

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЁЖНОСТЬ ВЕНТИЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн, Р.А. Шаипов
г. Челябинск, ЮУрГУ

SERVICEABILITY OF VALVE EXCITEMENT SYSTEMS OF SYNCHRONOUS GENERATOR

A.N. Andreev, M.E. Goldstein, R.A. Shaipov
Chelyabinsk, SUSU

На основе статистических данных проведён анализ причин отказов систем возбуждения синхронных генераторов. Рассмотрена динамика соотношения отказов силовой части и системы управления возбуждением. Показано, что применение резервных систем возбуждения и 100 % резервирования в силовой части требует проведения дополнительных исследований электромагнитных процессов.

Ключевые слова: надёжность, отказ, резервирование, система возбуждения генератора, система управления возбуждением, полупроводниковый преобразователь.

On the base of statistical data the analysis of fault reasons of excitements systems of synchronous generator is made. The dynamics of proportion of power part and excitements control system is considered. It is shown that usage of reserve ES and 100% backup in power part requires undertaking the additional studies of the electromagnetic process.

Keywords: reliability, failure, backup, generator excitation system, excitation control system, semiconductor converter.

1. Статистика отказов систем возбуждения синхронных генераторов. Система возбуждения (СВ) состоит из комплекта оборудования, предназначенного для создания в обмотке возбуждения синхронного генератора автоматически регулируемого постоянного тока в различных его режимах [1]. Состав систем возбуждения определяется предъявляемыми к ним требованиями и теми параметрами, которые они должны обеспечить, а их классификация – принципиальными отличиями источников питания, структурой силовых схем преобразователя и применяемых в нём вентилей, конструкцией основного оборудования. Вентильная СВ включает возбудитель (генератор переменного тока или трансформатор, преобразователь); АРВ; коммутационную аппаратуру; измерительные датчики и приборы; средства защиты оборудования системы возбуждения от повреждений, вызванных перенапряжениями, сверхтоками, неисправностями системы охлаждения, возможными перегрузками, устройством начального возбуждения и ввод резервного возбуждения [2]. Отказы этих элементов могут привести к частичному или полному отказу системы возбуждения.

На протяжении длительного времени сбор сведений о технологических нарушениях в работе турбо- и гидрогенераторов и анализ их причин

выполнялся фирмой ОРГРЭС, а затем ПО «Союзтехэнерго». Анализ обзора аварий синхронных генераторов по данным [3, 4, 5, 6, 7], дополненным информацией об отказах СВ девяти синхронных генераторов Троицкой ГРЭС, показывает, что в среднем около 20 % технологических отказов в работе турбогенераторов (а по данным исследовательского комитета СИГРЭ до 32 % [8]) происходит из-за нарушений в работе систем возбуждения (см. таблицу).

Из графика (см. рисунок), построенного по данным таблицы, видно, что с 1960-го года наблюдается тенденция к увеличению доли отказов СВ. Одной из причин этого является внедрение и всё более широкое применение вентильных систем возбуждения: с 60-х годов XX в. – высокочастотных диодных, а затем диодных бесщёточных и тиристорных. Обладая более высокими функциональными свойствами, чем электромашинные СВ, они состоят из технически более сложного оборудования и требуют значительных трудозатрат эксплуатационного и ремонтного персонала для поддержания их в работоспособном состоянии. Это снижает надёжность их работы. Статистические данные показывают, что нарушения в работе СВ в большинстве случаев ведут к отказу генератора и в значительной степени определяют его надёжность.

Данные по отказам турбогенераторов из-за нарушений в работе систем возбуждения за период 1960–1996 гг.

Год	Всего отказов	Отказы из-за нарушений в работе СВ		Год	Всего отказов	Отказы из-за нарушений в работе СВ	
		количество	%			количество	%
1960	107	—	22,4	1976	287	—	18
1961	127	—	16	1977	384	—	13
1962	151	—	13	1978	360	—	24
1963	—	—	17	1979	448	—	23
1964	161	—	13,1	1980	468	—	16
1965	159	—	13,8	1981	436	104	23,9
1966	157	—	19	1982	436	108	24,8
1967	136	—	19	1987	594	130	21,9
1968	170	—	18	1988	499	113	22,6
1969	177	—	22	1989	551	134	24,3
1970	189	—	21	1990	396	67	16,9
1971	177	—	19	1991	453	78	17,2
1972	184	—	15	1992	174	45	25,9
1973	228	—	14	1995	189	49	25,9
1974	224	—	18	1996	201	34	16,9
1975	240	—	20				

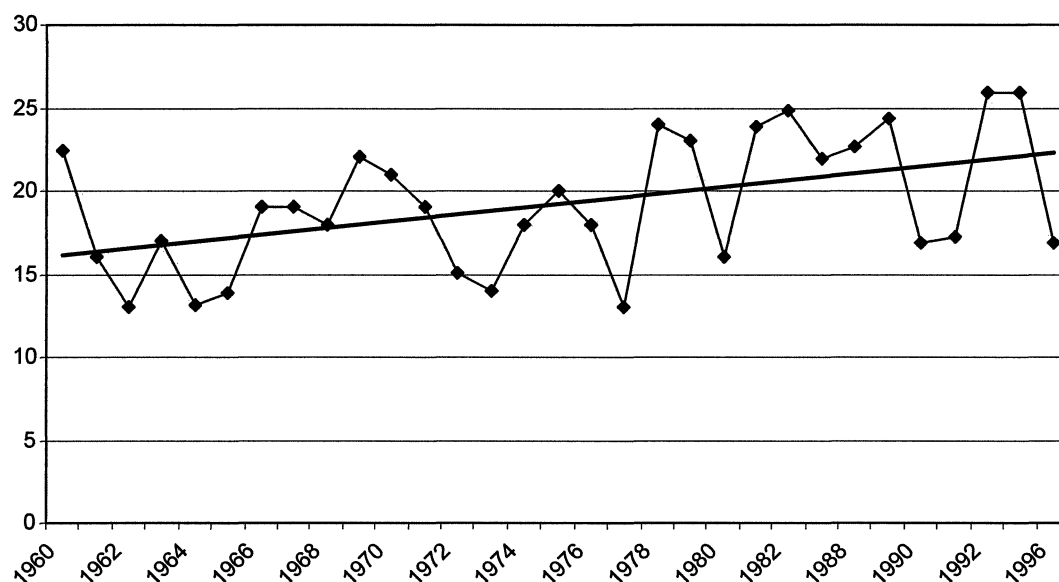


График доли отказов СВ в 1960–1996 гг.

2. Анализ причин отказов СВ. Анализ причин повреждений СВ за ряд лет [7] показал, что большое их количество связано с неправильной эксплуатацией, схемными, функциональными и конструктивными недоработками СВ.

Эти дефекты – результат воздействия человека на стадиях разработки, монтажа и эксплуатации системы относят к организационным причинам возникновения отказов. Их доля в общем числе отказов велика. Действительно, в 1995 году [6] из 189 отказов турбогенераторов 49 (26 %) было вызвано нарушениями в работе систем возбуждения. Из них 35 % вызваны организационными причинами. В 1996 году доля организационных причин составила 50 % [7].

При разработке и эксплуатации систем возбуждения возникновения организационных при-

чин стремятся не допускать. Фактически они являются ошибками разработчиков и эксплуатационников. Разнообразный характер организационных причин обычно не зависит от схемных, конструктивных, функциональных особенностей СВ, параметров режима эксплуатации, поэтому их учёт на стадии проектирования может быть произведён только на основе статистических данных эксплуатации. На их основе должны вырабатываться и соответствующие меры организационного характера, повышающие надёжность СВ.

Отказы систем возбуждения могут быть полными или частичными. При частичном отказе СВ не может полностью обеспечить все режимы генератора, однако он остаётся в работе. При полном отказе система возбуждения не может выполнять свои функции, поэтому генератор отключается

либо переводится на резервное возбуждение. При отказе СВ и потере возбуждения генератор переходит в асинхронный режим. В таком режиме ряд генераторов способны выдавать активную мощность в сеть, потребляя из неё реактивную. Так как последствия отказа СВ в данном случае ниже, то при наличии на станции резервной системы возбуждения и возможности длительной работы генератора в асинхронном режиме требования к надёжности системы возбуждения снижаются. Это обычно относится к генераторам небольшой мощности. Рассмотрим причины и последствия отказов элементов СВ, которые могут привести к частичному или полному отказу системы возбуждения. Для этого выделим в составе систем силовую часть и систему управления возбуждением (СУВ). Основные структурные единицы силовой части: источник питания – вспомогательный генератор, выпрямительный трансформатор, шины собственных нужд станции или их комбинации; преобразовательная часть; коммутационная аппаратура.

Нарушения в работе трансформаторов и вспомогательных генераторов, входящих в состав систем возбуждения, типичны для этих элементов. Отказ источника питания ведёт к полному отказу системы возбуждения. Для минимизации ущерба, вызванного повреждениями источника питания в аварийной ситуации, а следовательно, и времени восстановления, используются типовые для этих элементов защиты.

Преобразовательная часть в простейшем случае состоит из одного одногруппового (выполненного по трёхфазной мостовой схеме) преобразователя. В плече преобразователя может быть включен один полупроводниковый вентиль или несколько параллельных вентиляльных ветвей для обеспечения нормируемой нагрузки по току. В ветви последовательно могут включаться несколько вентиля для обеспечения нормируемого значения напряжения на вентиле. Отказ вентиля наступает при тепловом пробое или пробое из-за превышения допустимого значения напряжения. В некоторых случаях пробой тиристоров может произойти как следствие отказа защитных RC-цепей или выхода из строя выходных блоков системы управления тиристорами (в тиристорных СВ). При пробое всех вентилях, входящих в состав ветви, наступает её отказ. Для отключения отказавшей ветви последовательно с вентилями включаются быстродействующие предохранители. В системах возбуждения небольшой мощности, в которых преобразователи выполняются без параллельных ветвей, предохранители могут включаться не в ветви, а в фазные шины. Для повышения надёжности в плечи преобразователя включаются резервные параллельные ветви. Также устанавливаются резервные последовательные вентиля с целью предотвращения недопустимого повышения напряжения. ГОСТ [1] допускает выход из строя некоторого количества параллельных ветвей, при

котором наступает частичный отказ – ограничение режима возбуждения генератора. Если количество отказавших ветвей в любом плече преобразователя превысит допустимое значение, то произойдёт отказ преобразователя.

Возможны отказы и предохранителей – обычно это перегорание плавкой вставки при рабочем значении тока и соответственно ложное отключение. В некоторых случаях предохранитель не справляется с отключением тока короткого замыкания: происходит разрыв его оболочки с выбросом дуги в шкаф преобразователя с последующими перекрытиями между шинными соединениями. Это развивающееся короткое замыкание. Для таких аварий характерен высокий уровень повреждений и в результате этого длительный ремонт. Для предотвращения развития аварий вследствие таких отказов предохранителей разработана специальная защита [9].

В некоторых СВ, например, новых систем возбуждения генераторов Зейской ГЭС, для повышения надёжности вместо предохранителя последовательно в ветвь включается диод высокого класса по напряжению. Так как диоды обладают меньшим чем тиристоры временем выключения, то в момент коммутации основное перенапряжение приходится именно на него, что разгружает тиристор и увеличивает срок его службы. При пробое тиристора ветвь преобразователя останется в работе, что повышает общую надёжность преобразователя.

Для отвода тепла от вентилях в преобразователях СВ применяют естественное воздушное, принудительное воздушное или водяное охлаждение. Отказ систем охлаждения выражается в уменьшении потока охлаждающего агента через охладители вентилях, что приводит к их перегреву и последующему тепловому пробое, и, как следствие, отказу преобразователя. В системах водяного охлаждения также возможны течи воды из контура охлаждения, которые приводят к перекрытию изоляции и отказу преобразователя.

Коммутационные аппараты, присутствующие в цепях постоянного тока СВ, выполняют функции устройства гашения поля (УГП). Отказ УГП во время гашения поля может вести либо к полному отказу СВ, либо к частичному в зависимости от типа СВ и условий гашения поля. Если СВ позволяет произвести гашение поля каким-либо другим способом (например, переводом преобразователя в режим инвертирования), то отказ УГП приводит к частичному отказу СВ. В противном случае к полному. Следует отметить, что отказ СВ в гашении поля обычно ведёт к серьёзным повреждениям генератора и оборудования самой СВ.

Системы возбуждения, производимые до конца 90-х годов, оснащались системами управления возбуждением, выполненными на полупроводниковой элементной базе. Такие СУВ включали в себя измерительные датчики и приборы, устройст-

во автоматического регулирования возбуждения (АРВ), систему управления тиристорами, аппаратуру управления, сигнализации и защиты. С переходом на микропроцессорную элементную базу функции АРВ, управления, защиты и сигнализации стали выполняться программно на микропроцессорном контроллере. Частичный отказ контроллера может вести как к частичному, так и к полному отказу СУВ и СВ. Полный отказ контроллера ведёт к полному отказу СУВ и СВ в целом, поэтому предпринимаются различные меры по повышению его надёжности путём резервирования: дублирование по питанию, использование двухпроцессорных контроллеров и др. Производителями предлагаются варианты установки двух контроллеров – один из которых полноценный, а второй с меньшим набором функций выполняет роль резервного, позволяя в случае отказа первого сохранить СВ в работе. Также существуют варианты исполнения СУВ со 100 %-ным резервированием, т.е. установкой двух полноценных контроллеров. При выходе из строя измерительных датчиков и приборов и сохранении предшествующего режима управления вентилями, можно оставить генератор в работе. В таком случае отказ СУВ является частичным.

В СУВ современных систем возбуждения реализуется значительное количество защит как самой СВ, так и цепей ротора генератора. Отказы защит возникают при ложном их срабатывании, а также при несрабатывании в аварийной ситуации. Ложное срабатывание, приводящее к отключению СВ, ведёт к отказу СВ. Несрабатывание защиты в аварийной ситуации приводит к повреждению оборудования СВ и генератора и является отказом СВ.

Если в СВ применяется один мост, то при его выходе из строя наступает отказ СВ. Поэтому для повышения надёжности в таких СВ используется 100 %-ное резервирование в преобразовательной части. При этом один преобразователь находится в работе, а второй, находящийся в горячем резерве со снятыми импульсами управления, вступает в работу при отказе первого. Однако электромагнитные процессы при аварийном переводе с одного преобразователя на другой требуют дополнительного изучения. Для повышения эксплуатационных параметров преобразовательная часть СВ может выполняться из нескольких параллельно работающих мостов. Впервые такой способ резервирования был опробован в СВ с двухгрупповым преобразователем. В общем случае эти мосты могут быть рассчитаны на разную нагрузку. При отказе одного или нескольких мостов, и способности оставшихся поддерживать все режимы генератора отказа СВ не происходит. Если же при этом на режим генератора накладывается ограничение, то наступает частичный отказ СВ. Во всех остальных случаях наступает полный отказ. Обычно повышение надёжности в этом случае достигается выполнением параллельных мостов такими, чтобы

выход из строя любого из них не приводил к отказу СВ. Например в двухгрупповых преобразователях и форсировочную, и рабочую группу изготавливают способными обеспечить длительные режимы генератора.

Для повышения надёжности генератора, а также удобства эксплуатации на станции обычно применяются резервные системы возбуждения. Производители предлагают как тиристорные, так и электромашинные резервные СВ. Следует отметить, что переводы возбуждения с рабочей СВ на резервную и обратно нередко бывают неудачными и приводят к потере возбуждения. Для разработки методики перевода без отказов необходимы дополнительные исследования электромагнитных процессов, протекающих в контурах преобразователей систем возбуждения, включенных на параллельную работу.

3. Динамика отказов силовой части и СУВ.

На первоначальном этапе разработки полупроводниковых СВ применением резервирования удалось достичь высоких показателей надёжности силовой части. Поэтому основные усилия разработчиков были направлены на повышение надёжности систем управления возбуждением. И тем не менее до появления микропроцессорного управления возбуждением надёжность цепей управления была существенно ниже, чем у силовой части [6, 7, 11, 12]. Это объяснялось большим количеством элементов в системе управления возбуждением; сложностью систем в эксплуатации и ремонте; наличием скрытых дефектов изготовления.

С переходом на микропроцессорную элементную базу повысились функциональные возможности систем управления возбуждением, в том числе появились возможности самодиагностики. Это значительно снизило время восстановления СВ при частичных отказах. С повышением степени интеграции количество элементов и объём монтажа уменьшился, что существенно снизило вероятность отказов в цепях управления. При этом конструктивные схемы систем микропроцессорного управления стремятся сделать такими, чтобы отказы их элементов являлись только частичными для СВ в целом. Из-за высокой интеграции схем с микропроцессорным управлением их ремонт может быть проведён только специалистами высокого уровня. Поэтому снижается количество отказов вследствие дефектов после ремонта. Следует заметить, что эксплуатация микропроцессорных систем требует меньшего количества персонала, но с высоким уровнем квалификации. При этом у оперативного персонала становится меньше возможностей для неправильных действий, это также позволило снизить количество отказов. С учётом резервирования надёжность СУВ в настоящее время значительно возросла.

В силовой части в последние десятилетия не было качественного скачка, как в случае с СУВ. Элементная база, схемные и конструктивные ре-

шения остались прежние. При это надежность силовой части существенно не изменилась, более того, стремление снизить себестоимость СВ привело к упрощенным решениям, в частности, в ряде случаев к отказу от полноценного резервирования.

Выводы

Проведенный анализ статистики, причин и тенденций отказов СВ синхронных генераторов показывает, что надежность СВ сегодня остаётся низкой и во многом определяет надёжность генераторов в целом. При этом до половины всех отказов СВ происходят по организационным причинам, требующим соответствующих мер организационного характера.

Сегодня надёжность СУВ значительно повысилась, поэтому дальнейшее повышение надёжности СВ следует ожидать за счёт снижения отказов в силовой части. Однако при этом следует отметить, что при применении 100 %-ного резервирования в преобразовательной части и систем резервного возбуждения для повышения надёжности и удобства эксплуатации необходимо дополнительное исследование электромагнитных процессов при параллельной работой преобразователей в процессе перевода.

Литература

1. ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
2. Гольдштейн, М.Е. Вентиляльные системы возбуждения синхронных генераторов: учебное пособие/ М.Е. Гольдштейн. – 3-е издание, перераб. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.
3. Гайнуллин, Р.Р. Защита синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения от коротких замыканий в цепи ротора: дисс. ... канд. техн. наук / Р.Р. Гайнуллин. – Свердловск, 1989.
4. Обзор и анализ повреждаемости электрооборудования и линий электропередачи в энергосистемах за 1982 год. Выпуск 1. – М.: Союзтехэнерго, 1983.
5. Обзор и анализ повреждаемости электрооборудования и линий электропередачи в энергосистемах за 1988 год. Выпуск 1. – М.: Союзтехэнерго, 1989.
6. Анализ причин технологических нарушений в работе электроустановок за 1995 год. – М.: ОРГРЭС, 1996.
7. Анализ причин технологических нарушений в работе электроустановок за 1998 год. – М.: ОРГРЭС, 1999.
8. Новое оборудование для систем возбуждения и опыт его эксплуатации / В.К. Воробей, С.Л. Иванов, В.В. Кичаев и др. // Электрические станции. – 2002. – № 11. – С. 51–57.
9. Пат. 2197051 Российская Федерация, МПК 7 Н 02 Н 7/12. Способ и устройство защиты тиристорного преобразователя от развивающихся коротких замыканий / А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн. – № 2001109387; заявл. 06.04.2001; опубл. 20.01.2003, Бюл № 2.
10. Пат. 2282925 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 7/09, Н 02 Р 9/14. Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) / А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн, Е.Я. Крекер. – № 2005111665; заявл. 19.04.2005; опубл. 27.08.2006, Бюл. № 8.
11. Глебов, И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1988.
12. Костелянец, В.С. Режимы и надёжность работы тиристорного возбудителя синхронной машины / В.С. Костелянец. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в редакцию 10.06.2008 г.

Андреев Алексей Николаевич – доцент кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

Andreev Alexei Nikolajevich – candidate of technical science, associate professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department, South-Ural State University, Chelyabinsk. Contact phone: 8-(351) 267-92-46.

Гольдштейн Михаил Ефимович – заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, профессор. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

Goldstein Michael Efimovich – candidate of technical science, Professor, Head of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department, South-Ural State University, Chelyabinsk. Contact phone: 8-(351) 267-92-46.

Шаипов Ринат Азатович – аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-41.

Shaipov Rinat Azatovich – postgraduate student of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department, South-Ural State University, Chelyabinsk. Contact phone: 8-(351) 267-92-41.