

# АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Махмудов Ф.Н.

Мақолада симметрик таркибий қисимларга асосланган электр тизимларида ягона ва күп носимметрияларни хисобдашнинг усуллари кўриб чиқилган. Симметрик ташкил этувчилар асосида тузилган комплекс алмаштириш схемалар ёрдамида күп носимметриаларни хисоблаш умумий методи келтирилган.

В данной статье на основе линейных узловых уравнений рассмотрены различные методы расчета однократной и многократной несимметрии в сетях электрических систем. Приведен общий метод расчета многократной несимметрии по комплексным схемам замещения на базе симметричных составляющих.

In this article on the base of linear node equations various methods for calculating single and multiple asymmetries in networks of electrical systems are considered. A general method of calculation of multiple asymmetries complex equivalent schemes on the base of symmetric components is given.

В настоящее время на практике для расчётов установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетических системах определённого круга задач используются специализированные программные комплексы. Наибольший относительный объём расчётов при эксплуатации и проектировании занимают расчёты установившихся симметричных режимов. Поэтому математические модели в программах для расчётов установившихся режимов основаны на однолинейной схеме замещения прямой последовательности. Программы для расчёта электромеханических переходных процессов, также основаны на однолинейной схеме замещения прямой последовательности, а возмущения вызываемые несимметричными короткими замыканиями или неполнофазными режимами, учитываются включением в место несимметрии соответствующего шунта или добавочного сопротивления. При этом, во-первых, возможно моделирование процессов только по прямой последовательности и во-вторых, исключается возможность определения токов и напряжений обратной и нулевой последовательностем в ветвях и узлах схемы, а также фазных токов и напряжений. Указанные выше ограничения не всегда позволяют выполнить полноценные расчёты параметров настройки релейной защиты. Это относится к устройствам релейной защиты, основанным на измерении симметричных составляющих нулевой или обратной последовательности. Возможны два варианта решения задачи: использование трёхфазной модели сети или модели с использованием метода симметричных составляющих. Трёхфазная модель принципиально даёт возможность для расчётов несимметричных режимов как при однократной, так и многократной несимметрии с получением любых электрических величин в моделируемой системе.[1]

Для анализа несимметричных режимов, наиболее целесообразно применение метода симметричных составляющих. При этом в рамках линейных моделей электрических сетей генераторы и нагрузки задаются своими сопротивлениями и ЭДС и учитываются основные гармоники токов и напряжений. Трансформаторы в общем случае, с комплексными коэффициентами трансформации, в схемах прямой (ПП), обратной (ОП) и нулевой последовательностей (НП) представляются в виде трехполюсников или пятиполюсников в зависимости от характера решаемой задачи. Это позволяет для расчета несимметричных режимов эффективно использовать комплексные схемы замещения,

получаемые соединением схем отдельных последовательностей в соответствии с граничными условиями вида несимметрии, что особенно важно при рассмотрении сложных видов повреждений и значительно упрощает расчеты.

Метод расчета однократной поперечной или продольной несимметрии по расширенным схемам ПП является традиционным и основан на предварительном эквивалентировании схем ОП и НП относительно узла несимметрии. Схема ПП, дополненная в месте несимметрии эквивалентной схемой, состоящей из сопротивлений ОП и НП, представляет собой расширенную схему ПП.

При расчете несимметричных режимов будем исходить из общепринятой методики, полагая ЭДС источников  $E_{ri}$  заданными. ЭДС, обусловленные реакцией токов ОП и НП, учитывают при этом в виде падений напряжений на соответствующих сопротивлениях. Таким образом, схему ПП (с линейными элементами при  $N$  заданных ЭДС) можно рассматривать как  $(N+1)$ -полюсник с  $N$  входами и общей нулевой (базисной) точкой 0. При этом нет необходимости в выборе опорного узла и система УУ  $N$ -го порядка имеет вид

$$\mathbf{Y}_1 \dot{\mathbf{U}}_1 = \mathbf{J} \quad (1)$$

где  $\mathbf{Y}_1$  - матрица узловых проводимостей расширенной схемы ПП;

$\dot{\mathbf{U}}_1$  - вектор узловых напряжений схемы ПП;

$\mathbf{J}$  - вектор узловых источников тока ( $J_i = Y_{ri} E_{ri}$ ).

Число ненулевых элементов в правой части (1), естественно, равно числу ветвей с ЭДС, преобразуемых в эквивалентные источники тока. Решение системы (1) определяет также токи обратной и нулевой последовательностей в местах несимметрии, поскольку они связаны линейными соотношениями с током прямой последовательности. По этим токам и по матрицам узловых сопротивлений схем ОП и НП ( $Z_2$  и  $Z_0$ ) легко найти напряжения узлов этих схем:

$$\dot{\mathbf{U}}_2 = \mathbf{Z}_2 \dot{\mathbf{I}}_2, \quad \dot{\mathbf{U}}_0 = \mathbf{Z}_0 \dot{\mathbf{I}}_0. \quad (2)$$

где

$I_2$  - ток обратной последовательности

$I_0$  - ток нулевой последовательности

$U_2$  - напряжение обратной последовательности

$U_0$  - напряжение нулевой последовательности

Напряжение и ток ПП в месте несимметрии могут быть связаны между собой и через так называемые несобственные уравнения, то есть через параметры схем ОП и НП:

$$\dot{U}_{L1}^{(n)} = Z_\Delta^{(n)} \dot{I}_{L1}^{(n)}. \quad (3)$$

Искомые фазные величины  $\dot{F} \in \dot{U}, \dot{I}$  определяем по найденным симметричным составляющим с помощью известной матрицы преобразования координат:

$$\begin{vmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{vmatrix} = \dot{M}(a) \cdot \begin{vmatrix} \dot{F}_1 \\ \dot{F}_2 \\ \dot{F}_0 \end{vmatrix}, \quad \dot{M}(a) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Алгоритм решаемой задачи может быть изменен в зависимости от её характера. Но во всех случаях для решения системы (1) и определения матрицы узловых сопротивлений

схем ОП и НП целесообразно применение методов факторизации с оптимально упорядоченным исключением неизвестных.[2]

Методика расчета однократной поперечной или продольной несимметрии является традиционной и основан, по существу, на предварительном эквивалентировании схем ОП и НП относительно узла несимметрии. Однако этот способ не единственно возможный.

Искомые напряжения могут быть определены также прямым совместным решением систем уравнений для всех последовательностей

$$Y_1 \dot{U}_1 = J - i_{k1}, \quad Y_2 \dot{U}_2 = -i_{k2}, \quad Y_0 \dot{U}_0 = -i_{k0}, \quad (5)$$

с учетом граничных условий рассматриваемого вида несимметрии; здесь  $i_{k1}, i_{k2}, i_{k0}$  - токи повреждения в узле  $K$  схемы, а  $J$  - столбец узловых источников тока.

Следовательно, имеем 12 уравнений (по 3 уравнения для ПП, НП, ОП и 3 граничных условия) и соответственно 12 неизвестных (9 напряжений – по 3 для каждой последовательности  $(\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0)$  и 3 тока  $(i_1, i_2, i_0)$ ).

Решение этой системы не представляет трудностей, хотя в общем случае более громоздко по сравнению с решением по расширенной схеме. Однако прямой метод является общей основой для расчета несимметричных режимов электрических систем, а расширенная схема – следствием и дальнейшей детализацией его применения к однократной несимметрии.

Изложенный выше метод расчета однократной несимметрии можно использовать при рассмотрении сложненесимметричного режима электрической системы, возникающего при любой  $N$ -кратной несимметрии в узлах системы. Модели трансформаторов с комплексными коэффициентами при этом не отличаются от общепринятых для анализа симметричных режимов. Система уравнений, аналогичная (5), будет содержать дополнительно три составляющие аварийных токов в правой части и соответствующее количество граничных условий:

$$\begin{aligned} Y_1 \dot{U}_1 &= J - i_{k1} - i_{L1}, \\ Y_2 \dot{U}_2 &= -i_{k2} - i_{L2}, \\ Y_0 \dot{U}_0 &= -i_{k0} - i_{L0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Составление и решение этих уравнений рассмотрим на простейшем примере двухкратной несимметрии.

Рассмотрим пример, состоящий из генератора G, трансформатора T и двухцепной линии W1 и W2, присоединённой к узлу системы С приведенный на рис.1.

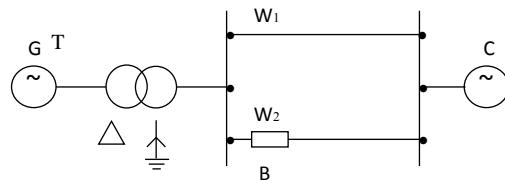


Рис.1. простейшая схема электропередачи.

Параметры элементов схемы:

G: 176,5 MVA;  $\cos\phi=0,85$ ; 18 kV:  $x'_d=0,31$ ;  $x_2=0,255$ ;

T: 200 MVA; 242/18 kV;  $U_k=11\%$ ;  $Y_0/\Delta=11$ ;

W1 и W2: 145 км;  $X_1 = 0,425 \text{ Ом/км}$ ;  $X_0 = 1,31 \text{ Ом/км}$ ;  $X_{I-II(0)} = 0,61 \text{ Ом/км}$ ;

C:  $S_c = 2000 \text{ МВА}$ ;  $U_c = 230 \text{ кВ}$ ;  $X_{c1} = X_{c2} = X_{c0}$ .

Определим начальные значения токов и напряжений генераторов при отключении фазы А выключателя В цепи 1.

При известных напряжениях узлов легко найти токораспределение в схемах ПП, ОП, НП, а по ним – искомые токи в фазах линии и генератора и напряжения фаз генератора:

Таблица.1

линия	$I_A \text{ kA}$	$I_B \text{ kA}$	$I_C \text{ kA}$
W-1	0	-0.198-j0.018	0.125+j0.155
W-2	0.167-j0.312	-0.223+j0.029	0.099+j0.202

Таблица.2

$G$	фазы	$I \text{ kA}$	$U \text{ kV}$
	A	4,574-j2.506	10,63+j0.14
	B	-5,016-j2.690	-5,19-j9.01
	C	0,443+j5.197	-5,44+j8,88

Таким образом, преимуществом метода является использование для схем ПП, ОП и НП матриц узловых проводимостей электрической системы, составляемых так же, как и при расчете симметричных режимов. Необходимо отметить, что в данном случае не требуется специального моделирования трансформаторов и граничных условий. Основная же сложность алгоритмизации и программирования рассматриваемого метода расчета сложннесимметричных режимов заключается в сложности формализации процедуры формирования общей линейной системы уравнений с учетом граничных условий многократной несимметрии. Для приведения этой системы к однородному базису УУ (узловым напряжениям) требуется предварительное исключение аварийных токов.

В заключении отметим, что рассмотренные в статье методы расчета несимметрии режимов ЭЭС являются адаптивными, поскольку позволяют легко перейти от одной модели и алгоритма к другой на общей информационной базе.

### Литература

- Насиров Т.Х. Основы общей теории нормальных и аварийных режимов энергосистем. – Ташкент.: «Фан ва технология», 2015.
- Насиров Т.Х., Радионова О.В. Моделирование режимов электрических систем. – Ташкент.: «Фан ва технология», 2016.