**Тема: Электрические станции и подстанции**

**Лекция№6 СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ.**

Оглавление

[6.1 Устройство системы возбуждения и предъявляемые к ней требования. 1](#_Toc427338685)

[6.2 Классификация систем возбуждения. 4](#_Toc427338686)

[6.3 Системы охлаждения генераторов 6](#_Toc427338687)

[6.4 Включение синхронных генераторов на параллельную работу 6](#_Toc427338688)

# 6.1 Устройство системы возбуждения и предъявляемые к ней требования

Для питания обмотки возбуждения синхронного генератора необходим источник постоянного тока — возбудитель. Наиболее часто в качестве возбудителя используется электромашинный генератор постоянного тока, якорь которого механически сопряжён с валом синхронной машины.

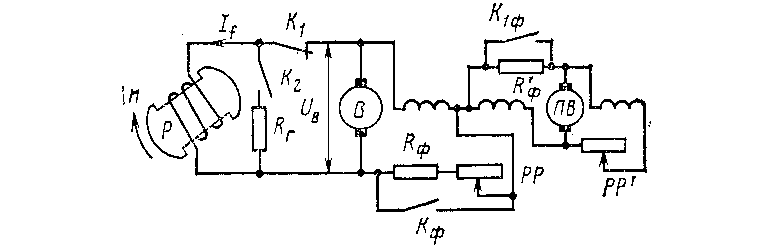


Рис. 6.1. Схема электромашинной системы возбуждения синхронного генератора

Р — ротор машины; В — возбудитель (генератор постоянного тока с параллельно-независимым возбуждением); ПВ — подвозбудитель, генератор постоянного тока с независимым возбуждением; РР и РР' — регулировочные резисторы; Кф и К1ф — контакторы для форсировки возбуждения; Rф и R’ф — резисторы, закорачиваемые при форсировке; K1 и К2 — контакты автомата гашения поля (АГП); Rг — гасительный резистор.

Схемы возбуждения с генератором постоянного тока показаны на рис. 6.1, 6.2, а. Кроме самого возбудителя, система включает подвозбудитель, питающий независимую обмотку возбуждения главного возбудителя, регулировочные реостаты, контакторы, аппаратуру дистанционного управления, автоматические регуляторы напряжения и другие устройства.

1) *Регулирование тока возбуждения*. Ток возбуждения *If* в крупных синхронных машинах составляет несколько сотен и даже тысяч ампер. Поэтому экономически нецелесообразно регулировать его с помощью реостата, включённого в контур обмотки возбуждения — якоря возбудителя. Потери в реостате заметно понижали бы КПД синхронной машины.

Управление током возбуждения осуществляется исключительно за счет изменения напряжения возбудителя *Uf*, пропорционально которому изменяется ток

*If=Uf /Rf*.

В зависимости от режима, в котором работает синхронный генератор, должны устойчиво поддерживаться различные токи возбуждения и соответственно различные напряжения возбудителя *Uf.* В электромашинной схеме по рис. 6.1 для регулирования напряжения возбудителя *В* служат реостаты *РР* и *РР'* соответственно в цепи параллельной обмотки возбудителя и подвозбудителя. За счет введения в схему подвозбудителя *ПВ* пределы регулирования

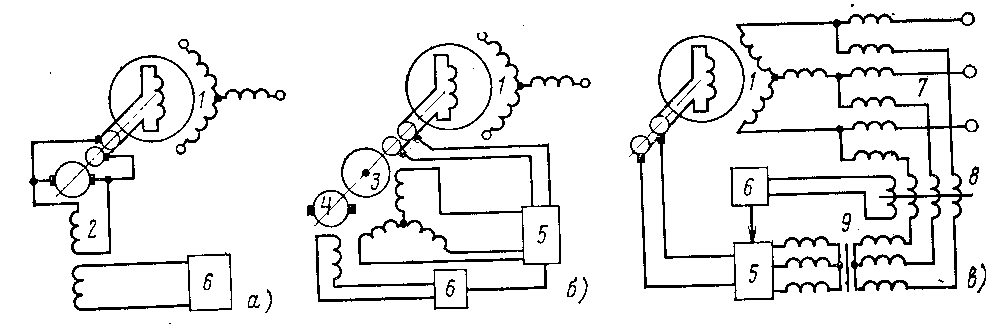


Рис. 6.2. Системы возбуждения синхронных генераторов.

*а* — прямая злектромашинная; б — прямая с использованием выпрямителей; *в* — система самовозбуждения; / — синхронный генератор; *2* — возбудитель постоянного тока; *3* — возбудитель переменного тока; *4 —* подвозбудитель возбудителя переменного тока; *5* — выпрямитель ионный или полупроводниковый; *6* — регулятор возбуждения; 7 — транс­форматор; *8* — управляемый от регулятора возбуждения реактор; *9* — трансформатор.

напряжения возбудителя существенно расширяются. В менее мощных синхронных машинах (а также при расширении пределов регулирования напряжения возбудителя путем введения нелинейных сопротивлений в цепь его параллельной обмотки) подвозбудитель может отсутствовать.

2) *Гашение поля возбуждения*. В схеме возбуждения предусматривается специальное устройство, с помощью которого можно в аварийной ситуации с достаточной быстротой уменьшить ток возбуждения до нуля («погасить» магнитное поле). «Гашение поля» осуществляется как при нормальной эксплуатации, так и в аварийной ситуации (например, при внутренних коротких замыканиях в обмотке статора) с помощью автомата гашения поля (АГП), объединяющего контакторы *K1* и *К2*, и гасительного сопротивления Rг. Прямой разрыв цепи возбуждения контактором К1 наиболее быстро привёл бы к желаемой цели (кривая 1 на рис. 6-3). Однако в сопротивлении электрической дуги, возникающей между размыкаемыми контактами К1, выделяется за время гашения вся энергия, запасённая в магнитном поле возбуждения. В крупных машинах эта энергия настолько велика, что при прямом разрыве контакты были бы разрушены. Кроме того, при столь быстром уменьшении тока возбуждения (за счет введения в цепь весьма большого сопротивления дуги) в обмотке появляется значительная ЭДС самоиндукции

,

которая во много раз превосходит номинальное напряжение на обмотке возбуждения и может повредить ее изоляцию.

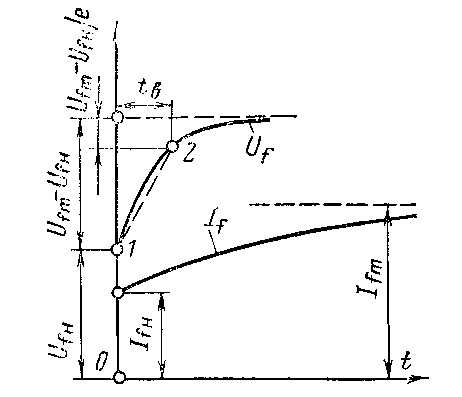
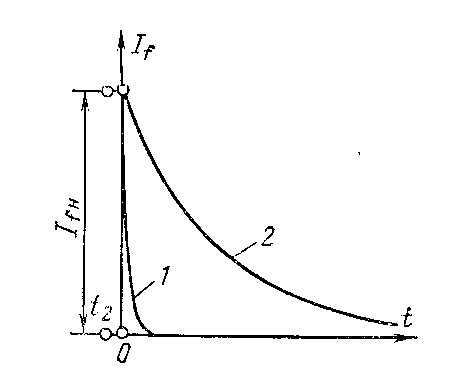


Рис. 6.3. Затухание тока Рис. 6.4. Нарастание напряжения

возбуждения при гаше- возбудителя и тока возбуждения

шении поля при форсировке возбуждения.

1 – при прямом выключении

К1; 2 – при гашении поля

с помощью АГП.

Для исключения этих явлений «гашение поля» проводится с помощью АГП в следующем порядке. При включенном контакторе *К1* включается контактор *К2* (*t = t2*), замыкающий обмотку возбуждения на гасительное сопротивление *Rг≈5Rf*. Затем (*t = 0*) размыкается контактор *K1* и возбудитель отделяется от обмотки возбуждения. Поскольку энергия магнитного поля возбуждения в самой синхронной машине при этом не изменяется, размыкание *К1* происходит без нежелательных осложнений. После этого ток возбуждения затухает с постоянной времени

,

где *Tf = Lf /Rf* — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых других обмотках, в соответствии с уравнением



по кривой 2 на рис. 6-3.

Гасительное сопротивление подбирается таким образом, чтобы гашение поля происходило достаточно быстро, но без появления недопустимых по условиям электрической прочности изоляции напряжений

.

При обычно рекомендуемом гасительном сопротивлении *RГ=5Rf* постоянная времени гашения поля *Tf=1/6(Tf)≈1* с; напряжение на гасительном сопротивлении *uг* не превосходит пятикратного номинального напряжения возбуждения.

3) *Форсировка возбуждения*. Для удержания синхронного генератора в синхронизме при снижении напряжения сети, которое может произойти при удалённых коротких замыканиях, прибегают к форсированию ее тока возбуждения. Форсирование производится автоматически релейной защитой машины, от которой поступает импульс на включение контакторов *Кф* и *К1ф* (рис. 6.1). При этом замыкаются накоротко форсировочные резисторы *Rф*и *R’ф* и регулировочный резистор *РР*, и напряжение на якоре возбудителя с большой скоростью возрастает до предельного значения *Ufm* (рис. 6.4). С запозданием, определяемым постоянной времени обмотки возбуждения синхронной машины, ток возбуждения достигает предельного значения:

.

Согласно стандарту ГОСТ эффективность форсировки возбуждения характеризуется кратностью предельного установившегося напряжения возбудителя, под которой понимается отношение наибольшего установившегося напряжения возбудителя *Ufm* к номинальному напряжению возбуждения *Ufн=RfIfн* , атакже номинальной скоростью нарастания напряжения возбудителя (на участке от точки 1 до точки 2 на рис. 6.4), определяемой по формуле

.

Крупные генераторы и компенсаторы должны иметь кратность предельного установившегося напряжения возбудителя 1,8—2,0 и номинальную скорость нарастания напряжения возбудителя 1,5—2,0 номинального напряжения на контактных кольцах в секунду. Для прочих синхронных машин кратность — не менее 1,4; скорость — не менее 0,8 номинального напряжения в секунду.

# 6.2 Классификация систем возбуждения

До 50-х годов для возбуждения синхронных машин применялись почти исключительно электромашинные системы возбуждения. В этих системах в качестве возбудителя используется коллекторный генератор постоянного тока.

В прямых электромашинных системах возбуждения якорь возбудителя сопряжён непосредственно с валом синхронного генератора (см. рис. 6.2*, а* и *б*).

В косвенных электромашинных системах возбуждения ротор возбудителя приводится во вращение синхронным или асинхронным двигателем, получающим питание или от шин собственных нужд станции, или от вспомогательного синхронного генератора на валу главного генератора, или от вспомогательного синхронного генератора, установленного на станции специально для этой цели. Эти системы возбуждения отличаются от приведённых на рис. 6.2, *а* и *б* только тем, что ротор возбудителя сопряжён не с валом генератора, а с отдельным двигателем.

В соответствии с ГОСТ гидрогенераторы и турбогенераторы должны иметь прямые системы возбуждения, обладающие наибольшей надёжностью (применение косвенной системы возбуждения требует особого согласования). Предельная мощность электромашинных возбудителей по условиям коммутации зависит от их частоты вращения, совпадающей, как правило, с частотой вращения возбуждаемого синхронного генератора (при 3000 об/мин не более 600 кВт). Поэтому электромашинные системы возбуждения не могут быть применены в двухполюсных турбогенераторах, мощность которых превосходит 100—150 МВт.

Начиная с 50-х годов по мере освоения производства и повышения надёжности полупроводниковых выпрямителей, получают все большее применение вентильные системы возбуждения с кремниевыми диодами и тиристорами. В 60— 70-е годы вентильные системы возбуждения почти полностью вытеснили электромашинные системы возбуждения. Они повсеместно применяются не только для синхронных двигателей и генераторов небольшой мощности, но и для крупных турбогенераторов, гидро­генераторов и синхронных компенсаторов, в том числе и для установок предельных мощностей.

Различают три основные разновидности вентильных систем воз­буждения: системы самовозбуждения, независимые системы возбуждения и бесщёточные системы возбуждения.

В системе самовозбуждения (см. рис. 6.2, *в*) необходимая для возбуждения синхронной машины энергия отбирается от ее обмотки якоря, причём выпрямление переменного тока, получаемого от якоря, осуществляется с помощью управляемых полупроводниковых выпрямителей (тиристоров). Отбор энергии осуществляется с помощью трансформатора 7, включаемого параллельно с обмоткой якоря, и трансформатора 9, включённого последовательно с обмоткой якоря. Трансформатор 9 позволяет обеспечить форсирование возбуждения при близких коротких замыканиях, когда напряжение на обмотке якоря существенно снижается.

В независимой системе возбуждения (см. рис. 6.2, *б*) энергия, необходимая для питания обмотки возбуждения, получается от возбудителя трехфазного переменного тока 3, ротор которого укреплён на валу главного генератора. В схемах выпрямителей в этом случае используются полупроводниковые вентили (кремниевые диоды или тиристоры), собранные по трехфазной мостовой схеме. При регулировании возбуждения генератора используются одновременно возможности управления выпрямителями и изменение напряжения возбудителя.

Одной из разновидностей системы независимого возбуждения является бесщёточная система возбуждения с установленными на валу машины полупроводниковыми выпрямителями, в которой отсутствуют скользящие контакты. Эта система отличается от системы по рис. 6.2, *б* тем, что обмотка переменного тока возбудителя 3 располагается на его роторе, а выпрямитель 5, получающий питание от этой обмотки, укреплён на валу. Обмотка возбуждения возбудителя, расположенная на его статоре, получает питание от подвозбудителя 4 или регулятора возбуждения 6.

# 6.3 Системы охлаждения генераторов

При работе генератора в его обмотках и магнитопроводах происходят потери энергии, которые выделяются в генераторе в виде тепла. Это приводит к повышению температуры элементов конструкции генератора. Повышение температуры особенно опасно для изоляции, т.к. вызывает быстрое ее старение. Для ограничения температуры генератора до уровня, когда старение изоляции будет проходить медленно и срок эксплуатации генератора будет равен расчётному, применяют системы искусственного охлаждения.

Охлаждение, в зависимости от конкретной конструкции, может производиться воздухом, водородом, водой, маслом. Отвод тепла может производиться *непосредственно* от проводников обмотки по каналам, расположенным внутри пазов, или *косвенно* от поверхности ротора и статора.

# 6.4 Включение синхронных генераторов на параллельную работу

Включение синхронных машин в сеть на параллельную работу производят - способом точной синхронизации и способом грубой синхронизации, который для генераторов обычно называют способом самосинхронизации. Иногда для синхронных машин применяют также частотный пуск, а для генераторов и несинхронное включение

*Способ точной синхронизации*. Этот способ используют при включении в сеть синхронных генераторов. Он состоит в том, что генератор сначала разворачивают турбиной до частоты вращения, близкой к синхронной, а затем возбуждают и при определенных условиях включают в сеть. Условиями, необходимыми для включения машины, являются:

1) равенство напряжений включаемого генератора и работающего генератора или сети;

2) совпадение фаз этих напряжений;

3) равенство частот включаемого генератора и работающего генератора или сети.

Первое условие обеспечивается путем регулирования тока возбуждения машины, а для выполнения второго и третьего условий необходимо изменение вращающего момента на ее валу, что достигается изме­нением количества пара или воды, пропускаемых через турбину.

Выполнение условий точной синхронизации может быть осуществлено вручную или автоматически. При ручной синхронизации все операции по регулированию возбуждения и подгонке частоты выполняет дежурный персонал, а при автоматической синхронизации — автоматические устройства. Применяется также ручная синхронизация с автоматическим контролем синхронизма, который запрещает включение выключателя синхронизируемой машины при несоблюдении условий синхронизации. При точной ручной синхронизации напряжения и частоты контролируют по установленным на щите управления двум вольтметрам и двум частотомерам, а сдвиг по фазе напряжений — по синхроноскопу; последний позволяет не только уловить момент совпадения фаз напряжений, но также определить, вращается ли включаемый генератор быстрее или медленнее, чем работающие. Указанные приборы объединяют в так называемую «колонку синхронизации». Вольтметр и частотомер, относящиеся к синхронизируемому генератору, подключают к его трансформатору напряжения, а вольтметр и частотомер, относящиеся к работающим генераторам (или сети), обычно подключают к трансформатору напряжения сборных шин станции. Синхроноскоп подключают одновременно к обоим трансформаторам напряжения.

При соблюдении всех вышеуказанных условий разность напряжений генератора и сети равна нулю, поэтому уравнительного тока между включенным и другими генераторами не возникает. Точной ручной синхронизации свойственны следующие недостатки:

1) сложность процесса включения из-за необходимости подгонки напряжения по модулю и фазе, а также частоты гене­ратора;

2) большая длительность включения — от нескольких минут в нормальном режиме до нескольких десятков минут при авариях в системе, сопровождающихся изменением частоты и напряжения, когда особенно важно обеспечить быстрое включение генератора в сеть;

3) возможность механических повреждений генератора и первичного двигателя при включении агрегата с большим углом опережения.

*Способ самосинхронизации*. Он исключает необходимость точной подгонки частоты и фазы напряжения включаемой синхронной машины. Последнюю разворачивают до частоты вращения, незначительно отличающейся от синхронной (с точностью до нескольких процентов), и невозбуждённой включают в сеть. При этом обмотку возбуждения замыкают на разрядный резистор, используемый при гашении поля, либо на специально предусмотренный для этой цели резистор, либо на якорь возбудителя, чтобы избежать появления в обмотке возбуждения напряжений, опасных для ее изоляции. После включения генератора в сеть подаётся импульс на включение АГП и машина возбуждается.

В момент включения невозбуждённой синхронной машины в сеть имеет место бросок тока статора и снижение напряжения в сети. Однако ток и соответствующая электродинамическая сила (она пропорциональна квадрату тока) меньше, чем при КЗ на выводах генератора. Это объясняется тем, что ток статора в момент включения определяется только напряжением сети Uc (так как генератор не возбуждён и его ЭДС равна нулю), которое меньше ЭДС нормального режима, и суммарными сопротивлениями Х"dΣ и XqΣ “, кторые больше соответствующих сопротивлений генератора X"d и X"q за счет сопротивлений сети. Кроме того, при самосинхронизации затухание свободных периодических составляющих тока происходит быстрее, чем при КЗ, так как в первом случае ротор замкнут на разрядный резистор. Поэтому даже ошибочное включение машины в сеть с большим скольжением, когда продолжительность действия повышенных токов достаточно велика, не представляет опасности.

Испытания показали, что обмотка статора в механическом отношении не реагирует на первый пик тока включения; деформация достигает наибольшего значения только спустя несколько периодов после включения. Учитывая также быстрое затухание свободной сверхпереходной составляющей тока статора, можно при оценке допустимости самосинхронизации начальное значение периодической составляющей тока Iп0 и напряжение U на выводах генератора определять по переходному сопротивлению:



и

.

Электродинамические силы, воздействующие при самосинхронизации на обмотку статора неявнополюсных машин, больше, чем явнополюсных, так как неявнополюсные машины имеют относительно большие полюсные деле ния, большие вылеты лобовых соединений обмотки статора и меньшие индуктивные сопротивления (определяющие начальное значение тока включения), чем явнополюсные машины.

Магнитный поток, создаваемый током статора, наводит в роторе ток, вследствие чего в машине возникает соответствующий магнитный поток ротора. Взаимодействие указанных магнитных потоков приводит к создан электромагнитного вращающего момента. Наибольшую опасность для машины представляет знакопеременный вращащий момент, возникающий в первые периоды времени после включения возбужденной машины в сеть. Наибольшее значение этого момента равно:

,

т. е. оно тем меньше, чем больше противление сети Хс и чем меньше разница между Х”dΣ и Х”qΣ. Поэтому турбогенераторы с массивным ротором и явнополюсные машины с демпферными обмотками по обеим осям на роторе подвергаются меньшему воздействию знакопеременных моментов вращения, чем явнополюсные машины без демпферных обмоток. В общем случае Хс≠0, поэтому в момент включения невозбуждённой синхронной машины в сеть она подвергается меньшему воздействию вращающих моментов, чем при трёхфазном КЗ, в то время как в случае ошибочного включения возбужденной машины в сеть вращающие моменты могут в несколько раз превышать моменты при трёхфазном КЗ.

Моменты, возникающие в машине при самосинхронизации, с одной стороны воспринимаются конструктивными элементами, которые крепят активную сталь к корпусу и корпус статора к фундаменту, а с другой — передаются на вал первичного двигателя. Момент, воспринимаемый первичным двигателем, приближенно равен отношению его момента инерции к моменту инерции всего агрегата. Это отношение у гидрогенераторов меньше, чем у турбогенераторов, и составляет 0,05 — 0,1.

В установившемся асинхронном режиме при постоянном скольжении машины момент состоит из знакопеременных составляющих, изменяющихся с двойной частотой скольжения, и постоянных составляющих. Знакопеременные составляющие момента оказывают влияние на вхождение машины в синхронизм только при малых скольжениях (s≤1,0 %), а при больших скольжениях работа, обусловленная этими составляющими, практически равна нулю. При синхронной частоте вращения (s=0) эти составляющие превращаются в реактивную составляющую вращающего момента, обусловленную явнополюсностью машины (*XdΣ≠XqΣ*):

,

где δ0 — фаза включения.

Постоянная составляющая момента определяет средний асинхронный вращающий момент

,

который оказывает основное влияние на процесс вхождения генератора в синхронизм; при синхронной частоте вращения этот момент становится равным нулю. Чем больше средний асинхронный вращающий момент, тем легче машина, включаемая в сеть с некоторым скольжением, приближается к синхронной частоте вращения. Далее за счет реактивного момента и синхронного момента, обусловленного возбуждением,

,

где δ — угол между векторами *Eq* и *Uс*, машина втягивается в синхронизм.

Наибольший асинхронный момент воздействует на турбогенераторы, имеющие массивный ротор, а наименьший — на гидрогенераторы без демпферных обмоток. Турбогенераторы даже при включении с большими скольжениями (15 — 20%) входят в синхронизм за 2 — 3 с.

Преимуществами метода самосинхронизации являются:

значительное упрощение операции включения, которое позволяет применить несложную систему автоматизации процесса;

быстрое включение машины в сеть, что особенно важно при аварии в системе;

возможность включения машин во время глубоких снижений напряжения и частоты сети, имеющих место при авариях в системе; отсутствие опасности повреждения машины.

Понижение напряжения, возникающее при включении невозбуждённой машины в сеть, может быть значительным, если мощность включаемой машины соизмерима с мощностью системы или превосходит ее. Тем не менее, этот факт не может служить препятствием для включения машин методом само синхронизации, так как напряжение быстро восстанавливается (примерно через 1—2 с).

В настоящее время для машин мощностью до 3000 кВт включительно самосинхронизация является основным способом включения на параллельную работу. Возможность использования этого способа для включения машин мощ­ностью более 3000 кВт ограничена допускаемым значением электродинамических сил в обмотке статора.

Включение машин с косвенным охлаждением методом самосинхронизации рекомендуется в тех случаях, когда переходная составляющая тока статора в момент включения не превосходит 3,5-кратного значения номинального тока статора. Этому условию удовлетворяют практически все гидрогенераторы и турбогенераторы с косвенным охлаждением, работающие по схеме блока с повышающими трансформаторами.

Включение методом самосинхронизации генераторов с непосредственным охлаждением обмоток допускается только в аварийных условиях. При работе нескольких генераторов на шины генераторного напряжения способ самосинхронизации не всегда применим; он допускается только в тех случаях, когда выполняется требование*: Iп0 ≤ 3,5Iном*.

В аварийных случаях методом самосинхронизации допускается включать все машины независимо от кратности тока включения и способа их охлаждения.