

ся. Так, при токах дугогасящих реакторов соответственно 50, 20 и 10 А, максимальный контрольный ток при автотрансформаторной связи составляет соответственно 1,37, 1,51 и 1,64 А, в то время как при трансформаторной связи 1,28 А.

Увеличение контрольного тока достигается без увеличения расхода трансформаторной стали и меди, т. к., *во-первых*, не меняются размеры магнитопровода, а, *во-вторых*, сечение проводов выбирается из условия заполнения неизменной площади ок-

на магнитопровода с практически одинаковыми коэффициентами заполнения.

Возможность увеличения контрольного тока именно при сравнительно небольших значениях тока дугогасящих реакторов имеет большое практическое значение для повышения надежности работы защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов, работающих в укрупненном блоке на одну обмотку низкого напряжения повышающего трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2268524 РФ. МПК⁷ H02H 3/16. Устройство для защиты от замыканий в сетях с компенсацией емкостного тока / Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, С.М. Юдин. Приор. 17.08.2004; Опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2.
2. Пат. 2286637 РФ. МПК⁷ H02H 7/06. Устройство для селективной защиты на землю в обмотке статора генераторов, работающих в укрупненном блоке / Р.А. Вайнштейн, А.М. Наумов, В.В. Шестакова, С.М. Юдин. Приор. 29.07.2005, Опубл. 27.10.2006 Бюл. № 30.
3. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. Собрание сочинений Мандельштама Л.И. – Т. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 325 с.
4. Вайнштейн Р.А., Гетманов В.Т., Пушков А.П. и др. Стопроцентная защита от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС // Электрические станции. – 1972. – № 2. – С. 41–44.

Поступила 04.05.2008 г.

УДК 621.311.016.001.24

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВЕТВИ С ЭДС

С.Г. Слюсаренко, Л.Ю. Костюк

Томский политехнический университет
E-mail: ssg@tpu.ru

Предлагается универсальный алгоритм расчета токов трехфазного короткого замыкания на основе итерационного преобразования электрических схем без приведения параметров к базисным условиям и с сохранением энергетического баланса для исходных и эквивалентных моделей.

Введение

В электроэнергетике расчеты режимов электрических схем методом преобразования широко применяются при моделировании коротких замыканий (КЗ). Преобразования выполняются на расчетных схемах, у которых параметры узлов и ветвей приведены к одним базисным условиям. Последовательное упрощение схем осуществляется путем эквивалентирования последовательно и параллельно соединенных ветвей, преобразований соединений ветвей в треугольник в соединение звездой и т. д. Формализация такой процедуры требует разработки и реализации сложных алгоритмов топологического анализа графов и выбора наилучшей траектории их преобразования. Главным недостатком таких преобразований является то, что в общем случае мощности источников и приемников энергии в исходной схеме не равны соответствующим мощностям в эквивалентной схеме [1].

В данной статье предлагается универсальный алгоритм расчета токов трехфазного КЗ на основе

итерационного преобразования электрических схем без приведения параметров к базисным условиям с сохранением энергетического баланса для исходных и эквивалентных моделей. Последнее обеспечивается расчетом режима линейной электрической схемы. Показан пример реализации одной итерации для решения обозначенной задачи на простой электрической схеме. Детали ключевых позиций алгоритма поясняются на примере обобщенного узла расчетной схемы.

Формирование информационного базиса для моделирования трехфазного короткого замыкания

Под информационным базисом подразумеваются сведения, необходимые для решения поставленной задачи. К их числу относятся графическая и параметрическая модели электрической системы, позволяющие рассчитать исходный установившийся режим. По его параметрам формируются сверхпереходные эквиваленты с сопротивлениями и источниками ЭДС для синхронных и асинхрон-

ных машин, комплексных нагрузок. Помимо этого нужны сведения о параметрах эквивалентов электрических систем, участвующих в питании интересующей нас локальной части энергосистемы.

Завершается подготовка к расчету режима трехфазного замыкания указанием места его нахождения.

Алгоритм расчета токов трехфазного КЗ

1. Выполняется нумерация узлов расчетной схемы методом вширь. При этом первый номер присваивается узлу – месту КЗ; последний узел имеет номер N .
2. Организуется цикл итераций с контролем предельно допустимого их числа.

3. Внутри цикла итераций организуется цикл по узлам, в котором производится исключение узлов в последовательности $N, N-1, \dots, 2$. Схема этой процедуры на примере трехузловой сети приведена на рис. 1.

4. См. рис. 1.

Этапы процедуры исключения обобщенного узла приведены на рис. 2.

Ветвь с параметрами $\underline{Z}_{э\text{пр}i}$ и $\underline{E}_{э\text{пр}i}$ формируется в момент, когда узел i становится расчетным. Она является эквивалентом ветвей, приспособованных от узлов $j, j > i$, и ветви с параметрами \underline{Z}_i и \underline{E}_i , являющейся, в свою очередь, сверхпереходной моделью одного генератора или двигателя или эквивалентом

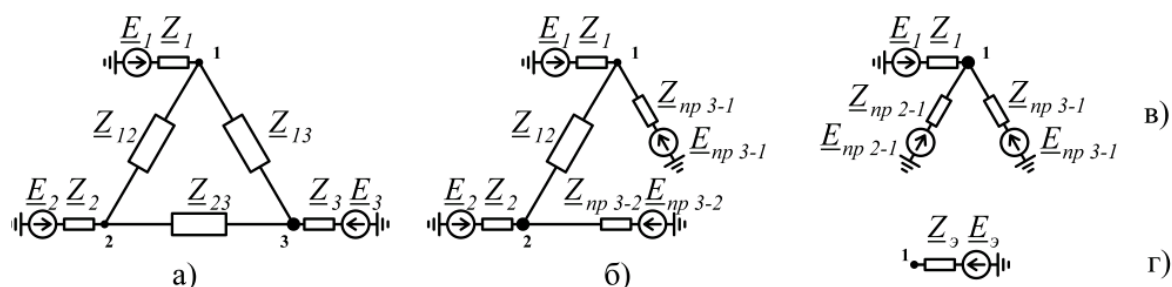


Рис. 1. Схема исключения узлов: а) исходная схема; б, в) результат исключения узлов № 3 и 2; г) результирующий эквивалент сети

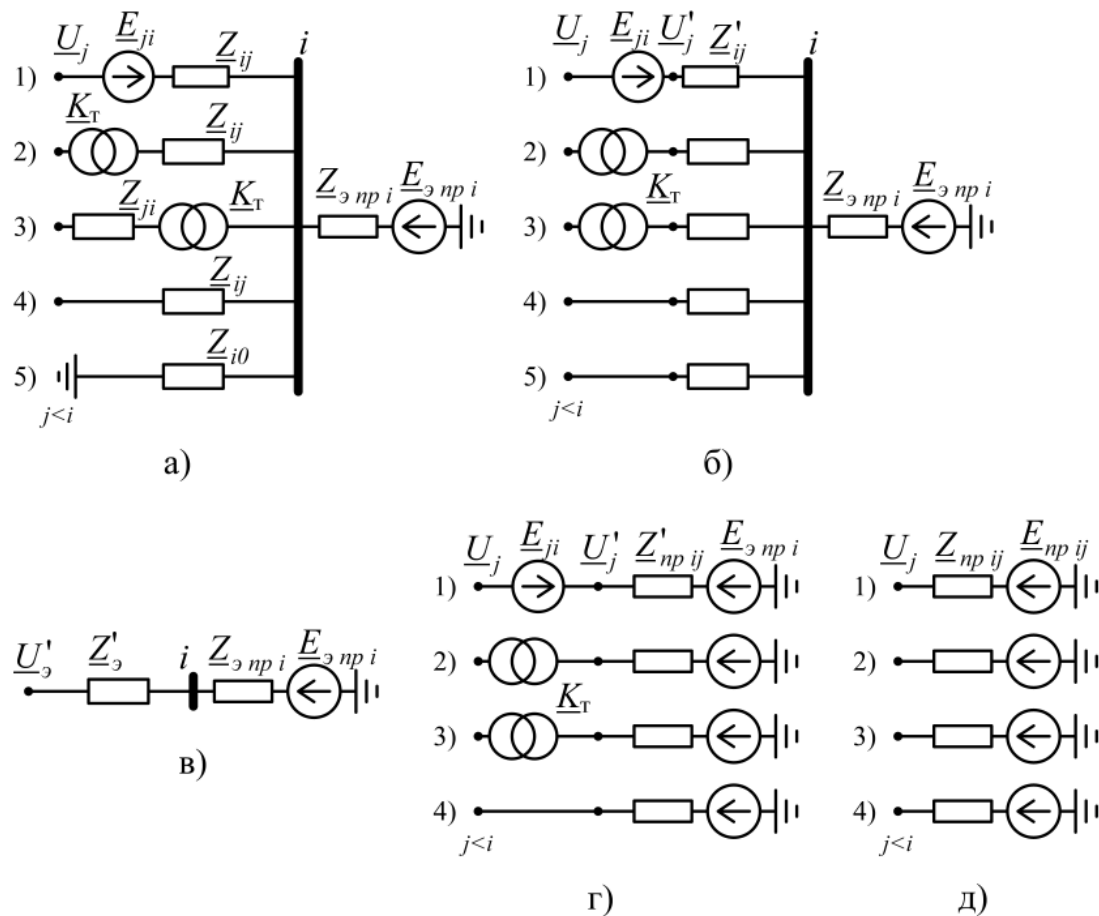


Рис. 2. Процедура исключения обобщенного узла i

нескольких генераторов или двигателей или эквивалентом комплексной нагрузки.

Ветви с узлами $j < i$ пронумерованы для удобства их представления. Так, ветвь № 1 моделирует вторичную обмотку выносного трансформатора (линейного регулятора). Ветви № 2 и 3 – силовые трансформаторы, примыкающие к узлу i , соответственно, сторонами высокого и низкого напряжения (коэффициент трансформации $K_T > 1$). Ветвь № 4 моделирует продольное сопротивление П-образной схемы замещения линии электропередачи. Ветвь № 5 представляет результирующую проводимость на шину нулевого потенциала, включающую собственную узловую проводимость и поперечные проводимости схем замещения ветвей, примыкающих к узлу i .

Первым шагом исключения расчетного узла i является приведение параметров ветвей $i-j, j < i$ к ступени напряжения узла i . В результате этого шага исходная схема расчетного узла, рис. 2, а, преобразуется в схему рис. 2, б. Ниже приводятся формулы приведения параметров для различных типов ветвей:

- 1) $\underline{U}'_j = \underline{U}_j + \underline{E}_{ji}, \quad \underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}_{ij};$
- 2) $\underline{U}'_j = \underline{U}_j \cdot K_T, \quad \underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}_{ij};$
- 3) $\underline{U}'_j = \underline{U}_j / K_T, \quad \underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}_{ji} / K_T^2;$
- 4) $\underline{U}'_j = \underline{U}_j, \quad \underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}_{ij};$
- 5) $\underline{U}'_j = 0, \quad \underline{Z}'_{ij} = \underline{Z}_{i0}.$

Вторым шагом является получение узлового эквивалента (рис. 2, в), необходимого для определения напряжения в узле i :

$$\underline{U}'_i = \frac{1}{\underline{Y}'_i} \sum_{j < i} \frac{\underline{U}'_j}{\underline{Z}'_{ij}}, \quad \text{где } \underline{Y}'_i = \frac{1}{\underline{Z}'_i} = \sum_{j < i} \frac{1}{\underline{Z}'_{ij}}.$$

Вычисляем напряжение в узле i :

$$\underline{U}_i = \underline{U}'_i + \underline{I}_i \cdot \underline{Z}'_{ij},$$

где $\underline{I}_i = (\underline{E}_{\text{эпр}i} - \underline{U}'_i) / (\underline{Z}'_{\text{эпр}i} + \underline{Z}_{\text{эпр}i})$.

На третьем шаге определяются значения сопротивлений ветвей, приспособиваемых от узла i к узлам с напряжением $\underline{U}'_j, j < i$, являющиеся результатом исключения узла i :

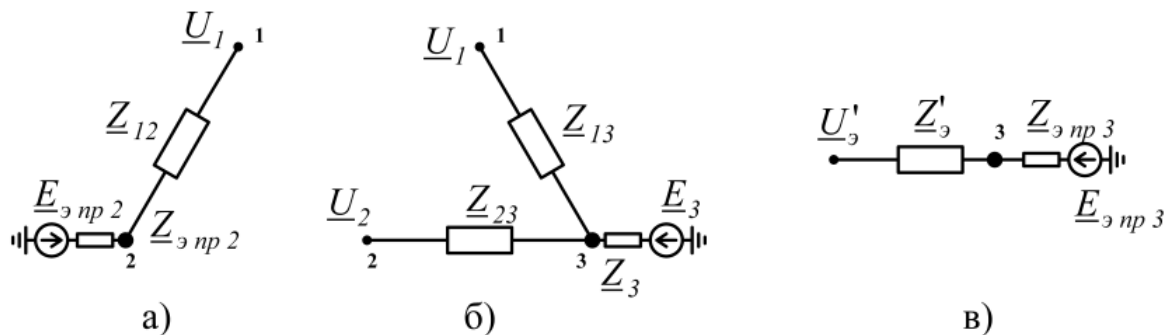


Рис. 3. Схема уточнения напряжений: а) в узле № 2; б, в) в узле № 3

$$\underline{Z}'_{\text{пр}ij} = (\underline{E}_{\text{эпр}i} - \underline{U}'_j) / \underline{I}'_{ij},$$

где $\underline{I}'_{ij} = \frac{\underline{U}_i - \underline{U}'_j}{\underline{Z}'_{ij}}$ (см. рис. 2, б).

Четвертый шаг является завершающим в процедуре исключения расчетного узла i и сводится к приведению параметров ветвей, приспособиваемых к узлам $j, j < i$ к соответствующим ступеням напряжений (рис. 2, д):

- 1) $\underline{Z}_{\text{пр}ij} = \underline{Z}'_{\text{пр}ij}, \quad \underline{E}_{\text{пр}ij} = \underline{E}_{\text{эпр}i} - \underline{E}_{ji};$
- 2) $\underline{Z}_{\text{пр}ij} = \underline{Z}'_{\text{пр}ij} / K_T^2, \quad \underline{E}_{\text{пр}ij} = \underline{E}_{\text{эпр}i} / K_T;$
- 3) $\underline{Z}_{\text{пр}ij} = \underline{Z}'_{\text{пр}ij} \cdot K_T^2, \quad \underline{E}_{\text{пр}ij} = \underline{E}_{\text{эпр}i} \cdot K_T;$
- 4) $\underline{Z}_{\text{пр}ij} = \underline{Z}'_{\text{пр}ij}, \quad \underline{E}_{\text{пр}ij} = \underline{E}_{\text{эпр}i}.$
5. После выхода из цикла исключения узлов открывается цикл по узлам, в котором уточняются значения напряжений узлов в последовательности 2,3,...N. Этапы уточнения напряжения обобщенного узла совпадают с тремя этапами процедуры исключения обобщенного узла, рис. 2, а–в. На рис. 3 показана схема уточнения напряжений для трехузловой сети.
6. См. рис. 3.
7. После выхода из цикла уточнений напряжений осуществляется проверка выполнения заданной точности расчета режима КЗ. Если заданная точность достигнута, итерации завершаются.
8. Формируется отчет.

Заключение

Представленный алгоритм итерационного расчета трехфазного КЗ позволяет более детально учитывать участие электрических машин в подпитке КЗ, нежели метод наложения аварийного режима на исходный.

Создаваемый эквивалент сети, являющийся эквивалентом схемы для токов прямой последовательности, удовлетворяющий энергетическому балансу для исходных и эквивалентных моделей, может использоваться при расчете несимметричных КЗ в этой же точке.

Используя возможность получения эквивалентов схем для токов обратной и нулевой последовательностей на основе алгоритма, изложенного в [3], представляется возможным формировать комплексную схему, отвечающую виду несимметричного КЗ, и определить напряжения всех последовательностей. Используя значения этих напряжений в качестве ба-

зисов в соответствующих схемах замещения можно получить распределение токов и напряжений.

Изложенный метод не требует приведения параметров к базисным условиям, легко программируется и удобен для пользователей. Данный алгоритм может быть адаптирован для моделирования гидравлических режимов трубопроводных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 528 с.
3. Слюсаренко С.Г., Костюк Л.Ю. Расчет нормальных установившихся режимов электрических систем двухэтапным методом // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 101–106.

Поступила 07.05.2008 г.

УДК 621.3.01 (075)

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО КУРСУ ТОЭ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Н.А. Макенова, Ф.Ю. Канев, Г.В. Носов

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@el.ti.tpu.ru

Проведено сравнение серии виртуальных лабораторных работ, написанных на языке программирования C++ и работ, построенных в редакторе Electronics Workbench 5.12. Отмечены достоинства и недостатки методов создания компьютерных приложений, предназначенных для использования в учебном процессе. В качестве примеров рассмотрен ряд моделей, используемых в курсе электротехники.

Введение

В настоящее время в образовательном процессе и для решения научных задач широко используются такие программные редакторы, как Electronics Workbench (Multisim) и MathCAD. Указанные системы программирования являются относительно простыми, универсальными, набор встроенных функций позволяет создавать на их основе модели, применяемые в различных областях. Несмотря на отмеченные преимущества в ряде случаев создание учебных приложений целесообразно на языках низкого уровня, таких как C++, которые позволяют наиболее полно использовать возможности, предоставляемые персональным компьютером.

В данной статье выполнено сравнение компьютерных моделей, построенных на языке C++ и в среде программирования Electronics Workbench 5.12. В качестве примеров использованы модели цепей с сосредоточенными параметрами, линий электропередач и модели, в которых строятся картины электростатического и магнитного полей линии.

1. Моделирование электрических цепей с сосредоточенными параметрами

Среда программирования Electronics Workbench была разработана специально для решения задач

электротехники и электроники [1]. Набор встроенных компонент, таких как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности; измерительных приборов, осциллографа позволяет моделировать достаточно сложные цепи, исследовать их работу в различных режимах. Удобно использовать этот редактор и в учебном процессе, так в данной среде был создан цикл лабораторных работ по курсу теоретических основ электротехники, написан лабораторный практикум [2]. Примеры построения приложений на основе Electronics Workbench, оформленных в виде лабораторных работ, приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 показана цепь, предназначенная для исследования резонанса напряжений, в нее входят катушка индуктивности, конденсатор, два резистора. Частотная характеристика цепи выведена на экран анализатора амплитудно-частотных характеристик (Bode Plotter). Здесь видно, что близкий к нулю сдвиг фаз между током и напряжением, т. е. резонанс, достигается при определенной частоте источника ЭДС, входящего в цепь. Редактор позволяет варьировать емкость конденсатора, индуктивность катушки, номиналы резисторов, студентам можно продемонстрировать изменение резонансной частоты, ее зависимость от параметров цепи.

Аналогичным является выполнение лабораторной работы, моделирующей трехфазную цепь