

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В.В. Шевченко, М.В. Соловьев
(Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков)

Определена проблема создания и внедрения в силовую энергетику высоковольтных генераторов. Рассмотрено современное состояние и перспективы использования высоковольтных генераторов. Рассмотрена альтернатива создания высоковольтных генераторов, позволяющим непосредственно включаться в высоковольтную сеть, без промежуточных трансформаторов.

высоковольтный генератор, силовая энергетика, трансформатор

Постановка проблемы. Повышение единичной мощности генераторов выдвигает проблему повышения напряжения статорной обмотки с целью непосредственного подключения к высоковольтной распределительной сети. Это решение предполагает исключение из передающей системы повышающего трансформатора. Однако, развитие других направлений науки и техники, в частности, физики низких температур, позволяет рассматривать альтернативные пути решения этой проблемы.

Анализ публикаций. Рассмотрены данные о существующих конструктивных решениях турбо- и гидрогенераторов, вопросы охлаждения и организации систем возбуждения обмоток генераторов, определены практические достижения в создании конструкций высоковольтных генераторов обычного и криогенного исполнения [1 – 6].

Цель статьи: систематизировать данные по достигнутым значениям величины напряжения в высоковольтных синхронных генераторах, о перспективах, достоинствах и недостатках существующих решений. Предложить альтернативу варианту исключения повышающего трансформатора из системы «генератор – повышающий трансформатор – сеть» на замену его типа: предлагается использовать трансформатор с высоковольтными и со сверхпроводящими обмотками возбуждения.

Продолжается рост мощности генераторов, что приводит к возникновению проблем снижения потерь, как в самих генераторах, так и в элементах, соединяющим выводы статорной обмотки с повышающим трансформатором – промежуточным связующим звеном генератора с сетью. Также необходимо совершенствовать систему охлаждения машин, разрабатывать и внедрять коммутационную аппаратуру на все возрастающие токи (при сохранении прежнего, сравнительного малого напряжения генератора). Наиболее очевидным решением является увеличение напряжения генератора до уровня

напряжения ЛЭП, т.е. хотя бы до 110 кВ (рис. 1: а – схема с повышающим трансформатором для обычного генератора; б – схема включения высоковольтного генератора в сеть).

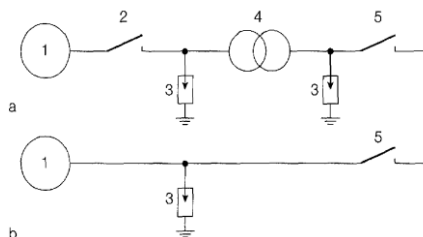


Рис. 1. Схематическая диаграмма включения генератора в энергосеть: 1 – генератор; 2 – высоковольтный выключатель генератора; 3 – разрядник; 4 – повышающий трансформатор; 5 – автомат включения генератора в сеть

мощности при малых напряжениях (15 –16 кВ) и, соответственно, при больших токах. Это приводит к значительным потерям уже на первом этапе транспортирования электроэнергии к потребителю (рис. 2) [1].

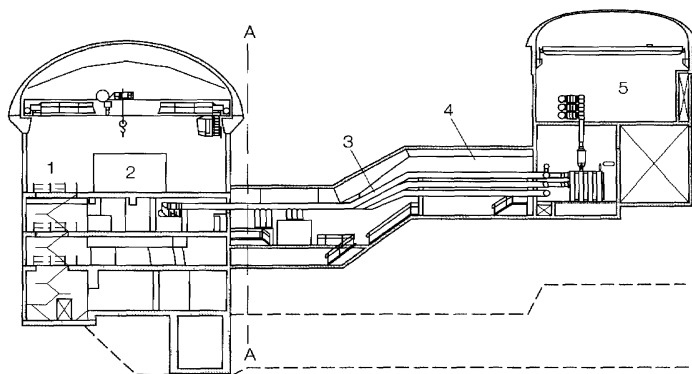


Рис. 2. Схематический разрез гидроэлектростанции (с использованием новой технологии (высоковольтного гидрогенератора), всё правее сечения А-А устроено):

1 – машинный зал; 2 – гидрогенератор; 3 – система токопроводов; 4 – туннельная система связи генератора, трансформатора и СЭС; 5 – повышающий трансформатор

Использование высоковольтных генераторов, т.е. вариант исключения повышающего трансформатора, имеет ряд достоинств:

- 1) исключение из сети повышающего трансформатора, а также низковольтных коммутационных аппаратов и шинопроводов;
- 2) повышение КПД системы выработки электроэнергии (на 0,5... 1,5 %);

3) уменьшение стоимости, повышение технологичности энергетической установки и стоимости её эксплуатации (снижение строительных затрат);

4) экономия материалов: электротехнической стали, меди и трансформаторного масла;

5) улучшение экологических условий (в связи с отсутствием трансформаторного масла);

6) возможность сохранения при модернизации существующих генераторов части основных сборочных единиц.

Работы в этом направлении ведутся давно. Высоковольтный генератор был разработан в середине 70-х - конце 80-х годов на базе НИИЭС (СССР) и испытан на Сходненской ГЭС в г. Москве (мощность генератора – 14,5 МВт, напряжение – 110 кВ). Однако, судя по практически полному отсутствию публикаций и дальнейшего широкого внедрения высоковольтных гидрогенераторов в энергосистемы, испытания не дали положительного результата.

Проведение исследований и создание промышленно-перспективных высоковольтных генераторов (ВВГ) стало целесообразным после появления последнего поколения изоляционных материалов, например, создание высоковольтного кабеля с полиэтиленовой («прошитой») изоляцией и с одним (как у обычного кабеля) или несколькими токопроводящими слоями. Перспективность такого решения определяется еще и тем, что работы по созданию этих кабелей и их применению в электротехнических установках ведутся во всех промышленно развитых странах: в России, США, Великобритании, Франции и Канаде [1, 2]. В 1998 г. на Порьюсской (Porjus) ГЭС в Швеции фирмой АВВ был установлен высоковольтный генератор мощностью 11 МВт и напряжением 45 кВ [1, 2].

Увеличивать номинальное напряжение генераторов обычной конструкции не удавалось выше 20 – 30 кВ из-за значительного роста необходимой толщины изоляции и невозможности уложить обмотку в обычный по конструкции паз статора. В некоторой степени эта задача пересекается с проблемами создания турбогенераторов со сверхпроводящими обмотками, работы над которыми активизировались в последнее время после определенных достижений в создании высокотемпературных сверхпроводников. Еще в 70-е годы прошлого столетия рассматривался вариант создания беззубцового слоя статора, т.е. создания конструкции, где обмотки статора укладывались бы равномерно по внутренней поверхности гладкого сердечника. Это решение позволило бы исключить пульсации магнитного поля зубцового порядка, добиться равномерного распределения токов по внутренней поверхности статора. Работы по созданию высоковольтных генераторов в настоящее время ведутся в двух условно определяемых направлениях:

1) использование в качестве проводников обмотки якоря высоковольтных кабелей (например, кабелей с изоляцией из сшитого полиэти-

лена, которые созданы на напряжение до 220 кВ) с изменением под профиль укладки формы и величины паза (рис. 3, 4);

2) переход к беспазовой конструкции статора и новым типам обмоток (рис. 5).

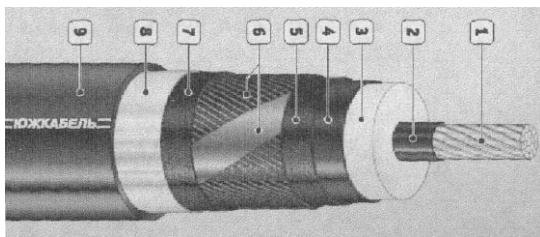


Рис. 3. Силовой кабель из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 64/110 кВ:

- 1 – многопроволочная уплотненная алюминиевая или медная токопроводящая жила;
- 2 – внутренний экструдированный полупроводящий слой;
- 3 – изоляция из сшитого полиэтилена;
- 4 – внешний экструдированный полупроводящий слой;
- 5 – слой полупроводящего полотна или водонабухающей ленты;
- 6 – медный экран;
- 7 – слой нетканого полотна или пластмассовой ленты;
- 8 – алюмополимерная лента;
- 9 – наружная оболочка из полиэтилена, из ПВХ пластиката пониженной горючести или ПВХ пластиката пониженной пожароопасности

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена обладают рядом преимуществ перед кабелями с бумажной пропитанной изоляцией:

- 1) повышенная допустимая рабочая температура, что позволяет увеличить пропускную токовую способность;
- 2) повышенная стойкость при работе в условиях перегрузок и коротких замыканий;
- 3) возможность прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней и возможность изготовления кабелей большой строительной длины;
- 4) не содержат масла, битума, свинца, что упрощает монтаж, эксплуатацию и устраняет экологически неблагоприятные факторы;
- 5) более надежны в эксплуатации и требуют меньших расходов на реконструкцию, содержание и обслуживание кабельных линий;
- 6) меньший вес и допустимый радиус изгиба;

Повышенная термическая и механическая стойкость сшитого полиэтилена обусловлена созданием новых молекулярных связей в процессе вулканизации («сшивки») изоляции. Уникальная технология химической сшивки изоляции позволяет получить изоляцию высокого качества, удовлетворяющую требованиям современных стандартов. Выпуск подобных кабелей налажен и в Украине: завод «Южкابل» выпускает кабели с изоляцией из

сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 110 кВ включительно. Конструкции кабелей бывают одно- и трехжильные, с наружными оболочками из полиэтилена, поливинилхлоридного пластиката, со стальной ленточной броней, круглопроволочной броней, с герметизацией от распространения влаги. Есть кабели, не распространяющие горение и с низким дымо- и газо-выделением. Силовой кабель на номинальное напряжение 64/110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена показан на рис. 3.

Все исследователи отмечали целесообразность использования данного вида изоляции в обмотках электрических машин. Многими зарубежными фирмами уже проводятся экспериментальные разработки по внедрению сшитого полиэтилена в качестве статорной изоляции турбогенераторов и гидрогенераторов. На рис. 4 представлено новое конструктивное решение выполнения активной зоны статорного сердечника (а – эскиз сечения генератора; б – эскиз паза статора с тремя значениями сечения изоляции укладки кабеля-обмотки: минимальное сечение – 4 нижних витка, среднее сечение – 4 средних витка, максимальное сечение – 4 верхних витка).

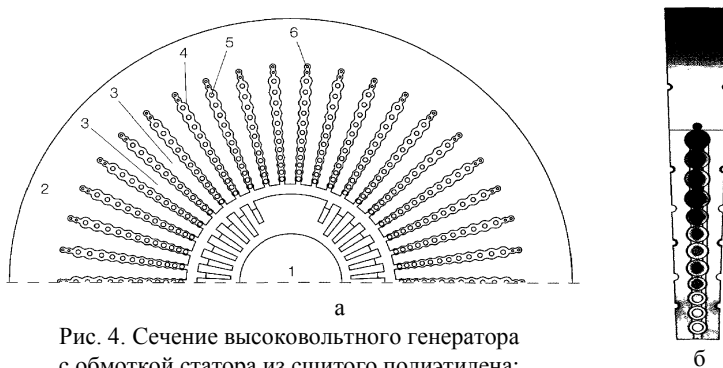


Рис. 4. Сечение высоковольтного генератора с обмоткой статора из сшитого полиэтилена:

- 1 – ротор; 2 – сердечник статора; 3 – зубцы; 4 – пазы; 5 – основная рабочая обмотка статора; 6 – дополнительная (резервная) обмотка статора

Статор шихтован, в пазах предусмотрена система дополнительной вентиляции (вентиляционные каналы). Паз сужается по направлению к расточке, к ротору, и имеет профиль, напоминающий велосипедную цепь. В пазы по высоте укладывают кабели трех видов, с изменяющейся толщиной изоляции. Связано это с тем, что чем ближе виток расположен к воздушному зазору, тем ему требуется меньшее количество изоляции: в наиболее напряженном состоянии находятся витки обмотки, расположенные у дна паза. На рис. 6 приведен снимок укладки такого кабеля в пазы статора.

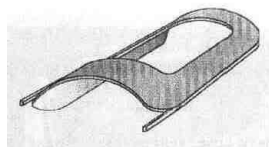


Рис. 5. Геометрия седлообразной катушки

Подобное решение имеет ряд недостатков:

- 1) увеличение глубины паза для укладки обмотки из сшитого полиэтилена приводит к увеличению габаритов машины, усложнению охлаждения;
- 2) выполнение фигурного профиля паза делает невозможным выполнение транспозиции проводника по длине машины, т.е. к усилению явления скин-эффекта. Это приведет к увеличению потерь от циркуляционных токов.
- 3) Ступенчатое изменение значения толщины изоляции, т.е. наружного диаметра, кабеля, укладываемого в пазы, на наш взгляд, приведет к неодинаково плотному прилеганию проводника к стенкам изгиба паза.

Последнее явление достаточно опасно для любой машины, но осо-



Рис. 6. Укладка высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в пазы сердечника статора

бенно – для высоковольтной: при недостаточном уплотнении обмотки в пазах статора, при плохом качестве полупроводящего покрытия или при его разрушении возможно нарушение контакта между полупроводящим покрытием пазовой части стержня обмотки и стенкой паза.

На участке поверхности стержня, не соединенном непосредственно со стенкой паза, наводиться некоторый потенциал, под действием которого в момент касания поверхностью стержня стенки паза и последующего отрыва от нее происходит электрический разряд, называемый пазовым. В работающем генераторе стержни статорной обмотки, имеющие плохое уплотнение, под действием электромагнитных сил совершают поперечные колебания в пределах паза, поэтому разряды следуют практически постоянно. Пазовые разряды оказывают разрушительное действие на изоляцию, так как в канале разряда сосредоточивается энергия разряда емкости достаточно больших участков стержня. При этом возможно выгорание изоляции по всей толщине стержня. Разряды относительно слабой интенсивности также представляют опасность для поверхности изоляции обмотки.

В этом случае повреждения представляют собой очаги, в которых под действием разрядов происходит деструкция асбестовой ленты, являющейся одним из компонентов пазового полупроводящего покрытия. В таких очагах электрическое сопротивление покрытия повышается в 10^4 раз в зависимости от длительности действия разрядов и их интенсивности. При этом отмечается и снижение механической прочности

покрытия. Вес это приводит к дальнейшему росту интенсивности пазовых разрядов и к дальнейшему, уже более ускоренному, разрушению изоляции. В статорной обмотке генератора одновременно возможно наличие большого количества очагов пазовых разрядов. Таким образом, на выводах обмотки будет иметь место последовательность затухающих колебательных импульсов, зачастую накладывающихся один на другой.

Учитывая вышеизложенное, достаточно интересным является второе направление создания высоковольтных генераторов, указанное нами выше: переход к беспазовой конструкции статора и новым типам обмоток.

Одним из таких решений для обмотки статора высоковольтного генератора может быть, так называемая, «седлообразная» обмотка, состоящая из концентрических катушек седлообразной формы (рис. 5), [1], соединенных в секции. Такая секционированная обмотка является монолитной и позволяет создать симметричную схему с минимальным числом пазов на полюс и фазу $q_1 = 1$. Эта обмотка предназначена для электрических машин с беспазовой конструкцией статора, что является одной из особенностей не только высоковольтных, но сверхпроводниковых электрических машин. С другой стороны, беспазовые статоры экономически эффективны тогда, когда они имеют повышенные уровни напряжений вплоть до высоких напряжений ЛЭП. Эти два обстоятельства позволяют говорить об особой эффективности применения такой обмотки в высоковольтных генераторах.

Основные преимущества обмотки заключаются в следующем:

- 1) упрощаются конфигурация катушек обмотки статора и технология их изготовления;
- 2) упрощается сборка и повышается надежность крепления в активной зоне и лобовых частях, не требуется дополнительного крепления обмотки в радиальном направлении;
- 3) упрощается ремонт обмотки;
- 4) охлаждение катушек может осуществляться с поверхности, по каналам в элементах крепления.

Такие обмотки уже прошли промышленные испытания в статоре генератора мощностью 5 МВА на напряжение 40 кВ, [3], которая была создана для опытного турбогенератора с беспазовой конструкцией ферромагнитного сердечника статора. Созданная модель концентрической обмотки статора генератора беспазового исполнения состоит из 6 седлообразных катушек, уложенных в 2 слоя – по 3 катушки в каждом. Фазы образуются парами противоположащих катушек разных слоев. Обмотка собрана для числа пар полюсов $p = 2$. Каждая катушка нижнего слоя состоит из 4-х галет; каждая катушка верхнего слоя – из 3-х галет. Галеты соединены между собой последовательно. Седлообразные катушки обмотки статора с помощью элементов крепления закреплены в сердечни-

ке статора и между собой. Катушки имеют высоковольтную изоляцию на основе лавсановой пленки. Система крепления обеспечивала хорошие электроизоляционные свойства, доступ охлаждающей среды к обмотке, посредством каналов охлаждения, монолитность конструкции обмотки, и в то же время простоту разборки обмотки в случае ремонта.

Это решение является достойной альтернативой исполнения статора высоковольтного генератора с зубцовым слоем и обмотками с высоковольтной изоляцией. Однако, существует, на наш взгляд, еще вариант упрощения перехода от гидрогенератора к высоковольтным передающим сетям. Вариант, который позволит снять если не все проблемы присутствия повышающего трансформатора, то значительно ограничить их.

Компания АВВ, разработавшая принципиально новую конструкцию генераторов на напряжение до 150 кВ с применением кабельной обмотки (система Powerformer), распространила ее принципы на конструкцию силовых трансформаторов. Это трансформатор, обмотка которого выполнена кабелем ВН с изоляцией из сшитого полиэтилена. Практически достижим уровень напряжения 220 кВ. Трансформатор имеет воздушное охлаждение обмоток, не имеет бака и, соответственно, масла. Разработки «сухого» трансформатора начались в 1996 году [4]. Отсутствие масла, снижение доли горючих материалов вдвое и больше по сравнению с обычным трансформатором устраняют риск пожара, взрыва, загрязнения воды и почвы при повреждении трансформатора. Это позволяет применять такие трансформаторы в зонах с большой плотностью населения, в подземных установках (например, для гидрогенераторов), в экологически охраняемых регионах. Повышается безопасность эксплуатации для персонала. Минимальный риск пожара объясняется не только отсутствием масла, но и тем, что масса сгораемых материалов в трансформаторе меньше, чем в трансформаторах обычных исполнений:

- 1) для трансформатора мощностью 10 МВА/69 кВ масса сгораемых материалов не более 3400 кг вместо 6150 кг;
- 2) для трансформатора 40 МВА/69 кВ — 4300 вместо 9800 кг;
- 3) для 40 МВА/145 кВ — 8800 вместо 11000 кг.

Был проведен эксперимент по возгоранию кабеля, используемого для высоковольтных обмоток трансформатора: через два кабеля диаметром 30 мм, рассчитанным на напряжение 45 кВ, пропускали ток 40 кА через поврежденную изоляцию в течение 100 мсек. В результате медный проводник испарился, но огонь по кабелю не распространился. Часть изоляции сгорела с выделением в основном CO_2 и небольшого количества CO и углеводородов [5].

Интересным конструктивным решением является применение для обмотки цилиндрического проводника вместо прямоугольного, что резко снижает неравномерности распределения электрического поля в изо-

ляции. Кроме того, в изготовлении такая обмотка существенно проще обычной. Для такого трансформатора не нужны вводы ВН, просто кабель протягивается к распределительному устройству на любую длину. В итоге, принципиально такой трансформатор снижает общие потери в сети, благодаря тому, что его можно установить как угодно близко к месту нагрузки.

Внедрение такого трансформатора в действующие установки наиболее вероятно и его можно ожидать в ближайшее время:

- конструкция кабелей для высоковольтного трансформатора не требует дополнительных доработок по сравнению с исполнением кабелей для прокладки систем электроснабжения, не требует специальных контрольных приспособлений или измерительных систем;

- на действующих электростанциях возможна замена существующих масляных повышающих трансформаторов на новые практически без капитальных затрат, без выполнения строительных и монтажных работ;

- на гидроэлектростанциях возможно размещение таких трансформаторов в непосредственной близости от генераторов, т.е. в теле плотины, т.к. снята проблема пожаро- и взрывоопасности. Это позволит снять проблему потерь активной мощности при передаче ее на большие расстояния от генератора до отдельно стоящего трансформатора.

Еще более интересные перспективы открываются в направлении совершенствования «цепочки»: генератор – трансформатор – сеть, вследствие начала работ по созданию сверхпроводящих трансформаторов [6].

К преимуществам сверхпроводящих силовых трансформаторов над обычными маслонаполненными трансформаторами или даже высоковольтными трансформаторами относятся уменьшение их размера и массы, уменьшение омических потерь, исключение из их комплектации трансформаторного масла, отсутствие проблемы пожаро- и взрывоопасности. Хотя, как и у всех предыдущих решений, и здесь имеется ряд проблем, которые необходимо учитывать: обеспечение достаточного для перехода в сверхпроводящее состояние охлаждения обмоток; выполнение обмоток из специальных материалов (высокотемпературных сверхпроводников), производство которых на сегодняшний день не стабилизировалось, и сами проводники пока что дорогие.

Выводы. 1. Во всех странах ведутся работы по созданию высоковольтных генераторов с целью исключения повышающего трансформатора из цепочки генератор – трансформатор – сеть. Основными направлениями является разработка новой конструкции паза (углубление и выполнение в виде «велосипедной цепи») для укладки туда обмотки по типу высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Также перспективны работы по принципиальному изменению классиче-

ской конструкции активной зоны генератора: по созданию беззубцового статора с укладкой по внутренней поверхности статора новой конструкции обмотки (седлообразной).

2. Каждое из рассматриваемых решений находится в начальной стадии, имеет много нерешенных проблем, недостатков, требует длительных технологических и промышленных испытаний.

3. Поэтому в качестве альтернативы следует рассмотреть решения, сохраняющие в схеме повышающий трансформатор, но исключают ряд недостатков, присущих обычным трансформаторам с масляным охлаждением: пожаро- и взрывоопасности, загрязнение окружающей среды, требования по территориальному удалению от генераторов и т.д. К таким решениям следует отнести замену масляных трансформаторов обычного ряда напряжений на сухие трансформаторы с высоковольтными обмотками из шитого полиэтилена или со сверхпроводящими обмотками.

4. Наиболее простым и кратким по времени введения в производство следует считать применение решения, указанного в п.3. Решение по использованию того или иного решения необходимо применять индивидуально, в каждом отдельном случае учитывая наличие оборудования, тип решаемой при замене задачи, экономическую целесообразность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов Р.В. Алгоритм выбора оптимальных параметров сверхпроводящей обмотки возбуждения // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1979. – № 6. – С. 15 – 19.
2. Чубраева Л.И. Генераторы нетрадиционного исполнения (исследования и методы расчета). – Л.: Наука, 1991. – 326 с.
3. Андреев Е.Н., Волюнкин И.В., Кунаев В.Л. Разработка высоковольтного генератора // *Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования*. – С.-Пб.: – ОЭЭП РАН. – 2003. – Вып. 5. – С.17 -23.
4. Алексеев Б.А. Трансформаторы типа Dryformer с кабельной обмоткой – новая разработка компании АВВ. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: www.transform.ru (13.09.2004).
5. Силовой трансформатор. Патент № 2193253. Описание. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: info@rper.ru.
6. Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Шахтарин В.Н. Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. – Л.: Наука, 1981. – 432 с.

Поступила 24.06.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор С.Ф. Артюх,
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.