

УДК 621.311.014

Представлені математичні моделі ПЛ різного конструктивного виконання в фазних координатах і показана можливість їх подання в уніфікованій формі для підвищення ефективності моделювання складних несиметричних режимів електричних систем, що дозволяє скоротити різноманіття форм запису рівнянь елементів мережі та забезпечити алгоритмізацію формування узагальненої базової моделі, без обмеження їхніх можливостей

Ключові слова: математичне моделювання, рівняння у фазних координатах, складні несиметричні режими

Представлены математические модели ВЛ различного конструктивного исполнения в фазных координатах и показана возможность их представления в унифицированной форме, что позволяет сократить разнообразие форм записи уравнений элементов сети и обеспечить алгоритмизацию формирования обобщенной базовой модели, не ограничивая ее возможностей

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнения в фазных координатах, сложные несимметричные режимы

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С ТРОСАМИ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Ю. Н. Веприк

Доктор технических наук, профессор
Кафедра "Передача электрической энергии"
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: (057) 707-62-46

Постановка проблемы

Параметры воздушных линий электропередачи (ВЛ) и влияющие на них факторы достаточно хорошо изучены, однако при моделировании режимов работы электрических систем для ВЛ различного конструктивного исполнения разными авторами предлагаются разные формы представления (в виде трехфазных схем замещения, уравнений, решетчатых схем и др.). Необходимость учета такого разнообразия исполнений ВЛ и форм их представления усложняет разработку моделей электрических систем в несимметричных режимах.

Анализ публикаций

Необходимость в расчетах режимов с учетом несимметрии возникает при решении целого ряда задач планирования режимов и оперативного управления режимами электрических систем. К таким задачам относятся, например, расчеты режимов сети при аварийных отключениях фаз ВЛ, несимметричных коротких замыканиях, проведении пофазных ремонтов оборудования, расчеты наводимых напряжений на смежные линии со стороны высоковольтных ВЛ. В разработках математических моделей несимметричных режимов можно считать сложившимися два принципиально различных подхода.

Первый из них направлен на то [1-3], чтобы представить трехфазные схемы замещения сетей с несимметрией, как и однофазные схемы замещения в симметричных режимах, набором резистивных, индуктивных и

емкостных элементов, для которых применимы (с некоторыми модификациями) существующие алгоритмы и программы расчетов режимов симметричных трехфазных систем. Для этого предлагается трехфазные элементы (ВЛ, КЛ, трансформаторы) представлять решетчатыми схемами замещения из RLC-элементов или синтезировать из схем в симметричных составляющих [2]. Линии электропередачи замещаются решетчатыми схемами или многополюсниками [3] – путем преобразования уравнений для напряжений, но только для частного случая трехфазной трехпроводной линии.

Второй основан на том, что модель электрической системы разрабатывается как трехфазная, в состав которой входят трехфазные элементы. При этом необходимость в использовании каких-либо искусственных приемов и схем отпадает, так как используется естественное трехлинейное представление трехфазных элементов матрицами третьего порядка (в фазных координатах), отражающими индуктивные и емкостные собственные и взаимные параметры фаз.

Второй подход представляется более предпочтительным, так как в фазных координатах обеспечивается возможность получения адекватных моделей элементов электрических систем, таких, как воздушные и кабельные линии электропередачи, однофазные и трехфазные трансформаторы различных модификаций, асинхронные и синхронные машины, в которых достаточно легко учесть разнообразные несимметрии трехфазных элементов (обрывы проводов и несимметричные короткие замыкания, различия в фазных параметрах линии), наличие грозозащитных тросов и расщепленных проводов фаз.

Цель и задачи

Подход к построению моделей электрических систем с учетом особенностей конструктивного исполнения элементов обеспечивается в базовой математической модели несимметричных режимов электрических систем [4], реализованной на основе перехода на уровень трехфазных многополюсников и представления элементов уравнениями в фазных координатах. Однако многообразие форм представления элементов приводит к усложнению модели системы. Поэтому при разработке моделей ВЛ, как и других элементов, разнообразие форм записи уравнений элементов сети целесообразно сократить и представить их в некоторой унифицированной форме, с тем, чтобы обеспечить формализацию и алгоритмизацию формирования обобщенной базовой модели, не ограничивая ее возможностей.

Основной материал

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) могут иметь различное конструктивное исполнение (одно- или двухцепные, с тросами или без тросов, с различными схемами заземления тросов), поэтому для унификации процедур формирования уравнений сети и их решения целесообразно от исходных уравнений ВЛ различного конструктивного исполнения переходить к некоторой единой форме, обеспечивающей возможность их включения в модель системы.

Одноцепные ВЛ без тросов. Воздушные линии в несимметричных режимах, как и в симметричных, можно представить П-образной схемой (рис. 1), которая, однако, в отличие от расчетов на одну фазу, содержит трехфазные продольные и поперечные ветви.

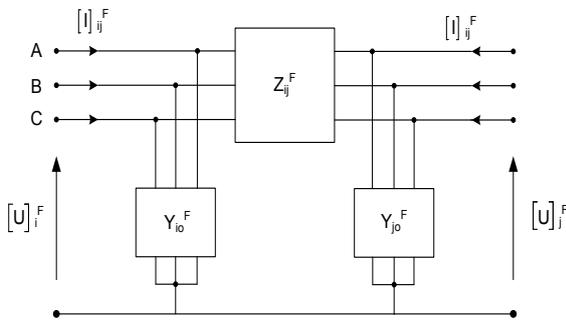


Рис. 1. Трехфазная расчетная схема участка ВЛ в несимметричном режиме.

Продольные ветви отражают индуктивные, а поперечные – емкостные связи между фазами ВЛ (рис. 1).

Матрицы продольных параметров ВЛ фазных координатах

$$[Z]_{ij}^F = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} Z_L & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_L & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

содержат собственные $Z_{ii}=Z_L$ и взаимные $Z_{ij}=Z_M$ параметры фаз, которые определяются по формулам

$$Z_{L,0} = (R_{\Pi 0} + j0.14451g \frac{D}{r_s}) = R_{\Pi 0} + jX_{L,0};$$

$$Z_{M,0} = (R_0 + j0.14451g \frac{D}{D_r}) = R_0 + jX_{M,0} \quad (2)$$

где $R_{\Pi 0}$ - погонное активное сопротивление провода, Ом/км, r_s - эквивалентный радиус провода (для нерасщепленного провода $r_s = k_{\Pi} r$, D_{cp} - среднегеометрическое расстояние (м) между фазами ВЛ

$$D_i = \sqrt{D_{AB} D_{AC} D_{BC}} \quad D_3 = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3)$$

При $f=50$ Гц и среднем значении $\rho=100$ ом.м $D_3=1000$ м.

Матрицы поперечных параметров ВЛ в фазных координатах

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

содержат собственные (α_{ii}) и взаимные (α_{ij}) потенциальные коэффициенты проводов, которые зависят от геометрических размеров, взаимного расположения проводов и от диэлектрической проницаемости среды

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_{ii}}{r_s}; \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}},$$

где $\epsilon_0=8.86 \cdot 10^9$ ф/км абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха, h_{ii} - высота подвеса i -го провода, D_{ij} - расстояние между i -м проводом и зеркальным отражением j -го провода, d_{ij} - расстояние между i -м и j -м проводами.

Определив собственные и взаимные потенциальные коэффициенты фаз матрицы $[\alpha]$ и выполнив ее обращение, получим элементы матрицы емкостей $[C]$ трехфазной ВЛ, а по ним матрицу погонных емкостных проводимостей для трехпроводной ВЛ без тросов в фазных координатах

$$[B] = j\omega [\alpha]^{-1} = j\omega \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} \end{bmatrix} \quad (5)$$

При известных продольных и поперечных параметрах фаз уравнения баланса токов и напряжений для одноцепной линии без тросов можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \end{bmatrix},$$

$$\frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \alpha_{AA} & \alpha_{AB} & \alpha_{AC} \\ \alpha_{BA} & \alpha_{BB} & \alpha_{BC} \\ \alpha_{CA} & \alpha_{CB} & \alpha_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

где $[I]$, $[U]$ - токи и напряжения фаз; $[Z]$, $[\alpha]$ - матрицы собственных и взаимных продольных и поперечных параметров фаз ВЛ размером 3×3 , или в виде, разрешенном относительно токов фаз

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{B0} \\ I_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA0} & Y_{AB0} & Y_{AC0} \\ Y_{BA0} & Y_{BB0} & Y_{BC0} \\ Y_{CA0} & Y_{CB0} & Y_{CC0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Переход к уравнениям элементов, разрешенным относительно токов, необходим для формирования узловых уравнений сети в форме баланса токов.

Одноцепные ВЛ с тросами. Тросы предназначены для защиты ВЛ от атмосферных перенапряжений и прямых ударов молнии. Для обеспечения грозозащитной функции тросы заземлены, и образуют замкнутые контуры, в которых возможно протекание наведенных токов. Кроме основной, грозозащитной функции тросы могут быть использованы и для других целей – в качестве каналов высокочастотной связи, для прокладки оптоволоконного кабеля (ВОК), в качестве токоведущих проводов для электроснабжения потребителей малой мощности. Поэтому схема заземления троса зависит от условий его применения.

На ВЛ до 110 кВ тросы применяют только на подходах к ПС, на ВЛ 220 кВ и выше тросы подвешивают вдоль всей линии и присоединяются к заземлениям через искровые промежутки. Причем на промежуточных опорах трос изолирован, на анкерных опорах трос имеет разрыв и заземлен только с одной стороны анкерного пролета, а с другой – изолирован. В случае прокладки в качестве троса оптоволоконного кабеля применяется заземление троса на каждой промежуточной опоре. При использовании тросов в качестве каналов высокочастотной связи они заземляются только по концам ВЛ через переходное сопротивление и на всей длине не имеют разрывов.

Для того, чтобы в результате расчета режима электрической сети получить параметры режима не только по концам ВЛ, но и в промежуточных точках, линию делят на участки, количество которых зависит от решаемой задачи. В расчетах несимметричных режимов деление на участки нужно выполнять с учетом схемы заземления троса, транспозиции проводов, наличия параллельных линий.

При наличии на ВЛ заземленных тросов в уравнениях ВЛ с тросами необходимо учитывать взаимное влияние контуров, образованных проводами фаз и тросами. Для участка одноцепной линии, имеющей, например, два троса, матрицы продольных и поперечных параметров линии можно представить в виде

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AT1} & Z_{AT2} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BT1} & Z_{BT2} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CT1} & Z_{CT2} \\ Z_{T1A} & Z_{T1B} & Z_{T1C} & Z_{T1} & Z_{T1T2} \\ Z_{T2A} & Z_{T2B} & Z_{T2C} & Z_{T2T1} & Z_{T2} \end{bmatrix}$$

$$[B] = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \alpha_{AA} & \alpha_{AB} & \alpha_{AC} & \alpha_{AT1} & \alpha_{AT2} \\ \alpha_{BA} & \alpha_{BB} & \alpha_{BC} & \alpha_{BT1} & \alpha_{BT2} \\ \alpha_{CA} & \alpha_{CB} & \alpha_{CC} & \alpha_{CT1} & \alpha_{CT2} \\ \alpha_{T1A} & \alpha_{T1B} & \alpha_{T1C} & \alpha_{T1} & \alpha_{T1T2} \\ \alpha_{T2A} & \alpha_{T2B} & \alpha_{T2C} & \alpha_{T2T1} & \alpha_{T2} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

где z_T, α_T – сопротивления и потенциальные коэффициенты тросов.

Собственное удельное сопротивление заземленного с двух сторон троса

$$z_{от} = r + 0,05 + j 0,145 \lg \left(\frac{D}{r_{тэкв}} \right), \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

где r_T – активное сопротивление, а $r_{тэкв}$ – эквивалентный радиус троса. Сопротивление взаимной индукции (Ом/км) между проводом и тросом

$$z_{пт} = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{пт}}$$

где $D_{пт} = \sqrt[3]{D_{AT} \cdot D_{BT} \cdot D_{CT}}$ – среднегеометрическое расстояние (м) между фазными проводами линии и тросом.

Собственные и взаимные потенциальные коэффициенты троса

$$\alpha_T = 41,4 \times 10^6 \lg \frac{H_T}{r_T} \quad \alpha_{пт} = 41,4 \times 10^6 \lg \frac{H_{пт}}{D_{пт}}$$

где H_T – расстояние (м) между проводом и его зеркальным изображением, r_T – радиус троса (м), $H_{пт} = \sqrt[3]{H_{AT1} \cdot H_{BT1} \cdot H_{CT1}}$ – среднее геометрическое расстояние (м) между проводами фаз и зеркальным изображением троса; $D_{пт}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз и тросом $D_{пт} = \sqrt[3]{H_{AT} \cdot H_{BT} \cdot H_{CT}}$.

В зависимости от исполнения и схемы заземления тросов уравнения ВЛ с тросами имеют разный вид. Для сокращения порядка системы совместно решаемых уравнений, для унификации процедур формирования и решения систем уравнений в фазных координатах уравнения ВЛ различного конструктивного исполнения целесообразно приводить к единой форме, исключая напряжения и токи тросов и заменяя петлю провод – земля тремя эквивалентными петлями фаз. При эквивалентировании нужно учитывать дополнительные условия, вытекающие из особенностей подвески троса (равенство нулю напряжений многократно заземленных тросов; отсутствие тока в тросах, заземленных в одной точке и т.п.). С учетом возможных схем заземления троса можно выделить три возможных варианта уравнений ВЛ с тросами.

Первый вариант: ВЛ с тросом, заземленным с одной стороны и изолированным с другой. Так как заземление троса в этом случае выполняется, как правило, на анкерной опоре, то количество участков равно числу анкерных пролетов. Выделив в матрицах (5) блоки, относящиеся к проводам и тросам, уравнения для анкерного пролета можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} z_{п} & z_{пт} \\ z_{тп} & z_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\phi} \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_{\phi} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \alpha_{п} & \alpha_{пт} \\ \alpha_{тп} & \alpha_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\phi} \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

где $z_{тп} = z_{пт}^t, \alpha_{тп} = \alpha_{пт}^t$ – параметры, отражающие взаимное электромагнитное и электростатическое влияние проводов и тросов; z_T и α_T – собственные и взаимные сопротивления и потенциальные коэффициенты тросов; I_{ϕ}, I_T – токи в проводах и тросах.

Порядок матриц z и α линии с тросами можно снизить, исключив из уравнений токи, заряды и потенциалы тросов. Для этого первое из уравнений (9) представим в виде

$$[z][I_{\phi}] + [z_{пт}][I_T] = [\Delta U_{\phi}]$$

$$[z_{тп}][I_{\phi}]+[z_{т}][I_{т}]=[0]$$

Выражая токи тросов из второго уравнения

$$I = -z^{-1}_{т} z_{тп} I_{\phi}$$

и подставляя их в первое уравнение, получим уравнение баланса напряжений в виде

$$[z - z_{тп} z^{-1}_{т} z_{тп}][I_{\phi}] = [U_{\phi}] \quad (10)$$

Первое слагаемое в скобках Z – матрица параметров фаз ВЛ без тросов, второе $z_{тп} z^{-1}_{т} z_{тп}$ - отражает влияние тросов.

Аналогично второе из уравнений (9), выражая токи тросов через токи проводов

$$I_{т} = -\alpha^{-1}_{т} \alpha_{тп} I_{\phi}, \quad (11)$$

можно привести к виду

$$\frac{1}{\omega} [\alpha_{п} - \alpha_{пт} \alpha^{-1}_{т} \alpha_{тп}][I_{\phi}] = [U_{\phi}]$$

Исключив токи и заряды тросов, получим эквивалентные уравнения для ВЛ с тросом в том же виде, что и для ВЛ без тросов

$$\begin{aligned} [Z]^F [I]^F &= [\Delta U]^F \\ \frac{1}{\omega} [\alpha]^F [I]^F &= [U]^F \end{aligned} \quad (12)$$

Элементы матриц

$$\begin{aligned} [z]^F &= [z] - [z]_{тп} [z]^{-1} [z_{тп}], \\ [\alpha]^F &= [\alpha] - [\alpha]_{тп} [\alpha_{т}^{-1}] [\alpha_{тп}] \end{aligned}$$

определены с учетом влияния тросов, поэтому по уравнениям (12) можно выполнить расчеты режимов ВЛ с тросами так же, как и линии без тросов. Выполнив обращение матриц Z и α , получим уравнения ВЛ с тросами в форме, разрешенной относительно токов

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{B0} \\ I_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA0} & Y_{AB0} & Y_{AC0} \\ Y_{BA0} & Y_{BB0} & Y_{BC0} \\ Y_{CA0} & Y_{CB0} & Y_{CC0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}$$

такие же, как для ВЛ без тросов (7), но учитывающие наличие тросов.

Y_{11}^{AA}	Y_{11}^{AB}	Y_{11}^{AC}	Y_{11}^{AT}	Y_{12}^{AA}	Y_{12}^{AB}	Y_{12}^{AC}	Y_{12}^{AT}			U_{A1}	I_{A1}
Y_{11}^{BA}	Y_{11}^{BB}	Y_{11}^{BC}	Y_{11}^{BT}	Y_{12}^{BA}	Y_{12}^{BB}	Y_{12}^{BC}	Y_{12}^{BT}			U_{B1}	I_{B1}
Y_{11}^{CA}	Y_{11}^{CB}	Y_{11}^{CC}	Y_{11}^{CT}	Y_{12}^{CA}	Y_{12}^{CB}	Y_{12}^{CC}	Y_{12}^{CT}			U_{C1}	I_{C1}
Y_{11}^{TA}	Y_{11}^{TB}	Y_{11}^{TC}	Y_{11}^{TT}	Y_{12}^{TA}	Y_{12}^{TB}	Y_{12}^{TC}	Y_{12}^{TT}			U_{T1}	I_{T1}
Y_{21}^{AA}	Y_{21}^{AB}	Y_{21}^{AC}	Y_{21}^{AT}	Y_{22}^{AA}	Y_{22}^{AB}	Y_{22}^{AC}	Y_{22}^{AT}	Y_{23}^{AA}	Y_{23}^{AB}	Y_{23}^{AC}	Y_{23}^{AT}
Y_{21}^{BA}	Y_{21}^{BB}	Y_{21}^{BC}	Y_{21}^{BT}	Y_{22}^{BA}	Y_{22}^{BB}	Y_{22}^{BC}	Y_{22}^{BT}	Y_{23}^{BA}	Y_{23}^{BB}	Y_{23}^{BC}	Y_{23}^{BT}
Y_{21}^{CA}	Y_{21}^{CB}	Y_{21}^{CC}	Y_{21}^{CT}	Y_{22}^{CA}	Y_{22}^{CB}	Y_{22}^{CC}	Y_{22}^{CT}	Y_{23}^{CA}	Y_{23}^{CB}	Y_{23}^{CC}	Y_{23}^{CT}
Y_{21}^{TA}	Y_{21}^{TB}	Y_{21}^{TC}	Y_{21}^{TT}	Y_{22}^{TA}	Y_{22}^{TB}	Y_{22}^{TC}	Y_{22}^{TT}	Y_{23}^{TA}	Y_{23}^{TB}	Y_{23}^{TC}	Y_{23}^{TT}
				Y_{32}^{AA}	Y_{32}^{AB}	Y_{32}^{AC}	Y_{32}^{AT}	Y_{33}^{AA}	Y_{33}^{AB}	Y_{33}^{AC}	Y_{33}^{AT}
				Y_{32}^{BA}	Y_{32}^{BB}	Y_{32}^{BC}	Y_{32}^{BT}	Y_{33}^{BA}	Y_{33}^{BB}	Y_{33}^{BC}	Y_{33}^{BT}
				Y_{32}^{CA}	Y_{32}^{CB}	Y_{32}^{CC}	Y_{32}^{CT}	Y_{33}^{CA}	Y_{33}^{CB}	Y_{33}^{CC}	Y_{33}^{CT}
				Y_{32}^{TA}	Y_{32}^{TB}	Y_{32}^{TC}	Y_{32}^{TT}	Y_{33}^{TA}	Y_{33}^{TB}	Y_{33}^{TC}	Y_{33}^{TT}
								Y_{43}^{AA}	Y_{43}^{AB}	Y_{43}^{AC}	Y_{43}^{AT}
								Y_{43}^{BA}	Y_{43}^{BB}	Y_{43}^{BC}	Y_{43}^{BT}
								Y_{43}^{CA}	Y_{43}^{CB}	Y_{43}^{CC}	Y_{43}^{CT}
								Y_{43}^{TA}	Y_{43}^{TB}	Y_{43}^{TC}	Y_{43}^{TT}

После расчета токов и напряжений фаз токи и заряды тросов (если в этом есть необходимость) определяются по (11).

Второй вариант: трос заземлен на каждой опоре. Ток ЗУ опоры зависит от напряжения на рассматриваемом и на соседних ЗУ. Для линии с одним тросом, содержащей, например, четыре участка, исходные уравнения в форме (9) нужно разрешить относительно токов и составить узловые уравнения в форме баланса токов.

Каждый блок матрицы узловых проводимостей содержит элементы, отражающие взаимное влияние между фазами и между фазами и тросом (верхние индексы). Нижние индексы относятся к номерам узлов (трехфазных). Если все элементы, отражающие наличие тросов, записать последними, то система уравнений примет вид:

Y_{11}^{AA}	Y_{11}^{AB}	Y_{11}^{AC}	Y_{11}^{AT}	Y_{12}^{AA}	Y_{12}^{AB}	Y_{12}^{AC}	Y_{12}^{AT}	Y_{11}^{AT}	Y_{12}^{AT}	0.00	0.00
Y_{11}^{BA}	Y_{11}^{BB}	Y_{11}^{BC}	Y_{11}^{BT}	Y_{12}^{BA}	Y_{12}^{BB}	Y_{12}^{BC}	Y_{12}^{BT}	Y_{11}^{BT}	Y_{12}^{BT}	0.00	0.00
Y_{11}^{CA}	Y_{11}^{CB}	Y_{11}^{CC}	Y_{11}^{CT}	Y_{12}^{CA}	Y_{12}^{CB}	Y_{12}^{CC}	Y_{12}^{CT}	Y_{11}^{CT}	Y_{12}^{CT}	0.00	0.00
Y_{11}^{TA}	Y_{11}^{TB}	Y_{11}^{TC}	Y_{11}^{TT}	Y_{12}^{TA}	Y_{12}^{TB}	Y_{12}^{TC}	Y_{12}^{TT}	Y_{11}^{TT}	Y_{12}^{TT}	0.00	0.00
Y_{21}^{AA}	Y_{21}^{AB}	Y_{21}^{AC}	Y_{21}^{AT}	Y_{22}^{AA}	Y_{22}^{AB}	Y_{22}^{AC}	Y_{22}^{AT}	Y_{21}^{AT}	Y_{22}^{AT}	Y_{23}^{AT}	0.00
Y_{21}^{BA}	Y_{21}^{BB}	Y_{21}^{BC}	Y_{21}^{BT}	Y_{22}^{BA}	Y_{22}^{BB}	Y_{22}^{BC}	Y_{22}^{BT}	Y_{21}^{BT}	Y_{22}^{BT}	Y_{23}^{BT}	0.00
Y_{21}^{CA}	Y_{21}^{CB}	Y_{21}^{CC}	Y_{21}^{CT}	Y_{22}^{CA}	Y_{22}^{CB}	Y_{22}^{CC}	Y_{22}^{CT}	Y_{21}^{CT}	Y_{22}^{CT}	Y_{23}^{CT}	0.00
Y_{21}^{TA}	Y_{21}^{TB}	Y_{21}^{TC}	Y_{21}^{TT}	Y_{22}^{TA}	Y_{22}^{TB}	Y_{22}^{TC}	Y_{22}^{TT}	Y_{21}^{TT}	Y_{22}^{TT}	Y_{23}^{TT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{32}^{AA}	Y_{32}^{AB}	Y_{32}^{AC}	Y_{32}^{AT}	Y_{32}^{AT}	Y_{33}^{AT}	Y_{34}^{AT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{32}^{BA}	Y_{32}^{BB}	Y_{32}^{BC}	Y_{32}^{BT}	Y_{32}^{BT}	Y_{33}^{BT}	Y_{34}^{BT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{32}^{CA}	Y_{32}^{CB}	Y_{32}^{CC}	Y_{32}^{CT}	Y_{32}^{CT}	Y_{33}^{CT}	Y_{34}^{CT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{32}^{TA}	Y_{32}^{TB}	Y_{32}^{TC}	Y_{32}^{TT}	Y_{32}^{TT}	Y_{33}^{TT}	Y_{34}^{TT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{43}^{AA}	Y_{43}^{AB}	Y_{43}^{AC}	Y_{43}^{AT}	Y_{43}^{AT}	Y_{44}^{AT}	Y_{45}^{AT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{43}^{BA}	Y_{43}^{BB}	Y_{43}^{BC}	Y_{43}^{BT}	Y_{43}^{BT}	Y_{44}^{BT}	Y_{45}^{BT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{43}^{CA}	Y_{43}^{CB}	Y_{43}^{CC}	Y_{43}^{CT}	Y_{43}^{CT}	Y_{44}^{CT}	Y_{45}^{CT}	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	Y_{43}^{TA}	Y_{43}^{TB}	Y_{43}^{TC}	Y_{43}^{TT}	Y_{43}^{TT}	Y_{44}^{TT}	Y_{45}^{TT}	0.00

или, в более компактной форме:

$$\begin{matrix}
 \begin{matrix}
 \overset{ABC}{Y}_{11} & \overset{ABC}{Y}_{12} & 0 & 0 \\
 \overset{ABC}{Y}_{21} & \overset{ABC}{Y}_{22} & \overset{ABC}{Y}_{23} & 0 \\
 0 & \overset{ABC}{Y}_{32} & \overset{ABC}{Y}_{33} & \overset{ABC}{Y}_{34} \\
 0 & 0 & \overset{ABC}{Y}_{43} & \overset{ABC}{Y}_{44}
 \end{matrix} &
 \begin{matrix}
 \overset{ABC}{Y}_{11} & \overset{ABC}{Y}_{12} & 0 & 0 \\
 \overset{ABC}{Y}_{21} & \overset{ABC}{Y}_{22} & \overset{ABC}{Y}_{23} & 0 \\
 0 & \overset{ABC}{Y}_{32} & \overset{ABC}{Y}_{33} & \overset{ABC}{Y}_{34} \\
 0 & 0 & \overset{ABC}{Y}_{43} & \overset{ABC}{Y}_{44}
 \end{matrix} &
 \begin{matrix}
 \overset{ABC}{u}_1 \\
 \overset{ABC}{u}_2 \\
 \overset{ABC}{u}_3 \\
 \overset{ABC}{u}_4
 \end{matrix} =
 \begin{matrix}
 \overset{ABC}{I}_1 \\
 \overset{ABC}{I}_2 \\
 \overset{ABC}{I}_3 \\
 \overset{ABC}{I}_4
 \end{matrix} &
 \begin{matrix}
 \overset{TT}{Y}_{11} & \overset{TT}{Y}_{12} & 0 & 0 \\
 \overset{TT}{Y}_{21} & \overset{TT}{Y}_{22} & \overset{TT}{Y}_{23} & 0 \\
 0 & \overset{TT}{Y}_{32} & \overset{TT}{Y}_{33} & \overset{TT}{Y}_{34} \\
 0 & 0 & \overset{TT}{Y}_{43} & \overset{TT}{Y}_{44}
 \end{matrix} &
 \begin{matrix}
 \overset{TT}{u}_1 \\
 \overset{TT}{u}_2 \\
 \overset{TT}{u}_3 \\
 \overset{TT}{u}_4
 \end{matrix}
 \end{matrix} \quad (14)$$

Смысл обозначений очевиден из сопоставления (13) и (14).

Как и в уравнениях (9), матрица параметров [Y] содержит четыре блока: первый блок на диагонали матрицы содержит элементы, отражающие параметры фаз ВЛ без тросов, второй блок на диагонали – параметры тросов, недиагональные – взаимное влияние фаз и тросов. Так как сумма токов в узлах, относящихся к тросам, в (14) равна нулю, то уравнения, относящиеся к тросам, можно исключить, выразив аналогично предыдущему напряжению тросов из последних уравнений и подставив их в первые.

Третий вариант: трос заземлен по концам ВЛ. Количество участков по длине ВЛ можно выбирать произвольно, например, с учетом транспозиции проводов – три. Если, далее, трос на каждом участке транспозиции представить продольными (R, X) и поперечными (G, C) параметрами, то исходные уравнения в форме

Выводы

1. Использование для моделирования аварийных и эксплуатационных режимов работы электрических систем уравнений в фазных координатах позволяет естественным образом отразить все особенности конструктивного исполнения в матрицах параметров соответствующих элементов.

2. Переход на уровень трехфазных многополюсников, представление уравнений элементов в унифицированной форме (преобразование уравнений воздушных линий с тросами, двухцепных с тросами и без тросов к эквивалентным однофазным без тросов) позволяет сократить разнообразие форм записи уравнений элементов сети и обеспечить формализацию и алгоритмизацию формирования обобщенной базовой модели, не ограничивая ее возможностей.

Литература

1. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. – 2005. – 273 с.
2. Войтов О.Н., Мантров В.А., Семенова Л.В. Анализ несимметричных режимов электроэнергетических систем и управление ими. Электричество, 1999, № 10, с. 2.
3. К расчету наведенного напряжения на ремонтируемых линиях электропередачи / М. Ш. Мисриханов [и др.] // Электрические станции. – 2000. – № 2. – С. 19–24.
4. Веприк Ю.Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке/ Ю. Н. Веприк // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 59-61.

Abstract

The article represents a mathematical model of overhead lines of different structural design (single-circuit, double-circuit with and without cables to the equivalent single-phase without cables) in phase coordinates. The possibility of their representation in the unified form is shown. The use of electric systems equations in phase coordinates for modeling emergency and operating conditions can reflect all the features of embodiment of corresponding elements in the parameters matrixes. However, the necessity to consider the variety of designs and shapes of overhead lines complicates the development of models of electrical systems in single-ended modes.

To reduce the order of the system of simultaneous equations, to unify the formation and solution of system of equations in the phase coordinates, the overhead lines equations of different structural design are reduced to a single form by elimination the voltage and current in cables. Following conditions, caused by specific suspension of cable are taking into account (zero voltage of repeatedly grounded cables; lack of current in cables, grounded at one point).

The transition to the level of three-phase multipoles, representation of the equations of elements in a unified form improve the efficiency of modeling of complex single-ended modes of electrical systems, reduce the diversity of notation of equations of network elements and provide formalization and algorithmization of the base model formation, without limiting its capabilities.

Keywords: mathematical modeling, equations in the phase coordinates, complex single-ended modes