

DOI 10.5862/JEST.243.2

УДК 621.313.322-81

Н.В. Гришин

УРАВНЕНИЯ РЕЖИМНЫХ ЗАДАЧ ШЕСТИФАЗНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

N.V. Grishin

EQUATIONS FOR OPERATION CONDITIONS PROBLEMS OF SIX PHASE TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY

В целях увеличения единичной мощности сверхмощных турбогенераторов могут применяться многофазные обмотки статора, в том числе шестифазные, которые состоят из двух сдвинутых в пространстве на 30 электрических градусов трехфазных обмоток. Мощные шестифазные турбогенераторы находят широкое применение на строящихся в настоящее время энергоблоках атомных электростанций. Такие турбогенераторы за счёт наличия индуктивной связи между трехфазными системами обмотки статора обладают рядом специфических особенностей по сравнению с трехфазными. Ряд вопросов, касающихся шестифазных генераторов предельной мощности, нашёл освещение в литературе. Вместе с тем режимные задачи и связанные с ними аспекты изучены недостаточно. В статье, используя обычные допущения, применяемые при анализе трехфазных машин, получены дифференциальные уравнения шестифазного турбогенератора в фазных координатах. Определены соотношения между индуктивностями само- и взаимной индукции контуров статора и ротора. Индуктивности рассеяния контуров статора представлены в виде суммы индуктивностей рассеяния по путям самоиндукции и взаимной индукции между трехфазными системами обмотки статора. Произведено преобразование уравнений к вращающимся синхронно с ротором координатам, что обеспечивает большую наглядность и меньшую ресурсоемкость вычислений. Выявлены отличия от известных выражений для трехфазных машин. Определено уравнение движения ротора шестифазного турбогенератора. Произведен выбор относительных единиц, позволяющий упростить полученные выражения и проводить сопоставление параметров с параметрами обычных трехфазных машин. В относительных единицах получены уравнения состояния шестифазного турбогенератора аналогичные уравнениям Парка–Горева трехфазных машин. Это позволяет по аналогии с известными методами трехфазных турбогенераторов проводить исследования режимов работы и переходных процессов шестифазного турбогенератора.

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ; ШЕСТИФАЗНЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ; РЕЖИМНЫЕ ЗАДАЧИ; УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ; ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.

Polyphase stator winding can be used for increasing the unit capacity of high-power turbine generators. This includes six-phase winding consisting of two separate three-phase windings displaced by 30 electrical degrees. The modern high-power six-phase turbine generators are widely used in the construction of nuclear power plant units. Six-phase turbine generators have some specifics compared with three-phase generators due to mutual inductive coupling between three-phase stator winding systems. Some issues regarding six-phase generators have been described in literature; however, the operation conditions and related aspects have not been studied enough. This article has obtained differential equations defining the operation conditions of a six-phase turbine generator in phase coordinates using the common assumptions from the theory of three-phase machines. The relationship between self and mutual induction of rotor and stator circuits is defined. Leakage reactance of stator circuits is presented as a sum of leakage reactance for the self and mutual induction paths between three-phase stator winding systems. The equations were converted to rotating coordinates synchronous with rotor to provide higher clarity and reduce the amount of resources required for the calculations. We have explored the differences from the well-known equations for three-phase machines. The equation for the rotor movement of the six-phase generator has been determined. We have chosen the relative units allowing to simplify the obtained expressions and compare the parameters with those of ordinary three-phase generators. By this equations of six-phase generator operation are obtained. These relative units enables us to find the equations similar to the Park-Gorev-form equations for three-phase turbine generators. Solving these equations by traditional methods known for three-phase machines allow studying the operation modes and transient processes of six-phase turbine generators.

TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY; SIX-PHASE TURBINE GENERATORS; OPERATION CONDITIONS PROBLEMS; OPERATION CONDITIONS EQUATIONS; LINEAR TRANSFORMATION.

Введение

Укрупнение единичной мощности вновь вводимых энергоблоков — это одно из следствий развития электроэнергетики и роста установленных мощностей.

При достигнутом техническом уровне электромашиностроения мощность трехфазных турбогенераторов ограничена главным образом долговечностью и прочностью крепления лобовых частей обмотки статора. Поэтому снижение электродинамических усилий в лобовых частях, а также снижение тока в стержне обмотки является условием увеличения мощности генераторов. В этих целях могут использоваться многофазные обмотки статора. Увеличивая количество фаз при заданном напряжении статора, можно спроектировать машину повышенной мощности при меньшем фазном токе. Это обстоятельство послужило толчком к рассмотрению применения многофазных (вплоть до 27) обмоток для турбогенераторов большой мощности [1–3].

Шестифазная обмотка статора представляет собой двойную обмотку, состоящую из двух трехфазных со смещенными в пространстве на 30 электрических градусов магнитными осями. Такая схема позволяет приблизить форму пространственного распределения поля реакции якоря к синусоидальной и тем самым снизить добавочные потери, а также паразитные электромагнитные моменты. Для генераторов предельной мощности подключение шестифазной системы к трехфазной сети, как правило, производят с помощью трехобмоточного блочного повышающего трансформатора при соединении обмоток генераторного напряжения в звезду и треугольник. Применение большего числа фаз в генераторах предельной мощности сопряжено со сложностями использования мощной преобразовательной техники, а потому не нашло применения.

Успешный опыт применения подобной схемы для генератора ТВВ-1200-2У3 мощностью 1200 МВт с шестифазной обмоткой статора на Костромской ГРЭС был использован при строительстве энергоблоков мощностью более 1000 МВт.

В то же время применению теории синхронной машины к шестифазным турбогенераторам в научно-технической литературе уделено мало

внимания [4–7], что связано с относительно небольшим их распространением. Указанные публикации затрагивают расчеты переходных режимов обособленных генераторов. При этом принятые подходы не ориентированы на описание процессов, подходящее для любых — установившихся или переходных — режимов и не ограниченное условиями наличия токов только в шести или трех фазах. В выборе базисных количеств отсутствует единый подход, что приводит к нарушению соотношений при расчетах в относительных единицах. Отсутствует построение уравнений состояния, описывающих поведение машины в эксплуатации.

Задача настоящей работы — рассмотреть и преобразовать к удобной форме уравнения состояния шестифазного турбогенератора. Это позволит в дальнейшем провести систематизацию определяющих параметров, получить схемы замещения, отражающие электромагнитные связи между контурами машины, и упростить физическую трактовку протекающих процессов.

Объект исследования и принимаемые допущения

Рассмотрим неявнополюсный шестифазный синхронный генератор с одной парой полюсов на роторе. Ротор вращается против часовой

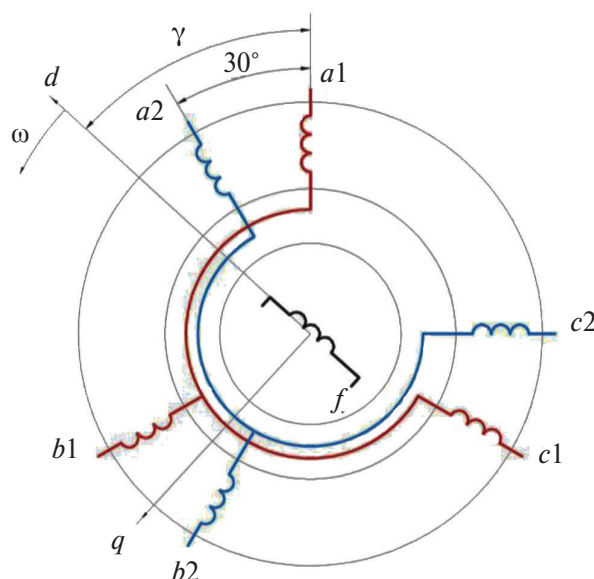


Рис. 1. Схема расположения осей фаз статора и ротора шестифазной неявнополюсной машины

стрелки и имеет обмотку возбуждения (контур f), полностью аналогичную трехфазным турбогенераторам. Обмотка якоря образована двумя разобщенными симметричными трехфазными обмотками (фазы $a1, b1, c1$ и $a2, b2, c2$), вторая трехфазная система сдвинута относительно первой на 30 градусов по направлению вращения. Отсчет угловых координат иллюстрирует рис. 1. Кроме магнитных осей фаз статора, используются оси, определяемые магнитной симметрией ротора: продольная (d) и поперечная (q). Направление поперечной оси выбрано исходя из удобства записи соотношений в дальнейшем.

Используем обычные для трехфазных машин допущения. Магнитная проницаемость элементов магнитопровода постоянна. Пространственное распределение намагничивающих сил обмоток, полей самоиндукции и взаимоиндукции синусоидально. Магнитопровод и обмотки машины симметричны. В обмотках статора все фазы одинаковы по числу витков и активным сопротивлениям. Влияние ферромагнитного массива бочки ротора эквивалентизируется с помощью двух демпферных контуров (контуров ed и eq). Для более скрупулезного исследования отдельных явлений влияние указанных допущений на результаты может учитываться дополнительно.

Дифференциальные уравнения напряжений в фазных координатах

Для описания режимных задач синхронные машины рассматривают как некоторую электродинамическую систему, состоящую из совокупности электрических цепей и вращающегося ротора. Согласно второму закону Кирхгофа можно записать уравнения напряжений обмоток якоря (p – символ дифференцирования по времени):

$$\begin{aligned} U_{a1} &= p\Psi_{a1} - r_{a1}i_{a1}; & U_{a2} &= p\Psi_{a2} - r_{a2}i_{a2}; \\ U_{b1} &= p\Psi_{b1} - r_{b1}i_{b1}; & U_{b2} &= p\Psi_{b2} - r_{b2}i_{b2}; \\ U_{c1} &= p\Psi_{c1} - r_{c1}i_{c1}; & U_{c2} &= p\Psi_{c2} - r_{c2}i_{c2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для роторных контуров справедливы соотношения, повторяющие аналогичные для трехфазной машины с двумя демпферными контурами:

$$\begin{aligned} U_{fd} &= p\Psi_{fd} + r_{fd}i_{fd}; \\ 0 &= p\Psi_{ed} + r_{ed}i_{ed}; \\ 0 &= p\Psi_{eq} + r_{eq}i_{eq}. \end{aligned} \quad (2)$$

На основании принятых допущений потокосцепления можно вычислять в виде суммы потокосцеплений самоиндукции и взаимоиндукции со всеми остальными рассматриваемыми контурами.

Индуктивности само- и взаимоиндукции контуров ротора и статора

Вследствие неявнополюсности ротора и симметричности обмоток собственные индуктивности и взаимные индуктивности фаз не будут зависеть от положения ротора.

Собственные индуктивности фаз равны между собой. Взаимоиндукции фаз для каждой трехфазной системы тоже равны, что соответствует трехфазным машинам. Взаимоиндукции между фазами обеих систем могут быть равными, противоположными по знаку или равны нулю для фаз с перпендикулярными осями обмоток в зависимости от пространственного расположения фаз (см. рис. 1).

Взаимоиндукции между цепями статора и ротора зависят от положения обмотки возбуждения; выражения для них запишутся как функции угла γ вида $m \cos(\gamma - \alpha)$, где α – соответствует углу между осью $a1$ и осью статорной обмотки, взаимная индуктивность с которой определяется.

Между роторными контурами продольной оси взаимные индуктивности равны.

Преобразование уравнений к координатам, вращающимся вместе с ротором

Часть индуктивностей выражаются гармоническими функциями времени, поэтому уравнения напряжений (1) и (2) являются дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. При исследовании электрических машин сложилась практика их упрощения с помощью математических линейных преобразований координат [8, 9], с тем чтобы получить уравнения с постоянными коэффициентами.

Стоит отметить, что на современных ЭВМ можно выполнять с применением численных методов расчеты режимов работы электрических машин, не прибегая к линейным преобразованиям [10]. Однако с помощью таких расчетов трудно проследить физическую взаимосвязь между отдельными явлениями и параметрами машин; кроме того, периодические коэффициенты в уравнениях заставляют проводить дополнительные вычисления, повышая ресурсоемкость.

Воспользуемся линейным преобразованием координат d, q . Оно достаточно хорошо освещено в литературе, однако из-за присутствия шести фаз в новых координатах необходимо использовать шесть переменных. Ввиду наличия двух разоб- щенных трехфазных систем на статоре удобно рассматривать магнитное воздействие каждой системы отдельно, заменяя ее эквивалентными продольными, поперечными контурами и токами нулевой последовательности. Например, воздействие трех фаз первой системы в продольной оси машины будет эквивалентироваться контуром $d1$, а трех фаз второй системы — контуром $d2$ и т.д.

В общем случае для каждой трехфазной системы можно использовать свои координатные оси d, q . Чтобы упростить уравнения и облегчить возможность сравнения с трехфазными машинами, для обеих систем будем использовать одну систему координат d, q .

Целесообразно использовать линейное преобразование для токов, применяемое для трехфазных машин. Переменные $i_{d1}, i_{d2}, i_{q1}, i_{q2}, i_{01}, i_{02}$ имеют для каждой трехфазной системы общепринятый смысл соответственно продольного, поперечного и нулевого токов. При этом для токов i_{d2}, i_{q2} в линейных преобразованиях вместо угла γ должен использоваться угол $\gamma - \pi/6$, что связано с пространственным расположением обмоток.

Тогда потокосцепления ротора с учетом линейного преобразования токов в координатах d, q можно представить в виде

$$\begin{aligned}\Psi_{fd} &= \frac{3}{2}m_{afd}i_{d1} + \frac{3}{2}m_{afd}i_{d2} + L_{fd}i_{fd} + m_{fed}i_{ed}; \\ \Psi_{ed} &= \frac{3}{2}m_{aed}i_{d1} + \frac{3}{2}m_{aed}i_{d2} + m_{fed}i_{fd} + L_{ed}i_{ed}; \\ \Psi_{eq} &= -\frac{3}{2}m_{aeq}i_{q1} - \frac{3}{2}m_{aeq}i_{q2} + L_{eq}i_{eq}.\end{aligned}\quad (3)$$

Полученные выражения отличаются от известных для трехфазной машины наличием дополнительных членов $3/2m_{afd}i_{d2}, 3/2m_{aed}i_{d2}, 3/2m_{aeq}i_{q2}$, отражающих влияние второй трехфазной системы статора.

Используя линейные преобразования выражений для потокосцеплений, получим формулы для потокосцеплений первой системы в координатах d, q :

$$\begin{aligned}\Psi_{d1} &= (L_a - m_{alb1})i_{d1} + \sqrt{3}m_{ala2}i_{d2} + m_{afd}i_{fd} + m_{aed}i_{ed}; \\ \Psi_{q1} &= (L_a - m_{alb1})i_{q1} + \sqrt{3}m_{ala2}i_{q2} + m_{aeq}i_{eq}; \\ \Psi_{01} &= (L_a + 2m_{alb1})i_{01}.\end{aligned}$$

Для второй системы выражения аналогичны и получаются перестановкой индексов 1 и 2.

Как видим, индуктивности обеих трехфазных систем нулевой последовательности равны, не зависят от потокосцеплений с другой трехфазной системой и поэтому могут определяться как для обычной трехфазной обмотки.

Полученные выражения по форме отличаются от известных для трехфазных машин наличием в потокосцеплениях членов $\sqrt{3}m_{ala2}i_{d2}, \sqrt{3}m_{ala2}i_{d1}, \sqrt{3}m_{ala2}i_{q2}, \sqrt{3}m_{ala2}i_{q1}$, отражающих взаимные связи между трехфазными системами статора. Возникновение множителя $\sqrt{3}$ перед взаимной индуктивностью m_{ala2} связано с выполняемым линейным преобразованием, поскольку обмотки со сдвинутыми на 30 эл.град. осями приводятся к одной оси. Соответственно изменив величину взаимной индуктивности между трехфазными системами при переходе к относительным единицам, можно избежать записи этих коэффициентов в уравнениях.

В практике исследования трехфазных машин пользуются приведенными токами и индуктивностями цепей ротора, позволяющими записать уравнение без коэффициентов $3/2$ [11]. Необходимые преобразования обычно производятся одновременно с переходом к относительным единицам и могут быть применены при исследовании шестифазных машин.

Система относительных единиц

Для статора воспользуемся системой относительных единиц с широко распространенными базисными величинами [12], но со следующими отличиями.

Обычно для базисной мощности используется выражение $P_6 = m/2 I_6 U_6$, где m — число фаз. Однако имеет смысл за базисную мощность использовать мощность одной трехфазной системы: $P_6 = 3/2 I_6 U_6$. В этом случае величины соответствующих активных сопротивлений и индуктивностей, рассчитываемые для каждой системы отдельно, будут сопоставимы с параметрами обычных синхронных машин, которые приводятся в справочниках, используются для настройки релейных защит и т.д.

В этом случае при номинальной нагрузке обеих трехфазных систем момент на валу будет равен 2 о.е. (такой же будет номинальная мощность генератора).

Базисные величины для контуров ротора принято выбирать исходя из удобства исследования. В данном случае, когда по каждой из осей учитывается одна демпферная обмотка, целесообразно принимать базисные мощности всех контуров равными — $P_6 = P_{\text{я}} = P_{\text{сб}}$, а базисные токи такими, чтобы обеспечить равенство относительных значений взаимоиндуктивностей (так называемые базисные единицы Ранкина [8]). Для демпферного контура в поперечной оси принимаются те же базисы, что и для контура в продольной оси.

В таком случае выражения упрощаются, сокращается количество параметров, наиболее просто составляются эквивалентные схемы замещения.

Уравнения шестифазного турбогенератора в относительных единицах

Формально индуктивные сопротивления по продольной (x_d) и поперечной (x_q) осям, входящие в выражения для потокосцеплений, целесообразно представить в более удобном для физической трактовки виде: так же, как это практикуется для трехфазных машин, состоящими из двух составляющих — x_{ad} , соответствующей полю основной гармонической, связанной с ротором, и x_{σ} , соответствующей полям рассеяния обмотки статора.

Такой же подход удобно распространить и на соответствующее взаимной индуктивности между трехфазными системами индуктивное сопротивление $x_{12} = x_{ad} + x_{\sigma 12}$.

Взаимная индуктивность x_{ad} по пути основного потока и индуктивность $x_{\sigma 12}$ по путям потоков рассеяния между трехфазными системами из-за симметричности обмоток статора для продольной и поперечной осей будут одинаковыми.

Индуктивность рассеяния каждой трехфазной системы можно представить в виде суммы собственного рассеяния $x_{\sigma 11}$, $x_{\sigma 22}$ и взаимного рассеяния с другой системой $x_{\sigma 12}$, то есть $x_{\sigma 1} = x_{\sigma 11} + x_{\sigma 12}$ и $x_{\sigma 2} = x_{\sigma 22} + x_{\sigma 12}$.

Такое представление облегчает исследование режимов при различных нагрузках трехфазных систем.

Используя введенную систему относительных единиц и приведенные выше соображения, запишем систему уравнений состояния для контуров ротора и первой трехфазной системы статора шестифазного турбогенератора (аналогично уравнениям Парка—Горева трехфазной машины)

$$\begin{aligned} U_{d1} &= p\Psi_{d1} - \Psi_{q1}p\gamma - r i_{d1}; & U_{q1} &= p\Psi_{q1} + \Psi_{d1}p\gamma - r i_{q1}; \\ U_{01} &= p\Psi_{01} - r i_{01}; & U_{fd} &= p\Psi_{fd} + r_{fd} i_{fd}; \\ 0 &= p\Psi_{ed} + r_{ed} i_{ed}; & 0 &= p\Psi_{eq} + r_{eq} i_{eq} \end{aligned}$$

и уравнения связи токов и потокосцеплений

$$\begin{aligned} \Psi_{d1} &= x_{\sigma 11} i_{d1} + x_{\sigma 12} (i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{q1} &= x_{\sigma 11} i_{q1} + x_{\sigma 12} (i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq} (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \\ \Psi_{01} &= x_0 i_{01}; \\ \Psi_{fd} &= x_{\sigma fd} i_{fd} + x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{ed} &= x_{\sigma ed} i_{ed} + x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{eq} &= x_{\sigma eq} i_{eq} + x_{aq} (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}). \end{aligned}$$

(5)

Для второй системы выражения аналогичны и получаются перестановкой индексов 1 и 2.

Уравнение движения ротора

Уравнения электрических контуров необходимо дополнить уравнением, описывающим движение вращающегося ротора. Определяя для установившегося режима электромагнитный момент генератора через сумму полной мощности и мощности электрических потерь, можно записать дифференциальное уравнение движения ротора следующим образом:

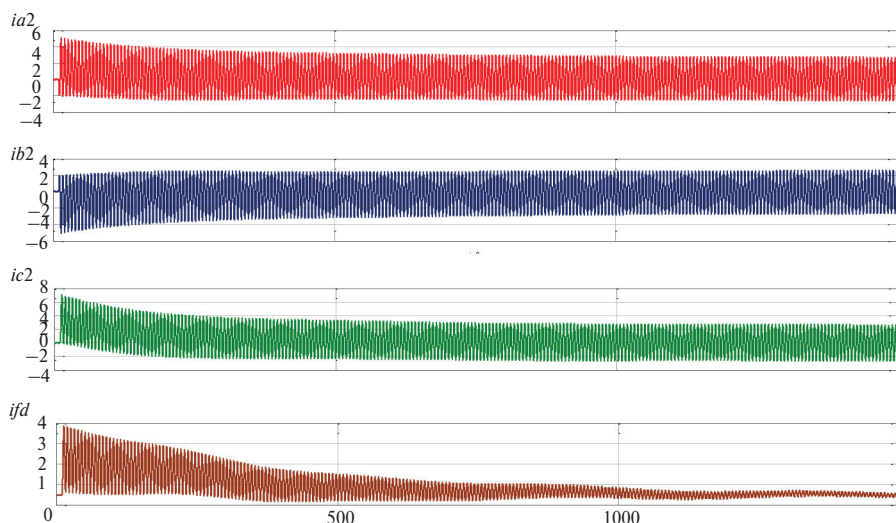


Рис. 2. Фазные токи короткозамкнутой системы и ток возбуждения

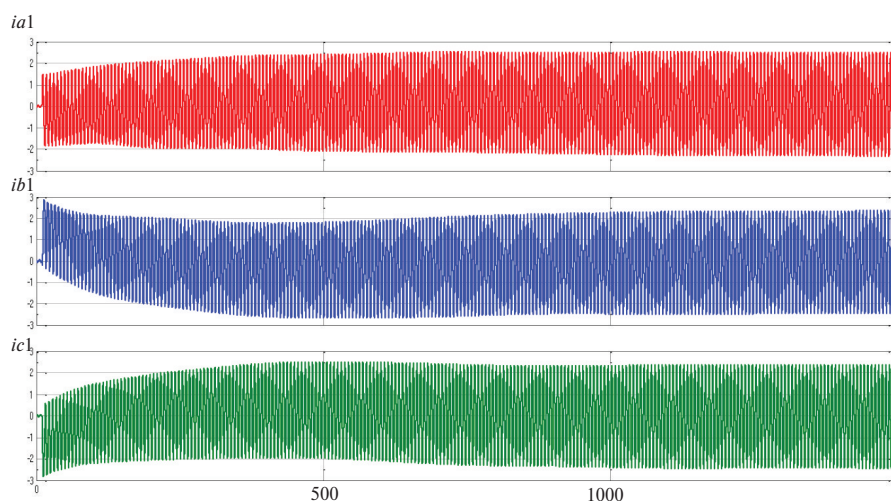


Рис. 3. Фазные токи системы, включенной на сеть

$$Jp\omega = \frac{3}{2}(\Psi_{d1}i_{q1} + \Psi_{d2}i_{q2} - \Psi_{q1}i_{d1} - \Psi_{q2}i_{d2}) + m_t.$$

Применение полученных уравнений

Преимущества при описании электрических машин уравнениями в осях d, q , жестко связанных с ротором, известны [8]. Используя их, удобно рассматривать установившиеся режимы. В этом случае производные от потокоцеплений равны нулю, а от угла γ — равны единице, и тогда выражения становятся просты и наглядны.

Возьмем как пример режим установившегося трехфазного короткого замыкания первой

системы при разомкнутой второй. При пренебрежении активным сопротивлением реакция якоря будет продольная размагничивающая, и ток короткого замыкания совпадает с осью d [8], а вектор напряжения второй системы — с осью q . Таким образом, в выражениях (4) и (5) необходимо положить: $i_{d1} = \text{const}$; i_{d2}, i_{q1}, i_{q2} равны нулю; U_{d1}, U_{d2}, U_{q1} также равны нулю и $U_{q2} = \text{const}$. После чего эти выражения сведутся к системе из двух линейных уравнений.

В случае установившегося шестифазного короткого замыкания условиями по токам будут: $i_{d1}, i_{d2} = \text{const}$; i_{q1}, i_{q2} равны нулю; а по напряже-

ниям — $U_{d1}, U_{d2}, U_{q1}, U_{q2}$ равны нулю. Тогда уравнения (4) и (5) сведутся к одному линейному уравнению.

Уравнения (4), (5) могут быть применены для анализа режимных задач путем совместного решения по аналогии с хорошо проработанными методами трехфазных генераторов. Это сводится к следующему: определению начальных условий по напряжениям внешних источников; решению системы дифференциальных уравнений состояния (4) численными методами, при этом на каждом шаге должны быть решены алгебраические уравнения связи (5); нахождению величин в фазных координатах. Величины в фазных координатах могут быть определены через переменные в d, q координатах с использованием обратных преобразований, аналогичных широко освещенным в литературе [8, 9].

Предложенный подход был реализован на базе программного комплекса Matlab Simulink; он позволяет исследовать широкий спектр эксплуатационных и аварийных режимов, в том числе при работе генератора в энергосистеме. Например, на рис. 2, 3 представлены результаты расчета внезапного трехфазного короткого замыкания второй системы генератора мощностью 1200 МВт при первой системе, включенной на сеть.

Расчетные результаты сопоставимы с опытными, полученными при приемочных испытаниях оборудования. Следует отметить, что результаты анализа существенно зависят от точности задания используемых параметров.

Выводы

Шестифазные турбогенераторы за счет наличия индуктивной связи между трехфазными системами обмотки статора обладают рядом специфических особенностей.

Произведено преобразование уравнений шестифазного генератора к вращающимся синхронно с ротором d, q координатам, позволяющее перейти от уравнений с переменными коэффициентами к линейным. Выявлены отличия от известных уравнений для трехфазных машин.

Произведен выбор относительных единиц, позволяющих упростить полученные выражения и проводить сопоставление параметров с параметрами обычных трехфазных машин.

В относительных единицах получены уравнения состояния шестифазного турбогенератора, аналогичные уравнениям Парка–Горева, позволяющие проводить исследования режимов работы и переходных процессов методами, известными для трехфазных турбогенераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роберт П., Диспо Р., Дасье Ж. Повышение коэффициента полезного действия турбогенераторов // Экспресс-информация. Электрические машины и аппараты. 1966. № 31. С. 9–25.
2. Шильдинер Л.М. К вопросу о повышении удельной мощности турбогенераторов // Электротехника. 1968. №10. С. 6–8.
3. Chan K., Oesterheld J., Walli K.-D. Flexible Turbogenerator Converter System With Enhanced Grid Support Features - Design and Applications // CIGRE. Study Committee A1 meeting and colloquium "Rotating electrical machines: requirements, operation & maintenance". September 6th -11th, 2015, Madrid, Spain.
4. Хуторецкий Г.М. Шестифазные турбогенераторы // «Электросила». 1970. №28. С. 33–40.
5. Хуторецкий Г.М. Схемы замещения шестифазной неявнополюсной машины // Известия вузов. Электромеханика. 1970. №1. С. 27–33.
6. Хуторецкий Г.М., Воронов Г. Г. Шестифазные обмотки турбогенератора // Электротехника. 1968. № 10. С. 1–6.
7. Хуторецкий Г.М. Индуктивные сопротивления шестифазных турбогенераторов при двойных двухфазных замыканиях // Электричество. 1978. №4. С. 42–47.
8. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М., Л.: ГЭИ, 1960. 312 с.
9. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М., Л.: ГЭИ, 1950. 551 с.
10. Адалев А.С., Кучинский В.Г., Попков Е.Н., Фильчиков А.И., Чайка В.М. Имитационная модель шестифазной вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 2(147). С. 283–291.
11. Concordia C. Relations among Transformations Used in Electrical Engineering Problems // General Electric Review. 1938. July, P. 323–325.
12. Стрижков И.Г. Системы относительных единиц в теории синхронных машин с несколькими обмотками на статоре // Научный журнал КубГАУ. 2013. №91(07). С. 37–43.

REFERENCES

1. Robert P., Dispaux Y., Dacier Y. Povishenie koeffitsienta poleznogo deistviya turbogeneratorov. [Turbogenerators efficiency improvement]. *Express-informatsiya. Elektricheskie mashiny i apparaty*. 1996. № 31. S. 9–25 (rus)
2. Shildiner L.M. K voprosu o povyshenii udelnoy moshchnosti turbogeneratorov. [Step-up of turbogenerator specific capacity]. *Elektrotehnika*. 1968. № 10. S. 6–8. (rus)
3. Chan K., Oesterheld J., Walli K.-D. Flexible Turbogenerator Converter System With Enhanced Grid Support Features - Design and Applications. *SIGRE. Study Committee AI meeting and colloquium "Rotating electrical machines: requirements, operation & maintenance"*. September 6th -11th, 2015. Madrid, SPAIN.
4. Khutoretskiy G.M., Voronov G.G. Shestifaznyye turbogeneratory. [Six-phase turbogenerators]. «*Elektrosila*». 1970. № 28. S. 33–40. (rus)
5. Khutoretskiy G.M. Skhemy zameshcheniya shestifaznoy neyavnopolyusnoy mashiny. [Six-phase non-silent pole machine equivalent circuits]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 1970. № 1. S. 27–33. (rus)
6. Khutoretskiy G.M., Voronov G.G. Shestifaznyye obmotki turbogenerators [Six-phase winding for turbogenerators]. *Elektrotehnika*. 1968. № 10. S. 1–6. (rus)
7. Khutoretskiy G.M. Induktivnyye soprotivleniya shestifaznykh turbogeneratorov pri dvoynnykh dvukhfaznykh zamykaniyakh [Reactance of six-phase turbogenerators during double two-phase short-circuits]. *Elektrichestvo*. 1978. № 4. S. 42–47. (rus)
8. Vazhnov A.I. Osnovy teorii perekhodnykh protsessov sinkhronnoy mashiny [Foundation of transient analysis for synchronous machines]. Moscow – Leningrad: GEI, 1960. 312 s. (rus)
9. Gorev A.A. Perekhodnyye protsessy sinkhronnoy mashiny [Transient analysis for synchronous machines] Moscow–Leningrad: GEI, 1950, 551 s. (rus)
10. Adalev A.S., Kuchinskiy V.G., Popkov Ye.N., Filchikov A.I., Chayka V.M. Imitatsionnaya model shestifaznoy ventilnoy mashiny s возбуждением от postoyannykh magnitov [Simulation model of six-phase converter-fed machine with permanent magnets excitation]. *Naychno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2012. № 2(147). T. 1. S. 283–291. (rus)
11. Concordia C. Relations among Transformations Used in Electrical Engineering Problems General. *Electric Review*. 1938, July. P. 323–325.
12. Strizhkov I.G. Sistemy otnositelnykh yedinit v teorii sinkhronnykh mashin s neskolkimi obmotkami na statore [Per unit systems in theory of synchronous machines with several windings at stator]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2013. № 91(07). S. 37–43. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ГРИШИН Николай Васильевич — руководитель группы, ОАО «Силовые машины».
195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.
E-mail: kostroma44@gmail.com

GRISHIN Nikolai V. — OJSC "Power Machines".
3A, Vatutina str., St. Petersburg, Russia, 195009.
E-mail: kostroma44@gmail.com