

УДК 621.311

РАСЧЁТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ СИСТЕМ КООРДИНАТ

Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский*, Н.В. Коломиец

Томский политехнический университет

*ОАО «Сибирский химический комбинат», г. Северск

E-mail: vra@tpu.ru

Предлагается и иллюстрируется приём расчёта режимов электроэнергетической системы при многоместной несимметрии с учётом электромеханических переходных процессов. Расчёт основан на том, что в виде трёхфазной схемы замещения представляется только та часть электрической сети, в которой имеют место короткие замыкания и обрывы фаз. Остальная часть представляется в системе симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности. Взаимосвязь между частями схемы, представленными в симметричных составляющих и трёхфазных координатах, при пошаговом расчёте осуществляется соответствующим прямым и обратным преобразованием координат.

Ключевые слова:

Несимметричные режимы, электромеханический переходный процесс.

Key words:

Asymmetrical modes, electromechanical transient.

В сложившейся в настоящее время практике расчётов установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетических системах для определённого круга задач используются специализированные программные комплексы. Наибольший относительный объём расчётов при эксплуатации и проектировании занимают расчёты установившихся симметричных режимов. Поэтому математические модели в программах для расчётов установившихся режимов основаны на однолинейной схеме замещения прямой последовательности.

Программы для расчёта электромеханических переходных процессов также основаны на однолинейной схеме замещения прямой последовательности, а возмущения, вызываемые несимметричными короткими замыканиями или неполнофазными режимами, учитываются включением в место несимметрии соответствующего шунта или добавочного сопротивления. При этом, *во-первых*, возможно моделирование процессов только по прямой последовательности и, *во-вторых*, исключается возможность определения токов и напряжений обратной и нулевой последовательности в ветвях и узлах схемы, а также фазных токов и напряжений. Указанные выше ограничения не всегда позволяют выполнить полноценные расчёты параметров настройки релейной защиты. Это относится, в частности, к устройствам релейной защиты, основанным на измерении симметричных составляющих нулевой или обратной последовательности.

Возможны два варианта решения задачи: использование трёхфазной модели сети или модели с использованием метода симметричных составляющих.

Трёхфазная модель принципиально даёт возможность для расчётов несимметричных режимов как при одноместной, так и многоместной несимметрии с получением любых электрических величин в моделируемой системе.

В модели на основе метода симметричных составляющих в отличие от трёхфазной модели затруднены расчёты при многоместной несимметрии [1].

В ряде случаев при расчётах параметров устройств релейной защиты и автоматики требуется учёт влияния электромеханических переходных процессов, которые вызываются возмущениями в виде коротких замыканий или каких-либо коммутаций в сети. Для таких расчётов в составе модели объекта должны присутствовать динамические модели генераторов со своими системами регулирования возбуждения и модели двигательной части нагрузки.

Проведём сравнение вариантов расчётов по трёхфазной модели (ABC) и по модели с использованием системы симметричных составляющих (1–2–0).

Естественно, что при расчётах несимметричных режимов по трёхфазной модели должна правильно воспроизводиться реакция элементов энергосистемы к токам прямой, обратной и нулевой последовательности. Для этого в электрических машинах должна быть достаточно точно замещена система контуров ротора в определенном диапазоне частот, а в сетевых элементах индуктивная и электростатическая связи между фазами линии и между сближенными параллельно идущими линиями.

Оценим порядок системы уравнений, которыми для учёта указанных факторов должны быть описаны участки сетевых элементов в трёхфазной модели и модели, основанной на системе симметричных составляющих на примере двухцепной линии электропередачи (ЛЭП). На рис. 1 показана схема замещения двух линий в фазных координатах ABC, на которой учтены индуктивные собственные сопротивления и взаимные сопротивления между всеми проводами линий, а ёмкостные — опущены. Как видно, в этой схеме из-за необходи-

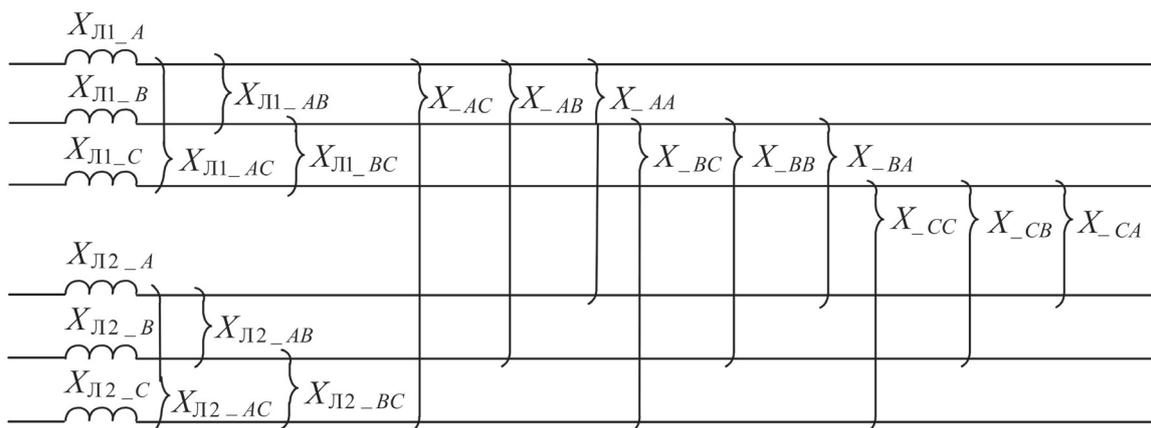


Рис. 1. Схема замещения участка двухцепной ЛЭП в координатах ABC: $X_{Л1_A}, X_{Л1_B}, X_{Л1_C}, X_{Л2_A}, X_{Л2_B}, X_{Л2_C}$ – собственные сопротивления фазных проводов соответственно первой и второй линии; $X_{Л1_AB}, X_{Л1_BC}, X_{Л1_CA}$ – сопротивления взаимоиндукции между фазами первой линии; $X_{Л2_AB}, X_{Л2_BC}, X_{Л2_CA}$ – сопротивления взаимоиндукции между фазами второй линии; $X_{AA}, X_{AB}, X_{AC}, X_{BA}, X_{BB}, X_{BC}, X_{CA}, X_{CB}, X_{CC}$ – сопротивления взаимоиндукции между фазами первой и второй линий

мости учёта взаимоиндукции между каждой парой проводов, количество взаимных сопротивлений равно 15.

На рис. 2 приведена та же схема, но в системе симметричных составляющих, в которой индуктивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности обусловлены взаимодействием между фазами каждой из линий, а взаимодействие между линиями остаётся только в составляющих нулевой последовательности и учитывается одним взаимным сопротивлением [2]. Это является существенным достоинством использования системы симметричных составляющих, так как приводит к значительному уменьшению порядка системы уравнений.

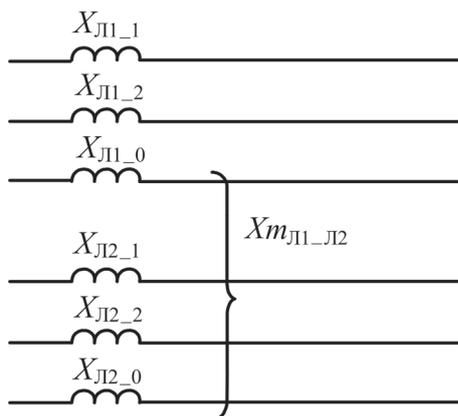


Рис. 2. Схема замещения участка двухцепной ЛЭП в координатах 1-2-0: $X_{Л1_1}, X_{Л1_2}, X_{Л1_0}, X_{Л2_1}, X_{Л2_2}, X_{Л2_0}$ – сопротивления прямой, обратной, нулевой последовательности соответственно первой и второй линии; $X_{mЛ1_Л2}$ – сопротивление взаимоиндукции между ветвями первой и второй линии в схеме нулевой последовательности

Ещё одним достоинством использования симметричных составляющих является то, что при моделировании сложной электрической сети схема

нулевой последовательности содержит, как правило, значительно меньшее количество элементов, чем исходная схема прямой последовательности, так как пути протекания для токов нулевой последовательности образуются только в той части схемы, где есть аппараты с заземлёнными нейтралями.

Существенные отличия при использовании трёхфазной модели по сравнению с системой симметричных составляющих имеют место и при моделировании вращающихся электрических машин. В настоящее время является практически общепринятым применение модели электрических машин в системе прямоугольных координат $d-q$, жёстко связанных с ротором [3]. Чаще всего по продольной оси d учитывается контур обмотки возбуждения и один демпферный контур, а по поперечной оси q – только один демпферный контур. Как показано в работе [4] этого вполне достаточно для расчета процессов при небольших скольжениях (около $\pm 5\%$), что соответствует реальным электромеханическим переходным процессам.

Однако при сочетании такой модели с трёхфазной моделью сети не отражается адекватно реакция электрической машины к составляющим обратной последовательности, которые появляются при несимметричных режимах. Это объясняется тем, что токи обратной последовательности образуют поле, вращающееся с той же частотой, что и поле, созданное токами прямой последовательности, но в противоположном направлении. При этом в контурах ротора наводятся токи с частотой около 100 Гц. Поэтому необходимо обеспечить достаточно точное воспроизведение параметров демпферной системы электрической машины в широком диапазоне частот. Особенно это важно для турбогенераторов, имеющих ротор с неявно выраженными полюсами, так как при задании параметров демпферных контуров необходимо учитывать их изменение из-за поверхностного эффекта [5]. Одним из вариантов моделирования электрических машин в таких усло-

виях является замещение демпферной системы несколькими контурами по продольной и поперечной осям. Однако в этом случае сложной является задача определения параметров этих контуров, так как для этого требуются экспериментально полученные частотные характеристики машины, которые не входят в состав паспортных данных.

При использовании системы симметричных составляющих задача существенно упрощается, так как реакция электрических машин к токам обратной последовательности может быть учтена их замещением в схеме обратной последовательности интегральным параметром – сопротивлением обратной последовательности, которое задаётся в паспортных данных.

Таким образом, при необходимости расчётов режимов при одноместной несимметрии с учётом влияния электромеханических переходных процессов целесообразно использовать метод симметричных составляющих с соединением схем различных последовательностей в зависимости от вида несимметрии [2]. Динамические модели генераторов и двигателей остаются в схеме прямой последовательности, и поэтому сохраняется возможность замещения демпферной системы роторов электрических машин ограниченным количеством контуров и проявляются все другие отмеченные выше достоинства метода симметричных составляющих по сравнению с использованием трёхфазной модели.

Если в комплексной схеме замещения схемы обратной и нулевой последовательности оставить развёрнутыми, то при этом имеется возможность проводить расчёты несимметричных режимов при одноместной несимметрии с определением токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности в любой ветви и любом узле с учётом электромеханических переходных процессов. Для реализации такого варианта расчёта авторами разработана специальная программа, которая позволяет автоматически формировать схемы обратной и нулевой последовательности по исходной схеме прямой последовательности с добавлением дополнительной логической и количественной информации [6].

Эта программа принципиально может использоваться с любой программой расчёта электромеханических переходных процессов, построенной на базе схемы замещения прямой последовательности. Конкретная проработка выполнена для промышленной программы «Мустанг». Имеющиеся в программе «Мустанг» возможности задания включения и выключения ветвей по времени или по каким-либо факторам позволяет в темпе электромеханического переходного процесса определять электрические величины всех последовательностей при сменяющихся друг друга видах несимметрии. Наиболее типичным и востребованным случаем, который при этом может быть смоделирован, является цикл однофазного повторного включения. При таком варианте расчётов имеет место так

же ряд положительных факторов по сравнению, например, со специальными программами расчётов токов короткого замыкания «ТКЗ-3000» или «АРМ СРЗА», в которых электрическая сеть описывается алгебраическими уравнениями с неизменными ЭДС генераторов. То есть электромеханический переходный процесс не учитывается.

Немаловажно для расчётов релейной защиты и то, что в предложенном в [6] варианте расчета на базе программ электромеханических переходных процессов учитывается одна из наиболее существенных составляющих электромагнитного переходного процесса – переходный процесс в контурах ротора синхронных машин и таким образом отображается изменение периодической составляющей токов при коротких замыканиях. Это особенно важно при коротких замыканиях электрически близких к генераторам. Кроме того, учитываются реальные начальные условия при коммутациях, повторяющихся через небольшие промежутки времени. В частности автоматически учитывается изменение электродвижущих сил синхронных машин под действием автоматических регуляторов возбуждения и при форсировке возбуждения.

Однако очевидно, что использование комплексных схем замещения практически не даёт возможности моделировать процессы при многоместной несимметрии. При этом переходить на трёхфазную модель для всей большой энергосистемы нецелесообразно. В координатах ABC может быть представлена только та часть сети, где возникает несимметрия. Вся остальная сеть может быть представлена в виде трёх схем: прямой, обратной и нулевой последовательности. Трёхфазный фрагмент должен быть связан со схемами прямой, обратной, нулевой последовательности через операторы прямого и обратного преобразования координат по каждой ветви на границе выделенного трёхфазного фрагмента, как показано для одной из связей на рис. 3. Наиболее просто такой подход может быть реализован в том случае, если выделенный трёхфазный фрагмент сети не содержит вращающихся электрических машин. Такой случай может часто встречаться при расчётах релейной защиты. При этом генераторы остаются только в схеме прямой последовательности.



Рис. 3. Подключение трёхфазного фрагмента к схеме в системе симметричных составляющих

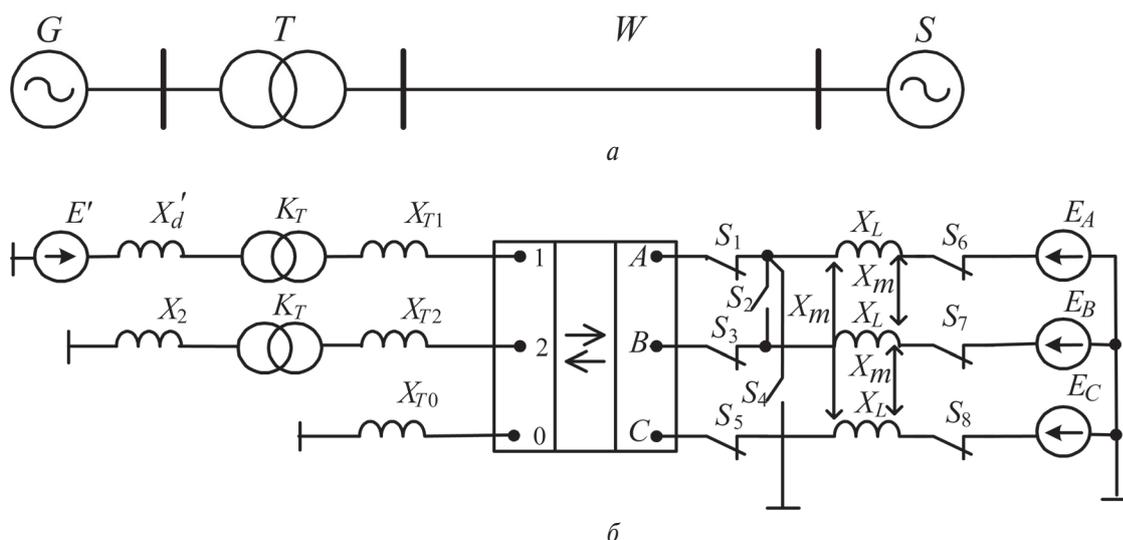


Рис. 4. Иллюстрация расчётов несимметричных режимов в электроэнергетической системе на основе сочетания систем координат: а – однолинейная принципиальная схема; б – схема замещения выделенного трёхфазного фрагмента, связанного через оператор преобразования координат со схемами прямой, обратной и нулевой последовательностей

Проиллюстрируем предлагаемый способ расчёта на простой схеме, рис. 4. Часть схемы, включающая генератор (G) и трансформатор (T), задаётся в координатах симметричных составляющих, ЛЭП (W) и система бесконечной мощности (S) выделяются в трёхфазный фрагмент. Ключи S_1-S_8 введены для моделирования коротких замыканий и обрывов фаз.

Система бесконечной мощности S в трёхфазном фрагменте представляется в виде неизменных ЭДС: $E_A=132$ кВ; $E_B=132e^{j120^\circ}$ кВ; $E_C=132e^{j240^\circ}$ кВ.

Трёхфазная линия электропередачи W в трёхфазном фрагменте представлена в виде одинаковых собственных сопротивлений фаз $X_L=103$ Ом, магнитная связь между которыми учитывается взаимными сопротивлениями $X_m=23$ Ом.

Трансформатор T в схемах прямой, обратной и нулевой последовательности замещён соответствующими сопротивлениями $X_{m1}=X_{m2}=X_{m0}=25$ Ом (приведены к стороне 220 кВ), его коэффициент трансформации $K_T=0,0658$.

Генератор в схеме замещения прямой последовательности моделируется неизменной по модулю переходной ЭДС $E'=16,7/\sqrt{3}$ кВ за переходным реактивным сопротивлением $X'_d=0,311$ Ом, в схеме обратной последовательности – сопротивлением обратной последовательности $X_2=0,3$ Ом.

Модель генератора при расчёте электромеханического переходного процесса описывается уравнениями движения ротора

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{M_j} [P_T - P_G - DP_{ном} s], \quad \frac{d\delta}{dt} = s\omega_{ном},$$

где s и δ – соответственно, скольжение ротора генератора, о.е., и угол вектора E' относительно вектора ЭДС системы, рад.; $\omega_{ном}=314$ рад./с – номи-

нальная частота вращения ротора; $P_T=125$ МВт – мощность турбины; P_G – электромагнитная мощность генератора, МВт; $P_{ном}=200$ МВт – номинальная активная мощность генератора; $M_j=1480$ МВт·с – момент инерции ротора генератора и турбины; $D=20$ о.е. – коэффициент демпфирования, учитывающий асинхронный момент.

Уравнение движения ротора решалось методом последовательных интервалов с определением напряжений и токов во всех узлах и ветвях схемы на каждом шаге расчёта с учётом прямого и обратного преобразования координат в месте стыковки трёхфазного фрагмента со схемами прямой, обратной и нулевой последовательности. Электрическая мощность генератора на каждом i -м шаге интегрирования определялась по расчётному напряжению на выводах генератора U_{Gi} и углу δ между векторами E' и U_{Gi} , как

$$P_{Gi} = \frac{E' \cdot U_{Gi}}{X'_d} \sin \delta.$$

В принятой схеме моделировалось варианты процессов при несимметричных режимах однофазного короткого замыкания (КЗ) на линии электропередач со стороны трансформатора:

- 1) с последующим циклом успешного однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). При этом в темпе электромеханического переходного процесса сменяют друг друга два вида одноместной несимметрии – однофазное короткое замыкание и неполнофазный режим с одной отключенной фазой;
- 2) с переходом в двухфазное на землю после одностороннего (каскадного) отключения фазы A данной ЛЭП. В этом случае несимметрия двухместная, так как одновременно отключена фаза A и замкнуты на землю фазы A и B .

Последовательность событий с указанием коммутаций в схеме приведена в таблице.

Таблица. Последовательность коммутаций для вариантов 1 и 2

Время, с	Событие	Коммутация ключей	
		Включение	Отключение
Вариант 1			
0,10	КЗ фазы А ЛЭП на землю за выключателем	S_4	–
0,25	Ликвидация КЗ отключением фазы А ЛЭП с обеих сторон	–	S_1, S_6, S_4
1,10	Успешное ОАПВ фазы А ЛЭП, восстановление нормального режима	S_1, S_6	–
Вариант 2			
0,10	КЗ фазы А ЛЭП на землю за выключателем	S_4	–
0,25	Отключение фазы А ЛЭП со стороны трансформатора Т	–	S_1
0,27	Переход однофазного КЗ в двухфазное (АВ) на землю	S_2	–
0,40	Отключение всех трёх фаз ЛЭП с обеих сторон	–	S_1-S_8

Моделирование процесса по варианту 1 с одноместной несимметрией выполнено для того, чтобы можно было сравнить результаты расчёта на базе сочетания трёхфазного фрагмента со схемами прямой, обратной и нулевой последовательности с результатами расчёта путём формирования комплексных схем замещения по упомянутой выше методике [6]. Результаты расчёта изменения угла вектора переходной ЭДС генератора E' в ходе электромеханического переходного процесса приведены на рис. 5.

Совпадение результатов расчёта с выделением трёхфазного фрагмента и с применением комплексных схем замещения свидетельствует о том, что операция взаимного преобразования координат в точке стыковки схем при пошаговом расчёте выполняется корректно. Следовательно, предлагаемый приём

расчёта может быть использован и для случая многоместной несимметрии с последующим определением токов и напряжений в ветвях и узлах схемы.

В качестве примера на рис. 6 приведены результаты расчётов фазных токов в трёхфазном фрагменте со стороны высокого напряжения трансформатора при многоместной несимметрии (при коммутациях по варианту 2). Значения фазных токов при многоместной несимметрии могут быть определены и в части схемы, описанной в координатах симметричных составляющих путём преобразования системы токов в прямой, обратной и нулевой последовательности к системе ABC . Представленные на рис. 7 и 8 графики изменения активной мощности генератора и угла вектора переходной ЭДС иллюстрируют соответствие электромеханического переходного процесса имеющим место возмущениям. До отключения повреждённой линии, когда существуют однофазное, а затем двухфазное короткое замыкание на землю, имеет место сброс мощности генератора, поэтому угол ЭДС E' увеличивается. После отключения линии тремя фазами связь между генератором и системой прерывается, поэтому ротор генератора ускоряется и движется несинхронно относительно вектора ЭДС системы.

Выводы

1. Для расчёта аварийных электрических величин в электроэнергетических системах при многоместной несимметрии с учётом электромеханических переходных процессов целесообразно представлять в виде трёхфазной схемы замещения только ту часть электрической сети, в которой имеют место короткие замыкания и обрывы фаз, а остальную часть – в системе симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности.

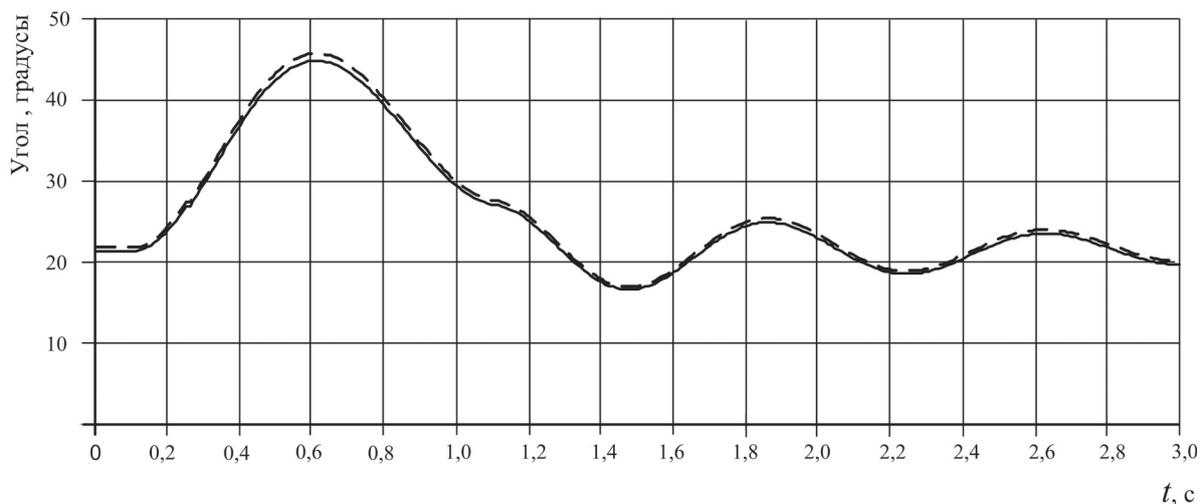


Рис. 5. График изменения угла вектора переходной ЭДС генератора E' в ходе электромеханического переходного процесса в цикле ОАПВ при коммутациях по варианту 1: (—) – с выделением трёхфазного фрагмента; (---) – с применением комплексных схем замещения

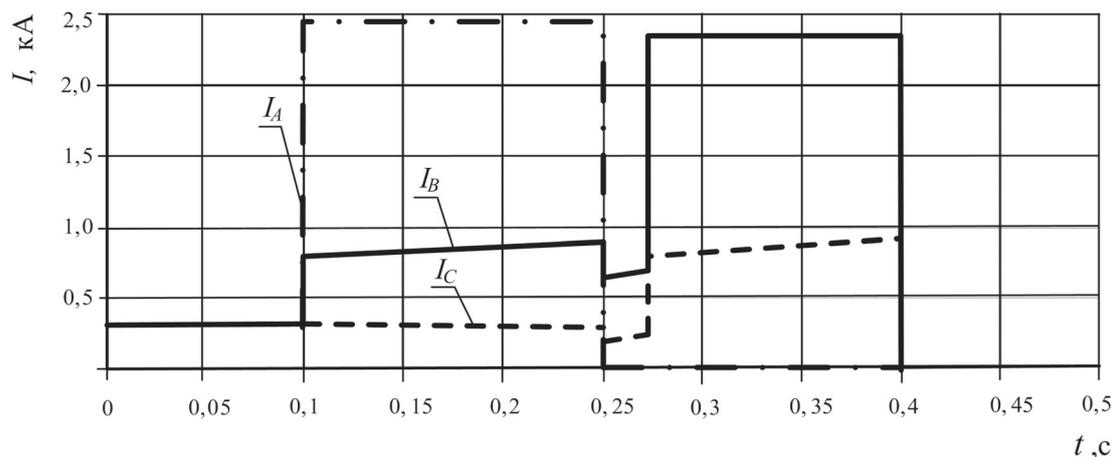


Рис. 6. График изменения расчётных значений токов фаз A, B и C на стороне высокого напряжения трансформатора при коммутациях по варианту_2

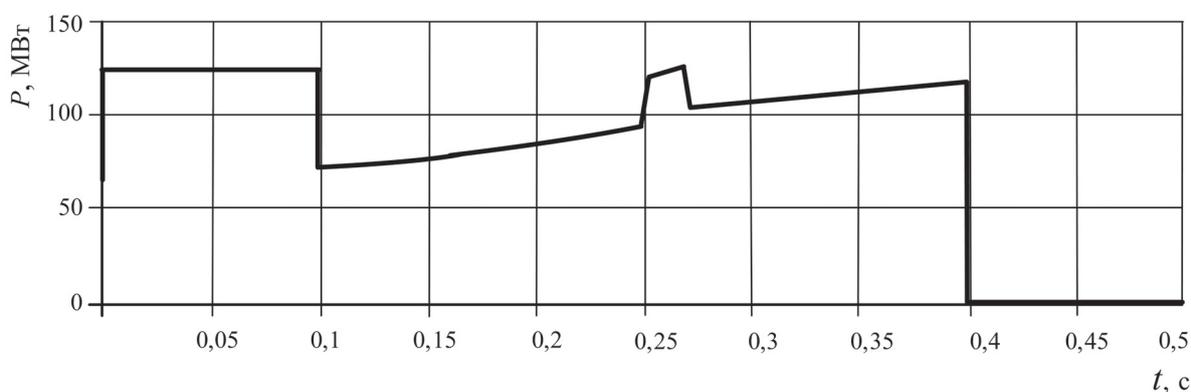


Рис. 7. График изменения активной мощности генератора при коммутациях по варианту_2

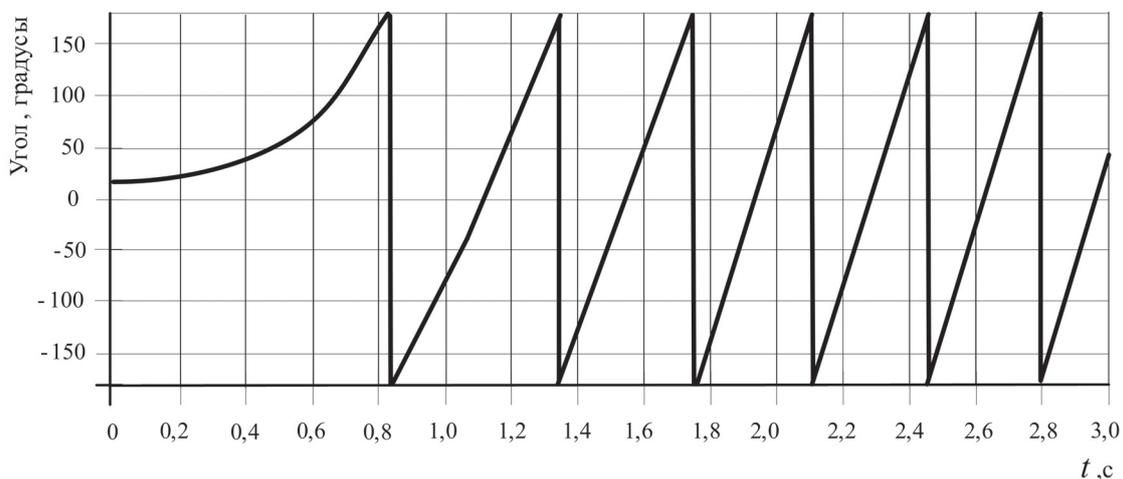


Рис. 8. График изменения угла вектора переходной ЭДС генератора при коммутациях по варианту 2

2. Взаимосвязь между частями схемы, представленными в симметричных составляющих и трёхфазных координатах, при пошаговом расчёте может быть осуществлена соответствующим прямым и обратным преобразованием координат.
3. Расчёт несимметричных режимов на основе сочетания различных систем координат позволяет снизить порядок системы алгебраических и дифференциальных уравнений модели и упростить задачу моделирования вращающихся электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернин А.Б., Лосев С.Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 439 с.
2. Ульянов С.А. Короткие замыкания в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 280 с.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
4. Лоханин Е.К., Глаголев В.А., Скрыпник А.И. Моделирование синхронных машин // Энергосистема: управление, конкуренция, образование: Сб. докл. III Междунар. научно-техническая конф. – Т. 1. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 453 с.
5. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / под общей ред. Л.С. Линдорфа и Л.Г. Мамикоянца. – М.: Энергия, 1972. – 352 с.
6. Вайнштейн Р.А., Лозинский К.С., Иванов В.П., Кобытев М.И. Усовершенствование расчетов несимметричных режимов в программах расчета электромеханических переходных процессов // Электричество. – 2008. – № 7. – С. 19–23.

Поступила 15.03.2010 г.

УДК 621.311.016.361

ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

В.И. Готман, А.В. Глазачев

Томский политехнический университет
E-mail: mo@elti.tpu.ru

Рассматривается расчет пропускной способности системообразующей связи энергосистемы по условиям статической аperiodической устойчивости. Для решения задачи предложено представлять энергосистему в виде трехузловой схемы. Приводится методика эквивалентирования энергосистемы на основе её режимных параметров.

Ключевые слова:

Энергосистема, статическая устойчивость, эквивалентирование, статические характеристики, пропускная способность, критическое напряжение.

Key words:

Power system, static stability, making equivalent, static characteristics, transmission capacity, critical voltage.

Введение

Современные энергообъединения имеют большую размерность и содержат до 10^4 узлов. Вопросы их эквивалентирования являются актуальными [1], поскольку позволяют существенно снизить размерность исследуемой энергосистемы и локализовать интересующий объект. Рассматриваемый ниже способ эквивалентирования целесообразен для решения задач повышения пропускной способности системообразующих связей, оценки статической аperiodической устойчивости энергообъединений.

Статическая устойчивость характеризуется коэффициентом запаса по мощности P в контролируемой связи или по напряжению U узла

$$K_p = (P_{\max} - P)/P, \quad K_U = (U - U_{\text{кр}})/U,$$

где P , U – мощность и напряжение в исходном режиме; P_{\max} , $U_{\text{кр}}$ – предельная мощность и критическое напряжение по условиям статической устойчивости; K_p , K_U – коэффициенты запаса устойчивости по соответствующим параметрам.

Ниже рассматривается возможность оценки пропускной способности системообразующей связи энергосистемы по условиям статической аperiodической устойчивости на базе представления исходной схемы эквивалентной.

Параметры эквивалента энергосистемы

На рисунке, *a*, приведена условная схема энергосистемы произвольной структуры, в которой контролируемой связью по мощности считаем $j-3$ и по напряжению – нагрузочный узел 3. Исходная схема может быть приведена к эквивалентной трехузловой (рисунок, *b*). В этой схеме в «чистом» виде выделено примыкание контролируемой связи к узлу 3; все прочие примыкания к этому узлу представлены результирующей связью. Для общности считаем, что в узле 3 есть собственная нагрузка $\bar{S}_{н3}$, которая в неизменном виде входит в эквивалентную схему. Эквивалентирование схемы осуществляется на следующих предпосылках.

Установившийся режим энергосистемы характеризуется значениями активных P_{ij} и реактивных Q_{ij} мощностей по ветвям и векторами напряжений U_i узлов. Эта информация может быть дополнена производными $\alpha_{ij} = dP_{ij}/dU_i$, $\beta_{ij} = dQ_{ij}/dU_i$, которые по существу представляют коэффициенты крутизны обобщенных статических характеристик соответственно по активной и реактивной мощностям относительно узла i [2].

Части исходной схемы со стороны связи $j-3$ по известным значениям параметров U_3 , P_{3j} , Q_{3j} , α_{3j} , β_{3j} можно поставить в соответствие эквивалент в виде