

УДК 621.313

В.В. Костюков, старший преподаватель*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СХЕМНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ К АНАЛИЗУ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

Рассмотрены особенности анализа переходных процессов в трехфазных цепях на примере однофазного короткого замыкания методом схемных коэффициентов.

Ключевые слова: *схемные коэффициенты, переходные процессы, трехфазные цепи, переменные состояния.*

Работа электроэнергетической системы в ряде случаев сопровождается нестационарными режимами и переходными процессами, при этом могут возникать аварийные ситуации, сопровождаемые перенапряжениями и сверхтоками на отдельных участках системы. Следовательно, анализ таких режимов имеет, кроме теоретического, весьма важное практическое значение.

Для анализа переходных процессов используются, как правило, классический, операторный и метод переменных состояния, каждый из которых имеет свои особенности.

В классическом методе трудности связаны с поиском постоянных интегрирования свободных составляющих искомым величин. В операторном методе затруднения вызваны переходом из области изображений в область оригиналов. В обоих этих методах при поиске другой переменной указанные трудности необходимо преодолевать заново. В методе переменных состояния решения ищутся сразу для всех токов и напряжений, через которые выражается запасаемая элементами энергия. Однако такая универсальность влечет за собой громоздкость математических преобразований.

Целью статьи является представление методики применения метода схемных коэффициентов к анализу переходных процессов в трехфазных цепях.

В рассматриваемом здесь методе схемных коэффициентов искомой является одна из переменных состояния. Как и в классическом методе, все переменные состояния записываются в виде суммы свободной и принужденной составляющих. Искомая переменная состояния принимается за базисную и постоянные интегрирования остальных переменных состояния выражаются через постоянные интегрирования базисной переменной. Коэффициенты связи между переменными состояния называются схемными.

Постоянные интегрирования всех переменных состояния выражаются через разность значений этих переменных в последний перед коммутацией момент времени и в начальный момент принужденной составляющей нового установившегося режима. Данная разность является известной правой частью системы уравнений, полученной после подстановки во все переменные состояния начального момента времени при условии, что все постоянные интегрирования небазисных переменных состояния выражены через постоянные интегрирования базисной переменной. Решением такой системы являются постоянные интегрирования базисной переменной состояния, зная которые, через схемные коэффициенты определяются постоянные интегрирования остальных переменных состояния.

По известным переменным состояния можно определить ток или напряжение любого элемента в нестационарном режиме.

Применим метод схемных коэффициентов к анализу переходных процессов в трехфазных цепях на примере однофазного короткого замыкания на землю. Рассмотрим однофазное короткое замыкание в электротехнической системе, изображенной на рисунке 1, где фаза А замыкается на землю через сопротивление r .

Сопротивления Z' и Z'' характеризуют состав цепи до и после точки короткого замыкания, а r – сопротивление участка короткого замыкания. Предположим, что трехфазная цепь получает питание от источника $E = 220$ В бесконечной мощности.

Зададим параметры схемы при частоте $f = 50$ Гц

$$Z' = r_1 + j\omega L_1 = 1 + j10 \text{ Ом};$$

$$Z'' = r_2 + j\omega L_2 = 2 + j30 \text{ Ом}; \quad r = 0,2 \text{ Ом}.$$

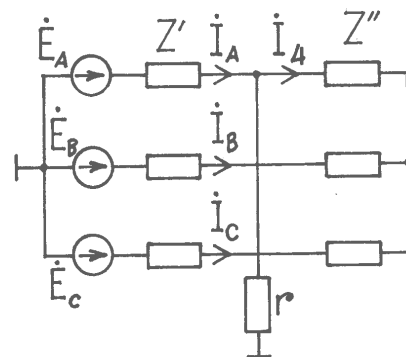


Рисунок 1 – Схема однофазного короткого замыкания на землю

Так как Z' и Z'' имеют активно-индуктивный характер, а, следовательно, выполняются законы коммутации для токов, начальные их значения находятся из предшествующего симметричного режима:

$$\dot{I}_{AO} = \dot{I}_{4O} = \frac{E}{Z' + Z''} = 0,41 - j5,47 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{BO} = \dot{I}_{AO} \cdot a^2 = -4,94 + j2,38 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CO} = \dot{I}_{AO} \cdot a = 4,53 + j3,09 \text{ A},$$

где $a = -0,5(1 - j\sqrt{3})$ – поворотный множитель.

Установившийся режим короткого замыкания определяется на основании системы уравнений контурных токов. Контурный ток $\dot{I}_{k1}$ проходит через Z' фазы А и сопротивление r . Контурный ток $\dot{I}_{k2}$ – через r , Z'' фазы А и Z' и Z'' фазы В. Контурный ток $\dot{I}_{k3}$ – через Z' и Z'' фазы В и Z' и Z'' фазы С. Все контурные токи направлены по часовой стрелке. Записанная в матричной форме система уравнений контурных токов имеет вид

$$\begin{vmatrix} Z' + r & -r & 0 \\ -r & Z' + 2Z'' + r & -(Z' + Z'') \\ 0 & -(Z' + Z'') & 2(Z' + Z'') \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_{k1} \\ \dot{I}_{k2} \\ \dot{I}_{k3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{E} \\ -\dot{E}a^2 \\ \dot{E}a^2 - \dot{E}a \end{vmatrix}.$$

Решив эту систему, получим численные величины комплексных действующих значений установившихся токов

$$\dot{I}_{A\text{уст}} = \dot{I}_{k1} = 2,559 - j21,694 \text{ A}; \quad \dot{I}_{B\text{уст}} = \dot{I}_{k3} - \dot{I}_{k2} = -4,775 + j0,747 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{C\text{уст}} = -\dot{I}_{k3} = 4,698 + j1,458 \text{ A}; \quad \dot{I}_{4\text{уст}} = \dot{I}_{k2} = 0,076 - j2,205 \text{ A}.$$

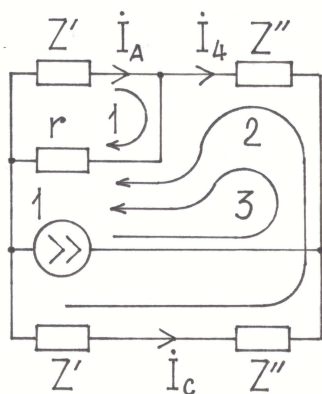


Рисунок 2 – Схема для определения схемных коэффициентов при однофазном коротком замыкании

Для определения схемных коэффициентов примем за базовую переменную ток I_B , поставим в фазу В пробный единичный источник тока (рисунок 2) и введем операторное сопротивление $Z'(p)$ и $Z''(p)$.

Анализ данной схемы, проведенный также методом контурных токов, нумерация и направление которых представлены на рисунке 2, дает следующие аналитические выражения для контурных токов:

$$I_{k1}(p) = -\frac{r(Z'(p) + Z''(p))}{Z'(Z' + 2Z'') + 2r(Z' + Z'')};$$

$$I_{k2}(p) = -\frac{r(Z'(p) + Z''(p)) + Z'(p)Z''(p)}{Z'(p)(Z'(p) + 2Z''(p)) + 2r(Z'(p) + Z''(p))}.$$

По известным токам $I_{k1}(p)$, $I_{k2}(p)$, $I_{k3}(p) = 1$ определяются токи в ветвях

$$I_A(p) = I_{k1}(p); \quad I_B(p) = 1; \quad I_C(p) = I_{k2}(p); \quad I_4(p) = -(I_{k2}(p) + 1).$$

Схемные коэффициенты связывают токи в ветвях с принятым за базисный ток $I_B(p)$

$$k_A(p) = \frac{I_A(p)}{I_B(p)}; \quad k_C(p) = \frac{I_C(p)}{I_B(p)}; \quad k_4(p) = \frac{I_4(p)}{I_B(p)}.$$

Поскольку базисный ток $I_B(p) = 1$, аналитические выражения для схемных коэффициентов имеют вид

$$k_A(p) = I_A(p); \quad k_C(p) = I_C(p); \quad k_4(p) = I_4(p).$$

Для корней характеристического уравнения на основании определителя системы контурных токов формальной схемы замещения на рисунке 1 получаем: $[Z'(p)(3Z''(p) + Z'(p)) + 3r(Z'(p) + Z''(p))](Z'(p) + Z''(p)) = 0$, откуда при принятых численных значениях $Z'(p) = r_1 + pL_1$; $Z''(p) = r_2 + pL_2$ получаем: $p_1 = -38,207$; $p_2 = -22,709$; $p_3 = -23,55$. Матрица схемных коэффициентов для свободных составляющих токов в фазах В, А, С принимает численные значения

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ k_A(p_1) & k_A(p_2) & k_A(p_3) \\ k_C(p_1) & k_C(p_2) & k_C(p_3) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 23,839 & -0,239 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Тогда выражения для мгновенных значений токов i_B , i_A , i_C будут иметь вид:

$$\begin{aligned} i_B &= i_{B_{ycm}} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}; \\ i_A &= i_{A_{ycm}} + k_A(p_1) A_1 e^{p_1 t} + k_A(p_2) A_2 e^{p_2 t} + k_A(p_3) A_3 e^{p_3 t}; \\ i_C &= i_{C_{ycm}} + k_C(p_1) A_1 e^{p_1 t} + k_C(p_2) A_2 e^{p_2 t} + k_C(p_3) A_3 e^{p_3 t}. \end{aligned}$$

Учитывая, что известны начальные значения токов $\dot{I}_{AO}$, $\dot{I}_{BO}$, $\dot{I}_{CO}$ и значения этих токов в начальный момент нового установившегося режима $\dot{I}_{A_{ycm}}$, $\dot{I}_{B_{ycm}}$, $\dot{I}_{C_{ycm}}$, из последней системы в начальный момент времени получаем матричное уравнение для определения комплексных постоянных интегрирования $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$, $\underline{A}_3$

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ k_A(p_1) & k_A(p_2) & k_A(p_3) \\ k_C(p_1) & k_C(p_2) & k_C(p_3) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \underline{A}_1 \\ \underline{A}_2 \\ \underline{A}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{I}_{BO} - \dot{I}_{B_{ycm}} \\ \dot{I}_{AO} - \dot{I}_{A_{ycm}} \\ \dot{I}_{CO} - \dot{I}_{C_{ycm}} \end{vmatrix}.$$

Численные решения данного матричного уравнения с учетом значений схемных коэффициентов дает полную матрицу постоянных интегрирования токов i_B , i_A , i_C

$$\underline{A} = \begin{vmatrix} -0,093 + j0,713 & -0,074 + j0,919 & 0 \\ -2,211 + j16,996 & 0,062 - j0,771 & 0 \\ -0,093 + j0,713 & -0,074 + j0,919 & 0 \end{vmatrix}.$$

Из последнего выражения следует, что переходной процесс в фазах В и С протекает одинаково с равными постоянными интегрирования и слабо выражен ввиду малости мнимых частей постоянных A_1 и A_2 . Наиболее интенсивная составляющая процесса возникает в фазе А для корня p_1 . Нулевые составляющие последнего столбца говорят о том, что корень характеристического уравнения p_3 , соответствующий сумме $Z' + Z'' = 0$, является ложным. На рисунке 3 изображен переходный процесс, рассчитанный по выражению для мгновенных значений токов i_B , i_A , i_C :

$$i_n(t) = \text{Im} \left[\sum_{k=1}^2 A_{nk} \exp(p_k t) + I_{n_{ycm}} \exp(j\omega t) \right], \text{ где } n = B, A, C.$$

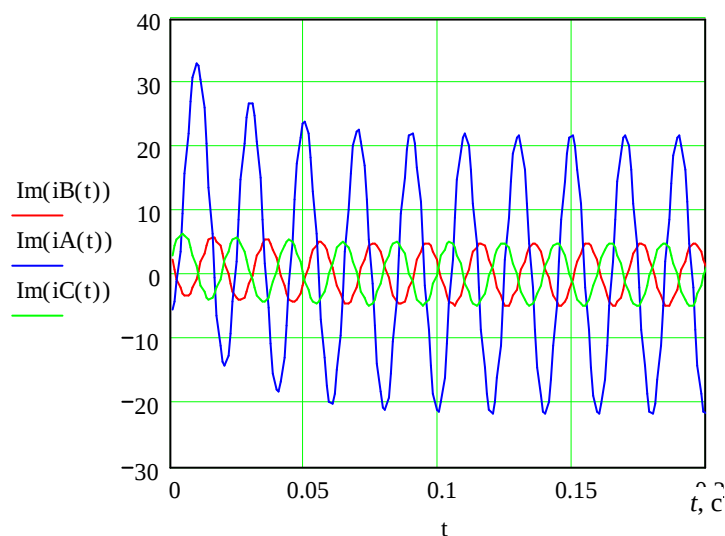


Рисунок 3 – Переходной процесс однофазного короткого замыкания на землю

Ударный ток в фазе А составляет 35 А, что в семь раз превышает ток нормального симметричного режима.

Применение метода схемных коэффициентов позволяет выразить постоянные интегрирования только через значения токов в начальный момент времени, что значительно проще, чем поиск производных этих токов по времени. В качестве дальнейших исследований можно предложить анализ переходных процессов при продольной несимметрии в трехфазных цепях.

Библиографический список использованной литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л.А. Бессонов. — 8-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1984. — 559 с.
2. Костюков В.В. Связь постоянных интегрирования с начальными условиями при анализе переходных процессов в линейных цепях / В.В. Костюков // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 48. — С. 87–93.

Поступила в редакцию 26.06.2010 г.

Костюков В.В. Застосування методу схемних коефіцієнтів до аналізу перехідних процесів у трифазних ланцюгах

Розглянуто особливості аналізу перехідних процесів в трифазних ланцюгах на прикладі однофазного короткого замикання методом схемних коефіцієнтів.

Ключові слова: схемні коефіцієнти, перехідний процес, трифазні кола, зміна стану.

Kostjukov V.V. Application of the circuit coefficient method to the transient process analysis

Application of the circuit coefficient method to the transient process analysis in three-phase circuits is considered.

Keywords: circuit coefficient, transient process, three-phase circuit, variable condition.