

05.09.12
4655

На правах рукописи

Андреев

Андреев Алексей Николаевич

ЗАЩИТА ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
ОТ РАЗВИВАЮЩИХСЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2004

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции, сети и системы»
Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
профессор М.Е. Гольдштейн.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Б.Ю. Алтунин;

кандидат технических наук,
Р.Р. Гайнуллин.

Ведущее предприятие – компания «Энергомаш (ЮК) лимитед»,
департамент ЭТО,
инженерный центр, г. Екатеринбург.

Защита состоится 25 марта 2004 г., в 12 часов, в ауд. № 380 на заседании
диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.
Факс: (3512) 67-92-46. E-mail: alexn@74.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского го-
сударственного университета.

Автореферат разослан 20 февраля 2004 г.

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



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Системы возбуждения (СВ) синхронных генераторов (СГ) большой мощности выполнены на базе двухгрупповых схем вентильных преобразователей, одногрупповых (трехфазных мостовых) и каскадных схем. Многолетний опыт разработки и эксплуатации таких схем, а также современная элементная база позволили в последние десятилетия в большинстве СВ отказаться от дорогостоящих схем. Наибольшее распространение получил одногрупповой преобразователь, выполненный по трехфазной мостовой схеме. В преобразователях СВ применяется параллельное соединение полупроводниковых приборов, вентильных секций и вентильных мостов. Это, с одной стороны, позволяет получить нормируемую величину рабочего тока, а с другой – повышает надежность работы преобразователя. При этом отказ одной из параллельных ветвей становится только частичным отказом для системы возбуждения СГ в целом. По этому признаку они могут быть отнесены к сильноточным.

Распространенными причинами отказов сильноточных полупроводниковых преобразователей являются внутренние короткие замыкания (КЗ), вызванные пробоями вентилей и пропусками включения вентилей или групп параллельных вентилей, приводящих к перегреву оставшихся в работе приборов и их пробою, а также внешние КЗ. Защита при этих повреждениях направлена на предотвращение развития аварии и создание условий, при которых отказ становится частичным. Между тем, данные по авариям тиристорных СВ синхронных генераторов показывают, что защита во многих случаях недостаточна и развивающиеся повреждения приводят к полному отказу системы и аварийному отключению генератора. Поэтому, особенности схем и режимов систем возбуждения синхронных генераторов определяют необходимость создания специальных защит их преобразователей, позволяющих увеличить надежность генератора.

Построить защиту можно, только изучив электромагнитные процессы (ЭМП) в тиристорных преобразователях при нормальных и аварийных режимах работы. Детально рассмотрены ЭМП в преобразователях, выполненных по трехфазной мостовой схеме, в трудах П.Д. Андриенко, Г.С. Зиновьева, И.Л. Каганова, Ф.И. Ковалева, М.П. Костенко, Г.П. Мостковой, Л.Р. Неймана, А.В. Поссе, В.С. Руденко, Ю.И. Хохлова, И.М. Чиженко и др. Большое количество исследований посвящено защите тиристорных преобразователей от аварий. Интегрированы эти вопросы отражены в работах Е.М. Глуха и В.Е. Зеленова. Но в этих работах не рассматриваются развивающиеся короткие замыкания (аварии), связанные с отказами исполнительных органов защиты. Подразумевается, что при развитии аварии работают резервные защиты, воздействующие на коммутационные органы, имеющиеся в преобразователе.

тационные аппараты, установленные в системе. Однако, в системах возбуждения синхронных генераторов большой мощности такие коммутационные аппараты недопустимы, так как отключение ими преобразователей при действии резервных защит приводят к дополнительным аварийным отключениям генератора. Кроме того, отказы этих аппаратов при нормальной работе преобразователей могут приводить к дополнительным аварийным отключениям генератора.

Для защиты от внутренних повреждений, вызванных пробоями вентилей, последовательно с ними включены быстродействующие предохранители, назначение которых – ограничение тока двухфазного короткого замыкания и отключение поврежденного тиристора. Для преобразователей, содержащих параллельные вентили, секции, мосты это основной способ защиты. Между тем, недостаточная надежность быстродействующих предохранителей приводит к тому, что при пробое тиристора наблюдаются случаи их отказов, проявляющихся в неспособности отключить короткое замыкание. В результате длительного протекания по предохранителю аварийного тока, происходит его разрушение, сопровождающееся выбросом ионизированных газов, возникновением перекрытий изоляции с неустойчиво горящими дугами, появлению перенапряжений, новым перекрытием изоляции и дальнейшему развитию аварии.

Повреждения подобного рода в системах возбуждения обычно сопровождаются практически полным разрушением преобразователя и приводят к аварийному отключению генератора. Большая величина ущерба, включающая затраты на восстановление поврежденного оборудования и недоотпуск электроэнергии из-за аварийногоостояния генератора, обуславливает необходимость дополнительной защиты системы возбуждения генератора. Поэтому, является актуальной задача поиска или создания специальной защиты, имеющей повышенное быстродействие и обеспечивающей восстановление нормального режима работы генератора без его отключения.

Цель работы. Обосновать принципы построения и реализации защиты тиристорных преобразователей систем возбуждения синхронных генераторов от развития аварии, вызванной пробоем тиристора и последующим отказом предохранителя.

Идея работы. Перевод аварийного тока из отказавшей ветви в цепь с резервным предохранителем и последующее его отключение.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: кусочно-припасовочный метод анализа электромагнитных процессов в схемах с силовыми полупроводниковыми приборами, графоаналитический метод расчета температуры перегрева полупроводниковой структуры, численные методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- для предотвращения развития аварии, вызванной пробоем тиристора и последующим отказом предохранителя, достаточно перевести аварийный ток из отказавшей ветви в цепь с резервным предохранителем;
- перевод аварийного тока из отказавшей ветви в цепь резервного предохранителя возможен путем шунтирования нагрузки преобразователя в момент завершения следующей после возникновения короткого замыкания коммутации тиристоров;
- новый способ и устройство защиты тиристорного преобразователя системы возбуждения синхронного генератора от развивающихся коротких замыканий;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов при развивающихся коротких замыканиях в преобразователях и работе предложенного алгоритма защиты.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются аргументированностью принятых допущений, использованием известных моделей объектов и методов расчета исследуемых цепей, соответствием характера ЭМП при теоретическом и экспериментальном исследовании работы защиты для различных видов пробоя тиристора и режимов синхронного генератора.

Научное значение работы

- На основе анализа обзоров аварий в системах возбуждения синхронных генераторов и исследования работы известных защит при развивающихся коротких замыканиях, показана актуальность создания специальной защиты и определены требования к ней.
- На основе анализа ЭМП в преобразователе с учетом предложенного способа защиты при различных видах пробоя тиристора и режимах генератора, получены алгоритмы работы и структурные схемы устройств, реализующих эти алгоритмы на различной элементной базе.
- Результаты совместного анализа тепловых режимов исполнительных органов защиты и ЭМП в преобразователе при защите в различных режимах работы синхронного генератора позволили сформулировать критерии выбора исполнительных органов и уставок защиты.

Практическое значение работы

- Предложен способ защиты сильноточных тиристорных преобразователей СВ синхронных генераторов от развивающихся коротких замыканий, обеспечивающий предотвращение развития аварии и сохранение нормального режима работы синхронного генератора.
- Разработаны варианты реализации защиты на аналоговой и микропроцессорной элементной базе, применение которых возможно как во вновь проектируе-

мых системах возбуждения синхронных генераторов, так и находящихся в эксплуатации.

- Обоснованны критерии выбора и методы расчета параметров исполнительных органов и уставок защиты тиристорных преобразователей СВ, обеспечивающие функционирование защиты при возникновении повреждения в различных режимах работы синхронного генератора.
- Показано, что годовой эффект от внедрения защиты на одном из турбогенераторов мощностью 200 МВт может составить от 10 до 160 тыс. руб. в год, в зависимости от дефицитности энергосистемы и цен на электроэнергию.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных исследований использованы при разработке и наладке опытного образца защиты. Принято решение об установке защиты на тиристорных преобразователях системы возбуждения блока №1 ЧТЭЦ-3.

Апробация работы. Основные положения работы и ее отдельные разделы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах.

- Научно-практической конференции «Энергосбережение в промышленности и городском хозяйстве», Челябинск, 2000.
- Второй и Третьей Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Энергентика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», Благовещенск, 2000.
- Всероссийской научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, безопасность», Екатеринбург, 2001 и 2003.
- Международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими», Новочеркасск, 2001.
- Российском национальном симпозиуме по энергетике, Казань, 2001.
- XIII научно-технической конференции по обмену опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики в энергосистемах Урала РАО ЭЭС «ЕЭС России», ОДУ Урала, МЭС Урала, Екатеринбург, 2001.
- Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России», С.-Петербург, 2002.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 11 работ, в том числе 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и 4 приложений. Основной материал содержит на 134 страницы машинописного текста, 68 иллюстраций, 7 таблиц. Общий объем работы составляет 179 страниц.

Работа поддержана Министерством образования РФ и Администрацией Челябинской области (конкурс грантов на 2002 год для студентов, аспирантов,

молодых учёных вузов Челябинской области по «Программе поддержки научного творчества молодежи в вузах Челябинской области»).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследования, указана научная новизна и практическая ценность работы, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ статистики повреждений сильноточных тиристорных преобразователей систем возбуждения мощных синхронных генераторов, выполненный на основе обзоров аварий ОРГРЭС за период с 1969 по 1995г. Исследованы электромагнитные процессы, происходящие при развитии аварий, связанных с отказами быстродействующих предохранителей, выполнен анализ возможности и эффективности применения известных в настоящее время защит, обоснованна актуальность создания специальной защиты и сформулированы требования, предъявляемые к ней, предложен оригинальный способ и алгоритм защиты тиристорного преобразователя от данного вида повреждений.

Показано, что характерными причинами аварий сильноточных вентильных преобразователей систем возбуждения синхронных генераторов, являются внутренние повреждения, вызванные пробоями тиристоров, а их наибольшее количество наблюдается у тиристорных преобразователей с естественным охлаждением СВ генераторов мощностью 200–220 МВт, работающих при предельных параметрах.

Особенностью сильноточных преобразователей является использование, для обеспечения больших рабочих токов, параллельных вентилей, секций и мостов. Основным средством защиты при повреждениях вентилей являются быстродействующие предохранители, включенные последовательно с вентилями. Однако, достаточно часто наблюдаются случаи их отказов, сопровождающиеся дальнейшим развитием аварии.

На основании анализа ЭМП при подобных повреждениях и в частности, анализе осциллограмм развития аварии в СВ блока №1 ЧТЭЦ-3 22.09.2000 г. установлен алгоритм развития процессов, согласно которому, при пробое тиристора и последующем отказе предохранителя, длительное протекание тока короткого замыкания становится причиной разрушения предохранителя, сопровождавшегося выбросом ионизированных газов. Вследствие этого, происходят перекрытия изоляционных промежутков между токоведущими частями тиристорного преобразователя и появляются новые короткие замыкания. В конечном итоге возникает устойчивое трехфазное короткое замыкание, которое отключается штатной защитой генератора по потере возбуждения. От момента

пробоя тиристора до прекращения тока короткого замыкания в преобразователе при таких повреждениях проходит несколько десятых долей секунды, а то и несколько секунд. За это время происходит практически полное разрушение преобразователя. Подобные повреждения наблюдались и на других генераторах производства «Уралэлектротяжмаш», оснащенных системами возбуждения серии СТС с преобразователями с естественным охлаждением.

Принятие после первой аварии чисто конструктивных мер, таких как усиление изоляции токоведущих частей, установка дополнительных изолирующих перегородок, усиление вентиляции и т.д. не принесло ощутимого эффекта, поэтому для снижения ущерба при внутренних КЗ и отказах предохранителей, необходима специальная быстродействующая защита сильноточного преобразователя, предупреждающая развитие аварии.

Проведенный анализ ЭМП в преобразователях при работе известных средств защиты тиристорных преобразователей, таких как отключение КЗ тиристорами, установленными в цепи первичной обмотки трансформатора; съем (блокировка) управляющих импульсов тиристоров; перевод выпрямителя в инверторный режим; принудительное прерывание аварийного тока с помощью коммутирующего конденсатора; шунтирование нагрузки преобразователя тиристорным короткозамыкателем (защита от коротких замыканий на кольцах ротора) и их комбинаций, показал их неэффективность при развивающихся коротких замыканиях. Одни из них не обеспечивают необходимого быстродействия, другие приводят к аварийному отключению системы, что не допустимо для генераторов, некоторые дороги и громоздки в исполнении.

На основе выполненных исследований электромагнитных процессов в тиристорных преобразователях СВ при развивающихся коротких замыканиях с учетом выявленных особенностей и недостатков типовых бесконтактных защит, предложен оригинальный способ защиты преобразователя от рассматриваемого вида повреждений. Он позволяет в большинстве случаев предотвратить развитие аварии без аварийного отключения преобразователя. Имеет высокую надежность, благодаря наличию трех ступеней защиты. Простая реализация этого способа позволяет установить защиту на большинстве сильноточных преобразователей, находящихся в эксплуатации.

На рис.1 приведена схема преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме, в каждом плече которого включено n параллельных ветвей, содержащих тиристоры с последовательно-включенными быстродействующими предохранителями. С трехфазной сетью вентильная часть связана через трансформатор. В плече 2 показаны параллельные ветви, остальные плечи отображены только одной ветвью. Рассмотрим принцип работы защиты при тепловом пробое тиристора VD21 на интервале работы тиристорных групп VD2 и

VD3. В момент включения тиристоров VD4 в преобразователе возникнет двухфазное короткое замыкание, ток которого будет протекать по контуру I. Предохранитель F21 должен прервать этот ток, тем самым, отключив поврежденный вентиль, а оставшиеся параллельные вентили (VD22-VD2n) должны обеспечить дальнейшую работу преобразователя. В случае отказа F21, короткое замыкание продолжается.

Предложенная защита ожидает включения группы тиристоров VD5 и завершения коммутации тиристоров VD3 и VD5, после чего подается импульс управления на тиристорный короткозамыкатель ТКЗ. Его включение приводит к возникновению нового контура для протекания тока КЗ, имеющего значительно меньшее сопротивление, чем контур, содержащий отказавший предохранитель и следовательно включающий сопротивление его дуги. В результате ток КЗ переходит из контура I в контур II. Поврежденный предохранитель оказывается зашунтированным и дуга в нем гаснет, предотвращая разрушение последнего. Функцию отключения тока КЗ берет на себя резервный предохранитель ПР, фактически осуществляя резервирование штатных предохранителей преобразователя.

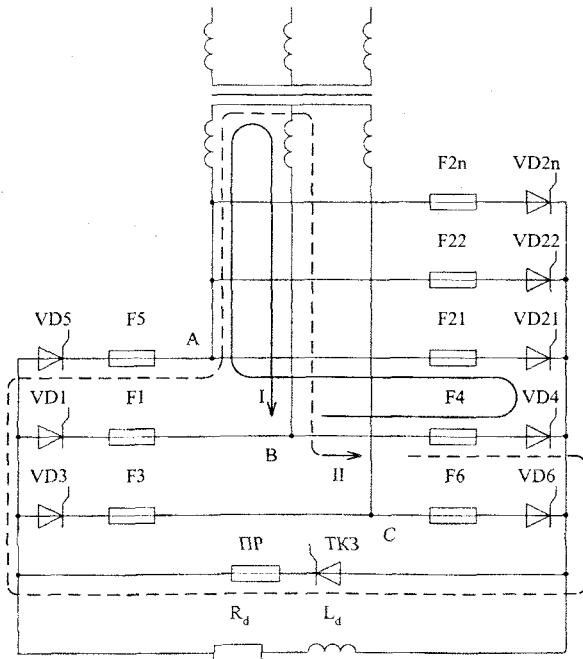


Рис.1. Схема трехфазного мостового сильноточного преобразователя с подключением исполнительных органов защиты

Предложенный способ позволяет реализовать три ступени защиты. Первая – *штатными предохранителями преобразователя*, установленными последовательно с тиристорами и отключающими ток короткого замыкания при пробое соответствующего тиристора. Если предохранитель не отключает ток КЗ, то запускается вторая ступень, реализуемая *предложенным алгоритмом и соответствующей схемой*, переводящей ток КЗ в контур с резервным предохранителем ПР, отключающим ток КЗ и предотвращающим выброс плазмы из предохранителя предыдущей ступени. Если резервный предохранитель ПР не отключает ток КЗ, то вступает в действие третья ступень, реализованная *штатными предохранителями преобразователя*, установленными последовательно с тиристорами, по которым проходит ток II контура (контура, содержащего резервный предохранитель ПР). Следовательно, третью ступень обеспечивают предохранители “здоровых” плеч преобразователя (плеч 4 и 5 на рис.1), отключающие ток короткого замыкания в случае отказа резервного предохранителя ПР.

Во второй главе представлены исследования электромагнитных процессов в сильноточных тиристорных преобразователях СВ синхронных генераторов при работе защиты. Рассмотрены случаи тепловых пробоев и пробоев по напряжению на интервалах работы различных групп тиристоров. Здесь же исследовано влияние режима работы генератора на протекание электромагнитных процессов, сопровождающих срабатывание защиты. Проведенный анализ позволил уточнить алгоритм работы защиты, сформулировать требования к ее элементам, определить диапазон рабочих режимов СГ, в которых рассматриваемая защита эффективна, и таким образом определить область применения защиты.

На рис.2 приведены диаграммы токов и напряжений преобразователя СВ синхронного генератора работающего в номинальном режиме с $\alpha = 60$ град.эл., при тепловом пробое одного из параллельных тиристоров группы 2. В это время, включены тиристоры группы 2 и 3. В момент времени t_1 приходит импульс тока управления на тиристоры группы 4, начинается коммутация тиристоров групп 2 и 4, в результате чего ток в неповрежденных тиристорах группы 2 снижается до нуля и они закрываются. Но, так как один из тиристоров второй группы пробит, двухфазное КЗ в контуре коммутации продолжается с увеличением тока, протекающего по тиристорам группы 4 и пробитому тиристору в группе 2.

В момент времени t_2 ток одной из фаз преобразователя превышает величину уставки защиты $I_{уст}$, что приводит защиту в состояние готовности. В мо-

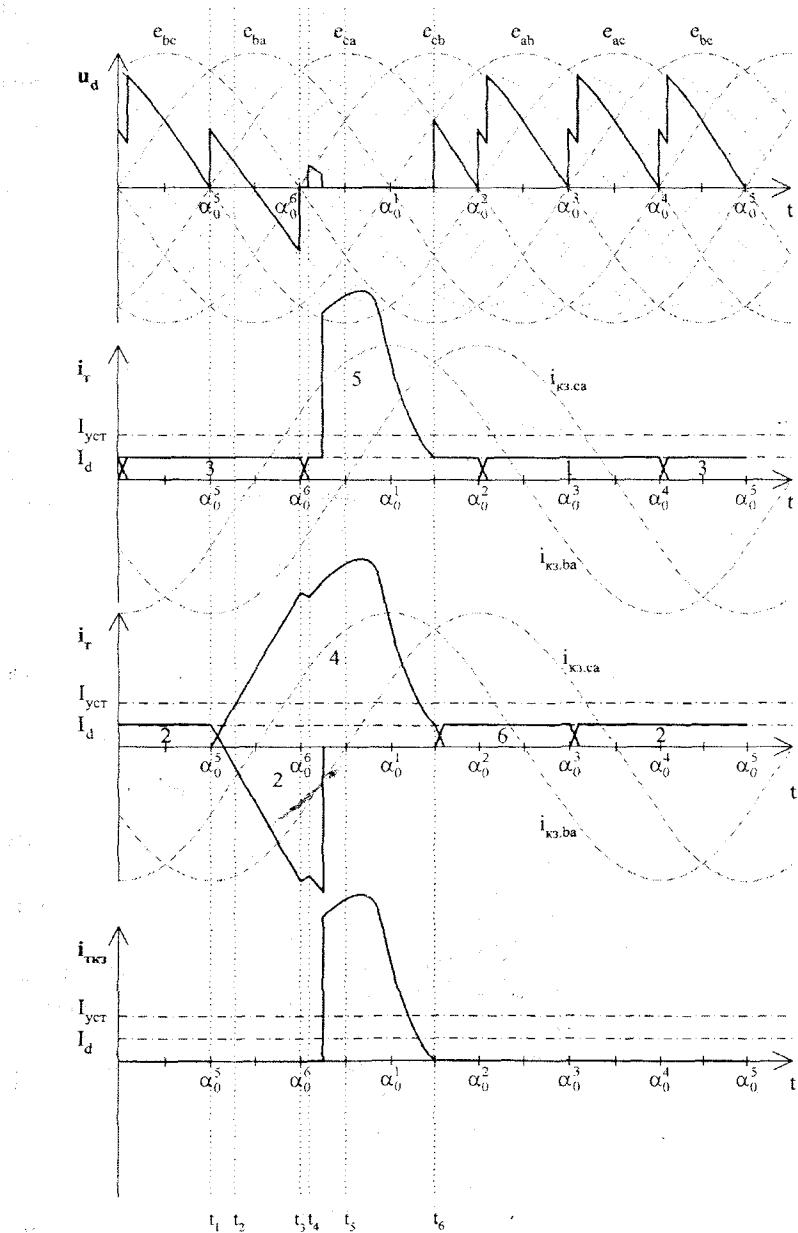


Рис.2. Электромагнитные процессы при тепловом пробое тиристора и работе защиты

мент t_3 появления импульсов управления на тиристорах 5-ой группы, под действием ЭДС e_{CA} происходит коммутация 3-ей и 5-ой групп тиристоров. В момент времени t_4 коммутация заканчивается, и в работе остаются тиристоры групп 4 и 5, а также пробитый тиристор второго плеча. Защита действует на включение короткозамыкателя ТКЗ в момент t_4 , одновременно снимая импульсы управления тиристорами преобразователя. Ток короткого замыкания, протекавший через поврежденный вентиль по контуру I (рис.1), переводится во вновь образовавшийся контур II, тем самым, достигается шунтирование дуги в предохранителе ее гашение. В момент времени t_5 в резервном предохранителе ПР загорается дуга, которая способствует ограничению тока КЗ и выведению энергии, сосредоточенной в индуктивностях силового трансформатора и трехфазной сети. В момент времени t_6 ток короткого замыкания в контуре II снижается до нуля и короткое замыкание отключается. Прекращение тока через короткозамыкатель фиксируется датчиком нуля тока, установленным в его цепи, и защита восстанавливает импульсы управления тиристорами, что приводит к восстановлению рабочего режима преобразователя.

Анализ электромагнитных процессов при пробоях тиристоров по напряжению показал, что в зависимости от момента пробоя, исходного режима генератора (угла управления тиристорами) и величины тока КЗ, возможна работа защиты по одному из двух сценариев: 1) шунтирование дуги, горящей в отказавшем предохранителе, и отключение тока КЗ с помощью резервного предохранителя; 2) ограничение величины тока КЗ при коммутации, вызванной пробоем тиристора по напряжению, с последующим шунтированием дуги, горящей в отказавшем предохранителе, и отключением тока КЗ с помощью резервного предохранителя. Это учтено при разработке логической части защиты и выборе ее силовых элементов.

Величина и длительность тока короткого замыкания, протекающего по отказавшему предохранителю, в режиме гашения поля СГ значительно меньше, чем при его форсировке. Это снижает вероятность разрушения предохранителя в случае его отказа. Проведенные исследования показали, что в ряде случаев для защиты преобразователей в этом режиме, достаточна типовая защита блокировкой импульсов управления тиристорами преобразователя, так как начиная с некоторых углов $\alpha = \alpha_{\min}$ термическое воздействие тока КЗ на предохранитель пробитого тиристора будет меньше предельно допустимого значения $W_{\text{пред}}$ и его разрушения не произойдет. Однако, при $\alpha < \alpha_{\min}$ возможно как плавление предохранителей здоровых плеч (потеря одного плеча преобразователя и соответственно его отключение) так и разрушение предохранителя про-

битого тиристора с развитием короткого замыкания. В этом случае, использование рассматриваемой защиты является необходимым.

Проведенный анализ электромагнитных процессов при пробоях тиристоров по напряжению показал, что вне зависимости от момента пробоя, они эквивалентны досрочному включению в работу плеча, содержащего пробитый тиристор, и в конечном счете сводятся к электромагнитным процессам при тепловых пробоях тиристоров. Следовательно, и в этих случаях рассматриваемая защита эффективна.

В результате выявлено, что при тепловых пробоях тиристоров и работе защиты от развивающихся КЗ наиболее тяжелым режимом, для исполнительных органов защиты, предохранителей первой, второй и третьей ступеней, является пробой тиристора при работе СВ в режиме форсировки генератора с предельной кратностью по напряжению. В этом случае наблюдается как наибольшая амплитуда тока КЗ, так и наибольшая его длительность. С увеличением α (включая и режим гашения поля СГ) эти величины уменьшаются, что снижает вероятность разрушения предохранителя в случае его отказа. Это позволяет считать данный режим расчетным при выборе основных параметров защиты.

В третьей главе проведен анализ влияния параметров исполнительных органов и уставок защиты на ее эффективность и быстродействие. Исходя из этого, сформулированы основные условия выбора параметров резервного предохранителя, количества и типа тиристоров короткозамыкателя.

Выдержка времени срабатывания защиты и ее уставка по току, определяют быстродействие защиты и ее селективность. Показано, что выбор уставки срабатывания защиты по току с отстройкой от тока преобразователя в режиме форсировки СГ не снижает быстродействия защиты. Проведенный анализ термического воздействия на предохранитель пробитого тиристора позволил предложить алгоритм определения оптимальной выдержки времени срабатывания защиты. Предложены способы ее регулирования, в частности, ускорением срабатывания защиты.

При выборе резервного предохранителя, с одной стороны, необходимо, для обеспечения лучших условий гашения шунтируемой дуги, иметь как можно большую величину интеграла плавления и соответственно интеграла полного отключения. С другой стороны, при этом не должно происходить плавление предохранителей, защищающих «здоровые» тиристоры, и находящихся в контуре протекания тока КЗ. С учетом этих требований выведено результирующее выражение для определения предельной величины полного интеграла отключения резервного предохранителя, используя параметры элементов защищаемого преобразователя

$$W_{\text{откл,пр}} < (n^2 - 1) \cdot W_{\text{пл,п}} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_2}{x_\gamma} \right)^2 \cdot k_n^2 \cdot \int_0^{360^\circ} (1 - \cos(\omega t))^2 \cdot dt,$$

где

- $W_{\text{пл,п}}$ -- интеграл плавления штатных предохранителей преобразователя;
- n -- количество параллельных тиристоров в плече преобразователя;
- k_n -- коэффициент неравномерности распределения токов в плече;
- E_2 -- линейная ЭДС приведенная к вентильной части преобразователя;
- x_γ -- индуктивное сопротивление сети, питающей преобразователь, приведенное к напряжению вентильной части;
- R_d -- сопротивление нагрузки преобразователя;
- Δt -- задержка срабатывания защиты;
- T -- период питающего напряжения.

Для выбора количества и типа тиристоров короткозамыкателя предложено использовать критерий максимально-допустимой температуры перегрева полупроводниковой структуры (ТПС), которая зависит от формы и величины импульса тока тиристоров, особенностей их конструкции, параметров (вольтамперной характеристики и тепловых сопротивлений) и условий охлаждения. Для ее расчета используется графоаналитический метод вычисления максимальной ТПС тиристора, в котором, в качестве исходных данных выступает импульс мощности, рассеиваемой в полупроводниковом приборе и его каталожные параметры. При этом, использована реальная вольтамперная характеристика (ВАХ) тиристора, имеющая вид «петли», ширина которой увеличивается с ростом амплитуды тока. Математическая модель тиристора с такой ВАХ, позволила учесть деформацию ВАХ за счет нагрева полупроводниковой структуры при протекании по тиристору импульса тока КЗ.

Анализ полученных данных показал, что при увеличении количества параллельных тиристоров в короткозамыкателе сглаживается зависимость ТПС от режима работы преобразователя. Это позволяет при установке более трех параллельных тиристоров использовать упрощенную методику их выбора, в которой рассчитывается ТПС только в режиме предельной форсировки генератора (при работе преобразователя с $\alpha = 0$).

На основе проведенных исследований разработана программа расчета параметров исполнительных органов и уставок защиты на ЭВМ, позволяющая определить: задержку срабатывания защиты, необходимость ускорения защиты, закон изменения угла управления тиристорами при ускорении, закон изменения

адаптивной задержки срабатывания защиты, тип тиристоров короткозамыкателя, количество параллельных тиристоров выбранного типа.

В четвертой главе произведена детализация алгоритма работы защиты, рассмотрены принципы его реализации на различной элементной базе. Разработан вариант принципиальной электрической схемы защиты на полупроводниковых элементах, сформированы основные принципы ее настройки. Показаны преимущества микропроцессорной защиты, предложена соответствующая структурная схема и обоснованы требования к ее основным параметрам. Проведен анализ данных, полученных в результате испытаний опытного образца защиты. Выполнена оценка возможного технико-экономического эффекта от внедрения разработанной защиты.

Для реализации защиты без изменения угла управления тиристорами на полупроводниковой элементной базе, разработана следующая структурная схема защиты. Она включает датчики токов фаз ДТ-А, ДТ-В, ДТ-С, блок определения завершения коммутации тиристоров БОЗК3, блок определения наличия тока короткого замыкания БОНК3, блок определения ликвидации короткого замыкания БОЛК3, блок логики, управления и сигнализации БЛУС, а также блок включения тиристоров короткозамыкателя БВТК3. Детализированный алгоритм работы защиты представлен на рис.3.

При аппаратной реализации этого алгоритма наиболее сложными являются блоки определения завершения коммутации тиристоров и определения отключения тока КЗ. Предложенные алгоритмы и схемные решения позволяют реализовать эти блоки, с использованием только фазных токов преобразователя.

Защита на микропроцессорной элементной базе позволяет закладывать более гибкие алгоритмы защиты, в частности, реализующие изменение угла управления тиристорами преобразователя, адаптивную задержку срабатывания защиты, контроль термического воздействия на предохранитель пробитого тиристора и т.д. Показано, что наиболее значимым параметром микропроцессорной защиты является частота дискретизации аналогово-цифрового преобразования, для определения которой предложен метод оценки средней погрешности преобразования сигнала с учетом его предполагаемой формы.

Проведены испытания опытного образца защиты от развивающихся коротких замыканий, предназначенного для установки в СВ турбогенератора блока №1 ЧТЭЦ-3 и выполненного на полупроводниковой элементной базе. Испытания защиты проводились для случаев пробоя тиристора по току при работе СВ в длительном режиме, режиме форсировки и режиме гашения поля СГ. Кроме этого, при работе в длительном режиме генератора, были проведены испытания защиты при пробоях тиристоров по напряжению в различные моменты

времени. Анализ полученных осцилограмм подтвердил результаты теоретических исследований и показал, что защита эффективна при всех режимах работы генератора и при различных видах повреждений тиристоров.

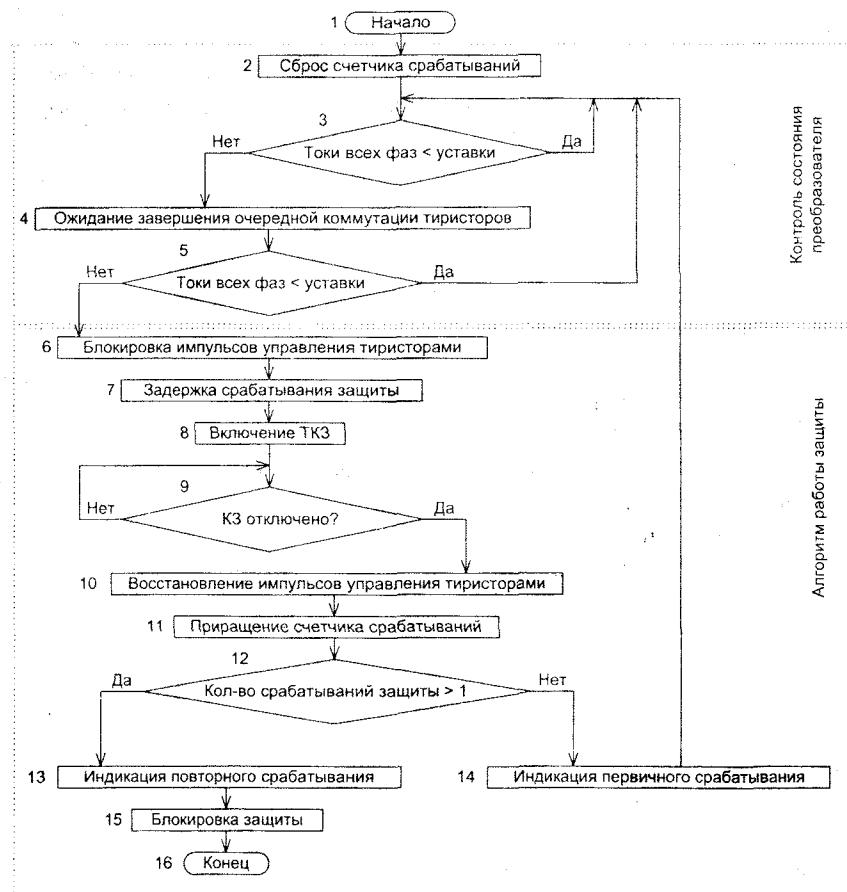


Рис.3. Блок-схема алгоритма функционирования защиты

Выполненная оценка технико-экономического эффекта от внедрения защиты, показала, что годовой эффект от внедрения защиты на турбогенераторе мощностью 200 МВт может составить, в зависимости от дефицитности энергосистемы, от 10 до 160 тыс. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено новое решение актуальной научно-технической задачи: обоснование принципов построения и реализации защиты тиристорных преобразователей систем возбуждения синхронных генераторов от развития аварии, вызванной пробоем тиристора и последующим отказом предохранителя. При этом получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа электромагнитных процессов при развивающихся коротких замыканиях при применении известных средств защиты тиристорных преобразователей СВ синхронных генераторов показана их неэффективность и необходимость создания дополнительной быстродействующей защиты. Определены основные требования к такой защите.

2. Предложен оригинальный способ и разработан алгоритм работы защиты, удовлетворяющий поставленным требованиям и обеспечивающий три ступени защиты тиристорного преобразователя системы возбуждения синхронного генератора.

5. Проведенный анализ электромагнитных процессов при пробоях тиристоров по току и напряжению показал, что предложенный алгоритм защиты преобразователей эффективен для всех режимов работы системы возбуждения синхронных генераторов.

6. Разработаны методы расчета уставок защиты и параметров ее элементов. Исследовано их влияние на эффективность защиты преобразователей системы возбуждения в различных режимах работы.

7. Проработаны варианты аппаратной реализации защиты на аналоговой и микропроцессорной элементной базе. Показаны преимущества микропроцессорной, в частности, возможность реализации контроля термического воздействия тока короткого замыкания, одновременно обеспечивающие и максимальное быстродействие и требуемый уровень селективности защиты.

8. Результаты испытаний опытного образца защиты для СВ блока №1 ЧТЭЦ-3, подтвердили теоретические исследования и показали возможность создания простых и надежных устройств для защиты тиристорных преобразователей систем возбуждения синхронных генераторов от развивающихся коротких замыканий.

9. Определено, что экономический эффект от установки защиты в системе возбуждения синхронного генератора мощностью 200 МВт может составить от 10 до 160 тыс. руб. в зависимости от мощности генератора и избыточности или дефицитности энергосистемы.

Основное содержание диссертации изложено в работах

1. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Защита силовых полупроводниковых преобразователей от развивающихся коротких замыканий // Научно-практическая конференция «Энергосбережение в промышленности и городском хозяйстве». – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – С. 10–11.
2. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Защита от развивающихся коротких замыканий в силовом тиристорном преобразователе системы возбуждения генератора // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Энергентика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». – Благовещенск: Изд. АГУ, 2000. – С. 353–354.
3. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Трехступенчатая защита от внутренних повреждений в тиристорных преобразователях систем возбуждения синхронных генераторов // XIII НТК по обмену опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики в энергосистемах Урала РАО ЭиЭ «ЭЭС России» ОДУ Урала, МЭС Урала. – Екатеринбург: Изд. УГТУ-УПИ, 2001. – С. 19–21.
4. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Защита сильноточных полупроводниковых преобразователей от развивающихся коротких замыканий. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Выпуск I. – 2001. – №4. – С. 94–99.
5. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Защита синхронных генераторов от развивающихся коротких замыканий в тиристорных системах возбуждения // Материалы докладов Российского национального симпозиума по энергетике. – Казань: Изд. КГЭУ, 2001. – Том II. – С. 77–80.
6. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Электромагнитные процессы в тиристорных преобразователях систем возбуждения синхронных генераторов при работе защиты от развивающихся коротких замыканий // Сборник трудов Российской научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, безопасность». – Екатеринбург: Изд. УГТУ-УПИ, 2001. – С. 256–260.
7. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Выбор силовых элементов защиты от развивающихся коротких замыканий в преобразователях тиристорных систем возбуждения генераторов // Материалы международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими». Часть 2. – Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ(НПИ), 2001. – С. 7–12.
8. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Управление электромагнитными процессами при развивающихся коротких замыканиях в сильноточных вентильных преобразователях // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России. Труды Международной научно-практической конференции. – С.-Петербург: Изд. СПбГТУ, 2002. – С. 210–211.

9. Андреев А.Н. Защита от развивающихся коротких замыканий в сильноточных полупроводниковых преобразователях // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – С. 27–28.

10. Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. Микропроцессорная защита от развивающихся коротких замыканий в преобразователях систем возбуждения генераторов // Сборник трудов второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» – Благовещенск: Изд. АГУ, 2003. – С. 150–155.

11. Патент РФ № 2197051. Способ и устройство защиты тиристорного преобразователя от развивающихся коротких замыканий / Андреев А.Н., Гольдштейн М.Е. // Бюл. изобр. – 2003. – № 2.

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 17.02.2004. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1.

Тираж 80 экз. Заказ 22.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.