

РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ И ИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Введение. Для решения целого ряда задач проектирования, эксплуатации, управления функционированием электрических систем необходимы детальные исследования режимов их работы – стационарных симметричных и несимметричных, переходных электромагнитных и электромеханических, кратковременных и длительных, аварийных и эксплуатационных. Причем с развитием электрических систем и изменением условий их эксплуатации (изменение структуры, появление новых элементов и устройств, старение оборудования, совершенствование средств управления, развитие рыночных отношений), требования к точности, адекватности, возможностям моделей возрастают. В стационарных режимах необходима точность, позволяющая проверять их на соответствие параметров режима требованиям к качеству электроэнергии, в переходных режимах для обеспечения адекватного моделирования необходимо воспроизводить как электромагнитные, так и электромеханические составляющие переходных процессов, с учетом несимметрии как исходного режима, так и несимметричных коммутаций в ходе переходных процессов.

Анализ публикаций. Развитие средств математического моделирования режимов работы электрических систем для повышения их точности и расширения круга решаемых задач принципиально возможно на основе перехода к математическим моделям, использующим уравнения в фазных координатах. Модели в фазных координатах как отдельных элементов, так и систем различной степени сложности, имеют не только большую универсальность, но и более широкие возможности развития. Переход к моделям, основанным на уравнениях в фазных координатах, позволяет создать более полные и более общие модели, ориентированные не на конкретные расчетные схемы, а на широкий класс задач и энергетических объектов.

Однако переход к моделированию переходных процессов на основе уравнений в фазных координатах сдерживается целым рядом факторов: при наличии индуктивных и емкостных элементов уравнения переходных процессов являются интегро-дифференциальными, порядок систем решаемых уравнений по сравнению с уравнениями для однофазных эквивалентов повышается, усложняется алгоритмизация процедур их составления и решения. Поэтому электрическая сеть в ряде работ представляется упрощенно – либо эквивалентными, либо типовыми расчетными схемами, для которых система дифференциальных уравнений предполагается заданной [1,2]. Так, в [2] сеть представлена упрощенной расчетной схемой – выделены две группы емкостей фаз системы относительно земли: емкость всех присоединений в конце защищаемой линии, включая емкость самой линии, и емкость всех присоединений к шинам 6–35 кВ узла нагрузки.

Математическая модель системы содержит дифференциальные уравнения баланса напряжений в электрических контурах схемы сети и уравнения баланса токов в узлах подключения емкостей. Использование смешанного координатного базиса (включение в модель узловых и контурных уравнений) усложняет ее алгоритмизацию и программную реализацию и, кроме того, вопрос о том, насколько допустима при моделировании переходных процессов замена реальной схемы электрической сети принятой упрощенной, требует исследования.

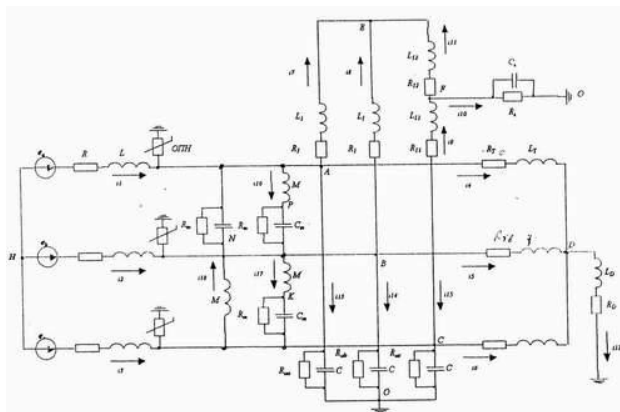


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения сети

Основная часть. В стационарных режимах процедура перехода от исходной схемы и соответствующей ей системы уравнений к эквивалентной меньшего порядка имеет строгое обоснование и основана на том, что выполняется исключение тех переменных, которые не представляют интереса для решаемой задачи.

В этом случае в схеме электрической сети при расчетах, например, токов КЗ можно выделить две подсхемы:

- расчетную, содержащую все расчетные точки КЗ и элементы, в которых должны быть определены токи и напряжения;
- внешнюю, содержащую все остальные элементы сети.

Эквивалентирование внешней электрической сети может быть реализовано на основе узловых уравнений следующим образом. Составить узловые уравнения для электрической сети (1), причем нумерацию узлов сети выполнить так, чтобы сначала были пронумерованы, например, все узлы первой подсхемы, а затем – все узлы второй подсхемы.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1k} & Y_{1l} & Y_{1m} & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2k} & Y_{2l} & Y_{2m} & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & Y_{kk} & Y_{kl} & Y_{km} & Y_{kn} \\ Y_{l1} & Y_{l2} & \dots & Y_{lk} & Y_{ll} & Y_{lm} & Y_{ln} \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \dots & Y_{mk} & Y_{ml} & Y_{mm} & Y_{mn} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nk} & Y_{nl} & Y_{nm} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_k \\ u_l \\ u_m \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_k \\ I_l \\ I_m \\ I_n \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Чтобы получить эквивалентные параметры расчетной части схемы, нужно исключить все узлы второй подсхемы. Разбив матрицу Y и векторы $[U]$, $[I]$ на блоки, соответствующие выделенным подсхемам, систему (1) можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix},$$

или, в развернутом виде:

$$\begin{aligned} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 &= I_1 \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 &= I_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Выразив из второго уравнения напряжения всех внешних узлов U_1 через напряжения узлов первой подсхемы:

$$U_2 = Y_{22}^{-1}I_2 - Y_{22}^{-1}Y_{21}U_1$$

и, подставив их в первое уравнение, получим:

$$(Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21})U_1 = I_1 - Y_{12}Y_{22}^{-1}I_2, \text{ или}$$

$$Y_{\text{вн. экв.}} U_{\text{вн. экв.}} = I_{\text{вн. экв.}} \quad (3)$$

Уравнениям (3) соответствует эквивалентная схема электрической сети, которая содержит только узлы первой подсхемы, эквивалентные собственные и взаимные проводимости внешней сети относительно узлов замыкания:

$$Y_{\text{вн. экв.}} = (Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}),$$

и эквивалентные задающие токи в узлах замыкания:

$$I_{\text{вн. экв.}} = I_1 - Y_{12} Y_{22}^{-1} I_2.$$

Зная эквивалентные параметры расчетной подсистемы, можно определить токи КЗ в узлах расчетной схемы с учетом влияния внешней сети.

Результаты, полученные при этом для эквивалентной схемы, совпадают с результатами решения исходной системы уравнений (1), а положительный эффект, получаемый при такой последовательности расчетов, заключается в том, что задача решается по частям и порядок систем уравнений, решаемых на каждом шаге, меньше суммарного порядка схемы в целом.

Моделирование переходных процессов требует составления и решения систем дифференциальных уравнений. Для линейной системы решение в соответствии с классическим методом представляет сумму принужденных и свободных составляющих. Принужденные составляющие являются решением соответствующих уравнений установившегося режима и к ним применима описанная выше процедура эквивалентирования.

Что же касается свободных составляющих, то они являются решением системы однородных дифференциальных уравнений

$$\frac{d}{dt}[x] = [A][x], \quad (4)$$

где x – вектор, содержащий токи индуктивных и напряжения емкостных элементов, A – матрица параметров индуктивных и емкостных элементов.

Если $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, – корни характеристического уравнения

$$D(\lambda) = a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + a_2 \lambda^{n-2} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0 \quad (5)$$

соответствующего уравнениям (4), то, считая, что первые m корней являются вещественными, а остальные комплексными, общее решение уравнения (4) можно представить в виде:

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^m c_i e^{\alpha_i t} + \sum_{i=m+1}^n c_i e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \phi_i), \quad (6)$$

где t – время, c_i и ϕ_i – некоторые константы. В первой сумме α_i – вещественные корни характеристического уравнения, а слагаемые $c_i e^{\alpha_i t}$ – аperiodические составляющие решения. Во второй сумме α_i и ω_i – вещественные и мнимые составляющие комплексных корней $\lambda_i = \alpha_i \pm j\omega_i$ характеристического уравнения, а слагаемые $c_i e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \phi_i)$ – колебательные составляющие решения системы.

Если система дифференциальных уравнений (4) составлена для эквивалентной схемы, полученной на основании уравнений стационарного режима (1), то однозначно можно утверждать, что принужденные составляющие (установившиеся значения) решения будут соответствовать действительности. Что же касается свободных составляющих решения, то при переходе к эквивалентной схеме изменяются как состав (количество) свободных составляющих, так и постоянные времени (корни характеристического уравнения), следовательно, изменяется и характер переходного процесса. Поэтому следует отметить, что при замене реальной разветвленной сети упрощенной схемой, включающей суммарные емкости и эквивалентные индуктивности, задача упрощается, но вопрос о том, насколько результаты моделирования переходных процессов, полученные по эквивалентной схеме, будут соответствовать результатам моделирования по полной схеме, остается открытым.

Для того, чтобы получить ответ на этот вопрос выполнены вычислительные эксперименты, которые состояли в том, что получены результаты расчетов электромагнитных переходных процессов в электрических сетях 6 кВ с изолированной нейтралью для полных и эквивалентных схем (рис. 2) с целью их сопоставления.

Расчеты выполнены с применением математических моделей и программных средств ANFAZ2 [3], позволяющих моделировать электромагнитные переходные процессы с учетом реальной схемы электрической сети на основе узловых уравнений в фазных координатах. Программными средствами [3] обеспечивается:

- формирование дифференциальных уравнений электромагнитных переходных процессов в фазных координатах в схеме произвольной конфигурации с любым режимом нейтрали (изолированной, глухо заземленной или резонансно заземленной),
- решение полученной системы дифференциальных уравнений при заданных коммутациях неявными методами,
- представление результатов моделирования в виде цифрограмм токов и напряжений в заданных элементах электрической сети.

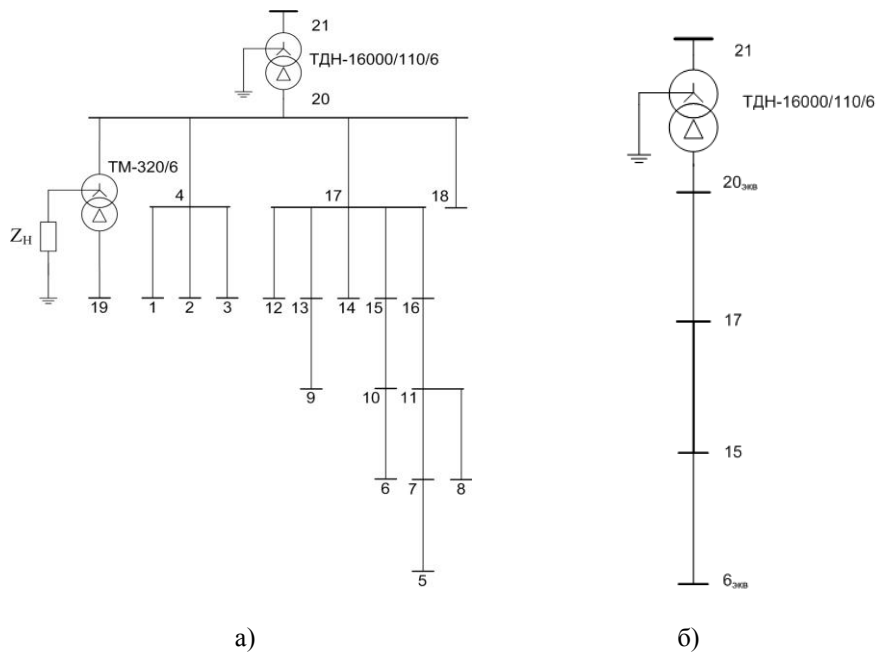


Рисунок 2 – Расчётные схемы электрической сети: а) реальная, б) упрощенная

Адекватность модели подтверждена сравнением результатов расчетов с данными экспериментов [3], которое показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Для иллюстрации результаты моделирования электромагнитных переходных процессов при замыкании фазы на землю в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью (суммарная протяженность кабельных сетей – 21,5 км) представлены на рис. 3, 4.

Из представленных результатов видно, что цифрограммы, относящиеся к упрощенной схеме, качественно и количественно отличаются от цифрограмм переходных процессов в полной схеме. Причем это различие, как показали расчеты, выполненные для ряда схем, тем значительней, чем протяженнее сеть. Поэтому более адекватными следует признать модели электромагнитных переходных процессов, основанные на составлении и решении дифференциальных уравнений в фазных координатах, с учетом реальной конфигурации сети.

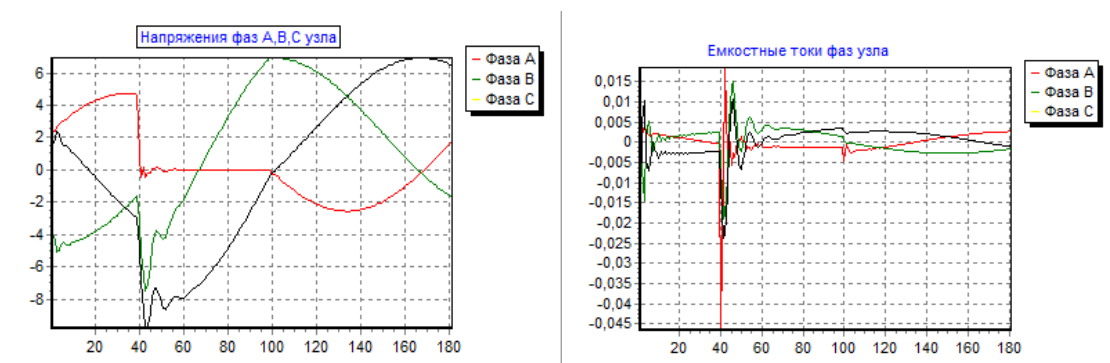


Рисунок 3 – Результаты моделирования переходного процесса в реальной схеме электрической сети

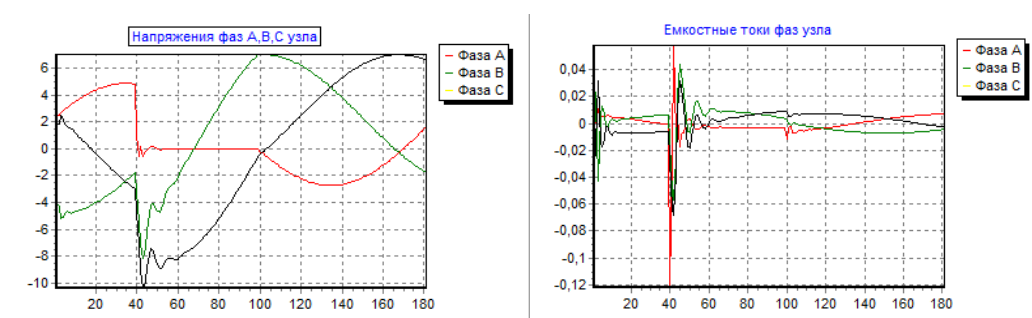


Рисунок 4 – Результаты моделирования переходного процесса в упрощенной схеме электрической сети

Выводы. При применении узловых уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования для математического моделирования переходных процессов обеспечивается алгоритмизация процедур как решения, так и формирования дифференциальных уравнений с учетом реальной конфигурации схем электрических сетей.

Для исследования переходных процессов в электрических сетях необходимо использовать модели, отражающие реальную конфигурацию схем электрических сетей на основе уравнений в фазных координатах, так как модели переходных процессов, использующие эквивалентные схемы электрических систем, полученные по условиям стационарных режимов, не отражают действительную картину переходных процессов.

Литература

1. Кобазев В.П. Амплітудні та фазові характеристики компенсованої мережі при однофазному замиканні на землю. Наукові праці Донецького національного університету, № 9(158) 2009.
2. Дударев Л.Е. Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью / Л.Е. Дударев, И.В. Волошек // Электрические станции. – 1991. – №4. – с. 66–71.
3. Веприк Ю.Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю.Н. Веприк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– 2010.– №2.– с. 37–42.

Bibliography (transliterated)

1. Kobzev V.P. Amplitudni ta fazovi harakterystyky kompensovanoji merezhi pry odnofaznomu zamykanni na zemlju. Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo universytetu, № 9(158) 2009.
2. Dudarev L.E. Chislennyj analiz ferrozonansnyh protsessov v setjah s izolirovannoju nejtral'ju. L.E. Dudarev, I.V. Voloshek. Elektricheskie stantsyi.– 1991.– №4.– P. 66–71.
3. Veprik Ju.N. Bazovaja model' elektromagnitnyh perehodnyh protsessov v elektricheskikh sistemah s nesimetrijei. Ju.N. Veprik. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij.– 2010.– №2.– P. 37–42.

УДК 621.311.014

Веприк Ю.Н., Небера О.А.

РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ В ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ ТА ЇХ ЕКВІВАЛЕНТНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ

У статті розглядаються розрахункові схеми електричних мереж. На основі розрахунків зроблено висновки, що для дослідження перехідних процесів в електричних мережах необхідно використовувати повні моделі на основі рівнянь в фазних координатах.

Veprik Ju.N., Nebera O.A.

CALCULATION SCHEMES OF ELECTRICAL SYSTEMS IN TRANSIENTS AND THEIR EQUIVALENT TRANSFORMATIONS

The article deals with calculation scheme of electric networks. On the basis of the calculations was concluded that for the study of transients in electrical networks is necessary to use complete models based on the equations in the phase variables.