Розроблено математичну модель електромагнітних перехідних процесів на основі рівнянь у фазних координатах і представлення елементів трифазними багатополюсниками

Ключові слова: математична модель, перехідні процеси, фазні координати

Разработана математическая модель электромагнитных переходных процессов на основе уравнений в фазных координатах и представления элементов трехфазными многополюсниками

Ключевые слова: математическая модель, переходные процессы, фазные координаты

The mathematical model of electromagnetic transients is developed on the basis of equalizations in phase co-ordinates and presentation of elements three-phase multiterminal networks

Keywords: mathematical model, transients, phase co-ordinates

УДК 621.311.014

БАЗОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С НЕСИММЕТРИЕЙ

Ю.Н. Веприк
Кандидат технических наук, профессор
Кафедра передачи электрической энергии
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: (057) 338-78-39

Постановка проблемы

Режимы работы электрических систем характеризуются наличием большого количества внешних воздействий: возмущающих, управляющих, защитных. Результатом этих воздействий наряду с изменением состава оборудования, схем соединения и параметров элементов, являются нарушения симметрии. К нарушению симметрии параметров режима в трехфазных системах приводит и большая часть отказов, так как связана с повреждениями чаще всего одной или двух фаз отдельных элементов. Внедрение устройств однофазного отключения, ОАПВ, использование неполнофазных режимов ВЛ, наличие несимметричных нагрузок, износ оборудования – все это вместе с развитием и усложнением энергосистем ведет к тому, что несимметрию режимов все с большим основанием приходится считать одним из характерных свойств электрических систем. Вероятность возникновения как кратковременных, так и длительных несимметричных (с простой и сложной несимметрией) режимов возрастает, и возрастает, следовательно, необходимость в разработке методов и средств математического моделирования для их исслед ования.

Анализ публикаций

Основным средством анализа режимов работы электрических систем при современном уровне развития вычислительной техники является математическое моделирование с использованием ЭВМ на основе все более полных математических моделей. Сложившийся традиционный подход к разработке математических моделей электрических систем с несимметрией в стационарных и переходных режимах, теоретические основы которого закладывались во время, когда возможности средств математического моделирования были ограничены, основан на использовании предварительных линейных преобразований для перехода от реальной трехфазной схемы к однофазным эквивалентам, с целью снижения трудоемкости моделирования.

Переход к однофазным эквивалентам упрощает задачу, но и значительно ограничивает как область применения соответствующих моделей, так и точность получаемых результатов. Результат такого подхода – множество узко специализированных моделей, не охватывающих все задачи, сложность организации их взаимодействия. При переходе к частным, типовым подзадачам во-первых, вносится погрешность и не воспроизводится реальная картина переходного процесса, а, во-вторых, что более существенно отметить, решение частных подзадач по отдельности, изолированно в ряде случаев усложняется (из-за разрыва связей с другими составляющими и необходимости иметь данные о них из других подзадач) или оказывается вообще невозможным. Дальнейшее движение в этом направлении – только усугубляет ситуацию, развитие же частных моделей в сторону расширения возможностей вряд ли имеет смысл.

Более целесообразным представляется подход, направленный на разработку более полных, обобщенных моделей на основе уравнений в фазных координатах. Принципиальная возможность использования уравнений в фазных координатах для моделирования несимметричных режимов отмечалась достаточно давно [1]. Известны и решения отдельных частных задач на основе уравнений в фазных координатах [2, 3]. Однако эти ‘широкие возможности’ до сих пор остаются чисто теоретическими, так как не решен целый ряд вопросов, необходимых для их реализации.

Отсутствие моделей в фазных координатах уже становится фактором, сдерживающим решение целого ряда задач. Как подтверждение этого можно рассматривать появление целого ряда работ [3], направленных на то, чтобы представить трехфазные схемы замещения сетей с несимметрией, как и однофазные схемы замещения в симметричных режимах, набором резистивных R, индуктивных L и емкостных C элементов, для которых применимы (с некоторыми модификациями) существующие алгоритмы и программы расчетов режимов симметричных трехфазных систем по однофазным эквивалентам. Такие предложения являются вынужденными (в условиях отсутствия полных моделей), применимыми в частных случаях и не снимают проблемы. С появлением и развитием новых средств исследования – математического моделирования и ЭВМ переход от уравнений в фазных координатах к каким-либо другим становится излишним, ранее применявшиеся методы анализа в значительной степени обесцениваются. Количество работ, направленных на разработку моделей в фазных координатах, невелико, что связано как с уже отмеченными выше сложностями, так и с тем, что попытки применения старых методов к новым задачам не дают желаемого эффекта.

Постановка задачи

Факторами, сдерживающими развитие методов математического моделирования переходных процессов в электрических системах на основе уравнений в фазных координатах до уровня обобщенной постановки и для реальных схем произвольной структуры, является отсутствие формализованных методов формирования и решения интегро-дифференциальных (при наличии L-, C-элементов) уравнений, эффективных для трехфазных систем. Поэтому модели электромагнитных переходных процессов в фазных координатах, предлагаемые в ряде работ, основаны на применении методов моделирования, разработанных для однофазных схем. Сложности алгоритмизации составления систем дифференциальных уравнений на уровне двухполюсных R-, L-, C-элементов при этом вынуждают ограничиться только системами невысокой размерности. Поэтому необходимо дальнейшее развитие известных методов численного интегрирования в направлении, обеспечивающем их применение в задачах моделирования в фазных координатах.

Математическая модель М2 электромагнитных переходных процессов в электрических системах в фазных координатах на макроуровне

Эффективное решение теоретических, методических, алгоритмических задач моделирования электрических систем в фазных координатах может быть реализовано в рамках подхода, основанного на следующих положениях:

1. При разработке математических моделей, соответствующих уровню сложности реальных электрических систем, целесообразно перейти на более высокий уровень декомпозиции (макроуровень), на котором в качестве элементов рассматриваются не двухполюсные R-, L-, C-элементы (микроуровень), а трехфазные многополюсники, соответствующие реальным элементам системы – воздушным и кабельным линиям, трансформаторам, источникам и потребителям электрической энергии.

2. Представление уравнений элементов (компонентных) в фазных координатах. Более целесообразно использовать для элементов сети (трехфазных многополюсников) не схемы (схемы замещения, решетчатые), а уравнения трехфазных элементов сети в форме, непосредственно отражающей электрические и магнитные связи между контурами и обмотками отдельных фаз.

3. Ориентация на комплексные, обобщенные модели. Переход на пофазное моделирование и представление элементов трехфазными многополюсниками с индуктивными и емкостными связями фаз позволяет отказаться от целого ряда допущений – о симметричности, о выделении отдельных составляющих, что, в свою очередь, позволяет реализовать полноту охвата моделируемого объекта и многофункциональность моделей – применимость их для любых схем, для широкого класса задач.

Линейные преобразования, обеспечивающие переход от фазных координат к каким-либо другим, требуют в каждой конкретной задаче особого, нетривиального подхода, что затрудняет обобщение, формализацию и алгоритмизацию. При моделировании в фазных координатах в каких-либо предварительных преобразованиях нет необходимости, поэтому становится возможным решение вопросов формализации и унификации как данных, так и вычислительных процедур.

Для реализации этого подхода в задачах моделирования переходных процессов нужно иметь: математические модели элементов в виде дифференциальных уравнений переходных процессов на уровне трехфазных многополюсников, метод формирования модели (интегро-дифференциальных уравнений) трехфазной системы в целом по компонентным и топологическим уравнениям, метод решения полученной системы уравнений методами численного интегрирования.

Все эти вопросы решены и предлагаемые решения непосредственно применимы к электрическим системам при представлении их однофазными эквивалентами на уровне двухполюсных элементов (на микроуровне), применительно к трехфазным схемам с многополюсными элементами (на макроуровне) эти задачи еще требуют решения и представляется целесообразным решать их на основе неявных методов численного интегрирования.

Неявные методы не требуют приведения к форме Коши и могут быть применены как к системе уравнений, сформированной для объекта в целом, так и на этапе получения дискретных уравнений отдельных элементов. Выбор в пользу неявных методов следует и из сопоставления явных и неявных методов по таким характеристикам, как точность и устойчивость вычислительного процесса. Кроме того, дополнительное повышение эффективности моделирования можно обеспечить за счет того, что последовательность этапов расчета на шаге численного интегрирования, единственно возможную для явных методов, при применении неявных методов можно изменить:

1).выполнить сначала аппроксимацию компонентных уравнений разностными уравнениями с применением формул численного интегрирования, соответствующих принятому методу численного интегрирования – получить дискретные уравнения трехфазных многополюсников на шаге интегрирования;

2).выполнить формирование системы алгебраических уравнений на шаге расчета с учетом топологических уравнений;

3).получить решение полученной системы уравнений на шаге.

При такой последовательности этапов расчета, как будет видно из последующего, обеспечиваются более широкие возможности унификации и алгоритмизации вычислительных процедур.

Первый этап формирования модели – получение дискретных моделей элементов, выполняется с учетом принятого метода численного интегрирования. Если в качестве исходного алгоритма для простоты принять неявную формулу Эйлера-Коши, то уравнения трехфазных элементов аппроксимируются по формуле

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + h\frac{d}{dt}x^{(k+1)} \tag{1}$$

Для формирования математической модели электрической сети на основе неявных методов численного интегрирования и узловых уравнений в фазных координатах нужно, в соответствии с принятой последовательностью этапов моделирования, дифференциальные уравнения всех трехфазных многополюсников на шаге численного интегрирования представить в дискретной форме, разрешенной относительно токов.

Уравнения переходных процессов для участка ВЛ в дифференциальной форме имеют вид:

$$\begin{aligned}&[L]_{ij}^{F}\frac{d}{dt}[i]_{ij}^{F}+[R]_{ij}^{F}[i]_{ij}^{F}=[u]_{i}^{F}-[u]_{j}^{F}\\&[C]_{i0}^{F}\frac{d}{dt}[u]_{i}^{F}+[C]_{i0}^{F}[u]_{i}^{F}=[i]_{i0}^{F}\end{aligned} \tag{2}$$

Разрешив их относительно производных и проинтегрировав по неявным формулам принятого метода численного интегрирования, будем иметь:

$$\begin{aligned}&[i]_{ij}^{(k+1)}=h\left([L]_{ij}+h[R]_{ij}\right)^{-1}[\Delta u]_{ij}^{(k+1)}+\\&+\left([L]_{ij}+h[R]_{ij}\right)^{-1}[l]_{ij}[i]_{ij}^{(k)}\\&[i]_{i0}^{(k+1)}=\frac{1}{h}\left([C]_{i0}+h[C]_{i0}\right)[u]_{i0}^{(k+1)}-\frac{1}{h}[C]_{i0}[u]_{i0}^{(k)}\end{aligned} \tag{3}$$

где h – шаг интегрирования, k, k+1 – номер шага интегрирования, или, в более краткой форме,

$$\begin{aligned}&[i]^{(k+1)}=[Y]_{ij}[\Delta u]_{ij}^{(k+1)}+[J]_{ij}^{(k)}\\&[i]_{i0}^{(k+1)}=[Y]_{i0}[u]_{i0}^{(k+1)}+[J]_{i0}^{(k)}\end{aligned} \tag{4}$$

где $[Y]_{ij},[Y]_{i0}$ - матрицы, определяемые соответственно продольными и поперечными параметрами участка трехфазной линии, $[J]_{ij}^{(k)},[J]_{i0}^{(k)}$ - векторы, зависящие от токов индуктивных и напряжений емкостных ветвей, определяемые на предыдущих шагах интегрирования. Уравнения (4), представляющие собой аппроксимацию дифференциальных уравнений (1) участка трехфазной линии разностными уравнениями, будем называть дискретной математической моделью трехфазной линии. Они разрешены относительно токов фаз на (k+1)-м шаге интегрирования, что позволяет включать их в систему узловых уравнений на шаге расчета. При интегрировании с постоянным шагом матрицы $[Y]_{ij},[Y]_{i0}$ остаются неизменными, и изменяются лишь векторы $[J]_{ij}^{(k)},[J]_{i0}^{(k)}$.

Дифференциальные уравнения остальных элементов системы (трансформаторы, статическая и двигательная нагрузка, реакторы и др.) также могут быть представлены в форме (4).

Полная система уравнений переходных процессов трехфазного трансформатора, включает в себя две группы уравнений:

- компонентные уравнения, отражающие электромагнитные связи между обмотками фазы при отсутствии каких-либо электрических соединений между ними:

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}V_{A1}\\V_{B1}\\V_{C1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{A1}&&\\&L_{B1}&\\&&L_{C1}\end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}j_{A1}\\j_{B1}\\j_{C1}\end{bmatrix}+\\&+\begin{bmatrix}L_{A12}&&\\&L_{B12}&\\&&L_{C12}\end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}j_{A2}\\j_{B2}\\j_{C2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_{A1}&&\\&r_{B1}&\\&&r_{C1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}j_{A1}\\j_{B1}\\j_{C1}\end{bmatrix}\\&\begin{bmatrix}V_{A2}\\V_{B2}\\V_{C2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{A21}&&\\&L_{B21}&\\&&L_{C21}\end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}j_{A1}\\j_{B1}\\j_{C1}\end{bmatrix}+\\&+\begin{bmatrix}L_{A2}&&\\&L_{B2}&\\&&L_{C2}\end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}j_{A2}\\j_{B2}\\j_{C2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_{A2}&&\\&r_{B2}&\\&&r_{C2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}j_{A2}\\j_{B2}\\j_{C2}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{5}$$

- топологические уравнения, отражающие электрические соединения обмоток:

$$\begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix} \tag{6}$$

В уравнениях (5), (6) приняты обозначения

$$[V]_1 = \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix}; [V]_2 = \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}; [j]_1 = \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}; [j]_2 = \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}$$

напряжения и токи обмоток фаз,

$$[U]_1 = \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}; [U]_2 = \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}; [i]_1 = \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}; [i]_2 = \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}$$

напряжения и токи на выводах фаз первичной и вторичной обмоток. Введя еще для параметров обмоток обозначения

$$[L]_{11} = \begin{bmatrix} L_{A1} & & \\ & L_{B1} & \\ & & L_{C1} \end{bmatrix}; [L]_{22} = \begin{bmatrix} L_{A2} & & \\ & L_{B2} & \\ & & L_{C2} \end{bmatrix};$$

$$[L]_{12} = [L]_{21} = \begin{bmatrix} L_{A12} & & \\ & L_{B12} & \\ & & L_{C12} \end{bmatrix};$$

$$[r]_1 = \begin{bmatrix} r_{A1} & & \\ & r_{B1} & \\ & & r_{C1} \end{bmatrix}; [r]_2 = \begin{bmatrix} r_{A2} & & \\ & r_{B2} & \\ & & r_{C2} \end{bmatrix};$$

компонентные уравнения электромагнитных связей между обмотками фаз трехфазного трансформатора можно представить в более компактном виде

$$\begin{bmatrix} L_{A12} & L_{A12} \\ L_{B21} & L_{A22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Эти уравнения имеют тот же вид, что и первое из уравнений (2) для ВЛ. Поэтому, выполнив над блочными элементами матричных уравнений (7) те же операции, что и в уравнениях (2), получим алгебраические уравнения, являющиеся аппроксимацией компонентных дифференциальных уравнений трехфазного трансформатора на шаге численного интегрирования.

Выразив, далее, в (5) токи $[j_2]$ через токи на внешних зажимах с учетом выражений (6), получим окончательно:

$$\begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} y_{A1} & & \\ & y_{B1} & \\ & & y_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}^{(n+1)} +$$

$$+ \begin{bmatrix} y_{A12} & & -y_{A12} \\ -y_{B12} & y_{B12} & \\ & -y_{C12} & y_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}^{(n+1)} + \tag{8}$$

$$+ \begin{bmatrix} a_{A1} & & \\ & a_{B1} & \\ & & a_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(n)} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} a_{A12} & & -a_{A12} \\ -a_{A12} & a_{B12} & \\ & -a_{A12} & a_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(n)}$$

$$\begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} y_{A21} & -y_{A21} & \\ & y_{B21} & -y_{B21} \\ -y_{B21} & & y_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}^{(n+1)} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 2y_{A2} & -y_{A2} & -y_{A2} \\ -y_{B2} & 2y_{B2} & -y_{B2} \\ -y_{C2} & -y_{C2} & 2y_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}^{(n+1)} +$$

$$+ \begin{bmatrix} a_{A21} & -a_{B21} & \\ & a_{B21} & -a_{C21} \\ -a_{A21} & & a_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(n)} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2a_{A2} & -a_{B2} & -a_{C2} \\ -a_{A2} & 2a_{B2} & -a_{C2} \\ -a_{A2} & -a_{B2} & 2a_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(n)}$$

Уравнения (8), полученные путем аппроксимации исходных дифференциальных уравнений (5), (6) разностными алгебраическими, являются дискретной математической моделью трехфазного двухобмоточного трансформатора $Y/\Delta-11$ с глухозаземленной нейтралью на шаге численного интегрирования неявным методом Эйлера. Они позволяют вычислять напряжения и токи на выходных зажимах обмоток трансформатора на (n+1)-м шаге интегрирования по напряжениям на этом же шаге и токам в обмотках на предыдущем шаге.

Конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений других элементов выполняется аналогично.

Второй этап – формирование системы узловых уравнений на шаге расчета переходного процесса.

Система дискретных алгебраических уравнений на шаге расчета переходного процесса неявными методами численного интегрирования формируется на основе дискетных уравнений отдельных элементов сети и информации о том, как они соединены в схеме электрической сети.

В каждом из независимых узлов для момента времени t = t(k+1) переходного процесса сумма токов каждой из фаз должна быть равна нулю.

Составив уравнения баланса токов для всех независимых трехфазных узлов сети и подставив в них дискретные уравнения элементов в форме (4, 8), получим систему уравнений

$$\begin{cases} [y_{11}][u_1]^{k+1} + [y_{12}][u_2]^{k+1} + \ldots + [y_{1i}][u_i]^{k+1} + \ldots + [y_{1n}][u_n]^{k+1} = [j_1]^k \\ [y_{21}][u_1]^{k+1} + [y_{22}][u_2]^{k+1} + \ldots + [y_{21i}][u_i]^{k+1} + \ldots + [y_{2n}][u_n]^{k+1} = [j_2]^k \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ [y_{i1}][u_1]^{k+1} + [y_{i2}][u_2]^{k+1} + \ldots + [y_{ii}][u_i]^{k+1} + \ldots + [y_{in}][u_n]^{k+1} = [j_i]^k \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ [y_{n1}][u_1]^{k+1} + [y_{n2}][u_2]^{k+1} + \ldots + [y_{ni}][u_i]^{k+1} + \ldots + [y_{nn}][u_n]^{k+1} = [j_n]^k \end{cases} \quad (9)$$

Матрица коэффициентов в этой системе формируется из дискретных проводимостей ветвей и содержит собственные (на диагонали) и взаимные (недиагональные) дискретные проводимости узлов сети.

Элементы вектора-столбца $[J]^k$ в правой части полученной системы уравнений зависят от токов индуктивных и напряжений емкостных элементов на предыдущих интервалах времени и изменяются от шага к шагу. Элементы блоков матрицы $[y_{ij}]$ определяются параметрами R, L, G, C элементов системы и при постоянном шаге интегрирования остаются неизменными.

Система уравнений (9) позволяет определить мгновенные значения параметров режима на текущем (к+1)-м интервале времени переходного процесса по известным параметрам режима на предыдущем к-м шаге.

Использование неявных методов и представление трехфазных элементов на шаге интегрирования дискретными моделями (9) позволяет свести решение системы дифференциальных уравнений к многократному формированию и решению системы алгебраических уравнений. Причем, если интегрирование выполняется с постоянным шагом, то отпадает необходимость формировать матрицу [Y] на каждом шаге, так как ее элементы при этом сохраняются неизменными. Расчет при h=const сводится к корректировке элементов столбца [J] с учетом вычисленных на шаге параметров режима и определению новых значений из решения системы (9).

Использование узловых уравнений и дискретных математических моделей элементов при анализе переходных процессов обеспечивает снижение порядка системы дифференциальных уравнений и упрощение алгоритма их формирования по трехфазной расчетной схеме при наличии в ней как индуктивных, так и емкостных элементов. Кроме того, алгоритм формирования и решения разностных уравнений на шаге интегрирования оказывается таким же, как и при анализе стационарных режимов по узловым уравнениям.

Отмеченные достоинства определяют целесообразность применения неявных методов и узлового метода формирования моделей трехфазных электрических систем на макроуровне для исследования переходных процессов в электрических системах.

Важно отметить и то, что с переходом к моделированию на макроуровне существенно повышается эффективность как модели, так и процесса ее формирования.

Повышение эффективности процесса формирования модели обусловлено тем, что:

- при моделировании на основе уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования и переходе на макроуровень математические модели трехфазных многополюсников, соответствующих реальным элементам системы, приводятся к единой унифицированной форме [4], чем обеспечивается формализация и алгоритмизация соответствующих вычислительных процедур,
- так как система уравнений (9) на шаге численного интегрирования имеет тот же порядок и ту же структуру, что и система уравнений стационарных несимметричных режимов, то методы, алгоритмы и вычислительные процедуры, разработанные и реализованные для задач моделирования стационарных режимов с несимметрией, применимы и в задачах моделирования электромагнитных переходных процессов в условиях несимметрии,
- отпадает необходимость предварительных специфических преобразований с целью перехода к тем или иным системам координат.

Эффективность модели повышается, так как:

- порядок системы решаемых уравнений снижается до числа трехфазных узлов электрической сети,
- обеспечивается возможность применения эффективных вычислительных процедур, учитывающих как слабую заполненность, так и блочную структуру матриц,
- моделирование на макроуровне в фазных координатах позволяет учесть все особенности конструктивного исполнения элементов, несимметрию параметров, любое количество несимметричных элементов и коммутаций.

Кроме того, в состав элементов математической модели включены воздушные и кабельные линии, трансформаторы с изолированной, глухо заземленной, заземленной через сопротивление нейтралью. Модель обеспечивает основу для решения широкого круга задач – исследования электромагнитных переходных процессов в воздушных и кабельных сетях, с изолированной, резонансно-, резистивно- или глухо заземлеными нейтралями, с несимметричными элементами и коммутациями. Поэтому разработанную модель можно рассматривать как базовую для решения задач, связанных с моделированием электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией.

Выводы

1. Разработанная математическая модель электромагнитных переходных процессов основана на уравнениях в фазных координатах, представлении элементов на макроуровне и использует меньшее по сравнению с известными моделями количество упрощающих допущений – в состав модели включены как индуктивные, так и емкостные элементы, силовые трансформаторы с разными схемами соединения обмоток, предусмотрена возможность включения в расчетные схемы трансформаторов с различными способами заземления нейтралей. Это позволяет в рамках одной модели решать широкий класс задач (воспроизводить как 'медленные' R,L-составляющие, так и 'быстрые' L,C-составляющие, в системах как с изолированной, так с резонансно- или резистивно заземленной нейтралью, с представлением результатов как в поузловой, так и в волновой интерпретации) и с более высокой точностью.

2. Пофазное представление элементов позволяет решать задачи, решаемые известными моделями приближенно или не решаемые ими вообще – пере-

ходные процессы с учетом неодновременности размыкания-замыкания контактов выключателей, при отключениях фаз и работе ОАПВ и разрядников, восстанавливающиеся напряжения на контактах выключателей и др.

Литература

1. Бернас, Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с англ.. - М.: Энергоиздат, 1982. - 312 с.
2. Джуварлы Ч.М., Рустамов С.А., Гаимов А.М. и др. Расчеты электромагнитных процессов при неполнофазном включении электропередачи 110 кВ с ненагруженными трансформаторами. Электричество, 2004, № 8. С 16.
3. Ефимов Б.В., Фастий Г.П., Якубович М.В. Наведенные напряжения на воздушных линиях при неоднородных трассах сближения. – Эл станции, 2002, № 8.
4. Веприк Ю.Н., Минченко А.А. Коммутационные перенапряжения в электропередаче 750 кВ. Электротехника и электромеханика. Ежекварт. научно-практический журнал. Харьков: НТУ 'ХПИ' – 2009. № 4. с.

УДК 538.953:54.139

SUSTAINABLE REFRIGERANT SELECTION IN BINARY BLENDS OF THE R1234YF – HYDROFLUOROETHERS

Досліджено фазову поведінку та теплофізичні властивості сумішей типу R1234yf - HFE, як заміни R134a. Погрішність прогнозу за допомогою нейронних мереж холодильного коефіцієнту та відношення тиску не перевищує 3%.

Ключові слова: рівняння стану; азеотропний стан; нейронні мережі; критерій сталого розвитку; розпливчата логіка

Исследовано фазовое поведение и теплофизические свойства смесей типа R1234yf - HFE, как замены R134a. Погрешность прогноза с помощью нейронных сетей холодильного коэффициента и отношение давлений не превышает 3%

Ключевые слова: уравнение состояния; азеотропное состояния; нейронные сети; критерий устойчивого развития; нечеткая логика

The phase behavior and thermophysical properties of R1234yf – HFE systems as alternative to R134a are investigated. Accuracy of COP and pressure ratio predicted by neural networks does not exceed 3%

Keywords: equation of state; azeotrope; neural networks; sustainable development criteria; fuzzy logic

С.В. Артеменко
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, докторант
Кафедра инженерной теплофизики*
Контактный тел.: 067-486-05-01
E-mail: sergey.artemenko@gmail.com

Д.Н. Никитин
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра программирования*
*Одесская государственная академия холода
ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082
Контактный тел.: (048) 238-95-00
E-mail: dnn@te.net.ua

1. Introduction

The sustainable refrigerant selection is one of the most important stages in the design of refrigeration systems. The compromise among such properties as contribution to greenhouse effect, flammability, toxicity, thermodynamic behaviour, performance specifications, and the others define a sustainable decision. It is obvious; a pure substance that