

Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах

ГУСЕЙНОВ А.М., ИБРАГИМОВ Ф.Ш.

Приводится методика расчета и анализа несимметричных установившихся режимов и режимов короткого замыкания, а также переходных процессов в сложных многомашинных регулируемых электроэнергетических системах в фазных координатах.

Ключевые слова: энергосистема, переходные процессы, режимы, фазные координаты

В настоящее время методики и программы для расчета установившихся режимов (УР) и переходных процессов в сложных электроэнергетических системах (ЭЭС) построены на базе схем замещения прямой последовательности. Моделирование переходных процессов при несимметричных КЗ и неполнофазных режимах учитывает включение в месте несимметрии шунтов или добавочных сопротивлений. Определение добавочных сопротивлений требует проведения дополнительных расчетов электрических величин обратной и нулевой последовательности в несимметричных режимах, а также фазных и линейных напряжений в ходе переходного процесса в любой ветви и любом узле схемы, включая генераторные и нагрузочные узлы сложной сети. Решение поставленных задач традиционными методами и программами значительно усложняется и даже становится невозможным: при сложно несимметричных режимах, отказе от транспозиции, необходимости учета пофазных различий в параметрах линий и других элементах системы, при особых схемах подключения трехфазных трансформаторов, питающих тяговые подстанции переменного тока.

В связи с этим наилучшим способом является определение электрических величин в установившихся и переходных режимах в фазных координатах.

Преимуществом координатной системы a, b, c перед любой другой системой является то, что все режимные величины соответствуют реальным значениям и не требуют пересчета результатов для получения фазных величин.

Решение указанных задач в фазных координатах обладает большой универсальностью, где легко реализуются различные виды КЗ и разрывы фаз, а также простота алгоритма при использовании современных высокопроизводительных ПЭВМ. При

A procedure for calculating and analyzing unbalanced steady-state operating conditions and short-circuit modes, as well as transients in complex controlled multimachine electric power systems in phase coordinates is presented.

Key words: power system, transients, operating modes, calculation, phase coordinates

этом главная трудность состоит в получении трехфазных схем замещения для элементов ЭЭС при несимметричных квазиустановившихся и переходных режимах. Поэтому для расчетов несимметричных УР приводятся математические модели и схемы замещения основных элементов ЭЭС [1–12].

Решение поставленных задач проводится в два этапа:

первый — расчет несимметричных установившихся режимов в фазных координатах проводится согласно [7], где доаварийный режим в силу указанных причин существенно отличается от однолинейных схемных режимов;

второй — стыковка с программой расчета переходных процессов в регулируемых многомашинных ЭЭС в фазных координатах с учетом полных уравнений Горева–Парка для генераторов.

В статье уравнения для обмотки статора составлены в системе координат a, b, c , а для роторных величин использована система осей d, q . Периодические коэффициенты в уравнениях синхронной машины вычисляются как функция угла между статорной и роторной осями на каждом интервале численного решения уравнений. Заметим, что ее периодические коэффициенты выражаются через \sin и \cos и вычисление их не представляет трудностей.

На первом этапе рассматривается метод расчета трехфазных электрических систем в фазных координатах, где каждый трехфазный элемент описывается соответствующими схемами замещения. При этом учитывается работа силовых трансформаторов и автотрансформаторов с различными ответвлениями с комплексными коэффициентами трансформации для регулирования напряжения. Составлены матрицы узловых уравнений отдельных элементов системы, на базе которых создан диалоговый комплекс, позволяющий использовать результаты рас-

четов не только для целей релейной защиты и автоматики, но и для решения более сложных задач по симметрированию режима, а также для стыковки с программами расчетов электромеханических процессов в фазных координатах, где отпадает необходимость в определении шунтов КЗ и т.д. Ниже рассматривается включение в узловые уравнения различных трехфазных элементов системы. Далее все величины выражены в относительных единицах (отн. ед.).

I этап: Математические модели элементов системы и их схемы замещения в фазных координатах для расчета несимметричных УР и режимов КЗ. Модели синхронных машин. Если нейтраль генератора заземлена через проводимость, как это показано на рис. 1, и учитывая, что $I_N = I_4 + I_5 + I_6 + Y_{N0} U_N$, то получим [7]:

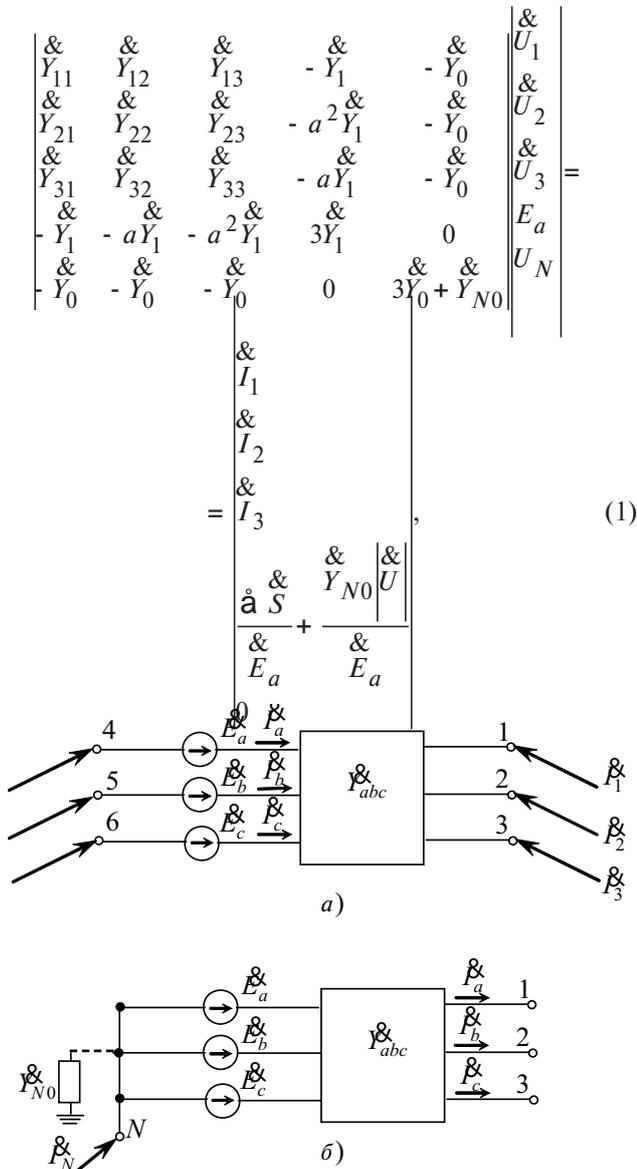


Рис. 1. Общая трехфазная схема замещения системы (а) и трех-

где $a = \sqrt[3]{1 \angle 120^\circ} = e^{j2\pi/3}$; Y_1, Y_2, Y_0 – проводимости прямой, обратной и нулевой последовательности.

Матричное выражение (1) включает полную мощность $\dot{a} S = S_a + S_b + S_c$ для синхронного генератора либо для асинхронной машины. В последнем случае величина $\dot{a} S$ берется с отрицательным знаком. Токи I_1, I_2 и I_3 считаются фазными на выводах машины. Заметим, что в выражении (1) в качестве основного параметра принята ЭДС E_a фазы А, для которой проводится расчет.

При проведении расчетов в сложной сети один узел берется в качестве балансирующего. Тогда (1) для такого узла имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & -Y_0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & -Y_0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & -Y_0 \\ -Y_0 & -Y_0 & -Y_0 & 3Y_0 + Y_{N0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a \\ E_a \\ E_a \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для генераторного узла при задании P_T полная активная мощность определяется с учетом E_a . Применяя (2), можно получить значения полной и реактивной мощности:

$$\begin{aligned} \dot{a} S &= E_a Y (-U_1 - aU_2 - a^2U_3) + 3Y |E_a|^2 - Y_{N0} |U_N|^2; \\ Q &= -\text{Im} \{ E_a Y (-U_1 - aU_2 - a^2U_3) + 3Y |E_a|^2 - Y_{N0} |U_N|^2 \}. \end{aligned}$$

Таким образом, матричное выражение (1) может быть использовано в качестве математической модели синхронной машины при расчетах квазиустановившихся несимметричных режимов и КЗ.

Модели трансформаторов. Для получения модели различных трансформаторов в фазных координатах используем схему замещения идеального двухобмоточного однофазового трансформатора без учета сопротивления намагничивания, представленную на рис. 2,а. Согласно этой схеме можно получить схему замещения двухобмоточного од-

нофазного трансформатора, которая приведена на рис. 2,б. При заземлении узлов k и q схема замещения преобразуется в П-образную схему (рис. 2,в).

Расчет режима работы силовых трансформаторов (автотрансформаторов) сложной электрической системы с различными ответвлениями для регулирования напряжения связан только с пересчетом сопротивлений трансформаторов при переключении ответвлений при сохранении неизменными сопротивлений других элементов схемы. Следует отметить, что при составлении схемы замещения с приведением всех сопротивлений к одной ступени напряжений при переключении ответвлений потребуется пересчет также сопротивлений многих элементов схемы системы. При этом нахождение истинных значений токов и напряжений связано с

пересчетом в соответствии с коэффициентами трансформации трансформаторов. Поэтому более целесообразно сохранение в схемах замещения трансформаторных связей с учетом изменения ответвлений.

На рис. 2,г представлена обобщенная схема замещения двухобмоточного однофазового трансформатора с учетом изменения ответвлений как в первичной (а), так и во вторичной (б) обмотках. В данном случае $\dot{a} = 1 + t_a$, $\dot{b} = 1 - t_b$, где t_a и t_b показывают изменение числа витков соответственно в первичной и вторичной обмотках. Например, если в отн. ед. коэффициент трансформации равен 1,025:1, то $t_a = 0,025$, $t_b = 0$. Заметим, что t_a и t_b могут иметь как положительный, так и отрицательный знак.

В соответствии с обобщенной схемой замещения двухобмоточного однофазового трансформатора получены фазовые диаграммы для различных типов трансформаторов и их проводимостей с учетом изменений ответвлений (табл. 1).

Таким образом, в соответствии с полученными диаграммами в фазных координатах трансформаторы представляются в виде матрицы узловых проводимостей $\begin{vmatrix} \dot{Y}_T \end{vmatrix}$.

Модель линии электропередачи. Математическая модель линии электропередачи (ЛЭП) в фазных координатах строится аналогично модели линии для однолинейных цепей.

Для примера рассмотрим только лишь одну фазу A трехфазной цепи ЛЭП, имеющую связь с фазой B (рис. 3,а и б). Для рассмотренного случая можно записать следующее матричное выражение:

$$\begin{vmatrix} U_a \\ U_b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{Y}_{ab} & \frac{1}{2}\dot{Y}_{ab} & -\dot{Y}_{ab} \\ \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ab} & \frac{1}{2}\dot{Y}_{ab} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $\dot{Y}_{ab} = Z_{ab}^{-1}$ – взаимная проводимость между фазами a и b ; $\frac{1}{2}\dot{Y}_{ab}$ – значение проводимости шунта на землю; U_a , U_b и I_a , I_b – узловые напряжения и узловые токи соответственно.

Для трехлинейной модели ЛЭП с учетом поперечных взаимных связей и проводимостей (шунтов) на землю согласно (3) и рис. 3,в и г можно записать:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{Y}_{abc} + \frac{1}{2}\dot{Y}_{ш} & & & & \\ & \dot{Y}_{abc} & & & \\ & & \dot{Y}_{abc} + \frac{1}{2}\dot{Y}_{ш} & & \\ & & & \dot{Y}_{abc} & \\ & & & & \dot{Y}_{abc} + \frac{1}{2}\dot{Y}_{ш} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

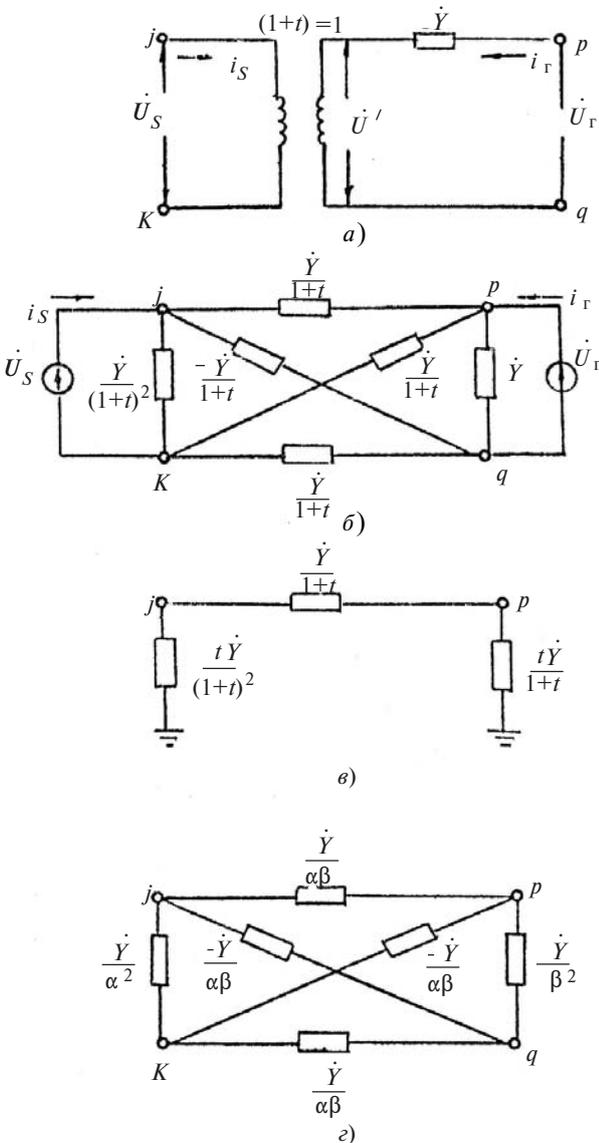


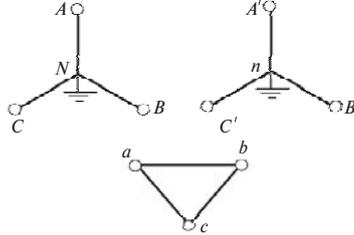
Рис. 2. Схема двухобмоточного трансформатора (а) и его схемы замещения: Х-образная схема замещения с учетом коэффициента трансформации $(1+t):1$ (б); П-образная схема замещения (в); Х-образная схема замещения с учетом ответвления в первичной (а) и вторичной (б) обмотках (г)

Таблица 1

Номер п\п	Соединение обмоток	Проводимость ветвей	Соединения между узлами	Трехфазная диаграмма	Примечание
1		$\frac{Y}{a^2}$	$N - A, N - B, N - C$		$a = (1 + t_a)$ отн. ед. $b = (1 + t_b)$ отн. ед. 1. Здесь и далее, если нейтраль N, n не имеют связи, то ветвь $N - n$ исключается из диаграммы. 2. Если нейтраль глухо заземлена, то ветвь $N - n$ исключается из диаграммы. 3. Если нейтраль соединены, как это показано ниже, то в графу N_3 включаются проводимости: Y_{ND}, Y_{nD}, Y_{D0}
		$\frac{Y}{b^2}$	$n - a, n - b, n - c$		
		$\frac{Y}{ab}$	$A - a, B - b, C - c$		
		$-\frac{Y}{ab}$	$n - A, n - B, n - C$ $N - a, N - b, N - c$		
		$\frac{3Y}{ab}$	$N - n$		
2		$\frac{Y}{a^2}$	$A - B, B - C, C - A$		$a = \sqrt{3}(1 + t_a)$ отн. ед. $b = \sqrt{3}(1 + t_b)$ отн. ед.
		$\frac{Y}{b^2}$	$a - b, b - c, c - a$		
		$\frac{2Y}{ab}$	$A - a, B - b, C - c$		
		$-\frac{Y}{ab}$	$A - b, B - c, C - a$ $a - B, b - C, c - A$		
3		$\frac{Y}{a^2}$	$A - N, B - N, C - N$		$a = (1 + t_a)$ отн. ед. $b = \sqrt{3}(1 + t_b)$ отн. ед.
		$\frac{Y}{b^2}$	$a - b, b - c, c - a$		
		$\frac{Y}{ab}$	$A - c, B - a, C - b$		
		$-\frac{Y}{ab}$	$A - b, B - c, C - a$		

		$\frac{\&}{a_T b_T} - \frac{2Y_T}{a_T b_T}$	$D - a_2$		$b_T = (1 + t_b)$ $BD = CD = a_{M1}$ $AN = a_{T1}$ $DN = a_{T2}$
		$\frac{\&}{a_T b_T} + \frac{2Y_T}{a_T b_T}$	$D - a_1$		
		$\frac{\&}{a_M^2} + \frac{4Y_M}{a_M^2}$	$B - D, C - D$		
		$\frac{\&}{b_M^2} + \frac{2Y_M}{b_M^2}$	$b_1 - b_2$		
		$\frac{\&}{a_M b_M} + \frac{2Y_M}{a_M b_M}$	$B - b_2, c - b_1$		
		$\frac{\&}{a_M b_M} + \frac{2Y_M}{a_M b_M}$	$b - b_1, C - b_2$		
5		$\frac{\&}{a^2} + \frac{2Y}{a^2}$	$A - N, B - N, C - N$		$a = (1 + t_a)$ отн. ед. $b = \sqrt{3}(1 + t_b)$ отн. ед.
		$\frac{\&}{b^2} + \frac{Y}{b^2}$	$a_1 - n, b_1 - n, c_1 - n$ $a_1 - b_1, b_1 - c_2, c_1 - a_2$		
		$\frac{\&}{ab} + \frac{Y}{ab}$	$A - a_1, A - c_1, B - b_1, B - a_1, C - c_1, C - b_1$		
		$\frac{\&}{ab} - \frac{Y}{ab}$	$N - a_2, N - b_2, N - c_2$ $A - n, B - n, C - n$ $A - a_2, B - b_2, C - c_2$		
		$\frac{\&}{ab} + \frac{3Y}{ab}$	$N - n$		
		$\frac{\&}{ab} - \frac{2Y}{ab}$	$N - a_1, N - b_1, N - c_1$		
6		$\frac{\&}{a^2} + \frac{2Y}{a^2}$	$a - b, b - c, c - a$		$a_T = \sqrt{3}(1 + t_a)$ отн. ед. $b = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 + t_b)$ отн. ед.
		$\frac{\&}{b^2} + \frac{Y}{b^2}$	$A_1 - N, B_1 - N, C_1 - N$ $A_1 - A_2, B_1 - B_2, C_1 - C_2$		
		$\frac{\&}{ab} + \frac{Y}{ab}$	$a - A_2, b - C_2, c - B_2$ $a - B_1, c - C_1, b - A_1$		
		$\frac{\&}{ab} - \frac{Y}{ab}$	$a - C_1, b - B_1, c - A_1$ $a - B_2, b - A_2, c - C_2$		

		$\frac{Y}{ab}$	$A- b, A- c, C- a$		
		$\frac{2Y}{ab}$	$A- a$		



где $Y_{abc} = Z_{abc}^{-1}$;

$$Y_{ш} = \begin{vmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{vmatrix}; Z_{abc} = \begin{vmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, сравнивая однолинейную диаграмму ЛЭП с трехлинейной, можно заметить, что в последнем случае каждый элемент содержит в себе матрицу размером 3 × 3.

Заметим, что матрица сопротивлений Z_{abc} (или Y_{abc}) может определяться согласно (5) либо прямым путем на базе основных данных, либо при использовании матрицы трансформации (преобразования), включающей заранее вычисленные элементы симметричных составляющих (Z_0, Z_1, Z_2). Если матрица сопротивлений симметричных составляющих определяется как диагональная матрица Z_{012} , то

$$Z_{abc} = \frac{1}{3} T Z_{012} T^{\Pi}, \quad (6)$$

где матрица трансформации (преобразования)

$$T^{\Pi} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}.$$

Здесь при записи (6) предусмотрено, что сопротивления прямой и обратной последовательности трехфазной одноцепной ЛЭП одинаковы (Ом/км при $f = 50$ Гц). Поэтому матрица Z_{abc} , определяемая согласно (6), является симметричной. Следовательно, (5) можно записать в виде:

$$Z_{abc} = \begin{vmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

В итоге, число элементов (N) для формирования матрицы (7) равно шести. Для определения элементов матрицы сопротивления (проводимости) для трехфазной цепи, включая и однолинейную цепь, используют выражение

$$N = (n + n^2) / 2,$$

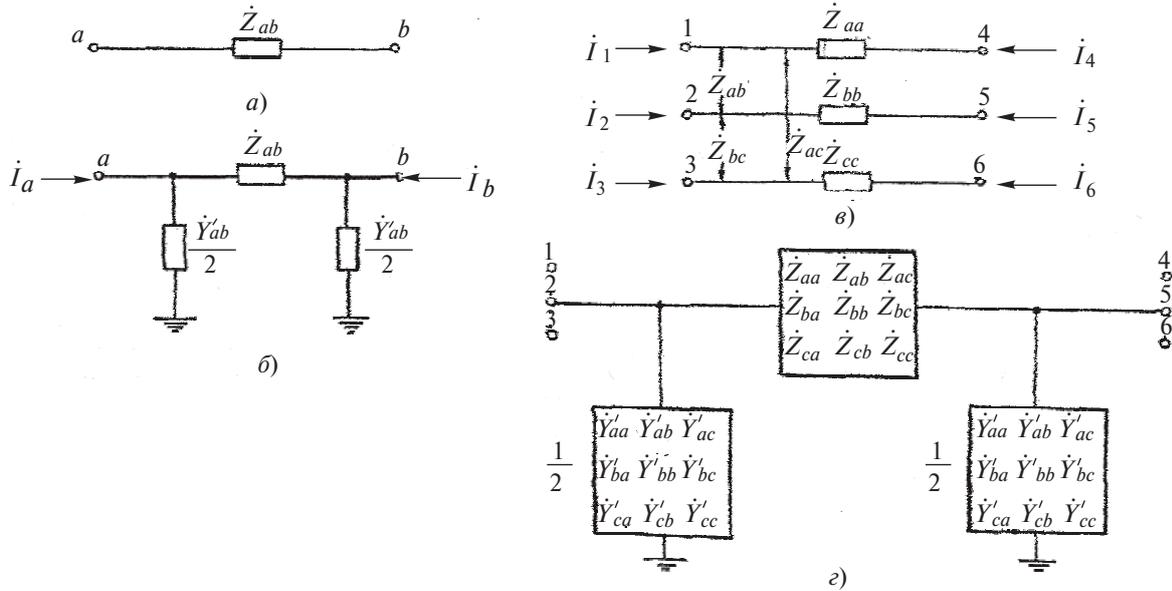


Рис. 3. Выделенная часть одной линии трехфазной ЛЭП (а); та же с учетом проводимости на землю (б); трехпроводная ЛЭП (в); то же с учетом поперечных связей и проводимости (шунтов) на землю (г)

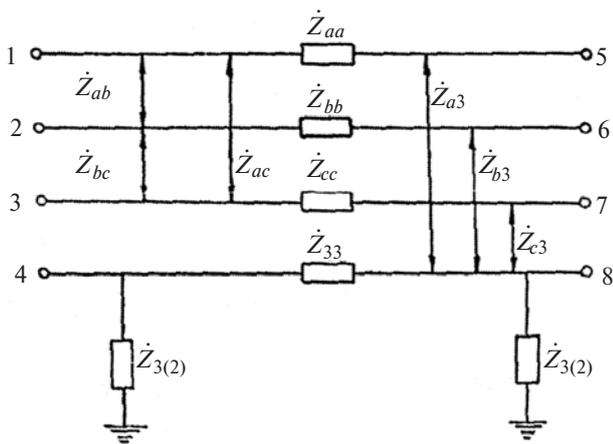


Рис. 4. Четырехпроводная схема линии электропередачи

где n – общее число проводников (например, для однофазной линии $N=1$, а для трехфазной линии $N=3$).

Если рассматривать трехфазную ЛЭП с учетом четвертого провода (рис. 4), то $N=10$. Следовательно, симметричная матрица будет иметь следующий вид:

$$\mathcal{Z}_{abc3} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{a3} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{b3} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} & Z_{c3} \\ Z_{a3} & Z_{b3} & Z_{c3} & Z_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

С учетом (8) узловое матричное выражение принимает вид:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{Z}_{aa} & \mathcal{Z}_{ab} & \mathcal{Z}_{ac} & \mathcal{Z}_{a3} \\ \mathcal{Z}_{ba} & \mathcal{Z}_{bb} & \mathcal{Z}_{bc} & \mathcal{Z}_{b3} \\ \mathcal{Z}_{ca} & \mathcal{Z}_{cb} & \mathcal{Z}_{cc} & \mathcal{Z}_{c3} \\ \mathcal{Z}_{a3} & \mathcal{Z}_{b3} & \mathcal{Z}_{c3} & \mathcal{Z}_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathcal{Y}_{abc3} = (\mathcal{Z}_{abc3})^{-1}; \quad \mathcal{Y}_{3i} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\mathcal{Z}_{3i} \end{pmatrix}, \quad i=1,2.$$

Модели нагрузок. В расчетах несимметричные нагрузки можно задавать значениями полных мощностей по фазам. При этом, если регулировочный диапазон трансформаторов достаточно четко определен, то нагрузки в расчетах несимметричных УР могут вводиться в виде $\mathcal{S}_H = P_H + jQ_H = \text{const}$.

Заметим, что при несимметричном распределении нагрузок по фазам значения напряжения в них не одинаковы. Поэтому в расчетах несимметричных электрических режимов также предусмотрен учет нагрузок в виде шунтов постоянной проводимости $\mathcal{Y}_{H,ш} = \text{const}$. Отметим, что значения $\mathcal{Y}_{H,ш}$ определяются для каждой фазы отдельно. Расчет ре-

жима в такой постановке может быть выполнен только итерационным методом.

Решение системы узловых уравнений в фазных координатах для исследования несимметричных УР в сложных многомашинных ЭЭС. Математическая модель установившегося режима трехфазной сети аналогична модели однолинейной сети и представляет собой нелинейную алгебраическую систему уравнений с комплексными коэффициентами и переменными. Для её решения могут быть использованы любые известные методы [13].

Для решения системы уравнений узловых напряжений в форме баланса токов, записанной в матричном виде $\begin{matrix} \& \\ Y \\ \& \end{matrix} \begin{matrix} \& \\ U \\ \& \end{matrix} = \begin{matrix} \& \\ I \\ \& \end{matrix}$, использован метод Гаусса–Зейделя.

Информация об узлах для каждой фазы задается мощностями нагрузок $P_H + jQ_H$; для генераторов задаются $P_G + jQ_G$ либо P_G и $\begin{matrix} \& \\ U_G \\ \& \end{matrix}$ соответственно для каждой фазы. Как и для однолинейной схемы системы один узел выбирается балансирующим и для него принимается, что ЭДС трех фаз расположены относительно друг друга на 120° . Напряжение для балансирующего узла определяется согласно выражению (2). При этом учитываются ограничения следующего вида:

$$P_{i \min} \leq P_{Gi} \leq P_{i \max}; Q_{i \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{i \max}; \\ \begin{matrix} \& \\ U_{i \min} \\ \& \end{matrix} \leq \begin{matrix} \& \\ U \\ \& \end{matrix} \leq \begin{matrix} \& \\ U_{i \max} \\ \& \end{matrix}; i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Допустимые пределы характеризуют изменение активной мощности P_i , реактивной мощности Q_i и

модуля напряжения $\begin{matrix} \& \\ U \\ \& \end{matrix}$ в узле с номером i . В программе используется ускорение сходимости итерационного процесса, где новый коэффициент ускорения w^H определяется пересчетом старого коэффициента w^{CT} через заданное число итераций:

$$w^H = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{(w^{CT} + 1)^2}{w^{CT} - 1}}},$$

где

$$l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left| \begin{matrix} \& \\ D U_1^{(k+1)} \\ \& \end{matrix} \right|^2}{\sum_{i=1}^n \left| \begin{matrix} \& \\ D U_1^{(k)} \\ \& \end{matrix} \right|^2}}.$$

Значение коэффициента ускорения принимается в пределах $1 \leq w \leq 2$. Итерационный процесс заканчивается после выполнения заданной точности расчета.

С учетом представленных выражений применительно к уравнениям элементов ЭЭС в фазных координатах написана программа расчета несимметричных режимов для сложных систем.

Определение токов и напряжений в фазных координатах при несимметричных КЗ и в сложносимметричных режимах ЭЭС. Расчет токов КЗ и нефазных режимов может выполняться по результатам расчета предшествующего КЗ доаварийного режима. В данном случае можно одновременно имитировать любые виды КЗ, включая КЗ через импеданс. Короткие замыкания и обрывы фаз учитываются непосредственно при составлении узловых уравнений. При этом в ЭВМ вводится вся необходимая информация с учетом емкостных прово-

(Окончание в № 7, 2012.)

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).

димостей соответствующих составляющих линий, сопротивления составляющих трансформаторов (автотрансформаторов); сопротивления, включаемые в нейтраль трансформаторов, генераторов и т.д. Разрыв фазы ветви также можно заменить включением в нее бесконечно большого сопротивления.

В матрице проводимостей $\begin{vmatrix} & \\ Y & \end{vmatrix}$ достаточно просто

учитывается КЗ через переходное сопротивление. Для этого в исходных данных достаточно задать значение переходного сопротивления. При моделировании КЗ в узлах схемы системы необходимо задать заранее предусмотренный шифр типа КЗ. Для расчетов токов КЗ и неполнофазных режимов применен метод Гаусса–Зейделя.

II этап: Моделирование в фазных координатах переходных процессов в сложной регулируемой ЭЭС. Уравнения основных элементов ЭЭС. Синхронные машины. Уравнения синхронных машин моделируются по полным уравнениям Горева–Парка и упрощенным уравнениям Лебедева–Жданова с учетом электромагнитных переходных процессов в контурах ротора [1-3, 8-12].

При составлении уравнений синхронной машины для расчета несимметричных переходных режимов приняты следующие допущения:

фазные обмотки синхронной машины симметричны, так как они имеют одинаковое число витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитных осей;

при рассмотрении магнитных полей самоиндукции обмоток статора и взаимной индукции этих обмоток с обмотками ротора принимается во внимание только одна гармоническая составляющая этого распределения;

на роторе кроме обмотки возбуждения расположен ещё один демпферный контур по продольной и поперечной осям;

магнитная проницаемость стали магнитопровода машины принята постоянной; учет насыщения проводится выбором постоянных по значению насыщенных параметров.

Исходными уравнениями для расчета режимов синхронной машины в координатах a, b, c являются следующие дифференциальные уравнения напряжений обмотки статора:

$$\begin{aligned} pY_a &= e_a - i_a r_a \ddot{\psi} \\ pY_b &= e_b - i_b r_b \dot{\psi} \\ pY_c &= e_c - i_c r_c \psi \end{aligned} \quad (10)$$

где Y_a, Y_b, Y_c – потокосцепления фаз обмотки статора; i_a, i_b, i_c – токи фаз обмотки статора; $r_a,$

r_b, r_c – активные сопротивления фаз обмотки статора; e_a, e_b, e_c – напряжения на зажимах фазных обмоток статора генератора; $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования по синхронному времени $t = 2\pi ft$.

К этой системе уравнений следует добавить уравнения напряжений для роторных контуров и уравнения движения ротора:

$$\begin{aligned} pY_f &= e_f - i_f r_f; & \ddot{\psi} \\ pY_{kd} &= -i_{kd} r_{kd}; & \dot{\psi} \\ pY_{kq} &= -i_{kq} r_{kq}; & \dot{\psi}, \\ pS &= \frac{1}{H}(M_m + M_e) \dot{\psi}; & \psi \\ pq &= S, & \psi \end{aligned} \quad (11)$$

где $Y_f, Y_{kd}, Y_{kq}, i_f, i_{kd}, i_{kq}, r_f, r_{kd}, r_{kq}$ – потокосцепления, токи и активные сопротивления обмотки возбуждения и демпферных контуров по продольной и поперечной осям; e_f – напряжение, приложенное к обмотке возбуждения; S – скольжение; H – инерционная постоянная; M_m – вращающий момент нагрузки на валу синхронной машины; M_e – электромагнитный вращающий момент синхронной машины; q – рабочий угол (угол между поперечной осью ротора и изображающим вектором фазных напряжений).

Для решения систем уравнений (10) и (11) на ЭВМ любым из известных численных методов Рунге–Кутты, Адамса Эйлера и др. [13] необходимо, чтобы число переменных равнялось числу уравнений. Опыт показывает, что целесообразно выразить все токи через потокосцепления контуров. Для этой цели используются известные соотношения, полученные при расчетах симметричных режимов по уравнениям Горева–Парка [9, 10].

$$\begin{aligned} i_d &= aY_d - bY_f - cY_{kd}; & \ddot{\psi} \\ i_q &= gY_q - hY_{kq}; & \dot{\psi} \\ i_f &= -bY_d + dY_f - eY_{kd}; & \dot{\psi} \\ i_{kd} &= -cY_d - eY_f + fY_{kd}; & \dot{\psi} \\ i_{kq} &= -hY_q + kY_{kq}; & \dot{\psi} \\ i_0 &= Y_0 / x_0, & \psi \end{aligned} \quad (12)$$

где коэффициенты $a, b, c, d, e, f, g, h, k$ выражаются через параметры машины следующим образом:

$$a = \frac{X_f X_{kd} - x_{ad}^2}{D}; \quad f = \frac{X_d X_f - x_{ad}^2}{D}; \quad b = \frac{x_{ad} X_{kd} - x_a^2}{D};$$

$$g = \frac{X_{kq}}{X_q X_{kq} - x_{aq}^2}; c = \frac{x_{ad} X_f - x_{ad}^2}{D}; h = \frac{x_{aq}}{X_q X_{kq} - x_{aq}^2};$$

$$d = \frac{X_d X_{kd} - x_{ad}^2}{D}; k = \frac{X_q}{X_q X_{kq} - x_{aq}^2}; e = \frac{X_d x_{ad} - x_{ad}^2}{D},$$

$$(13)$$

где $D = X_d(X_f X_{kd} - x_{ad}^2) - x_{ad}(x_{ad} X_{kd} - x_{ad}^2) - x_{ad}(x_{ad} X_f - x_{ad}^2)$.

Параметры, входящие в эти выражения представляют собой взаимные или полные реактивные сопротивления контуров:

$$X_f = x_{ad} + x_f; X_{kd} = x_{ad} + x_{kd}; X_{kq} = x_{aq} + x_{kq};$$

$$X_d = x_{ad} + x_e; X_q = x_{aq} + x_i.$$

Для перехода от статорных токов i_d, i_q, i_0 к фазным величинам i_a, i_b, i_c используем известные соотношения [3, 8].

$$i_a = i_0 + i_d \cos g - i_q \sin g;$$

$$i_b = i_0 + i_d \cos(g - \tau) - i_q \sin(g - \tau);$$

$$i_c = i_0 + i_d \cos(g + \tau) - i_q \sin(g + \tau);$$

$$(14)$$

$$Y_0 = \frac{1}{3}(Y_a + Y_b + Y_c);$$

$$Y_d = \frac{2}{3}[(Y_a \cos g + Y_b \cos(g - \tau) + Y_c \cos(g + \tau))];$$

$$Y_q = \frac{2}{3}(Y_a \sin g + Y_b \sin(g - \tau) + Y_c \sin(g + \tau));$$

$$(15)$$

где $\tau = 2\pi/3 = 120^\circ$ для машины с симметрично расположенными тремя фазными обмотками, $g = t + \alpha + \pi/2$ — угол между неподвижной осью фазы a и вращающейся продольной осью ротора.

Тогда выражения для токов i_a, i_b, i_c через потокоцепления фаз статора и роторных контуров будут иметь вид:

$$i_a = Y_a \frac{e_2}{3} a \cos^2 g + \frac{2}{3} g \sin^2 g \dot{\psi} +$$

$$+ Y_b \frac{e_2}{3} a \cos g \cos(g - \tau) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g - \tau) \dot{\psi} +$$

$$+ Y_c \frac{e_2}{3} a \cos g \cos(g + \tau) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g + \tau) \dot{\psi} - Y_f b \cos g -$$

$$- Y_{kd} c \cos g + Y_{kq} h \sin g + \frac{1}{3x_0}(Y_a + Y_b + Y_c);$$

$$i_b = Y_a \frac{e_2}{3} a \cos g \cos(g - \tau) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g - \tau) \dot{\psi} +$$

$$+ \frac{e_2}{3} a \cos^2(g - \tau) + \frac{2}{3} g \sin^2(g - \tau) \dot{\psi} +$$

$$+ Y_c \frac{e_2}{3} a \cos(g - \tau) \cos(g + \tau) + \frac{2}{3} g \sin(g - \tau) \sin(g + \tau) \dot{\psi} -$$

$$- Y_f b \cos(g - \tau) - Y_{kd} c \cos(g - \tau) + Y_{kq} h \sin(g - \tau) +$$

$$+ \frac{1}{3x_0}(Y_a + Y_b + Y_c);$$

$$i_c = Y_a \frac{e_2}{3} a \cos g \cos(g + \tau) + \frac{2}{3} g \sin g \sin(g + \tau) \dot{\psi} +$$

$$+ Y_b \frac{e_2}{3} a \cos(g - \tau) \cos(g + \tau) + \frac{2}{3} g \sin(g - \tau) \sin(g + \tau) \dot{\psi} +$$