагаемая модель учитывает фактическое расположение проводников на опоре, наличие грозозащитного троса, а также она может быть использована совместно со схемой замещения электрической сети в симметричных составляющих. Такой подход значительно сокращает время счета и упрощает схему замещения остальных элементов сети.

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Предлагаемая в работе комбинированная схема замещения ЛЭП основана на сочетании методов симметричных оставляющих и фазных координат. Для вывода расчетных выражений для определения продольного сопротивления двухцепной ЛЭП с двумя грозотросами необходимо составить матрицу сопротивлений ЛЭП:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_{ij} & \dot{\mathbf{Z}}_{Tj} \\ \dot{\mathbf{Z}}_{Tj} & \dot{\mathbf{Z}}_{TT} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где:

– матрица собственных и взаимных сопротивлений цепей

$$\dot{\mathbf{Z}}_{ij} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AA} & \dot{Z}_{BA} & \dot{Z}_{CA} & \dot{Z}_{aA} & \dot{Z}_{bA} & \dot{Z}_{cA} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{BB} & \dot{Z}_{CB} & \dot{Z}_{aB} & \dot{Z}_{bB} & \dot{Z}_{cB} \\ \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{CC} & \dot{Z}_{aC} & \dot{Z}_{bC} & \dot{Z}_{cC} \\ \dot{Z}_{Aa} & \dot{Z}_{Ba} & \dot{Z}_{Ca} & \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{ca} \\ \dot{Z}_{Ab} & \dot{Z}_{Bb} & \dot{Z}_{Cb} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{cb} \\ \dot{Z}_{Ac} & \dot{Z}_{Bc} & \dot{Z}_{Cc} & \dot{Z}_{ac} & \dot{Z}_{bc} & \dot{Z}_{cc} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

– матрицы сопротивлений взаимоиндукции между проводниками цепей и тросами

$$\dot{\mathbf{Z}}_{iT} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AT1} & \dot{Z}_{BT1} & \dot{Z}_{CT1} & \dot{Z}_{aT1} & \dot{Z}_{bT1} & \dot{Z}_{cT1} \\ \dot{Z}_{AT2} & \dot{Z}_{BT2} & \dot{Z}_{CT2} & \dot{Z}_{aT2} & \dot{Z}_{bT2} & \dot{Z}_{cT2} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{Z}}_{Tj} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{T1A} & \dot{Z}_{T2A} \\ \dot{Z}_{T1B} & \dot{Z}_{T2B} \\ \dot{Z}_{T1C} & \dot{Z}_{T2C} \\ \dot{Z}_{T1a} & \dot{Z}_{T2a} \\ \dot{Z}_{T1b} & \dot{Z}_{T2b} \\ \dot{Z}_{T1c} & \dot{Z}_{T2c} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

– матрица собственных и взаимных сопротивлений грозозащитных тросов

$$\dot{\mathbf{Z}}_{TT} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{T1T1} & \dot{Z}_{T2T1} \\ \dot{Z}_{T1T2} & \dot{Z}_{T2T2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Расчет собственных сопротивлений проводов и тросов, а также сопротивлений взаимоиндукции между ними предлагается выполнять по [20]:

$$\dot{Z}_{ij} = r_n + r_3 + j0,145 \lg \frac{D_3}{\rho_{n,3}}, \quad (i = j); \quad (6)$$

$$\dot{Z}_{ij} = r_3 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{ij}}, \quad (i \neq j), \quad (7)$$

где r_n – удельное активное сопротивление провода, Ом/км; r_3 – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока (принимается равным 0,05 Ом/км); D_3 – глубина расположения обратного провода (принимается равной 935 м); $\rho_{n,3}$ – эквивалентный радиус провода (0,95 от действительного радиуса), м; D_{ij} – расстояние между проводящими элементами, м.

Приведенную схему замещения в фазных координатах (1) можно преобразовать в эквивалентную матрицу размерностью 3×3 :

$$\dot{\mathbf{Z}}_s = \frac{1}{3} \dot{\mathbf{s}}^{-1} (\dot{\mathbf{Z}}_{ij} - \dot{\mathbf{Z}}_{Tj} \dot{\mathbf{Z}}_{TT}^{-1} \dot{\mathbf{Z}}_{iT}) \mathbf{s}, \quad (8)$$

где \mathbf{s} – матрица фазового поворота, содержащая оператор $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a^2 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a & a^2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a^2 & a & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a & a^2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Из полученной матрицы $\dot{\mathbf{Z}}_s$ можно определить сопротивления для комбинированной схемы замещения двухцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами:

– сопротивление прямой последовательности каждой цепи (на примере первой цепи):

$$\dot{Z}_{1,1} = \frac{1}{3} \frac{A}{\dot{Z}_{T2T1}^2 - \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2}}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A = & \dot{Z}_{AA} \dot{Z}_{T2T1}^2 - \dot{Z}_{AA} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{T1A} \dot{Z}_{T2T2} - \\ & - \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{T2A} \dot{Z}_{T2T1} - \dot{Z}_{T1A} \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{T2T1} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{T2A} \dot{Z}_{T2T1} + \\ & + \dot{Z}_{BB} \dot{Z}_{T2T1}^2 + \dot{Z}_{CC} \dot{Z}_{T2T1}^2 - \dot{Z}_{BB} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T1B} \dot{Z}_{T2T2} - \\ & - \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T2B} \dot{Z}_{T2T1} - \dot{Z}_{T1B} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T2T1} - \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T2B} \dot{Z}_{T1T1} - \\ & - \dot{Z}_{CC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T1C} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2C} \dot{Z}_{T2T1} - \\ & - \dot{Z}_{T1C} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T2T1} + \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T2C} \dot{Z}_{T1T1} + \\ & + a(\dot{Z}_{AB} \dot{Z}_{T2T1}^2 + \dot{Z}_{CA} \dot{Z}_{T2T1}^2 - \dot{Z}_{AB} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \\ & + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{T1B} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{T2B} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{T1B} \dot{Z}_{T2T2} + \\ & + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{T2B} \dot{Z}_{T1T1} - \dot{Z}_{CA} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{T1A} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2T2} - \\ & - \dot{Z}_{T1A} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T2T1} - \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2T1} + \dot{Z}_{T2A} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T1T1} + \\ & + \dot{Z}_{BC} \dot{Z}_{T2T1}^2 - \dot{Z}_{BC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T1C} \dot{Z}_{T2T2} - \\ & - \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T1C} \dot{Z}_{T2T1} - \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1C} \dot{Z}_{T2T1} + \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T2C} \dot{Z}_{T1T1}) + \\ & + a^2(\dot{Z}_{BA} \dot{Z}_{T2T1}^2 + \dot{Z}_{AC} \dot{Z}_{T2T1}^2 + \dot{Z}_{CB} \dot{Z}_{T2T1}^2 - \dot{Z}_{BA} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} - \end{aligned}$$

$$+\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{AC}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2C}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2C}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{CB}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T2}+\\+\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1T1});$$

– сопротивление взаимоиндукции прямой последовательности между цепями:

$$\dot{Z}_{1,I-II}=\frac{1}{3}\frac{B}{\dot{Z}_{T2T1}^2-\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}}; \quad (11)$$

$$B=\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}_{T2T1}^2-\\-\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{Ce}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T1T1}+\\+a(\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Bc}\dot{Z}_{T2T1}^2-\\-\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T1T1})+\\+a^2(\dot{Z}_{Ba}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}_{T2T1}^2-\\-\dot{Z}_{Ba}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T1T1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T1T1});$$

– сопротивление прямой последовательности каждой цепи (на примере первой цепи):

$$\dot{Z}_{1,I-II}=\frac{1}{3}\frac{C}{\dot{Z}_{T2T1}^2-\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}}; \quad (12)$$

$$C=\dot{Z}_{AA}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{BA}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{AC}\dot{Z}_{T2T1}^2+\\+\dot{Z}_{BB}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{CA}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{CB}\dot{Z}_{T2T1}^2+\\+\dot{Z}_{CC}\dot{Z}_{T2T1}^2-\dot{Z}_{AA}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BA}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{AC}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{BB}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{CA}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2C}\dot{Z}_{T2T1}+$$

$$+\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{T1A}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2C}\dot{Z}_{T1T1}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1T1}+\\+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{T1B}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{T2A}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1T1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2B}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{CB}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2C}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{T1C}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2C}\dot{Z}_{T1T1};$$

– сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между цепями:

$$\dot{Z}_{1,I-II}=\frac{1}{3}\frac{D}{\dot{Z}_{T2T1}^2-\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}}; \quad (13)$$

$$D=\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{BA}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}_{T2T1}^2+\\+\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Bc}\dot{Z}_{T2T1}^2+\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}_{T2T1}^2+\\+\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}_{T2T1}^2-\dot{Z}_{AA}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T1T1}-\\-\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{Ba}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T1T1}+\\+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T1T1}+\\+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{T2T2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1T1}+\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T2}-\\-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{T1a}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{T2a}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{Bc}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\\+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T2T1}-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{T2T1}+\\+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T1T1}+\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T1}-\\-\dot{Z}_{T1b}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2T1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{T2b}\dot{Z}_{T1T1}-\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}_{T1T1}\dot{Z}_{T2T2}+\\+\dot{Z}_{T1c}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2T2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{T2c}\dot{Z}_{T2T1}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены расчётные выражения для определения собственного и взаимного сопротивления двухцепной линии электропередачи с двумя грозозащитными тросами, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих, позволяющая выполнять расчеты параметров режима однофазного короткого замыкания на линии электропередачи с целью дистанционного определения места повреждения без излишнего усложнения схемы замещения электрической сети и отличающаяся возможностью учета несимметрии расположения проводящих элементов на опоре, что актуально для нетранспортированных ЛЭП в системах промышленного электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Safar H. Power transmission line analysis using exact, nominal π , and modified π models // 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, IC-CAE 2010. IEEE, 2010. Vol. 5. Pp. 128-134. doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451500
2. Ebrahimi R., Babaee A., Hoseynpoor M. Evaluation and calculation of overhead line impedance in distribution networks // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. Vol. 5. No. 8. Pp. 1278-1284.
3. Tossani F., Napolitano F., Borghetti A. Inverse Laplace Transform of the Ground Impedance Matrix of Overhead Lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60. No. 6. Pp. 1-4. doi: 10.1109/TEMC.2017.2765207
4. Ametani A., Schinzinger R. Mutual Impedance of Transmission Lines with Earth Return // IEEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution. 1980. Vol. 127. No. 5. Pp. 326-328. doi: 10.1049/ip-c.1980.0050
5. Holbeck J.I., Lantz M.J., Holbeck J.I. The Effects of Mutual Induction Between Parallel Transmission Lines on Current Flow to Ground Faults // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1943. Vol. 62. No. 11. Pp. 712-715. doi: 10.1109/T-AIEE.1943.5058634
6. Ukrantsev A.V., Nagay I.V. Virtual' power line method to correct the calculation of current ground faults in the parallel overhead transmission lines 110-220 kV // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. IEEE, 2016. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911473
7. Fang H. Mutual inductances between crossing three-phase power lines and communication line both with earth return // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 1990. Pp. 483-487. doi: 10.1109/isemc.1990.252814
8. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New multiphase transmission line model // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. IEEE, 1998. Vol. 1. Pp. 489-494. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759957
9. Ivanov I., Dubinin D., Zhukov A. Overhead Line Parameter Estimation Through Synchrophasor Data in Near Real-Time // 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019. IEEE, 2019. doi: 10.1109/RPA47751.2019.8958451
10. Balametov A.B., Halilov E.D., Isayeva T.M. An Adequate Mathematical Model of an Ultrahigh-Voltage Overhead Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, 2020. Vol. 44. No. 1. Pp. 1-9. doi: 10.1007/s40998-019-00225-3
11. V Stanojevic A., Preston G., Terzija V. Synchronised measurements based algorithm for long transmission line fault analysis // IEEE Transactions on Smart Grid, 2018. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-10. doi: 10.1109/TSG.2017.2658675
12. Kubis A., Rehtanz C. Application of a combined electro-thermal overhead line model in power flow and time-domain power system simulations // IET Generation, Transmission and Distribution, 2017. Vol. 11. No. 8. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1626
13. Martinez-Velasco J.A., Castro-Aranda F. Modeling of Overhead Transmission Lines for Lightning Overvoltage Calculations // Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2010. Vol. 18. No. 1. doi: 10.4067/s0718-33052010000100013
14. Ye H., Strunz K. Multi-Scale and Frequency-Dependent Modeling of Electric Power Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery, 2018. Vol. 33. No. 1. Pp. 32-41. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2630338
15. Freitas D., Guerreiro M., Neves Das, Almeida M.E., Maló Machado V. Evaluation of the longitudinal parameters of an overhead transmission line with non-homogeneous cross section // Electric Power Systems Research, 2015. Vol. 119. Pp. 478-484. doi: 10.1016/j.epsr.2014.11.003
16. Qi G., Zheng Y., Xia K., Wu W., Liao F., Shu S. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages // ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642003
17. Dias Pinto J.A., Coimbra A.P., Pereirinha P.G., Lemos Antunes C.F. Evaluation of the high voltage transmission line inductance and capacitance using the finite element approach // COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1998. Vol. 17. No. 1-3. Pp. 313-317. doi: 10.1108/03321649810203224
18. Murty P.S.R. The Line Parameters // Electrical Power Systems, 2017.
19. 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
20. 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.

Поступила в редакцию 25 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH**COMBINED EQUIVALENT CIRCUIT OF A DOUBLE-CIRCUIT POWER TRANSMISSION LINE WITH TWO LIGHTNING CABLES**

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia. ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Regina R. Sabirova

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Ivan V. Novikov

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

The paper proposes a combined equivalent circuit for a double-circuit power line with two lightning protection cables, based on a combination of phase coordinate and symmetrical components methods. The proposed approach to modeling power transmission lines allows introduction of the mutual arrangement of conductive elements on the tower (wires and lightning protection cables), including asymmetrical relative to each other. In addition, by combining the method of phase coordinates with the method of symmetrical components, the equivalent circuit as a whole and the process of preparing the initial data are simplified. The use of a combined equivalent circuit for power transmission lines makes it possible to calculate the unbalanced mode by the method of symmetrical components, while all elements, except for high voltage transmission lines, are modeled by the parameters of direct, reverse and zero sequence, and power lines are modeled in phase coordinates. The proposed PTL model is focused on performing calculations of the parameters of the single-phase short circuit mode in the 110-220 kV network of the industrial power supply system in order to remotely locate of the line fault.

Keywords: power line, phase coordinates, symmetrical components, mutual induction, ground wire.

REFERENCES

1. Safar H. Power transmission line analysis using exact, nominal π , and modified π models. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, IC-CAE 2010. IEEE, 2010, vol. 5, pp. 128-134. doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451500
2. Ebrahimi R., Babaee A., Hoseynpoor M. Evaluation and calculation of overhead line impedance in distribution networks. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, vol. 5, no. 8, pp. 1278-1284.
3. Tossani F., Napolitano F., Borghetti A. Inverse Laplace Transform of the Ground Impedance Matrix of Overhead Lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 1-4. doi: 10.1109/TEMC.2017.2765207
4. Ametani A., Schinzinger R. Mutual Impedance of Transmission Lines with Earth Return. IEEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution, 1980, vol. 127, no. 5, pp. 326-328. doi: 10.1049/ip-c.1980.0050
5. Holbeck J.I., Lantz M.J., Holbeck J.I. The Effects of Mutual Induction Between Parallel Transmission Lines on Current Flow to Ground Faults. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1943, vol. 62, no. 11, pp. 712-715. doi: 10.1109/T-AIEE.1943.5058634
6. Ukrantsev A.V., Nagay I.V. Virtual' power line method to correct the calculation of current ground faults in the parallel overhead transmission lines 110-220 kV. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. IEEE, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911473
7. Fang H. Mutual inductances between crossing three-phase power lines and communication line both with earth return. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 1990, pp. 483-487. doi: 10.1109/isemc.1990.252814
8. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New multiphase transmission line model. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. IEEE, 1998, vol. 1, pp. 489-494. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759957
9. Ivanov I., Dubinin D., Zhukov A. Overhead Line Parameter Estimation Through Synchrophasor Data in Near Real-Time. 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019. IEEE, 2019. doi: 10.1109/RPA47751.2019.8958451
10. Balametov A.B., Halilov E.D., Isayeva T.M. An Adequate Mathematical Model of an Ultrahigh-Voltage Overhead Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 1-9. doi: 10.1007/s40998-019-00225-3
11. V Stanojevic A., Preston G., Terzija V. Synchronised measurements based algorithm for long transmission line fault analysis. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 1-10. doi: 10.1109/TSG.2017.2658675
12. Kubis A., Rehtanz C. Application of a combined electro-thermal overhead line model in power flow and time-domain power system simulations. IET Generation, Transmission and Distribution, 2017, vol. 11, no. 8. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1626
13. Martínez-Velasco J.A., Castro-Aranda F. Modeling of Overhead Transmission Lines for Lightning Overvoltage Calculations. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2010, vol. 18, no. 1. doi: 10.4067/s0718-33052010000100013
14. Ye H., Strunz K. Multi-Scale and Frequency-Dependent Modeling of Electric Power Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 32-41. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2630338
15. Freitas D., Guerreiro M., Neves Das, Almeida M.E., Malo Machado V. Evaluation of the longitudinal parameters of an overhead transmission line with non-homogeneous cross section. Electric Power Systems Research, 2015, vol. 119, pp. 478-484. doi: 10.1016/j.epsr.2014.11.003
16. Qi G., Zheng Y., Xia K., Wu W., Liao F., Shu S. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages. ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642003
17. Dias Pinto J.A., Coimbra A.P., Pereirinha P.G., Lemos Antunes C.F. Evaluation of the high voltage transmission line inductance and capacitance using the finite element approach. COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1998, vol. 17, no. 1-3, pp. 313-317. doi: 10.1108/03321649810203224
18. Murty P.S.R. The Line Parameters. Electrical Power Systems, 2017.
19. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4(33), pp. 35-40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
20. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vyp. 11. Raschet tokov korotkogo zamykaniya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110-750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculation of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks], Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p. (In Russian)

Панова Е.А., Сабирова Р.Р., Новиков И.В. Комбинированная схема замещения двухцепной ЛЭП с двумя грозотросами // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 77-81. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-77-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-77-81)

Panova E.A., Sabirova R.R., Novikov I.V. Combined Equivalent Circuit of a Double-Circuit Power Transmission Line with Two Lightning Cables. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 77-81. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-77-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-77-81)