

УДК 621.311

Определение мгновенных значений токов коротких замыканий в электрических сетях с несимметричным напряжением

Мартынов А.П., Головинов В.В., Панченко С.В.

Азово-Черноморский инженерный институт Донской ГАУ

Аннотация

Моделирование переходных процессов в электрических сетях является важной задачей для оценки надежности их работы и качества электроснабжения потребителей. Так, например, определение максимальных токов короткого замыкания в установившихся режимах работы, а также ударных токов короткого замыкания, необходимо для выбора оборудования электрических сетей и правильной настройки средств защиты от аварийных и ненормальных режимов работы.

В данной статье предлагается метод определения мгновенных значений токов короткого замыкания при несимметричном напряжении в электрических сетях.

Ключевые слова: ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, НЕСИММЕТРИЯ НАПРЯЖЕНИЯ, РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ, КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ, УДАРНЫЙ ТОК

Для обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей необходимо корректное понимание и моделирование процессов, происходящих в электрических сетях. Для этого применяются различные методы расчета параметров и режимов работы электрических сетей, которые непосредственно влияют на качество электрической энергии и надежность электроснабжения [1, 2].

Наряду с расчетом установившихся режимов работы электрических цепей практический интерес представляет расчет и анализ переходных процессов в них. Так, например, для выбора электрооборудования необходимо знать максимальное значение тока трехфазного короткого замыкания, которое определяется из расчета переходного

процесса и т.д. [3, 4]

Как известно, переходные процессы в электрических цепях рассчитываются путем составления и решения системы уравнений в интегрально-дифференциальной форме. При этом в трехфазных сетях напряжение источника энергии, как правило, принимается симметричным. Это позволяет упростить расчет и вести его только для одной фазы [5]. Однако в сельских низковольтных распределительных сетях чаще всего напряжение несимметрично. Поэтому для определения переходных токов в такой трехфазной сети приходится решать систему из нескольких уравнений.

Рассмотрим простейшую трехфазную цепь с несимметричной системой напряжений (рис. 1). Для расчета переходных токов в этой цепи нужно составить по законам Кирхгофа и решить систему из трех дифференциальных уравнений.

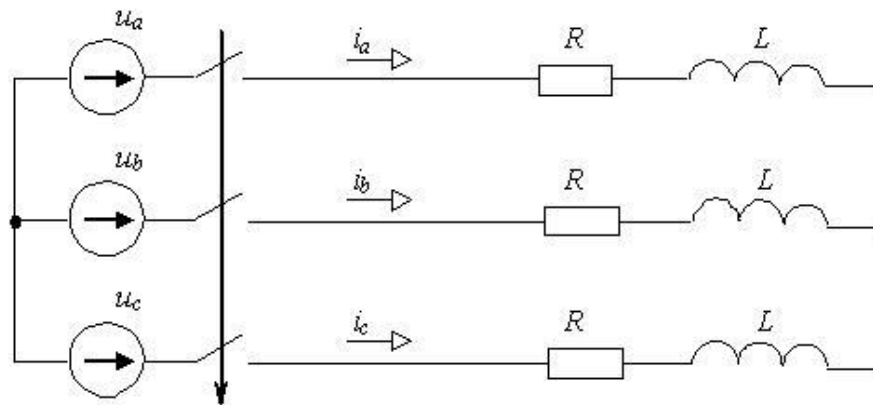


Рис. 1. Схема замещения трехфазной электрической цепи

Уменьшить количество уравнений можно, если представить мгновенное значение напряжения источника питания в виде [6-8]

$$u(t, n) = \sum_{s=1}^N U_{m_s} \cdot \sin(\omega t - s \cdot qn + \phi_s),$$

где U_{m_s} – амплитуда напряжения s -ой симметричной составляющей;

ϕ_s – начальный фазовый сдвиг напряжения s -ой симметричной составляющей;

$$q = \frac{2\pi}{N} \text{ – аналог угловой частоты } \omega ;$$

n – фазная переменная.

В этом случае от схемы замещения, представленной на рис. 1, можно перейти к эквивалентной однофазной схеме замещения (рис. 2).

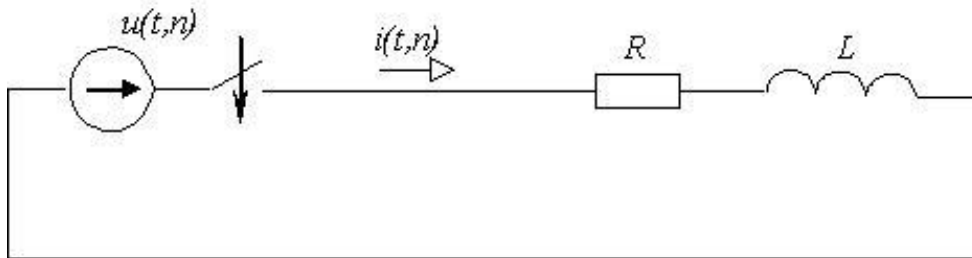


Рис. 2. Схема замещения эквивалентной однофазной электрической цепи

Тогда вместо системы из трех дифференциальных уравнений получаем только одно уравнение

$$u(t, n) = R \cdot i(t, n) + L \cdot \frac{di(t, n)}{dt}.$$

Решением данного уравнения будет функция вида [9, 10]

$$i(t, n) = A \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \sum_{s=1}^{s=2} \frac{U_{m_s}}{Z} \cdot \sin(\omega t - s \cdot qn + \phi_s - \psi),$$

где Z – модуль полного сопротивления;

ψ – аргумент полного сопротивления;

A – постоянная интегрирования.

Постоянная интегрирования A рассчитывается из начальных условий

$$A = i(0, n) - \sum_{s=1}^{s=2} \frac{U_{m_s}}{Z} \cdot \sin(-s \cdot qn + \phi_s - \psi),$$

где $i(0, n)$ – ток в момент времени $t = 0$, рассчитываемый из докоммутационного режима.

Для каждой фазы в отдельности мгновенные значения переходных токов можно получить, если принимать: $qn = 0$ – для первой фазы, $qn = 2\pi/3$ – для второй фазы и $qn = 4\pi/3$ – для третьей фазы.

Далее рассмотрим расчет переходного процесса в трехфазной цепи с трансформатором (рис. 3). Для определения переходных токов в этой цепи нужно составить и решить систему уже из шести дифференциальных уравнений.

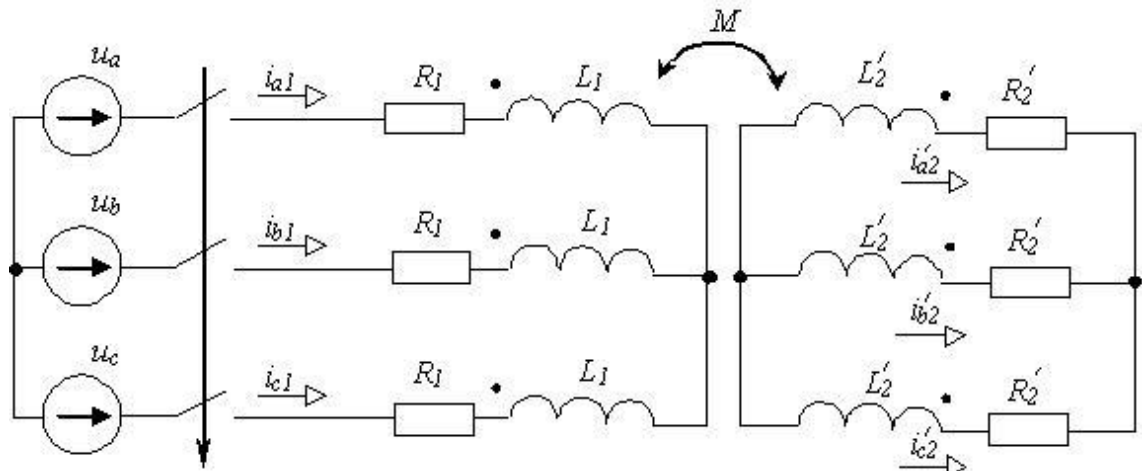


Рис. 3. Схема замещения трехфазной электрической цепи с трансформатором

Однако, если использовать предлагаемую методiku, то можно перейти к следующей схеме замещения (рис. 4).

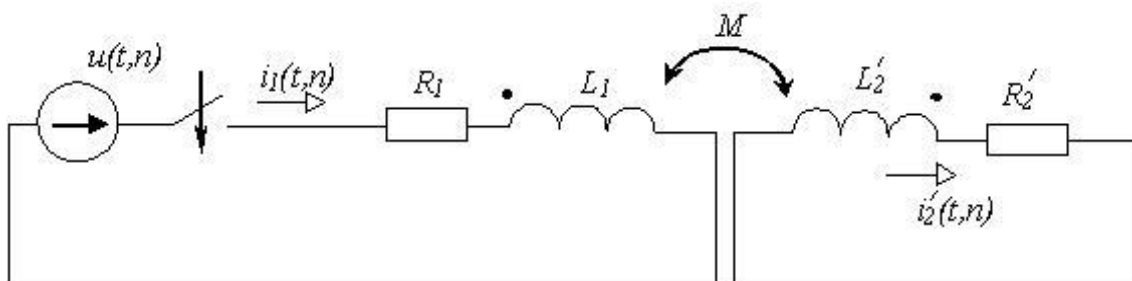


Рис. 4. Схема замещения эквивалентной однофазной электрической цепи с трансформатором

Тогда число контуров и, соответственно, уравнений в системе сократится до двух.

При этом следует отметить, что полученные результаты справедливы для однородной нагрузки. В этом случае линейные дифференциальные уравнения будут с постоянными коэффициентами. Если же нагрузка будет неоднородной, то придется решать дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами $R(n)$ и $L(n)$.

В заключение рассмотрим пример расчета переходного тока в трехфазной электрической цепи с несимметричным напряжением по предлагаемой методике.

ПРИМЕР

Дана простейшая трехфазная электрическая цепь, схема замещения которой приведена на рисунке 1. Параметры схемы замещения следующие: $R = 8 \text{ Ом}$, $L = 0,0191 \text{ Гн}$, $\omega = 314 \text{ рад/с}$. Фазные напряжения источника питания:

$$u_a = 100 \cdot \sin(\omega t) \text{ В}, u_b = 160 \cdot \sin(\omega t - 100^\circ) \text{ В}, u_c = 80 \cdot \sin(\omega t + 150^\circ) \text{ В}.$$

РЕШЕНИЕ

Вначале, используя метод симметричных составляющих [11], разложим мгновенные значения фазных напряжений источника питания на напряжения прямой и обратной последовательности. Так как в предлагаемой цепи нет токов нулевой последовательности, то и напряжение нулевой последовательности можно не определять.

1) Определим мгновенные значения напряжения фазы A в моменты времени:

$$\omega t_{a11} = \omega t_{a21} = 0^\circ \text{ и } \omega t_{a12} = \omega t_{a22} = 90^\circ, u_{a11} = u_{a21} = 100 \cdot \sin(0^\circ) = 0 \text{ В и}$$

$$u_{a21} = u_{a22} = 100 \cdot \sin(90^\circ) = 100 \text{ В}.$$

2) Определим мгновенные значения напряжения фазы B в моменты времени:

$$\omega t_{b11} = 120^\circ \text{ и } \omega t_{b12} = 120^\circ + 90^\circ = 210^\circ, \omega t_{b21} = 240^\circ \text{ и } \omega t_{b22} = 240^\circ + 90^\circ = 330^\circ,$$

$$u_{b11} = 160 \cdot \sin(120^\circ - 100^\circ) = 54,72 \text{ В и } u_{b12} = 160 \cdot \sin(210^\circ - 100^\circ) = 150,35 \text{ В},$$

$$u_{b21} = 160 \cdot \sin(240^\circ - 100^\circ) = 102,85 \text{ В и } u_{b22} = 160 \cdot \sin(330^\circ - 100^\circ) = -122,57 \text{ В}.$$

3) Определим мгновенные значения напряжения фазы C в моменты времени:

$$\omega t_{c11} = 240^\circ \text{ и } \omega t_{c12} = 240^\circ + 90^\circ = 330^\circ, \omega t_{c21} = 120^\circ \text{ и } \omega t_{c22} = 120^\circ + 90^\circ = 210^\circ,$$

$$u_{c11} = 80 \cdot \sin(240^\circ + 150^\circ) = 40 \text{ В} \quad \text{и} \quad u_{c12} = 80 \cdot \sin(330^\circ + 150^\circ) = 69,28 \text{ В},$$

$$u_{c21} = 80 \cdot \sin(120^\circ + 150^\circ) = -80 \text{ В и } u_{c22} = 80 \cdot \sin(210^\circ + 150^\circ) = 0 \text{ В}.$$

Тогда:

$$u_{11} = \frac{u_{a11} + u_{b11} + u_{c11}}{3} = \frac{0 + 54,72 + 40}{3} = 31,57 \text{ В},$$

$$u_{12} = \frac{u_{a12} + u_{b12} + u_{c12}}{3} = \frac{100 + 150,35 + 69,28}{3} = 106,54 \text{ В},$$

$$u_{21} = \frac{u_{a21} + u_{b21} + u_{c21}}{3} = \frac{0 + 102,85 - 80}{3} = 7,62 \text{ В},$$

$$u_{22} = \frac{u_{a22} + u_{b22} + u_{c22}}{3} = \frac{100 - 122,57 + 0}{3} = -7,52 \text{ В.}$$

Окончательно получаем:

$$U_{m1} = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2} = \sqrt{31,57^2 + 106,54^2} = 111,12 \text{ В, } \phi_1 = \arctg \frac{u_{11}}{u_{12}} = 16,5^\circ.$$

$$U_{m2} = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{7,62^2 + (-7,52)^2} = 10,7 \text{ В, } \phi_2 = 180^\circ - \arctg \left| \frac{u_{21}}{u_{22}} \right| = 134,6^\circ.$$

Переходной ток в цепи равен:

$$\begin{aligned} i(t, n) &= A \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \sum_{s=1}^{s=2} \frac{U_{m_s}}{Z} \cdot \sin(\omega t - s \cdot qn + \phi_s - \psi) = \\ &= A \cdot e^{-\frac{8}{0,0191}t} + \frac{111,12}{10} \cdot \sin(\omega t - 1 \cdot qn + 16,5^\circ - 36,87^\circ) + \\ &\quad + \frac{10,7}{10} \cdot \sin(\omega t - 2 \cdot qn + 134,6^\circ - 36,87^\circ) = \\ &= A \cdot e^{-418,85t} + 11,1 \cdot \sin(\omega t - qn - 20,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t - 2 \cdot qn + 97,73^\circ). \end{aligned}$$

Здесь:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом, } \psi = \arctg \frac{\omega \cdot L}{R} = \arctg \frac{6}{8} = 36,87^\circ.$$

Постоянная интегрирования равна:

$$\begin{aligned} A &= i(0, n) - \sum_{s=1}^{s=2} \frac{U_{m_s}}{Z} \cdot \sin(-s \cdot qn + \phi_s - \psi) = \\ &= 0 - 11,1 \cdot \sin(-qn - 20,37^\circ) - 1,07 \cdot \sin(-2 \cdot qn + 97,73^\circ). \end{aligned}$$

Здесь из докоммутационного режима получили $i(0, n) = 0 \text{ А}$.

Мгновенные значения переходных токов для каждой фазы в отдельности получаем следующим образом:

1) принимаем $qn = 0$ – для первой фазы А, тогда

$$\begin{aligned} i_a &= (-11,1 \cdot \sin(-0^\circ - 20,37^\circ) - 1,07 \cdot \sin(-2 \cdot 0^\circ + 97,73^\circ)) \cdot e^{-418,85t} + \\ &\quad + 11,1 \cdot \sin(\omega t - 0^\circ - 20,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t - 2 \cdot 0^\circ + 97,73^\circ) = \\ &= 2,8 \cdot e^{-418,85t} + 11,1 \cdot \sin(\omega t - 20,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t + 97,73^\circ) = \\ &= 2,8 \cdot e^{-418,85t} + 10,64 \cdot \sin(\omega t - 15,26^\circ) \text{ А.} \end{aligned}$$

2) принимаем $qn = 2\pi/3$ – для второй фазы В, тогда

$$\begin{aligned} i_b &= (-11,1 \cdot \sin(-120^\circ - 20,37^\circ) - 1,07 \cdot \sin(-2 \cdot 120^\circ + 97,73^\circ)) \cdot e^{-418,85t} + \\ &+ 11,1 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ - 20,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t - 2 \cdot 120^\circ + 97,73^\circ) = \\ &= 7,73 \cdot e^{-418,85t} + 11,1 \cdot \sin(\omega t^\circ - 140,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t - 142,27^\circ) = \\ &= 7,73 \cdot e^{-418,85t} + 12,17 \cdot \sin(\omega t^\circ - 140,54^\circ) \text{ А.} \end{aligned}$$

3) принимаем $qn = 4\pi / 3$ – для второй фазы С, тогда

$$\begin{aligned} i_c &= (-11,1 \cdot \sin(-240^\circ - 20,37^\circ) - 1,07 \cdot \sin(-2 \cdot 240^\circ + 97,73^\circ)) \cdot e^{-418,85t} + \\ &+ 11,1 \cdot \sin(\omega t - 240^\circ - 20,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t - 2 \cdot 240^\circ + 97,73^\circ) = \\ &= -10,53 \cdot e^{-418,85t} + 11,1 \cdot \sin(\omega t^\circ - 260,37^\circ) + 1,07 \cdot \sin(\omega t - 22,27^\circ) = \\ &= -10,53 \cdot e^{-418,85t} + 10,57 \cdot \sin(\omega t^\circ + 94,7^\circ) \text{ А.} \end{aligned}$$

В дальнейшем из полученных выражений аналитически или графически можно определить максимальное значение переходного тока в фазах и правильно выбрать электрооборудование с учетом несимметрии напряжения в сети, улучшая показатели надежности сельских электрических сетей.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет определять мгновенные значения токов короткого замыкания, в том числе значения установившихся и ударных токов к.з., с учетом несимметрии напряжения.

Список использованных источников:

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах – М.: «Энергия», 1970. – 520 с.
2. Мартынов А.П., Бирюков М.И., Арженовсков А.М. Исследование переходных процессов в электрических сетях // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – № 12 (38) – С. 150-155.
3. ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ».
4. Юндин М.А. Токовая защита электроустановок. Учебное пособие. 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2011. – 288 с.
5. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; Под ред. И.П. Крюčkова и В.А. Старшинова. – Москва: Издательский центр Академия, 2006. – 416 с.

6. Кобзистый О.В. О расчете несимметричных режимов работы многофазных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика – 2014. – № 4.

7. Мартынов А.П., Мартынов А.П., Головинов В.В., Панченко С.В. Расчет переходных процессов при несимметричных и несинусоидальных режимах работы электрических сетей [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/3/st_332.pdf

8. Мартынов А.П., Постельный В.Е., Бегиджонов Д.Д. Зависимость ударного тока короткого замыкания от несимметрии // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. – 2023. – № 1 – С. 114-119.

9. Кобзистый О.В., Нога И.Г. О расчете переходных процессов в электрических сетях с несимметричным напряжением // Инновации в сельском хозяйстве – 2014. – №4 (9).

10. Мартынов А.П., Постельный В.Е., Бегиджонов Д.Д. Программно-вычислительный комплекс для расчета токов короткого замыкания // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. – 2023. – № 1 – С. 93-98.

11. ГОСТ Р 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Цитирование:

Мартынов А.П., Головинов В.В., Панченко С.В. Определение мгновенных значений токов коротких замыканий в электрических сетях с несимметричным напряжением [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 4. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/4/st_409.pdf