

Применение схемного моделирования для расчета режимов электрических систем переменного тока

Предлагается методика применения схемного моделирования для расчета стационарных режимов электрических систем переменного тока, для чего построены схемные модели основных электротехнических элементов, источников и трансформаторов. Показана возможность использования для этих целей программных средств расчета цепей постоянного тока.

Введение

Расчеты установившихся режимов электрических систем необходимы при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения. Они нужны также для оценки эффективности регулирования напряжения, расчета потерь энергии, устойчивости и оптимизации режимов. Поэтому такие расчеты являются актуальной задачей современной электроэнергетики [1]. Методы расчета установившихся режимов достаточно хорошо разработаны и используются в практике [2]. Существует ряд промышленных компьютерных программ для подобных расчетов [3]. Трудности использования системных программ обусловлены специфическими особенностями построения систем электроснабжения промышленных предприятий. Например, применение программного комплекса Simulink не позволяет выполнить анализ установившихся аварийных режимов в электрических системах из-за наличия нескольких влияющих друг на друга управляемых источников. Кроме того, известные мощные пакеты программ весьма обширны и дорогостоящи, и их использование даже на правах аренды затруднительно. Поэтому во многих случаях востребованы более простые и менее универсальные методики расчета стационарных режимов электрических систем. Например, в Томском политехническом университете проводятся разработки методики гибридного моделирования электроэнергетических систем, а также моделей электрических систем в фазных координатах [4]. Гибридные комплексы представляют специализированные параллельные многопроцессорные программно-технические системы реального времени. В связи с этим они достаточно громоздки, энергоемки и дороги. В Запорожском национальном техническом университете создана программа COLO-complex [5], предназначенная для расчета электрических цепей переменного тока (в том числе и содержащих алгебраические петли) и реализованная в среде MatLab.

Наиболее предпочтительным для расчета установившихся режимов в электрических цепях является метод схемного (схемотехнического, электрического) моделирования [6].

Метод базируется на расчете схемной модели электрической системы. Схемная модель строится на основе электрических эквивалентных схем замещения элементов или участков системы. Расчет схемной

модели позволяет рассчитать стационарные и переходные электрические или электромагнитные процессы в электрической системе.

Исследования по схемному моделированию проводятся в Южно-Российском государственном техническом университете [7], Московском энергетическом институте (техническом университете) [8], Запорожском и Севастопольском национальных технических университетах [5, 9]. В отличие от имитационного моделирования (MatLab SimPowerSystem), которое оперирует с готовыми блоками-моделями электротехнических устройств (генераторами, двигателями, трансформаторами и т. п.), схемное моделирование позволяет использовать модели не только отдельных элементов, но и целых участков системы и отображать электрические, магнитные, механические и другие переменные состояния системы. Кроме того, оно более дешево, так как может выполняться простыми программами (подготовленными, например, в среде PASCAL) или с использованием общедоступного программного комплекса, как EWB [10].

Целью статьи является обоснование подхода к анализу стационарных режимов электрических систем переменного тока, основанного на применении метода схемного моделирования.

Материалы исследования

Построим комплексные схемные модели основных элементов в режиме переменного тока. Из соотношения для комплексного сопротивления:

$$(r + jx) \cdot (I' + jI'') = U' + jU'' \quad (1)$$

после отделения вещественных и мнимых частей получаем:

$$rI' - xI'' = U'; rI'' + xI' = U'', \quad (2)$$

где r, x – активные и реактивные сопротивления; I', U', I'', U'' – вещественные и мнимые составляющие тока и напряжения. Последним соотношениям можно поставить в соответствие несколько схемных моделей комплексного сопротивления. Эти модели представляют пары элементов: сопротивлений, проводимостей, управляемых источников напряжения и тока. На рис. 1 изображено по одной из возможных

моделей для сопротивления, индуктивности и емкости в смешанных переменных, (которые связывают вещественные части напряжений и мнимые части токов с мнимыми частями напряжений и вещественными частями токов). Подобный же вид имеют схемные модели, построенные на базе линейной комплексной проводимости.

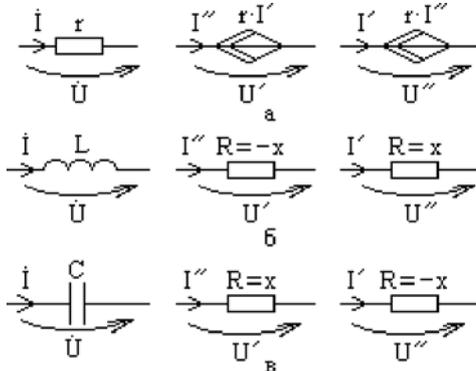


Рис. 1. Схемные модели в смешанных переменных: а – резистора; б – индуктивности; с – емкости

Из четырех видов линейных управляемых источников рассмотрим источник напряжения, управляемый током:

$$\dot{E} = \underline{k} \dot{I} \text{ или } E' + jE'' = (k' + jk'') \cdot (I' + jI''). \quad (3)$$

Одна из возможных схемных моделей в смешанных переменных изображена на рис. 2, где обозначены:

$$\left. \begin{aligned} E' &= k'I' - k''I'' \\ E'' &= k''I' + k'I'' \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Аналогично строятся схемные модели для других видов управляемых источников и элементов со взаимной индукцией.

Приведем одну из возможных схемных моделей идеализированного трансформатора с комплексным коэффициентом трансформации:

$$\dot{U}_1 = \underline{n} \dot{U}_2; \dot{I}_2 = -\underline{n}^* \dot{I}_1, \quad (5)$$

где \underline{n}^* – сопряженный коэффициент. Выражения по вещественным и мнимым частям имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_1' &= n'U_2' - n''U_2'' \\ I_2' &= -n'I_1' - n''I_1'' \\ U_1'' &= n'U_2'' + n''U_2' \\ I_2'' &= -n'I_1'' + n''I_1' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

а схемная модель в смешанных переменных изображена на рис. 3, где обозначены источники напряжения: $E1 = U_1'$, $E2 = U_1''$ и источники тока: $J1 = -I_2'$, $J2 = -I_2''$.

Для преобразования идеализированного трансформатора к реальному целесообразно параллель-

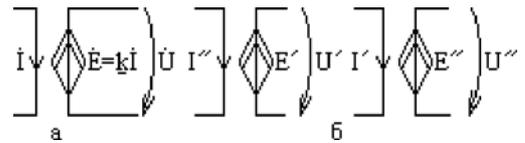


Рис. 2. Источник напряжения, управляемый током, (а) и его схемная модель (б)

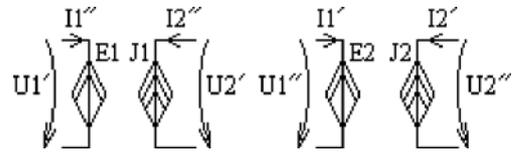


Рис. 3. Схемная модель идеализированного трансформатора

но первичной обмотке без нарушения режима подключить сопротивления \underline{Z} и $-\underline{Z}$ согласно рис. 4, а. На возможность такого подхода указывается, например, в [11]. Напряжения обмоток с учетом этого описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{Z} \dot{I}_Z = \underline{Z} \dot{I}_{01} + \frac{\underline{Z}}{\underline{n}^*} \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 = \frac{\underline{Z}}{\underline{n}} \dot{I}_{01} + \frac{\underline{Z}}{\underline{n}^2} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Полагая для определенности сопротивление чисто реактивным: $\underline{Z} = jx$ и учитывая схемную модель управляемого источника на рис. 2, получим модифицированную схемную модель трансформатора, изображенную на рис. 4, б, где обозначены управляемые источники напряжения в виде:

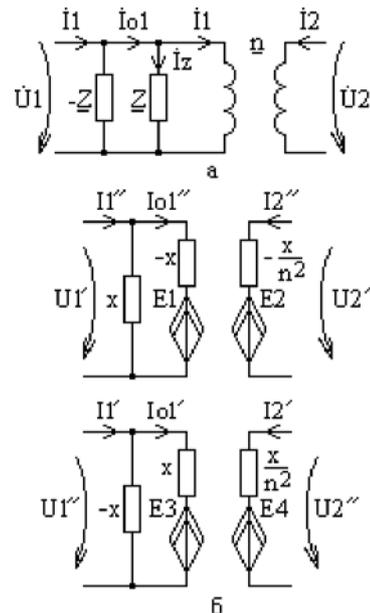


Рис. 4. Трансформатор, преобразованный к реальному, (а) и его схемная модель (б)

$$\left. \begin{aligned} E1 &= -N''I'_2 - N'I''_2; \\ E2 &= N''I'_{01} - N'I''_{01}; \\ E3 &= N'I'_2 - N''I''_2; \\ E4 &= N'I'_{01} + N''I''_{01}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В этих выражениях:

$$N' = \frac{n'x}{n^2} \text{ и } N'' = \frac{n''x}{n^2}. \quad (9)$$

Аналогично строятся и другие схемные модели трансформатора.

Объединяя эти и подобные им модели электротехнических элементов для режима переменного тока по вещественным и мнимым составляющим в соответствии с общей схемой системы, получаем схемную модель системы в виде двух схем постоянного тока, связанных между собой управляемыми источниками. При объединении нужно использовать схемные модели элементов в одинаковых сочетаниях переменных (например, как на показанных ранее рисунках). Расчет этих схем с использованием упомянутых простых программных средств расчета цепей постоянного тока позволяет получить вещественные и мнимые части токов и напряжений электрической системы.

Обсуждение результатов

Для иллюстрации рассмотрим расчет несимметричного установившегося режима, возникшего вследствие коротких замыканий в электрической системе.

Хотя такие аварийные режимы на практике кратковременны, подобные расчеты весьма актуальны в электроэнергетике. К числу задач, для решения которых необходимы такие расчеты, относятся: сопоставление, оценка и выбор схемы электрических соединений; выявление условий поведения потребителей при аварийном режиме; выбор электрических аппаратов и проверка их на отключающую способность; проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики. Основным подходом к проведению этих расчетов является применение комплексных схем замещения (для последующего использования метода симметричных составляющих [2, 3, 11]). При нарушении симметрии в нескольких точках системы соответствующие схемы по отдельным составляющим объединяются в одну комплексную схему замещения с помощью идеализированных трансформаторов, дополненных фазосдвигающими устройствами двухстороннего действия (которые обеспечивают поворот тока и напряжения на 120 эл. град.). При этом серьезным препятствием на пути анализа является необходимость создания эффективных схемных реализаций указанных устройств и их моделирования [3].

Ниже показана возможность применения схемного моделирования для расчета режима короткого замыкания в трехфазной цепи. В частности, на рис. 5 изображена линия, соединяющая генератор Г с мощной сетью С. В точках К и Л показаны короткие замы-

кания на «землю»: в точке К – для фазы А, в точке Л – для фазы В [11]. На рисунке обозначены номера участков: 1 – генератор Г; 2, 3, 4 – участки линии; 5 – трансформатор ТС. В точке К граничные условия, приведенные к фазе А, имеют вид: $\dot{I}_{k1} = \dot{I}_{k2} = \dot{I}_{k0}$ и $\dot{U}_{k1} + \dot{U}_{k2} + \dot{U}_{k0} = 0$. Аналогично, в точке Л получаем: $\dot{I}_{L1} = a^2 \dot{I}_{L2} = a \dot{I}_{L0}$ и $\dot{U}_{L1} + a^2 \dot{U}_{L2} + a \dot{U}_{L0} = 0$,

где $a = \exp\left(\frac{j2\pi}{3}\right)$; $\dot{U}_{k1}, \dot{I}_{k1}, \dot{U}_{k2}, \dot{I}_{k2}, \dot{U}_{k0}, \dot{I}_{k0}$ – составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей напряжения и тока короткого замыкания фазы А в точке К соответственно; $\dot{U}_{L1}, \dot{I}_{L1}, \dot{U}_{L2}, \dot{I}_{L2}, \dot{U}_{L0}, \dot{I}_{L0}$ – то же в точке Л. Схемы последовательностей при построении комплексной схемы объединяются в точке К непосредственно, а в точке Л – с помощью идеализированных трансформаторов с коэффициентами трансформации: a^2 – в схеме обратной последовательности или a – в схеме нулевой последовательности. Отметим, что для идеализированного трансформатора с коэффициентами $\underline{n} = a$ или $\underline{n} = a^2$, отношения напряжений и токов отличаются лишь знаком:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = -\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \underline{n}. \quad (10)$$

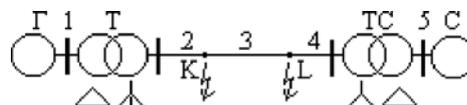


Рис. 5. Одновременное короткое замыкание в электрической системе

На рис. 6 изображена комплексная схема системы, на которой обозначены: $x_{11} = x_{1Г} + x_{1Т}$ и $x_{21} = x_{2Г} + x_{2Т}$ – суммарные реактивности генератора Г и трансформатора Т прямой и обратной последовательностей соответственно; x_{01} – реактивность трансформатора нулевой последовательности; $x_{12}, x_{22}, x_{02}, x_{13}, x_{23}, x_{03}, x_{14}, x_{24}$ – реактивности участков линии соответствующих последовательностей; x_{15}, x_{25} – реактивности трансформатора ТС. Отрицательный знак в отношениях токов отображен в направлениях токов во вторичных обмотках. Заменяя реактивные (индуктивные) сопротивления в комплексной схеме в соответствии с рис. 1, б, трансформаторы – в соответствии с рис. 4 и принимая: $\dot{E}_1 = E'_1$ и $\dot{E}_2 = E'_2$, – получаем схемную модель системы в режиме одновременного короткого замыкания в смешанных переменных, изображенную на рис. 7. На этом рисунке обозначены управляемые источники напряжения:

$$\begin{aligned} E3 &= 0,5x \cdot (I''_{L1} + \sqrt{3}I'_{L1}), & E4 &= 0,5x \cdot (I''_{L20} - \sqrt{3}I'_{L20}), \\ E5 &= -0,5x \cdot (I'_{L1} - \sqrt{3}I''_{L1}), & E6 &= -0,5x \cdot (I'_{L20} + \sqrt{3}I''_{L20}), \\ E8 &= 0,5x \cdot (I''_{L00} + \sqrt{3}I'_{L00}), & E10 &= -0,5x \cdot (I'_{L00} - \sqrt{3}I''_{L00}). \end{aligned}$$

– где источники $E7, E9$ отличаются от $E3, E5$ лишь обратными знаками перед $\sqrt{3}$.

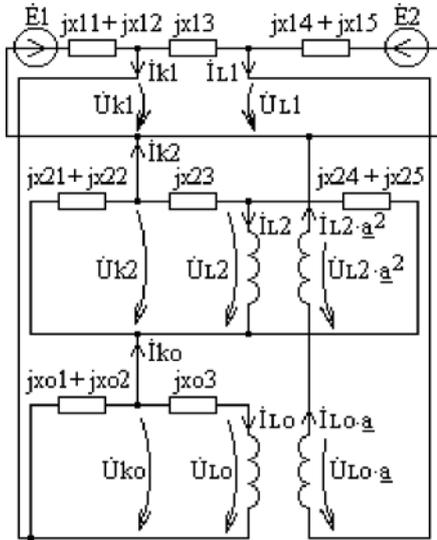


Рис. 6. Комплексная схема замещения

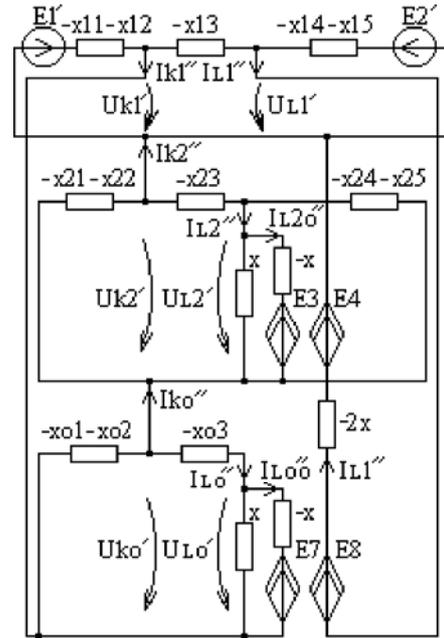
Построенная схемная модель представлена цепью постоянного тока, обе части которой связаны через управляемые источники. Расчет этой модели может быть выполнен любым программным средством расчета цепей постоянного тока (например, EWB). При численных данных из [11]: $E1 = 1,122$; $E2 = 1$; $x11 = 0,268$; $x12 = x22 = 0,091$; $x13 = x23 = 0,1$; $x14 = x24 = 0,15$; $x15 = x25 = 0,11$; $x21 = 0,214$; $x01 = 0,11$; $x02 = 0,182$; $x03 = 0,2$; $x = 1$ (все в относительных единицах) получаем составляющие токов короткого замыкания фазы А: $\dot{I}_{k1} = 0,318 - j1,922$. С учетом этого ток фазы А равен: $\dot{I}_a = 3\dot{I}_{k1} = 5,845e^{-j80^\circ}$; для фазы В справедливо: $\dot{I}_{B1} = \dot{I}_{B2} = \dot{I}_{B0} = -1,151 + j1,037$, а ток фазы В равен: $\dot{I}_B = 3\dot{I}_{B1} = 3\dot{I}_{L1}a^2 = 4,649e^{j138^\circ}$. Это хорошо совпадает (с погрешностью менее $\pm 1\%$) с результатами расчета, выполненными для проверки по непосредственному математическому описанию режима системы в среде MathCad.

В заключение отметим, что при использовании предлагаемого подхода к расчету несимметричных режимов электрических систем нет необходимости определять эквивалентные источники напряжения и сопротивления в схемах разных последовательностей, а также рассчитывать расширенные присоединенные схемы, благодаря чему снижается общая трудоемкость расчета.

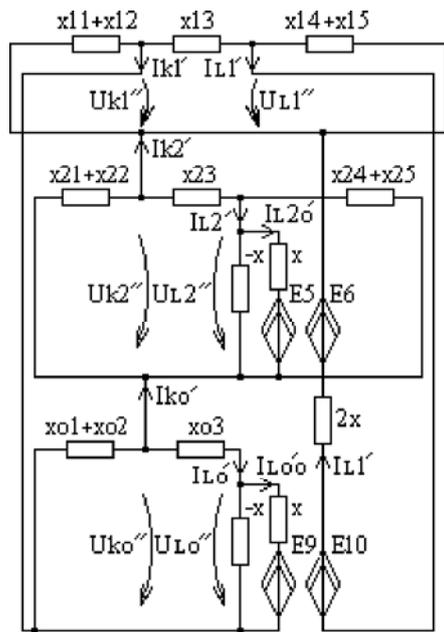
Выводы

1. Предложенная методика предназначена для применения схемного моделирования при расчетах стационарных режимов электрических систем переменного тока.

2. Разработанные схемные модели основных электротехнических элементов, управляемых источников и трансформаторов позволяют создать на их основе общую схемную модель исследуемой системы (состоя-



а)



б)

Рис. 7. Схемная модель системы в режиме одновременного короткого замыкания:

- а – для вещественных частей напряжений и мнимых частей токов;
- б – для мнимых частей напряжений и вещественных частей токов

щую из двух схем постоянного тока, отображающих связи между вещественными и мнимыми частями токов и напряжений для стационарного режима системы).

3. Достоинством предлагаемой методики является упрощение расчетов, так как не требуется предварительного определения эквивалентных параметров схем последовательностей или расширенных схем, а сам расчет может быть выполнен простыми про-

граммными средствами расчета цепей постоянного тока (в связи с чем отпадает необходимость применения дорогостоящих специализированных программ анализа электрических систем).

Перечень ссылок

1. Буслова Н. В. Электрические системы и сети / Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. Н. Денисенко, В. С. Перхач. – К. : Вища шк., 1986. – 584 с.
2. Зевеке Г. В. Основы теории цепей. Ученик для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М. : Энергия, 1975. – 752 с.
3. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков, В. В. Жуков, Ю. П. Кузнецов ; под ред. Б. Н. Неклепаева. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 152 с.
4. Гусев А. С. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения / А. С. Гусев // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 92–95.
5. Тиховод С. М. Совершенствование методики расчета установившихся процессов в электрических цепях переменного тока / С. М. Тиховод // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 2. – С. 29–33.
6. Кардашев Г. А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств / Г. А. Кардашев. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2002. – 260 с.
7. Астахов В. И. Моделирование цепями Кирхгофа электротехнических устройств / В. И. Астахов // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1998. – №5. – С. 95–108.
8. Антипенский Р. В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. – М. : Техносфера, 2007. – 128 с.
9. Канов Л. Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока / Л. Н. Канов // Электротехника та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С. 5–9.
10. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC / В. И. Карлащук. – М. : Изд-во «Солон-Р», 2001. – 726 с.
11. Чернин А. Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах / А. Б. Чернин, С. Б. Лосев. – М.: Энергия, 1971. – 440 с.

Поступила в редакцию 10.06.08 г.

После доработки 30.12.08 г.

Запропоновано методику застосування схемного моделювання для розрахунку стаціонарних режимів електричних систем змінного струму, для чого побудовані схемні моделі основних електротехнічних елементів, джерел та трансформаторів. Достойнство методики складається в спрощенні розрахунків за рахунок скорочення обчислень і застосування простих програмних засобів.

The method of scheme design application is offered for the calculation of the stationary modes of the electric systems of alternating current, for this purpose the scheme models of basic electrical engineering elements, sources and transformers are built. It is shown the possibility of the purposed use of programmatic facilities of the direct-current chain calculation.

УДК 621314

В. А. Волков

Источник электропитания, снижающий ток в нейтрале трехфазной сети переменного напряжения

Предложена и исследована схема источника электропитания, снижающего ток в нейтрале трехфазной сети переменного напряжения.

В связи с происшедшим в последние годы заметным удорожанием энергоносителей (в том числе электроэнергии) в Украине и во всем мире стала чрезвычайно острой проблема энергосбережения. При этом одним из возможных известных путей уменьшения потерь электроэнергии в трехфазных электрических сетях переменного тока является симметрирование фазных сетевых токов [1, 2]. Поэтому разработка и исследование новых симметрирующих устройств (СУ), решающих данную задачу, актуально и востребовано практикой.

Большинство из известных СУ создаются на основе конденсаторов, реакторов или трансформаторов,

условно разделяясь (в зависимости от вида своих схем) на две группы: с электрическими и электромагнитными связями [1]. Основная часть таких устройств, рассмотренных в [1], обеспечивает симметрирование токов только в трехфазных трехпроводных (без нулевого провода) сетях переменного напряжения. Опираясь на свои собственные исследования (и подтверждая их исследованиями других авторов [3]), также заметим, что, к сожалению, такой же ограниченной областью применения на практике пока характеризуются наиболее современные и эффективные СУ, создаваемые на основе активного фильтра [2].

В известной научно-технической и патентной ли-

© В. А. Волков 2009 г.