

На правах рукописи



Горшков Константин Евгеньевич

**УПРАВЛЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ТИРИСТОРНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ СИСТЕМ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ
В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ И ОТКАЗАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
ВЕНТИЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции, сети и системы»
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Научный руководитель – Гольдштейн Михаил Ефимович,
кандидат технических наук, профессор.

Официальные
оппоненты:

Цытович Леонид Игнатьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ), заведующий
кафедрой «Электропривод и автоматизация
промышленных установок»;

Гайнуллин Ришат Рафкатович,
кандидат технических наук,
ЗАО «Комплексные энергетические системы» –
КЭС Холдинг (г. Москва), главный специалист-
электрик.

Ведущая организация – ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится 14 февраля 2013 г., в 10 часов, на
заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГБОУ ВПО «Южно-
Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080,
г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского
государственного университета.

Автореферат разослан «____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сегодня многие синхронные генераторы (СГ) оснащаются цифровыми системами самовозбуждения (ССВ) с сильноточными тиристорными преобразователями (ТП) с несколькими параллельными вентиляльными ветвями в каждом плече. Отказ параллельных ветвей в таком преобразователе снижает его нагрузочную способность, что приводит к ограничению режимов работы синхронного генератора и, в ряде случаев, запрету на форсировку при коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме. В связи с тем, что форсировка генератора это основное, а часто и единственное средство восстановления напряжения при КЗ в энергосистеме, снижение ограничений и повышение эффективности работы преобразователей ССВ с целью сохранения функциональных возможностей синхронных генераторов в таких режимах является актуальной научно-технической задачей.

Работа синхронного генератора в режиме форсировки нормируется кратностью форсировки по напряжению и току ротора, а также длительностью форсировки. Эти параметры взаимосвязаны и у генераторов с самовозбуждением зависят от вида и удаленности КЗ, числа параллельных ветвей в плечах, алгоритма управления плечами и способа синхронизации системы импульсно-фазового управления тиристорами с напряжениями питающей сети. Поэтому исследование взаимосвязи этих параметров с учетом перечисленных факторов с использованием возможностей микропроцессорного управления создает предпосылки для разработки эффективных алгоритмов управления тиристорным преобразователем, снижающих ограничения на форсировку генератором внешних КЗ при отказах параллельных вентиляльных ветвей.

Вопросами расчета и анализа режимов работы синхронных машин с вентиляльными системами возбуждения в разное время занимались А.А. Горев, В.А. Веников, С.А. Ульянов, А.А. Ковач, Е.Я. Казовский, И.П. Крючков, А.А. Юрганов, А.С. Куцик, А.Х. Есипович, Е.К. Лоханин и др., а в работах И.А. Глебова, А.А. Виноградова, В.Я. Вейгандта, В.С. Костелянца, Б.Н. Абрамовича, О.Г. Плахтины, А.Г. Логинова, А.И. Федотова и др. синхронные генераторы анализируются и в совокупности с их вентиляльными системами самовозбуждения. Однако в этих работах ограничения кратности форсировки по току возбуждения СГ при отказах параллельных вентиляльных ветвей не рассматриваются во взаимосвязи с кратностью по напряжению и допустимой длительностью форсировки. Поэтому для исследования возможности снижения этих ограничений первоначально следует создать математическую модель, связывающую электротепловые процессы в тиристорном преобразователе ССВ с электромагнитными переходными процессами в обмотках СГ, а затем на ее основе разработать эффективные алгоритмы управления тиристорным преобразователем.

Цель работы – сохранение функциональных свойств сильноточных тиристорных преобразователей систем самовозбуждения синхронных генераторов при коротких замыканиях в энергосистеме и отказах параллельных вентиляльных ветвей путем повышения эффективности управления тиристорами.

Идея работы – разработка эффективных алгоритмов управления сильноточными тиристорными преобразователями систем самовозбуждения синхрон-

ных генераторов с микропроцессорным управлением при отказах параллельных вентильных ветвей на основе исследования взаимосвязи допустимых кратностей форсировки по напряжению и току с допустимой длительностью форсирования при разных способах управления тиристорами и разных видах КЗ в энергосистеме.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Показана целесообразность перераспределения длительностей работы плеч сильноточного тиристорного преобразователя системы самовозбуждения, а также изменения способа синхронизации системы импульсно-фазового управления тиристорами при форсировке синхронным генератором внешних КЗ с отказом параллельных вентильных ветвей. При этом обеспечивается снижение нагрева тиристорov, оставшихся в работе.

2. Уравнение внешней характеристики тиристорного преобразователя ССВ при форсировке синхронным генератором внешних КЗ, учитывающее вид и удаленность внешнего КЗ, схему и группу соединения обмоток преобразовательного трансформатора, режим работы преобразователя, способ управления тиристорами и способ синхронизации системы импульсно-фазового управления.

3. Математическая модель, связывающая электротепловые процессы в сильноточном тиристорном преобразователе системы самовозбуждения при отказах параллельных вентильных ветвей с электромагнитными процессами в синхронном генераторе, особенностью которой является учет влияния на работу преобразователя способов управления тиристорами и коротких замыканий в энергосистеме.

4. Алгоритмы управления сильноточным тиристорным преобразователем системы самовозбуждения при отказах параллельных вентильных ветвей, отличающиеся учетом числа ветвей, оставшихся в работе, их параметров, а также учетом распределения длительностей работы плеч, вида и удаленности КЗ, и обеспечивающие форсировку либо нормируемой длительности при ограничении кратности по току, либо нормируемой кратности по току при сокращении длительности.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается аргументированностью принятых допущений и исходных посылок, вытекающих из основ электротехники и силовой электроники, корректным применением известных моделей элементов и методов расчета исследуемых цепей, проверкой корректности и адекватности полученных уравнений и соотношений в средах научного моделирования NI LabVIEW, Simulink (MATLAB), MathCAD.

Научная новизна работы

1. Предложен способ перераспределения нагрузок и температур нагрева вентиляей сильноточного тиристорного преобразователя, позволяющий снизить тепловые потери и нагрев тиристорov, оставшихся в работе при отказах параллельных вентильных ветвей в плече, посредством целенаправленного несимметричного управления плечами.

2. Предложен способ снижения нагрузок и температур нагрева вентиляей тиристорного преобразователя при форсировке синхронным генератором несимметричных КЗ, обеспечивающий нормируемую форсировку при отказах «резервных» вентильных ветвей в плечах преобразователя за счет изменения

способа синхронизации системы импульсно-фазового управления тиристорами с напряжениями питающей сети.

3. Получены аналитические выражения для внешней характеристики ТП ССВ, длительностей работы его плеч и кратности форсировки по напряжению синхронного генератора, обобщенные для различных видов и удаленностей внешних КЗ, схем и групп соединения обмоток преобразовательного трансформатора, способов синхронизации системы управления тиристорами с напряжениями питающей сети, симметричного и несимметричного управления плечами преобразователя ССВ.

4. Разработана математическая модель, включающая синхронный генератор и сильноточный тиристорный преобразователь системы самовозбуждения, на основе совместного аналитического решения системы дифференциальных уравнений Парка-Горева с уравнением обобщенной внешней характеристики ТП ССВ, учитывающая электротепловые процессы в преобразователе и алгоритмы управления им при КЗ в энергосистеме и отказах параллельных вентильных ветвей.

Практическое значение работы

1. Разработаны эффективные алгоритмы управления сильноточным тиристорным преобразователем системы самовозбуждения синхронного генератора при форсировке внешних КЗ, сопровождающихся отказами параллельных вентильных ветвей, обеспечивающие работу генератора при значительно меньших функциональных ограничениях по сравнению с требованиями, регламентированными ГОСТ.

2. Показан положительный эффект, достигаемый реализацией предлагаемых алгоритмов, на примере анализа работы блока ТГВ-200-2М Челябинской ТЭЦ-3 на математической модели синхронного генератора с тиристорной системой самовозбуждения при различных видах и удаленностях внешних КЗ в случае отказа параллельных вентильных ветвей в ТП ССВ.

3. Интеграция полученной математической модели синхронного генератора с тиристорной системой самовозбуждения в программные комплексы расчета токов КЗ позволяет в ряде случаев отказаться от применения широко распространенного метода типовых кривых при расчете токов КЗ для произвольных моментов времени и тем самым повысить функциональность таких программ.

Реализация результатов работы

Получены положительные решения о применении разработанных алгоритмов и их реализации при модернизации систем возбуждения турбогенераторов мощностью 200 МВт на Челябинской ТЭЦ-3 ОАО «Фортум» и при реконструкции систем возбуждения турбогенераторов мощностью 300 и 500 МВт на Троицкой ГРЭС ОАО «ОГК-2». Материалы диссертации используются в учебном процессе в дисциплинах «Электромагнитные переходные процессы», «Вентильные системы возбуждения синхронных генераторов» и «Системы электроэнергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями».

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы доложены, рассмотрены и одобрены на конференциях: Международная конференция «Электроэнергетика и Автоматизация в металлургии и машиностроении» (г. Магнитогорск, АНО «Персонал», 22–24 октября 2008 г.), IV Всероссий-

ская научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти, ТГУ, 12–15 мая 2009 г.), XV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, ТПУ, 4–8 мая 2009 г.), I Научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск, ЮУрГУ, 27–30 апреля 2009 г.), XVI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, ТПУ, 12–16 апреля 2010 г.), Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, УрФУ, 17–19 ноября 2010 г.), III Международная научно-техническая конференция «Энергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, УрФУ, 22–26 октября 2012 г.), ежегодные научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (2007–2012 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 5 в реферируемых изданиях ВАК, также получено 2 свидетельства на регистрацию программных разработок для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 238 наименований и 13 приложений. Основной материал содержит 261 страницу машинописного текста, 110 иллюстраций, 5 таблиц. Общий объем работы составляет 316 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматриваются особенности управления тиристорным возбуждением синхронных генераторов в режиме форсировки при отказах параллельных вентильных ветвей. Анализируются требования, предъявляемые ГОСТ 215-58.2000 и международным стандартом IEC 60034-16 к управлению цифровыми системами самовозбуждения турбогенераторов с сильноточными тиристорными преобразователями при КЗ в энергосистеме. Выявляются особенности работы сильноточных ТП при разных видах внешних КЗ генератора. Оценивается влияние вида и удаленности КЗ на величину кратности форсировки по напряжению генератора и токораспределение между плечами ТП ССВ.

Выявлено, что, во-первых, при форсировке генератором близких несимметричных КЗ возможен перегрев тиристорov при отказе даже одного («резервного») вентиля в плече, когда длительность его проводящего интервала превышает нормируемую из-за несимметрии переменных напряжений. Во-вторых, показано, что положение ГОСТ о полном запрете на форсировку напряжения на выводах СГ при отказе двух и более параллельных ветвей в одном плече ТП ССВ не обосновано, если длительность форсировки не превышает времени нагрева тиристорov до предельно допустимых температур. В-третьих, установлено, что ГОСТ не учитывает возможность форсировки с отказом параллельных вентильных ветвей в плечах ТП ССВ при фактических кратностях по току ротора и длительностях форсирования меньше нормируемых. В связи с этим сделан вывод о необходимости разработки более эффективных алгоритмов управления тиристорным преобразователем, учитывающих его реальную нагрузочную способность и расширяющих применение форсировки при отказах параллельных вентильных ветвей.

Для этого выделены основные факторы, влияющие на нагрев ТП ССВ. Это число параллельных ветвей в плечах преобразователя, их параметры и способ охлаждения, распределение длительностей работы плеч за период, вид, удаленность и длительность форсируемого КЗ, предшествующий замыканию режим работы СГ. Также определены способы снижения нагрева и пути предотвращения перегрева ТП ССВ в процессе форсировки.

Предложено: перераспределять длительности работы плеч при отказе двух и более тиристоров в одном плече путем целенаправленного несимметричного управления плечами; при форсировке несимметричных КЗ с отказом только одной («резервной») параллельной ветви в плече снижать длительность его работы, меняя способ синхронизации системы управления тиристорами (СУТ) с напряжениями питающей сети; ограничивать кратность форсировки по току ротора при отказах параллельных ветвильных ветвей до величины, обеспечивающей ее нормируемую длительность, либо сокращать длительность форсировки с нормируемой начальной кратностью по току ротора до величины предельно допустимой по условию нагрева тиристорного преобразователя.

Разработка алгоритмов управления на основе этих принципов требует исследования взаимосвязи кратности форсировки по напряжению и току ротора с допустимой длительностью при разных способах управления тиристорами и может быть выполнена на математической модели, связывающей электро-

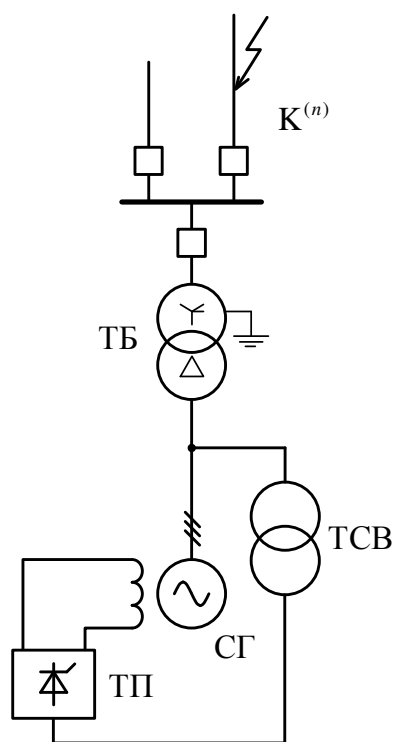


Рис. 1. Электрическая схема блока генератор-трансформатор (СГ – синхронный генератор; ТБ – трансформатор блока; ТСВ – трансформатор системы возбуждения; ТП – тиристорный преобразователь)

тепловые процессы в тиристорном преобразователе ССВ с электромагнитными переходными процессами в обмотках СГ. Для этого определены требования к такой модели, выполнен анализ существующих моделей и сформулирован подход, отвечающий поставленной задаче. Он предполагает аналитическое решение системы дифференциальных уравнений СГ с уравнением внешней характеристики ТП ССВ, обобщенной для разных видов и удаленностей КЗ генератора и возможных способов управления тиристорами, с учетом электротепловых процессов в преобразователе. В соответствии с выбранным подходом сформулированы задачи и определена методология дальнейшего исследования.

Во второй главе исследуется взаимосвязь параметров режима системы самовозбуждения и ее тиристорного преобразователя при разных способах управления тиристорами. Для блока генератор-трансформатор, изображенного на рис. 1, с применением метода симметричных составляющих в аналитической форме получены выражения для переменных напряжений тиристорного преобразователя ССВ при разных видах КЗ (n) за повышающим трансформатором

блока, а также уравнение обобщенной внешней характеристики ТП ССВ, выражения для кратности форсировки по напряжению СГ и длительностей работы плеч ТП при разных видах и удаленностях КЗ, способах управления тиристорами (симметричном, несимметричном, несимметричном пофазном) и способах синхронизации СУТ с напряжениями питающей сети.

Схема замещения прямой последовательности блока генератор-трансформатор при КЗ вида n приведена на рис. 2. На схеме СГ представлен сверхпереходными параметрами \dot{E}_A'' и x_d'' , повышающий трансформатор блока и преобразовательный трансформатор системы возбуждения (ТСВ) – соответственно сопротивлениями x_m и $x_{мсв}$, а цепь, отделяющая выводы СГ от точки КЗ, – внешним сопротивлением $x_{вн.}^{(n)}$, получаемым суммированием эквивалентного сопротивления прямой последовательности всех ее элементов $x_{вн.(1)}$ с добавочным сопротивлением $\Delta x^{(n)}$, зависящим от вида замыкания.

В соответствии с рис. 2 и схемой замещения обратной последовательности выражение для линейных напряжений на вводах ТП ССВ при произвольной схеме и группе соединения обмоток ТСВ, задаваемой как «+N» для схем соединения обмоток Y/Y и Y/Δ и «-N» для схемы Δ/Y, имеет вид:

$$\dot{U}_l = U_l e^{j\varphi_l}, \quad (1)$$

$$\text{где } U_l = \frac{E_2'' \sqrt{(x_{вн.}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{вн.}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2 \alpha_l}}{K_{мсв} (x_d'' + x_{вн.}^{(n)})}; \quad \varphi_l = \beta_l - \arctg \left(\frac{x_{вн.}^{(n)} + k^{(n)} x_2 \operatorname{ctg} \alpha_l}{x_{вн.}^{(n)} - k^{(n)} x_2} \right);$$

$$k^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{при } n=3; \\ -1, & \text{при } n=2; \\ +1, & \text{при } n=1. \end{cases} \quad \alpha_l = \begin{cases} (\mp N + 1)\pi/6, & \text{для } U_{CB}; \\ (\mp N + 9)\pi/6, & \text{для } U_{AC}; \\ (\mp N + 5)\pi/6, & \text{для } U_{BA}. \end{cases} \quad \beta_l = \begin{cases} 0, & \text{при } \pi \leq \alpha_l \leq 2\pi; \\ \pi, & \text{при } 0 < \alpha_l < \pi. \end{cases}$$

Для вывода уравнения внешней характеристики ТП ССВ, обобщенного для разных способов управления тиристорами, введены углы отклонения управляющих импульсов плеч $\Delta \alpha_{T1}, \Delta \alpha_{T2}, \dots, \Delta \alpha_{T6}$ от среднего значения α_{cp} при несимметричном управлении тиристорами и углы смещения моментов включения плеч $\epsilon'_{T1,4}, \epsilon'_{T2,5}$ и $\epsilon'_{T3,6}$ для фазных и линейных напряжений синхронизации каналов СУТ с одноканальным и многоканальным управлением при несимметричном питании преобразователя. Так как несимметричное питание и управление преобразователем могут приводить к режимам работы ТП отличным от чередования включенных вентилях группами по два и по три (режим «2–3»), то для этих режимов, используя выражение (1), найдены в аналитической форме граничные условия их появления. Для этого выведены формулы

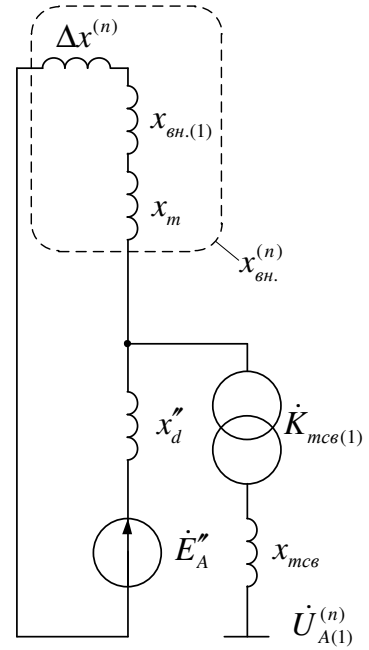


Рис. 2. Схема замещения блока генератор-трансформатор прямой последовательности с добавочным сопротивле-

для выпрямленных значений тока ротора, при которых возможно появление комбинаций включенных вентилях «2–3–3» и «2–3–3–3» и в соответствии с ними определены выражения для дополнительных углов запаздывания включения тиристоров $\psi_{T1}, \psi_{T2}, \dots, \psi_{T6}$, появляющихся в этих режимах. Это позволило обобщить уравнение внешней характеристики ТП ССВ для разных способов управления тиристорами и способов синхронизации СУТ с учетом возможной при КЗ несимметрии переменных напряжений и представить его в виде:

$$U_d(I_d) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{E_A^2 + E_B^2} \cos\left(\alpha_{cp.} + \arctg \frac{E_A}{E_B}\right) - \frac{3}{\pi} \left[x_\gamma + r_\gamma \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\gamma_{cp.}}{2} \right) \right] I_d, \quad (2)$$

где $E_A = U_{AC} \sin(\epsilon'_{T1,4} + \delta_{T1} + \delta_{T4}) \cos(\delta_{T1} - \delta_{T4}) + U_{CB} \sin(\epsilon'_{T2,5} + \delta_{T2} + \delta_{T5}) \cos(\delta_{T2} - \delta_{T5}) + U_{BA} \sin(\epsilon'_{T3,6} + \delta_{T3} + \delta_{T6}) \cos(\delta_{T3} - \delta_{T6});$

$$E_B = U_{AC} \cos(\epsilon'_{T1,4} + \delta_{T1} + \delta_{T4}) \cos(\delta_{T1} - \delta_{T4}) + U_{CB} \cos(\epsilon'_{T2,5} + \delta_{T2} + \delta_{T5}) \cos(\delta_{T2} - \delta_{T5}) + U_{BA} \cos(\epsilon'_{T3,6} + \delta_{T3} + \delta_{T6}) \cos(\delta_{T3} - \delta_{T6});$$

$$\delta_{Ti} = (\Delta\alpha_{Ti} + \psi_{Ti}) / 2, \quad i = 1..6.$$

На основе уравнений (1) и (2) выведены выражения для кратности форсировки по напряжению K_U с коэффициентами, определяющими ее зависимость от ранее выделенных факторов (вида и удаленности КЗ, способов управления тиристорами и способов синхронизации СУТ, параметров синхронного генератора и предшествующего замыканию режима его работы), а также длительностей работы плеч. Эти длительности представлены в виде интервалов проводимости тиристор (ИПТ) Δt_T , рассчитываемых, как промежутки между моментами включения сменяющих друг друга вентилях. Затем получены выражения для средних мощностей тепловых потерь в тиристорах ТП ССВ на проводящем интервале $P_{T(AV)}$ и при их выключении $P_{RQ(AV)}$ с учетом формы кривой тока ротора генератора, наблюдаемой при форсировке внешних КЗ.

Полученные зависимости позволили исследовать влияние на нагрев тиристор ТП ССВ таких факторов, как число параллельных ветвей в плечах, длительности их работы за период при разных способах управления тиристорами, наличие периодических токов в цепи ротора. По результатам исследований сделан вывод о необходимости учета этих факторов при разработке математической модели СГ с ССВ и даны соответствующие рекомендации.

В третьей главе разрабатывается математическая модель синхронного генератора с системой самовозбуждения с сильноточным тиристорным преобразователем «СГ с ССВ – ТП», связывающая электротепловые процессы в преобразователе ССВ с электромагнитными переходными процессами в обмотках СГ при КЗ в энергосистеме. Выполняется ее интеграция в программный комплекс расчета токов КЗ. Оценивается корректность и адекватность полученной модели.

При разработке модели рассматривалась система дифференциальных уравнений Парка-Горева, записанная в операторной форме для токов в d, q-осях ротора генератора в долях их базисных значений с учетом основных допущений, обычно принимаемых при расчетах токов КЗ в электроэнергетических системах напряжением свыше 1 кВ.

Первоначально, используя выражения (1) и (2), система уравнений была преобразована к виду:

$$\begin{pmatrix} (x_{d*} + x_{\text{вн.}^*}^{(n)})P & x_{q*} + x_{\text{вн.}^*}^{(n)} & x_{ad*}P & x_{ad*}P & x_{aq*} \\ -(x_{d*} + x_{\text{вн.}^*}^{(n)}) & (x_{q*} + x_{\text{вн.}^*}^{(n)})P & -x_{ad*} & -x_{ad*} & x_{aq*}P \\ x_{ad*}P & 0 & r_{f*} + x_{f*}P & x_{ad*}P & 0 \\ x_{ad*}P & 0 & x_{ad*}P & r_{kd*} + x_{kd*}P & 0 \\ 0 & x_{aq*}P & 0 & 0 & r_{kq*} + x_{kq*}P \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{d*} \\ i_{q*} \\ I_{d*} \\ I_{kd*} \\ I_{kq*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U_{d*} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где $U_{d*} = r_{e*} \sqrt{i_{d*}^2 + i_{q*}^2} - r_{d*} I_{d*}$;

$$\begin{cases} r_{e*} = \frac{3\sqrt{3} u_{\bar{o}}}{\pi U_{f\bar{o}}} \frac{\sqrt{(x_{\text{вн.}^*}^{(n)} + k^{(n)} x_{2*}^{(n)})^2 - 4x_{\text{вн.}^*}^{(n)} k^{(n)} x_{2*}^{(n)} \sin^2 \alpha_m}}{K_{mce}} K_R; \\ r_{d*} = k_x x_{\gamma*} + k_r r_{\gamma*}, \end{cases}$$

а затем решена аналитически относительно средних значений токов общеизвестным способом, описанным в работах И.А. Глебова. При этом для учета в полученном решении управляющих воздействий на тиристорный преобразователь со стороны автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и СУТ было предложено пересчитывать сопротивления r_{e*} и r_{d*} по методу конечных интервалов, разбивая ось времени на интервалы с малым шагом ΔT . Это позволило получить итерационные выражения для токов в виде:

$$\begin{cases} i_{d*}(T_i) = i'_{d*}(T_{i-1})e^{p_{d1}(T_{i-1})\omega\Delta T} + i''_{d*}(T_{i-1})e^{p_{d2}(T_{i-1})\omega\Delta T}; \\ i_{q*}(T_i) = i_{q*}(T_{i-1})e^{p_q(T_{i-1})\omega\Delta T}; \\ i_{m(1)*}(T_i) = \sqrt{i_{d*}(T_i)^2 + i_{q*}(T_i)^2}; \\ I_{d*}(T_i) = I'_{d*}(T_{i-1})e^{p_{d1}(T_{i-1})\omega\Delta T} + I''_{d*}(T_{i-1})e^{p_{d2}(T_{i-1})\omega\Delta T}. \end{cases} \quad (3)$$

и сформировать на их основе общую структуру математической модели.

Схема модели «СГ с ССВ – ТП» показана на рис. 3. Здесь выражения (3) приняты в качестве ее ядра. В соответствии с параметрами ядра, пересчитываемыми в конце каждой итерации расчета, по полученным в диссертации формулам вычисляются мгновенные значения периодических, аperiodических и полных токов в цепи статора i_A, i_B, i_C , периодических токов основной $I_{f(\omega)}$ и двойной частоты $I_{f(2\omega)}$ и полного тока в цепи ротора, мгновенные значения фазных u_A, u_B, u_C и линейных напряжений на выводах СГ и ТСВ, напряжение на обмотке возбуждения U_f , ИПТ плеч преобразователя, токи тиристоров i_T и т.д.

Для исследования электротепловых процессов в ТП ССВ модель дополнена выражениями расчета мгновенных значений мощностей тепловых потерь в наиболее нагруженных тиристорах плеч на проводящем интервале P_T и при их выключении P_{RQ} и температур нагрева их полупроводниковых структур (ТПС) Θ_T . Расчет ТПС основывается на предварительной аппроксимации кривой динамического теплового сопротивления «переход–среда» тиристорного модуля суммой экспоненциальных зависимостей, каждая из которых соответствует определенному участку или слою этого модуля.

Для моделирования установившегося режима форсировки и управления преобразователем ССВ в модель генератора включены основные алгоритмы ав-

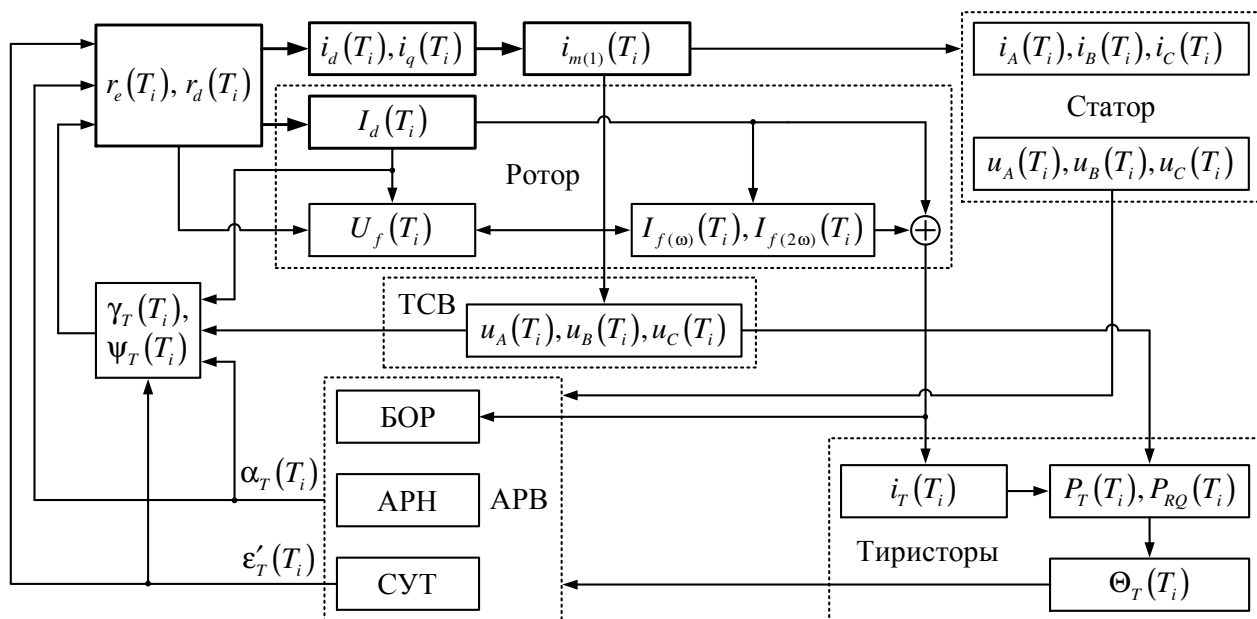


Рис. 3. Общая структура математической модели синхронного генератора с тиристорной системой самовозбуждения «СГ с ССВ – ТП» (АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРН – автоматический регулятор напряжения; БОР – блок ограничения тока ротора)

томатического регулятора возбуждения. На схеме АРВ представлен каналами управления напряжением статора (блок АРН) и током ротора СГ (блок БОР) с пропорционально-интегральными законами регулирования (см. рис. 3).

С целью анализа и расчета режимов форсировки генератора с самовозбуждением при разных удаленностях и длительностях КЗ в энергосистеме и разработки алгоритмов управления ТП ССВ математическая модель «СГ с ССВ – ТП» интегрирована в программный комплекс расчета токов КЗ на ЭВМ «ТоКо», разработанный на кафедре ЭССиС ЮУрГУ и применяемый в ряде организаций. На рис. 4 показаны кривые, полученные с помощью модели для сильноточного преобразователя ССВ блока ТГВ-200-2М ЧТЭЦ-3 при форсировке близкого

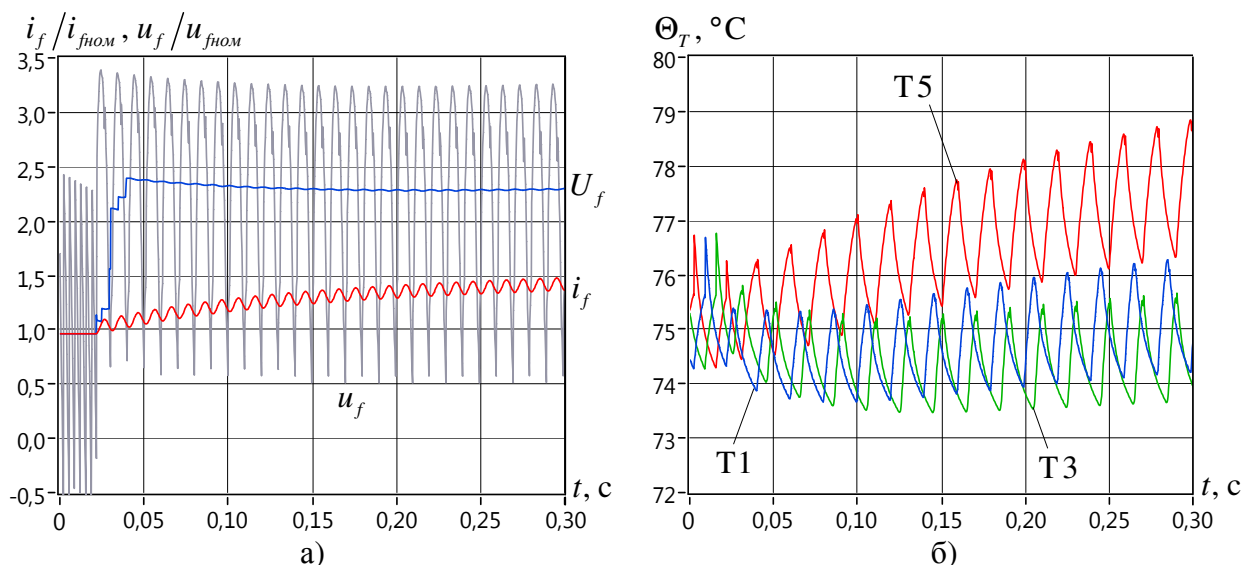


Рис. 4. Кривые тока возбуждения i_f , напряжения на роторе u_f (а) и температур нагрева наиболее нагруженных вентилях плеч тиристорного преобразователя ССВ (б) при форсировке турбогенератором ТГВ-200-2М двухфазного КЗ за блочным повышающим трансформатором

двухфазного КЗ на интервале $0 \dots 0,3$ с. Сравнение зависимостей, полученных на модели, с осциллограммами реальных КЗ показало, что разброс значений, вносимый принимаемыми при разработке модели допущениями, находится в пределах 5–15%. Также отмечено, что интеграция модели в программный комплекс позволила в ряде случаев отказаться от применения в расчетах токов КЗ широко распространенного метода типовых кривых и тем самым повысить функциональность комплекса. В ходе расчетов разница между значениями токов фаз, найденными этими способами, не превысила 5%. Поэтому полученная математическая модель будет полезна не только при разработке алгоритмов управления ТП ССВ, но и при расчете токов КЗ на ЭВМ.

В четвертой главе с использованием модели «СГ с ССВ – ТП» разрабатываются алгоритмы управления сильноточным тиристорным преобразователем системы самовозбуждения при КЗ в энергосистеме с отказом параллельных вентильных ветвей. Анализируется работа системы самовозбуждения с предложенными алгоритмами при форсировке генератором разных видов и удаленностей внешних КЗ. Оценивается эффективность алгоритмов и даются рекомендации по их реализации и применению.

Первоначально рассмотрена задача снижения ограничений, вводимых на работу ТП ССВ при отказах параллельных вентильных ветвей, за счет целенаправленного перераспределения нагрузок плеч.

Для этого предложено изменять интервалы проводимости тиристоров путем расчета корректирующих углов включения плеч анодной и катодной групп в соответствии с заданным критерием управления (рис. 5). В рабочих режимах генератора в качестве критерия определено снижение мощностей тепловых потерь в вентильных до максимально допустимых по условию их нагрева. При форсировке близких КЗ введен критерий – максимум кратности форсировки по напряжению. При форсировке остальных КЗ – снижение ИПТ плеча с отказавшими ветвями до максимально допустимого значения рабочего режима при ограничении кратности форсировки по току ротора или равенство ТПС наиболее нагруженных вентилей плеч (на этапе разгрузки преобразователя) в случае ограничения длительности форсировки. Для каждого из критериев получены выражения для расчета искомого ИПТ плеч.

Так максимально допустимая величина ИПТ плеча в рабочем режиме генератора находится из условия, что при отказе параллельных вентильных ветвей потери в оставшихся не превысят максимально допустимых, нормируемых при токе ротора $I_{f\max} = 1,1I_{fном}$:

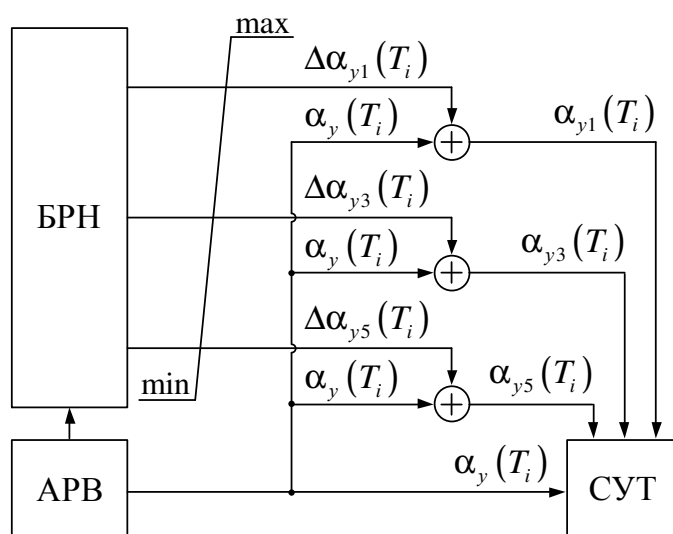


Рис. 5. Схема алгоритма перераспределения нагрузок плеч ТП ССВ при отказах тиристоров (БРН – блок распределения нагрузок плеч)

$$\Delta t_{Tj\max*} = \frac{1,1 \Delta_j'^2 \Delta_j + 1,1}{I_{f*} \Delta_j^2 \Delta_j' + I_{f*}}, \quad (4)$$

$$\text{где } \Delta_j' = \frac{U_{T(TO)}(N + N_p - m_j)}{r_T I_{fном} K'_{Hj}}; \quad \Delta_j = \frac{U_{T(TO)} N}{r_T I_{fном} K_{Hj}}; \quad I_{f*} = \frac{I_f}{I_{fном}}.$$

Величина Δ_j' названа параметрическим коэффициентом тока j -го плеча и зависит от числа «основных» N и «резервных» N_p ветвей в плече, числа отказавших ветвей m_j , коэффициента неравномерности деления тока плеча по оставшимся ветвям K'_{Hj} и от каталожных параметров тиристоров $U_{T(TO)}$, r_T .

Из формулы (4) получены выражения для расчета минимального $I_{f\min*}$ и максимально допустимого $I_{f\max*}$ тока ротора рабочего режима при несимметричном управлении тиристорами. После чего сформулирован алгоритм расчета дополнительных углов включения $\Delta\alpha_{yj}(T_i)$, $\Delta\alpha_{yj-2}(T_i)$, $\Delta\alpha_{yj+2}(T_i)$, корректирующих ИПТ плеч в анодной и катодной группах согласно критерию управления.

С целью предотвращения перегрева ТП ССВ при форсировке близких несимметричных КЗ с отказом только одной («резервной») параллельной ветви в плече разработан алгоритм управляемой синхронизации для системы импульсно-фазового управления тиристорами при симметричном управлении плечами (рис. 6). В основу алгоритма положен выбор напряжений синхронизации каналов многоканальной СУТ $U_{синх.} = (U_A, U_B, U_C, U_{AC}, U_{CB}, U_{BA})$ в соответствии с несимметрией переменных напряжений ТП, при которых ИПТ плеча с отказавшей ветвью $\Delta t_T(U_{синх.})$ не превышает нормируемого и обеспечивается максимально возможная кратность форсировки по напряжению $K_U(U_{синх.})$.

Обобщенный критерий выбора напряжения синхронизации в режиме форсировки несимметричного КЗ при отказе «резервной» ветви в j -м плече ТП ССВ получен в виде:

$$\begin{cases} \alpha_y \geq \max(-\varepsilon_{Tj+2}(U_{синх.}), -\varepsilon_{Tj}(U_{синх.})); \\ K_R(U_{синх.}) \rightarrow \max, \end{cases} \quad (5)$$

где α_y – текущий угол управления преобразователем; ε_{Tj} , ε_{Tj+2} – углы отклонения управляющих импульсов плеч от моментов их естественного включения, получаемые при синхронизации каналов СУТ по напряжению $U_{синх.}$.

Для форсировки генератором внешних КЗ с нормируемой длительностью при отказе двух и более параллельных вентиляльных ветвей в одном плече сильноточного ТП ССВ разработан алгоритм расчета предельно допустимой кратности форсировки по току возбуждения при симметричном и несимметричном управлении тиристорами (рис. 7). Для каждого плеча с отказавшими тиристорами в соответствии с их параметрическими коэффициентами Δ_j' и Δ_j

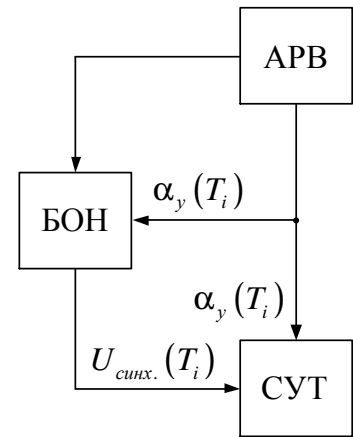


Рис. 6. Схема алгоритма управляемой синхронизации при несимметричных КЗ (БОН – блок ограничения нагрузок плеч)

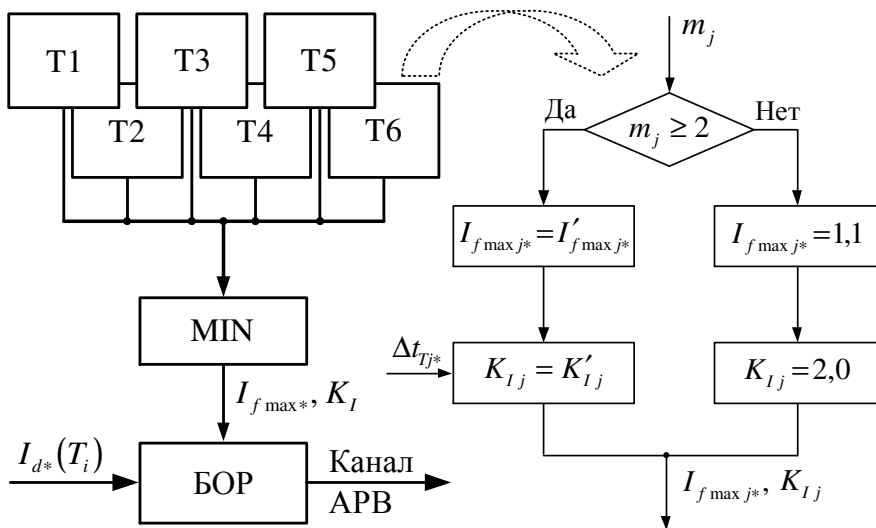


Рис. 7. Схема алгоритма расчета уставок блока ограничения тока ротора при отказах параллельных вентильных ветвей

определяются максимально допустимый ток ротора рабочего режима СГ $I'_{f \max j*}$ и предельно допустимая кратность форсировки по току K'_{Ij} . Необходимые для этого выражения, полученные для симметричного и несимметричного управления тиристорами, приведены в табл. 1. Из рассчитанных значений

выбираются наименьшие $I_{f \max*}$ и K_I , а из них формируются уставки для блока ограничения тока ротора в рабочем режиме и в режиме форсировки.

Таблица 1

Выражения для расчета уставок БОР при отказе параллельных вентильных ветвей в j -м плече ТП ССВ

Величина	Вид управления	
	Симметричное	Несимметричное
$I'_{f \max j*}$	$1,1 \frac{\Delta'_j}{\Delta_j}$	$\frac{\Delta'_j}{2\Delta_j} \left(\sqrt{4,4 \frac{\Delta_j + 1,1}{\Delta t_{Tj \max*}} + \Delta_j^2} - \Delta_j \right)$
K'_{Ij}	$\frac{\Delta'_j}{2\Delta_j} \left(\sqrt{8 \frac{(\Delta_j + 2)}{\Delta t_{Tj*}} + \Delta_j^2} - \Delta_j \right)$	$\frac{1}{2} \left(\sqrt{8 \frac{I'_{f \max*} (\Delta'_j + I'_{f \max*}) (\Delta_j + 2)}{1,1(\Delta_j + 1,1)} + \Delta_j^2} - \Delta'_j \right)$

Для форсировки генератором внешних КЗ при отказе двух и более параллельных вентильных ветвей с нормируемой кратностью по току ротора разработан алгоритм ограничения длительности форсировки (рис. 8). Ограничение длительности выполняется непосредственно в процессе форсировки путем снижения тока ротора пропорционально приращению верхней огибающей кривой мгновенной ТПС Θ_{Tenv*} наиболее нагруженного вентиля ТП ССВ над заданным предельным значением Θ_{Tnped*} . Тем самым ограничивается рост ТПС тиристора и не допускается перегрев преобразователя. Такой алгоритм целесообразен, в связи с тем, что на практике время отключения КЗ в энергосистеме обычно значительно меньше нормируемой длительности форсировки.

На схеме максимально допустимая кратность форсировки по току ротора определяется как

$$K_I(T_i) = K_I(T_{i-1}) + K_{np.} (\Theta_{Tnped*} - \Theta_{Tenv*}(T_i)). \quad (6)$$

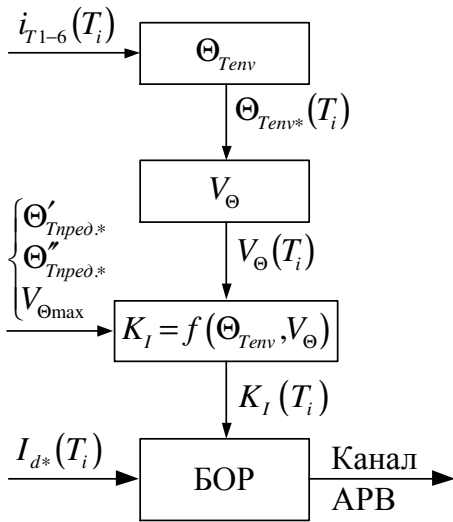


Рис. 8. Схема алгоритма ограничения температур нагрева тиристоров в процессе форсировки

необходимой кратности форсировки по напряжению $K_{U_{min}}$. На основании его сформулирован алгоритм выбора того или иного способа управления преобразователем. Показано, что при $K_U \leq K_{U_{min}}$ и отказе параллельных тиристоров следует ограничивать длительность форсировки, обеспечивая тем самым максимальное восстановление напряжения на выводах генератора в начале КЗ. В остальных случаях целесообразно ограничивать кратность форсировки по току ротора и сохранять перегрузочный запас ТП ССВ, что обеспечит ее нормируемую длительность.

После этого выполнена оценка эффективности разработанных алгоритмов и даны рекомендации по их реализации. На рис. 9 приведены кривые напряжения на выводах синхронного генератора при форсировке КЗ в энергосистеме, полученные на модели для турбогенератора ТГВ-200-2М ЧТЭЦ-3. Из сравне-

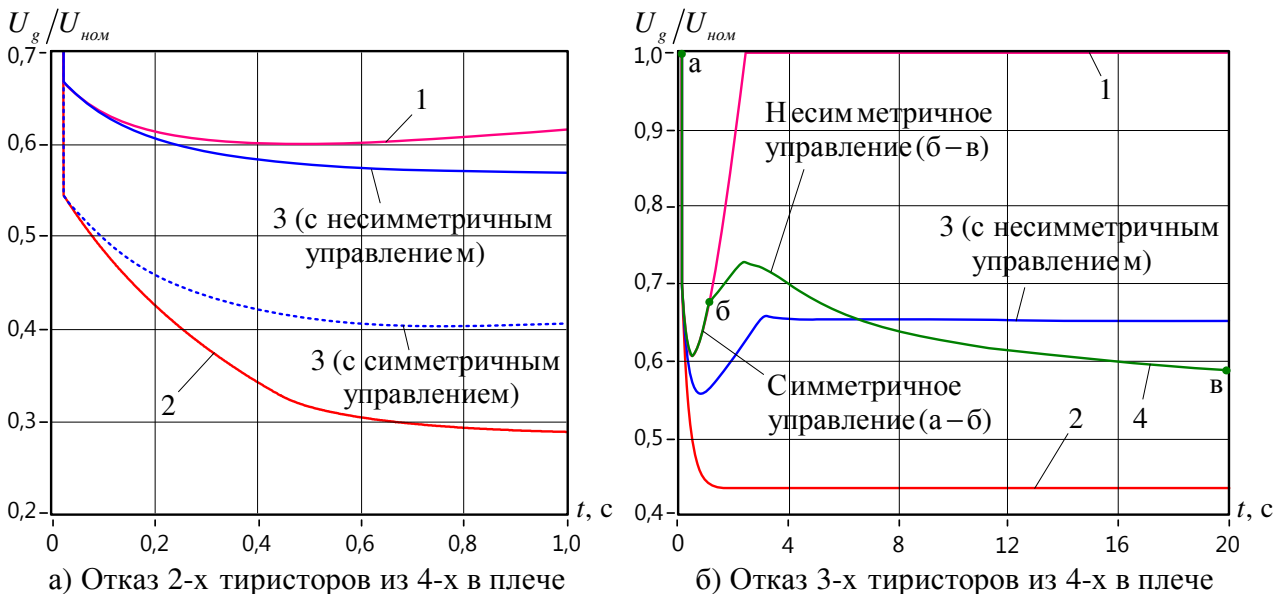


Рис. 9. Кривые напряжения на выводах СГ при форсировке удаленного трехфазного КЗ $x_{вн(1)}/x_m = 2$ (а) и близкого двухфазного КЗ $x_{вн(1)}/x_m = 0$ (б) с отказом параллельных тиристоров в одном из плеч ТП ССВ (1 – без отказа; 2 – запрет форсировки; 3 – алгоритм ограничения кратности форсировки по току ротора; 4 – алгоритм ограничения длительности форсировки)

Учитывая инерционность тепловых процессов в вентильных преобразователях, величину Θ_{Tenv*} предложено вычислять программным способом, а значение $\Theta_{Tpred.*}$ – задавать в долях от каталожной величины Θ_{Tm} в форме линейной зависимости от скорости нарастания ТПС V_{Θ} :

$$\Theta_{Tpred.*}(T_i) = \Theta'_{Tpred.*} - \frac{(\Theta'_{Tpred.*} - \Theta''_{Tpred.*})}{V_{\Theta max}} V_{\Theta}(T_i), \quad (7)$$

где $\Theta'_{Tpred.*}$, $\Theta''_{Tpred.*}$ и $V_{\Theta max}$ – задаваемые уставки.

В завершение на модели «СГ с ССВ – ТП» исследованы условия самовозбуждения синхронного генератора с рассмотренными алгоритмами при внешних КЗ и определен критерий успешного самовозбуждения в виде минимально

ния кривых видно, что разработанные алгоритмы обеспечивают режим форсировки с отказом двух параллельных тиристорных плеч (см. рис. 9а) вопреки запрету, устанавливаемому ГОСТ. При этом несимметричное управление плечами позволяет выполнить форсировку и в случае отказа большего числа параллельных ветвей в одном плече (см. рис. 9б), чем это указано в требованиях ГОСТ. Поэтому применение этих алгоритмов в системах самовозбуждения с микропроцессорным управлением должно повысить функциональность синхронных генераторов при отказах параллельных ветвей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрена актуальная научно-техническая задача о сохранении функциональных свойств силовых тиристорных преобразователей систем самовозбуждения синхронных генераторов при коротких замыканиях в энергосистеме, сопровождающихся отказами параллельных ветвей, путем повышения эффективности управления тиристорами. Для этого при разных способах управления тиристорами исследована взаимосвязь кратности форсировки по напряжению с предельно допустимыми кратностью форсировки по току ротора и ее длительностью и разработаны алгоритмы управления тиристорным преобразователем системы самовозбуждения, обеспечивающие форсировку генератора при отказах параллельных ветвей. При этом получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа требований к тиристорным системам самовозбуждения синхронных генераторов показана возможность снижения функциональных ограничений в работе их преобразователей при отказах параллельных ветвей за счет более эффективного управления тиристорами, а также определены пути снижения этих ограничений. Показано, что для снижения ограничений следует установить влияние способов управления тиристорами на электромагнитные переходные процессы в обмотках синхронного генератора и электротепловые процессы в преобразователе ССВ при форсировке генератором внешних КЗ и создать соответствующую математическую модель.

2. Для анализа режимов работы тиристорного преобразователя при КЗ в энергосистеме получены аналитические выражения переменных напряжений на вводах ТП ССВ, уравнение внешней характеристики тиристорного преобразователя и выражения для расчета кратности форсировки по напряжению и длительностей работы плеч, обобщенные для разных видов, удаленностей КЗ, схем и групп соединения обмоток преобразовательного трансформатора, при симметричном и несимметричном способах управления плечами и разных алгоритмах работы системы импульсно-фазового управления тиристорами.

3. Для исследования взаимосвязи параметров режима синхронного генератора, системы самовозбуждения и ее тиристорного преобразователя и разработки алгоритмов управления тиристорами при внешних КЗ генератора с отказом параллельных ветвей разработана математическая модель синхронного генератора с тиристорной системой самовозбуждения «СГ с ССВ – ТП». В основу модели положено совместное приближенное аналитическое решение системы дифференциальных уравнений Парка-Горева с обобщенным

уравнением внешней характеристики ТП ССВ. В модели представлены электромагнитные и электротепловые процессы в тиристорном преобразователе ССВ с учетом электромагнитных процессов в синхронном генераторе.

4. Для исследования режимов работы тиристорного преобразователя ССВ при разных удаленностях КЗ выполнена интеграция математической модели в программный комплекс расчета токов КЗ на ЭВМ, что позволило в ряде случаев отказаться от применения широко известного метода типовых кривых при расчете токов КЗ для произвольных моментов времени и тем самым повысить функциональность программного комплекса.

5. Разработан и проверен на математической модели «СГ с ССВ – ТП» алгоритм снижения нагрева тиристорov, оставшихся в работе при отказе параллельных вентильных ветвей в плечах ТП ССВ, путем расчета корректирующих углов включения плеч, показавший целесообразность перераспределения длительностей работы тиристорov и позволивший снизить ограничения по току ротора генератора, накладываемые на его работу при таких отказах.

6. На основе попеременного сочетания симметричного и несимметричного управления плечами, выбора напряжения синхронизации цифровой СУТ, а также ограничения кратности по току ротора и длительности форсировки с учетом числа оставшихся в работе тиристорov и их параметров, разработаны эффективные алгоритмы управления сильноточным тиристорным преобразователем ССВ при форсировке синхронным генератором разных видов и удаленностей внешних КЗ с одновременным отказом параллельных вентильных ветвей, обеспечивающие форсировку с ограничениями значительно меньшими в сравнении с требованиями, регламентированными ГОСТ.

7. На примере синхронного генератора ТГВ-200-2М Челябинской ТЭЦ-3 на математической модели «СГ с ССВ – ТП» определено условие самовозбуждения генератора при внешних КЗ, и с его учетом выполнен анализ эффективности предложенных алгоритмов при отказах параллельных вентильных ветвей. По результатам анализа даны рекомендации по применению и реализации алгоритмов.

8. Показано, что разработанные алгоритмы реализуемы в микропроцессорных системах управления сильноточными тиристорными преобразователями как в виде алгоритмов, так и отдельных цифровых устройств, так как оперируют либо параметрами доступными микроконтроллеру управления системой самовозбуждения, либо параметрами, вычисляемыми в соответствии с сигналами, поступаемыми на его входы.

В завершение отмечено, что некоторые из алгоритмов управления могут быть применены для сильноточных преобразователей, эксплуатируемых не только в системах возбуждения синхронных генераторов, но в других областях.

ПУБЛИКАЦИИ

В реферируемых изданиях ВАК

1. Гольдштейн, М.Е. Исследование работы системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10. – № 26(126). – С. 36–41.

2. Гольдштейн, М.Е. Токораспределение между тиристорами в преобразователе системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – № 15(148). – С. 10–16.

3. Гольдштейн, М.Е. Математическая модель синхронного генератора с системой самовозбуждения в режиме форсировки при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 4–11.

4. Гольдштейн, М.Е. Алгоритмы управления сильноточными тиристорными преобразователями систем самовозбуждения синхронных генераторов при отказах параллельных вентилях в режимах коротких замыканий [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 10–15.

5. Гольдштейн, М.Е. Моделирование электротепловых процессов в вентильном преобразователе системы самовозбуждения синхронного генератора при коротких замыканиях в энергосистеме [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16. – № 34(251). – С. 8–14.

В других изданиях

6. Гольдштейн, М.Е. Особенности работы систем самовозбуждения синхронных генераторов при внешних несимметричных коротких замыканиях [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Электроэнергетика и Автоматизация в металлургии и машиностроении: сборник докладов Международной конференции. Магнитогорск, 22–24 октября 2008 г. – Магнитогорск: АНО «Персонал», 2008. – С. 205–208.

7. Гольдштейн, М.Е. Влияние группы соединения обмоток трансформатора системы самовозбуждения синхронного генератора на ее работу при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сборник трудов IV Международной научно-технической конференции. Тольятти, 12–15 мая 2009 г. В 3-х ч. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч. 2. – С. 123–126.

8. Горшков, К.Е. Расчет тепловых потерь тиристорной системы самовозбуждения синхронного генератора при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме [Текст] / К.Е. Горшков // Современные техника и технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 4–8 мая 2009 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 32–34.

9. Горшков, К.Е. Перегрев тиристорной преобразователя системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях [Текст] / К.Е. Горшков // Научный поиск: материалы I научной конференции аспирантов и докторантов. Секция технических наук. Челябинск, 27–30 апреля 2009 г. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 246–250.

10. Горшков, К.Е. Интеграция макромоделей синхронного генератора в программы расчета токов короткого замыкания [Текст] / К.Е. Горшков // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сборник рефератов науч.-исслед. работ аспирантов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2007. – С. 94.

11. Горшков, К.Е. Управление тиристорным преобразователем системы самовозбуждения синхронного генератора в режиме форсировки как средство по-

вышения надежности работы энергосистемы [Текст] / К.Е. Горшков // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 12–16 апреля 2010 г. В 3-х т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – Т. 1. – С. 30–32.

12. Горшков, К.Е. Моделирование переходных процессов в синхронном генераторе с системой самовозбуждения при внешних несимметричных коротких замыканиях [Текст] / К.Е. Горшков // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секция технических наук. Челябинск, май 2010 г. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 3. – С. 71–74.

13. Гольдштейн, М.Е. Управление возбуждением синхронных генераторов при отказах тиристорных при коротких замыканиях в энергосистеме [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург, 17–19 ноября 2010 г. В 2-х т. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – Т. 2. – С. 103–106.

14. Горшков, К.Е. Оценка кратности форсировки по напряжению синхронного генератора с тиристорной системой самовозбуждения при разгрузке плеча или моста в случае отказа параллельных ветвей [Текст] / К.Е. Горшков // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й научной конференции. Секция технических наук. Челябинск, май 2011 г. В 3-х т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 164–169.

15. Гольдштейн, М.Е. Несимметричное управление тиристорным преобразователем системы самовозбуждения синхронного генератора в режиме форсировки при отказах параллельных вентильных ветвей [Текст] / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 22–26 октября 2012 г. В 2-х т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 2. – С. 150–154.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

16. Виртуальная модель синхронного генератора с тиристорной системой самовозбуждения «SG-SES-HCTR»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617385 / К.Е. Горшков, М.Е. Гольдштейн. – заявл. 22.06.2012; зарег. 16.08.2012; опуб. 20.12.2012; Бюл. Роспатента RU ОБПБТ № 4(81). – С. 333.

17. Zth-Approximation: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617384 / К.Е. Горшков, М.Е. Гольдштейн. – заявл. 22.06.2012; зарег. 16.08.2012; опуб. 20.12.2012; Бюл. Роспатента RU ОБПБТ № 4(81). – С. 333.