

ГЛАВА 3

Синхронизация генераторов

3.1. Способы синхронизации генераторов

Синхронизацией называется процесс включения синхронного генератора на параллельную работу с другими генераторами или энергосистемой.

Перед включением генератора на параллельную работу (синхронизацией), требуется выполнить ряд операций, которые могут быть проведены как вручную, так и специальными автоматическими устройствами. В соответствии с этим различают два вида синхронизации – ручную и автоматическую. Возможен и промежуточный вариант – так называемой полуавтоматической синхронизации, когда часть операций выполняется персоналом станции вручную, а другая – автоматически. Далее рассматривается только автоматическая синхронизация.

Существуют два способа синхронизации – точная и самосинхронизация. Термин точная синхронизация полнее отражает сущность метода, подчеркивая факт точной подгонки частоты, величины и фазы напряжения синхронизируемого генератора.

Термин самосинхронизация не раскрывает полностью сущности этого метода. Необходимые операции для синхронизации генератора и в этом случае выполняются либо персоналом вручную, либо автоматикой, но при этом не требуется столь точная подгонка указанных величин синхронизируемого генератора.

3.2. Самосинхронизация генераторов

Процесс самосинхронизации генератора производится следующим образом. Ротор генератора разворачивается турбиной до частоты вращения близкой к синхронной и без возбуждения включается в сеть, после чего в ротор подается возбуждение. Возникающие в генераторе электрические моменты обеспечивают подтягивание ротора к синхронной частоте вращения и

его втягивание в синхронизм. При последующем увеличении открытия регулирующего органа турбины генератор начинает принимать активную нагрузку и работать параллельно с другими генераторами.

При самосинхронизации нет необходимости соблюдать условия точной синхронизации. Действительно, поскольку подключение синхронизируемого генератора в сеть происходит без возбуждения, то его напряжение равно нулю и действия по подгонке этого напряжения, как по величине, так и по фазе теряют смысл. Частота вращения генератора также не обязательно должна быть точно синхронной. Процесс самосинхронизации может быть произведен весьма быстро, поскольку не требуется точная подгонка рассмотренных параметров. В этом заключается одно из основных преимуществ этого способа, особенно в аварийных режимах, когда частота сети может отличаться от 50 Гц и меняться во времени. Отсутствие устройств точной подгонки напряжения и частоты вращения генератора приводит к тому, что схема и аппаратура самосинхронизации получается простой и надежной.

При самосинхронизации возникает большой уравнительный ток в момент включения генератора в сеть. Максимальное амплитудное значение этого тока определяется формулой:

$$i_{y0} = \frac{k_{y0} \sqrt{2} E''_{dc}}{x''_{dc} + x_c + x''_{dc}}, \quad (3.1)$$

где E''_{dc} – продольная э.д.с. эквивалентного генератора энергосистемы за сверхпереходным индуктивным сопротивлением x''_{dc} ;

x_c – эквивалентное индуктивное сопротивление сети, через которое генератор связан с энергосистемой;

x''_{dc} и x''_{dc} – сверхпереходные индуктивные сопротивления подключаемого и эквивалентного генераторов по продольной оси;

k_{y0} – коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей тока, обычно $k_{y0} = 1,8 - 1,95$.

Наиболее тяжелые условия синхронизации возникают при включении генератора на сборные шины бесконечной мощности, когда сопротивление сети и генератора равны нулю ($x_c = 0$, $x''_{dc} = 0$). В этом случае максимальное значение

ние уравнивающего тока равно ударному току короткого замыкания на выводах генератора

$$i_{y0} = \frac{k_{y0} \sqrt{2} E''_{dc}}{x''_{d2}}. \quad (3.2)$$

Как правило, сопротивление энергосистемы не равно нулю $x_c \neq 0$, и уравнивающий ток меньше тока короткого замыкания на выводах генератора. Поскольку уравнивающий ток является реактивным, то при самосинхронизации больших толчков активной мощности и опасных механических усилий на валу генератора не возникает.

Наличие больших уравнивающих токов является существенным недостатком способа самосинхронизации. Короткое замыкание на выводах генератора является аварийным режимом и происходит сравнительно редко. Синхронизация генераторов производится значительно чаще и, следовательно, в каждом случае генератор преднамеренно подвергается действию больших уравнивающих токов.

Включение генератора методом самосинхронизации сопровождается снижением напряжения на сборных шинах станции. Напряжение на генераторе может быть определено по формуле

$$U_2 = U_c - I_2 \cdot x_c. \quad (3.3)$$

Уравнивающий ток, протекающий через генератор

$$I_2 = \frac{U_c}{x_2 + x_c}. \quad (3.4)$$

Совместное решение уравнений (3.3) и (3.4) дает

$$U_2 = U_c \left(1 - \frac{x_c}{x_2 + x_c} \right), \quad (3.5)$$

откуда снижение напряжения на выводах генератора определяется как

$$\Delta U = U_c \frac{x_c}{x_2 + x_c}. \quad (3.6)$$

Таким образом, величина снижения напряжения зависит от соотношения сопротивлений энергосистемы x_c и генератора x_d , что в свою очередь определяется соотношением мощностей энергосистемы и генератора. При соизмеримых значениях этих сопротивлений снижение напряжения может достигать 50 % от номинального значения, однако, обычно $x_c < x_d$, поэтому снижение напряжения составляет меньшую величину.

По мере втягивания генератора в синхронизм напряжение на сборных шинах восстанавливается. Это определяется, во-первых, тем, что сопротивление генератора увеличивается (так, для гидрогенератора $x_d \cong 3x'_d$) и, во-вторых, действием регулятора напряжения и устройства форсировки возбуждения. Втягивание генератора в синхронизм происходит сравнительно быстро – за время 1 – 2 с, так что снижение напряжения получается кратковременным и, как правило, не оказывает существенного влияния на режим работы энергосистемы и большинства потребителей. Поэтому практически нет ограничений величины мощности генераторов, включаемых в сеть методом самосинхронизации.

Возможность применения самосинхронизации оценивается по следующему критерию. Если действующее значение периодической составляющей толчка уравнительного тока, определяемого формулой $I'_{yp} = \frac{U_c}{x'_d + x_c}$, не превосходит 3,5 кратного значения номинального тока генератора, то генератор можно включать по способу самосинхронизации.

Для гидрогенераторов переходное сопротивление составляет величину $x'_d = 0,3$. Отсюда следует, что у гидрогенераторов толчок уравнительного тока не превосходит 3,5 кратного значения, даже если сопротивление энергосистемы равно нулю, $x_c = 0$. Таким образом, включение гидрогенераторов по способу самосинхронизации допустимо независимо от схемы электрических соединений станции.

3.3. Моменты, действующие на ротор генератора при самосинхронизации

Рассмотрим моменты, действующие на ротор генератора в процессе самосинхронизации.

На холостом ходу избыточный момент турбины идет на ускорение агрегата.

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_c = \Delta M_{изб}, \quad (3.7)$$

где ω – частота вращения,

T_j – инерционная постоянная времени агрегата,

M_m – момент турбины,

M_c – момент сопротивления,

$\Delta M_{изб}$ – избыточный момент турбины.

После включения генератора в сеть возникают электромагнитные моменты – асинхронный, реактивный и синхронный [14]

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + M_{ac} + M_p + M_{синх} = \Delta M_{изб}. \quad (3.8)$$

Если избыточный момент турбины равен нулю, т.е. развиваемый турбиной момент целиком расходуется на преодоление момента сопротивления, то дальнейшее изменение частоты вращения возможно только за счет электромагнитных моментов. Рассмотрим эти моменты подробнее.

Асинхронный момент M_{ac} . Этот момент является одним из определяющих моментов, обеспечивающих вхождение генератора в синхронизм. Именно за счет асинхронного момента происходит подтягивание ротора генератора к синхронной частоте вращения. Чем больше асинхронный момент, тем легче генератор подтянется к синхронной частоте вращения и за счет синхронного момента втянется в синхронизм.

Асинхронный момент генератора создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного потока статора и токов, наведенных им в обмотке возбуждения и успокоительной обмотке ротора.

Точное аналитическое выражение асинхронного момента очень сложно. В тоже время решающее значение для подведения ротора к синхронной частоте вращения имеют постоянные составляющие момента, образующие так называемый средний асинхронный момент. Поэтому ниже приводятся формулы только для среднего асинхронного момента генератора.

Поскольку асинхронный момент определяется параметрами генератора, то у турбогенератора и гидрогенератора асинхронные моменты различны.

Величина момента зависит также от наличия у генератора успокоительной обмотки. Для гидрогенератора без успокоительной обмотки величина среднего асинхронного момента для практических расчетов может быть выражена так:

$$M_{ac.cp} = \frac{U_c^2}{2} \left(\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} \right). \quad (3.9)$$

Для турбогенератора выражение среднего асинхронного момента может быть представлено в виде

$$M_{ac.cp} = \frac{U_c^2}{2} \left(\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} + \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q} \frac{sT''_q}{1 + (sT''_q)^2} \right), \quad (3.10)$$

где x_d, x'_d – синхронное и переходное индуктивные сопротивления генератора по продольной оси;

x_q, x''_q – синхронное и сверхпереходное индуктивные сопротивления генератора по поперечной оси;

T'_d – постоянная времени переходной составляющей тока по продольной оси при закороченной обмотке статора;

T''_q – постоянная времени для сверхпереходной составляющей тока по поперечной оси при закороченной обмотке статора;

s – скольжение.

Более наглядное представление о величине и характере среднего асинхронного момента дает графическая зависимость этого момента в функции скольжения генератора. На рис. 3.1 показаны кривые среднего асинхронного момента для различных типов синхронных генераторов.

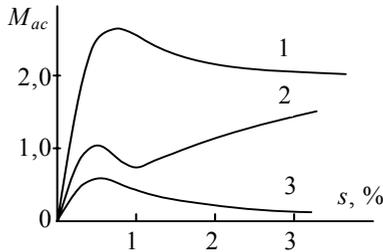


Рис.3.1. Графики средних асинхронных моментов для турбогенератора (1), гидрогенератора с демпферной обмоткой (2) и без демпферной обмотки (3)

Лучшей характеристикой асинхронного момента обладают турбогенераторы. За счет большого асинхронного момента турбогенераторы успешно втягиваются в синхронизм даже при скольжении равном $s = \pm (15 - 20) \%$ в течение времени 2 – 3 с.

Значительно меньший асинхронный момент имеют гидрогенераторы, особенно гидрогенераторы без успокоительной обмотки. Однако, как показал опыт, гидрогенераторы также надежно подтягиваются к синхронной скорости, если включение в сеть производится со скольжением не более $s = \pm (2 - 3) \%$ и принимаются надлежащие меры для уменьшения ускорения ротора при включении. В первую очередь это относится к гидрогенераторам без успокоительной обмотки.

Как видно из рис. 3.1, максимум асинхронного момента достигается при скольжениях до $s = 1 \%$, затем асинхронный момент убывает и при скольжении $s = 0$ он естественно становится равным нулю. Таким образом, окончательное втягивание генератора в синхронизм не может быть осуществлено за счет асинхронного момента.

Реактивный момент M_p . Этот момент определяется взаимодействием вращающегося поля статора с явно выраженными полюсами ротора. Величина реактивного момента рассчитывается по формуле

$$M_p = \frac{U_c^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta. \quad (3.11)$$

Реактивный момент не играет существенной роли при самосинхронизации генератора, поскольку его величина не столь большая, как средний

асинхронный момент. Так, для гидрогенераторов максимальное значение реактивного момента не превосходит значение $M = (0,2 - 0,4) M_{ном}$. Более существенным является тот факт, что реактивный момент изменяется во времени с двойной частотой скольжения. За счет этого ротор генератора может втянуться в синхронизм как при угле $\delta = 0$, так и при угле $\delta = 180^\circ$. Вхождение в синхронизм с углом $\delta = 180^\circ$ недопустимо, так как после подачи возбуждения генератор оказывается включенным в противофазе. Под действием синхронного момента ротор генератора должен будет повернуться на угол

$\delta = 180^\circ$, что будет сопровождаться дополнительными качаниями ротора, значительными толчками тока и активной мощности.

Синхронный момент $M_{син}$. За счет синхронного момента происходит втягивание ротора генератора в синхронизм. В установившемся режиме синхронный момент генератора определяется известным выражением

$$M_{синхр} = \frac{E_d U_c}{x_d} \sin \delta . \quad (3.12)$$

Вследствие запаздывания в обмотке возбуждения, ток возбуждения нарастает постепенно. Поэтому после подачи возбуждения синхронный момент устанавливается не мгновенно, а нарастает по экспоненциальному закону с постоянной времени T'_d

$$M_{синхр} = \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \right) \frac{E_d U_c}{x_d} \sin \delta . \quad (3.13)$$

При подтягивании генератора к синхронной частоте вращения его ротор движется с некоторым ускорением. Поэтому в первый момент синхронной работы в силу инерции ротора генератор будет качаться относительно среднего значения угла δ . Качания ротора сопровождаются колебаниями тока статора и толчками активной мощности, которые постепенно затухают. Существенное влияние на затухание колебаний оказывает успокоительная обмотка генератора. У гидрогенераторов с успокоительной обмоткой колебания затухают через 2 – 3 периода после вхождения ротора в синхронизм. У гидрогенераторов без успокоительной обмотки качания ротора продолжаются в течение времени

$t = 10 - 15$ с. Качания проявляются в меньшей степени, если сразу же после вхождения в синхронизм генератор примет на себя активную нагрузку.

3.4. Пусковые характеристики гидроагрегата

Продолжительность пуска гидроагрегата с последующей самосинхронизацией зависит от величины открытия направляющего аппарата. Чем больше открытие направляющего аппарата, тем больше момент турбины и тем быстрее нарастает частота вращения агрегата.

Зависимость нарастания частоты вращения в функции времени называют пусковой характеристикой. Каждой характеристике соответствует определенное открытие направляющего аппарата на холостом ходу. На рис. 3.2 показаны три характеристики: сниженная 1, нормальная 2 и повышенная 3.

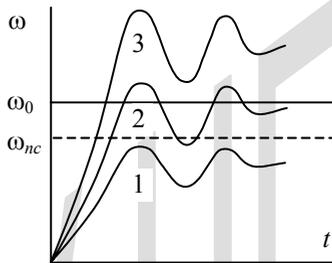


Рис.3.2. Пусковые характеристики гидрогенератора

Вследствие запаздывания в системе регулирования гидротурбины процесс изменения частоты вращения носит колебательный характер. Установившееся значение частоты вращения по нормальной характеристике соответствует синхронной частоте ω_0 . Автоматика синхронизации контролирует достижение подсинхронной частоты вращения ω_{nc} и подает сигнал на включение генератора в сеть.

Точки пересечения пусковых характеристик с линией ω_{nc} определяют время включения генератора. Очевидно, самое быстрое включение происходит при пуске по повышенной характеристике 3.

Наибольший интерес представляет нормальная характеристика, обеспечивающая достаточно быстрое включение генератора в сеть и эффективное

Глава 3. Синхронизация генераторов

втягивание его в синхронизм. Эффективность втягивания в синхронизм зависит от ускорения, с которым генератор проходит синхронную частоту вращения ω_0 . На рисунке это ускорение определяется углом наклона касательной к пусковой характеристике при синхронной частоте вращения ω_0 .

В свою очередь ускорение ротора генератора $d\omega/dt$ определяет избыточный момент $T_j \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_{изб}$. Этот избыточный момент должен быть скомпенсирован электромагнитными моментами и, в первую очередь, асинхронным моментом генератора после прохождения синхронной частоты ω_0 . С этих позиций нормальная пусковая характеристика обеспечивает небольшой избыточный момент при прохождении генератором синхронной частоты ω_0 и его быстрое включение в сеть.

При повышенной пусковой характеристике прохождение синхронной частоты ω_0 происходит с большим ускорением, а следовательно, со значительным избыточным моментом. Следствием этого может быть не втягивание генератора в синхронизм.

Наиболее эффективное втягивание генератора в синхронизм обеспечивается сочетанием пусковых характеристик, а именно, до частоты вращения $(0,7 - 0,8) \omega_0$ агрегат пускается по повышенной характеристике, затем открытие направляющего аппарата гидротурбины переводится в положение соответствующее нормальной характеристике. Это несколько усложняет схему самосинхронизации гидрогенератора.

Обычно время синхронизации гидрогенератора при пуске по нормальной характеристике лежит в пределах 30 – 40 с. При пуске агрегата по сниженной характеристике требуется время 80 – 120 с.

Как только генератор втягивается в синхронизм, действием на механизм изменения числа оборотов (МИЧО) регулятора частоты вращения в соответствии с программой пуска агрегата производится дополнительное открытие направляющего аппарата турбины и генератор начинает набирать активную нагрузку.

3.5. Устройства контроля подсинхронной частоты вращения

Контроль подсинхронной скорости ротора генератора может выполняться с помощью как механических, так и электрических устройств. Механические реле реагируют на величину частоты вращения, а не на скольжение и отличаются сравнительно невысокой точностью, в результате чего выбор момента включения синхронизируемого генератора может быть произведен неверно, особенно в аварийной ситуации, когда частота энергосистемы отличается от номинальной.

Более совершенным является принцип измерения скольжения, т.е. разности частот сети и синхронизируемого генератора. В этом случае при любом практически встречающемся отклонении частоты сети момент подключения генератора выбирается правильно и определяется уставкой скольжения.

Поскольку при самосинхронизации генератор разворачивается невозбужденным, то возникают затруднения с питанием обмотки реле разности частот со стороны генератора. Широкое распространение получило реле разности частот типа ИРЧ-01А. Особенность этого реле заключается в том, что для возбуждения одной из его обмоток вполне достаточно напряжения остаточного намагничивания.

Ниже рассмотрен принцип действия реле ИРЧ-01А (рис. 3.3).

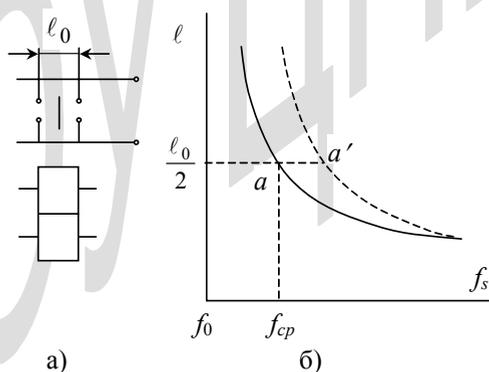


Рис.3.3. Схема и характеристика реле ИРЧ-01А

Реле выполнено на индукционном принципе и состоит из четырех-полюсного статора, цилиндрического ротора и контактной системы. Неподвижные контакты располагаются с двух сторон и замыкаются подвижным контактом, укрепленным на якоре реле.

Реле имеет две обмотки. Одна обмотка рассчитана на напряжение 100 В и подключается через трансформатор напряжения к сети. Вторая обмотка включается через трансформатор напряжения на остаточное напряжение генератора. Эта обмотка выполнена с малым сопротивлением, так что остаточного напряжения $U = 0,5 - 1,5$ В вполне достаточно для ее питания.

Момент, действующий на ротор индукционного реле, определяется известной формулой

$$M_{ep} = k \Phi_c \Phi_z \sin (\hat{\Phi}_1 \hat{\Phi}_2). \quad (3.14)$$

Поскольку

$$\Phi_1 \equiv U_c \text{ и } \Phi_2 \equiv U_z,$$

то

$$M_{ep} = k U_c U_z \sin (U_c \hat{U}_z) = k U_c U_z \sin \delta. \quad (3.15)$$

Угол δ между напряжением энергосистемы U_c и напряжением генераторов U_z равен:

$$\delta = (\omega_c - \omega_z) t = \omega_s t,$$

где ω_s скольжение

Учитывая сказанное, получим

$$M_{ep} = k U_c U_z \sin \omega_s t. \quad (3.16)$$

Таким образом, на ротор реле действует вращающий момент с частотой, равной частоте скольжения $f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$. Величина момента зависит от напряжения сети и остаточного напряжения генератора.

В реле ИРЧ–01 используется явление резонанса. Амплитуда колебания ротора реле с укрепленным на нем подвижным контактом тем больше, чем ближе частота вращающего момента реле к частоте собственных колебаний якоря.

На рис. 3.3, б показана резонансная кривая реле. Здесь f_0 – частота собственных колебаний якоря; ℓ – амплитуда отклонения подвижного контакта и ℓ_0 – расстояние между неподвижными контактами.

В обесточенном состоянии якорь реле удерживается пружиной в своем среднем положении. При возбуждении обмоток якорь начинает колебаться. До тех пор, пока частота скольжения f_s велика, амплитуда отклонения подвижного контакта незначительна и неподвижные контакты не замыкаются. С увеличением частоты вращения генератора частота скольжения f_s уменьшается, при этом амплитуда колебаний подвижного контакта увеличивается. Реле выполнено так, что при частоте $f_s = f_{cp} = 1,0$ Гц амплитуда колебаний становится равной $\frac{\ell_0}{2}$ (точка «а» рис.3.3,б) и реле срабатывает.

При срабатывании реле неподвижные контакты замыкаются кратковременно, причем за одно колебание ротора реле срабатывает дважды: сначала замыкается одна пара неподвижных контактов, затем – другая. Реле подает кратковременные импульсы, таким образом после него необходимо ставить промежуточное реле, подхватывающее эти импульсы.

Уставка срабатывания реле зависит от величины напряжения энергосистемы u_c и генератора u_g . При изменении этих величин резонансная кривая реле изменяется. Например, если одно из напряжений увеличивается, то резонансная кривая поднимается и точка пересечения этой кривой с линией $\frac{\ell_0}{2}$ перемещается вправо (точка «а'»). Это означает, что начало замыкания неподвижного контакта наступит несколько раньше, при большей частоте скольжения f_s .

Однако, при использовании явления резонанса зависимость уставки реле от напряжения не столь значительна. Так, при изменении напряжения сети в пределах $U = (50 - 120 \%) U_{ном}$ и остаточного напряжения генератора $\pm 50 \%$ от среднего значения, уставка срабатывания реле находится в пределах $f_c = 0,5 - 1,3$ Гц, что вполне допустимо.

Следует отметить, что уставка реле ИРЧ–01 также зависит и от ускорения синхронизируемого генератора. При переменном скольжении реле срабатывает с погрешностью.

После синхронизации генератора, напряжение на второй обмотке реле ИРЧ–01 резко возрастает, что может вызвать ее повреждение. Поэтому она немедленно отключается.

Если остаточное напряжение генератора мало для надежного срабатывания реле, то его необходимо включать через специальный стабилизатор напряжения.

В настоящее время выпускается реле разности частот на полупроводниковых элементах [3]. Кратко изложим принцип исполнения этого реле. Напряжение генератора u_g и энергосистемы u_c преобразуются в импульсы прямоугольной формы, соответствующие положительным полуволнам этих сигналов. Измеряется смещение импульсов по фазе угла δ . При наличии скольжения смещение по фазе меняется во времени $\delta(t) = \omega_s t$. Дифференцированием сигнала $\delta(t)$ получается скольжение напряжения генератора относительно напряжения сети. Компаратор на выходе схемы реле реагирует на скольжение и срабатывает при заданном значении.

Полупроводниковое реле разности частот РГР–II надежно срабатывает при остаточном напряжении генератора в $(2 - 15\%) U_{ном}$. Уставка реле по скольжению находится в пределах $f_s = 1,0 - 1,5$ Гц.

3.6. Схема самосинхронизации гидрогенератора

Принципиальная схема самосинхронизации гидрогенератора показана на рис. 3.4.

Схема разработана для пуска агрегата по нормальной пусковой характеристике. Контроль подсинхронной скорости осуществляется с помощью реле разности частот ИРЧ–01А.

Схема работает следующим образом. Включается ключ самосинхронизации (SA). Этим действием определяется дальнейшая программа пуска и включения генератора по методу самосинхронизации. Готовность агрегата к

пуску контролируется рядом реле: РО, ДД, АГП и БК. Пуск разрешается, если реле останова РО обесточено и его контакты замкнуты, тормозная система в исправности и контакт датчика давления ДД находится в замкнутом состоянии, автомат гашения поля и выключатель генератора отключены и контакты АГП и БК также замкнуты.

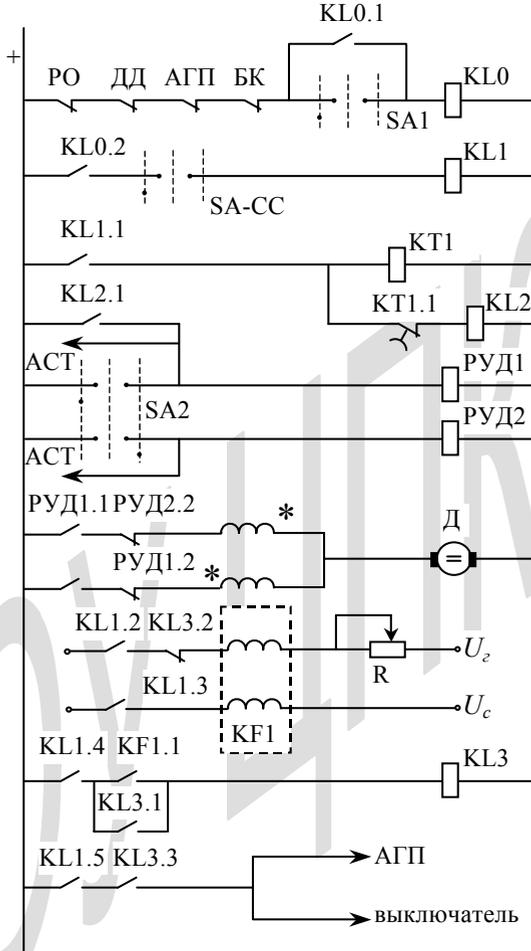


Рис.3.4. Схема самосинхронизации гидрогенератора

Поворотом ключа SA1 осуществляется пуск агрегата: включается реле автоматического пуска KL0, которое подает команду на регулятор частоты

вращения. Через контакт KL0.2 подается питание на реле KL1. Если включение генератора производится по методу точной синхронизации, то контакты ключа SA–CC разомкнуты и при пуске агрегата реле KL1 не включается.

Включение ключа SA1 может быть кратковременным, поэтому в дальнейшем реле KL0 самоудерживается своим контактом KL0.1.

Реле KL1 предназначено для выполнения ряда операций. Через контакты KL1.1 подается питание на реле KL2. Контакты KL1.2 и KL1.3 используются для подключения реле разности частот КФ. Четвертый и пятый контакты этого реле являются блокировочными контактами в цепи включения выключателя, АГП и реле KL3. Питание в эти цепи подается только в том случае, если реле KL1 сработало.

Одновременно с реле KL2 пускается реле времени КТ1, которое через определенную выдержку времени своим контактом КТ1.1 разрывает цепь реле KL2. Таким образом, нормально открытый контакт KL2.1 замыкается лишь на определенный промежуток времени, определяемый выдержкой времени реле КТ1.

Через контакт KL2.1 подается питание на реле РУД (реле управления двигателем МИЧО). Это реле включает двигатель Д. С помощью реле РУД1 и РУД2 возможно управлять двигателем Д как автоматического синхронизатора АСТ, так и вручную ключом SA2. В этом случае можно подать импульсы на «прибавить» (через реле РУД1) и на «убавить» (через реле РУД2).

При самосинхронизации точная подгонка скорости агрегата не требуется, поэтому через контакты KL2.1 подается импульс только на «прибавить», причем такой длительности, чтобы открытие направляющего аппарата турбины соответствовало нормальной пусковой характеристике. Длительность этого импульса определяется реле времени КТ1 и подбирается экспериментально.

При частоте генератора, близкой к частоте сети, срабатывает реле разности частот КФ1 (ИРЧ–01), которое своим контактом КФ1.1 пускает реле KL3. Реле ИРЧ–01 обеспечивает кратковременный импульс. Для надежно-го срабатывания реле KL3 последнее самоудерживается через контакт KL3.1.

Вторая обмотка реле ИРЧ–01 рассчитана на ток в 60 МА (включается на остаточное напряжение генератора). При включении генератора в сеть она отключается контактом KL3.2 во избежание повреждения.

Реле KL3 подает импульс на включение АГП и выключателя. АГП срабатывает, и в цепь ротора подается возбуждение, при этом ротор втягивается в синхронизм. На этом процесс пуска турбины и самосинхронизации заканчивается.

3.7. Точная синхронизация генератора

Точная синхронизация генератора осуществляется следующим образом. Ротор генератора разворачивается турбиной и возбуждается. Перед включением генератора в сеть выполняются следующие условия:

$U_g = U_c$ – величина напряжения генератора подгоняется к напряжению сети;

$f_g = f_c$ – частота генератора выравнивается с частотой сети;

$\delta = 0$ – выбирается наиболее благоприятный момент включения, когда угол между векторами напряжения генератора и сети равен нулю.

Подгонка указанных величин осуществляется или вручную персоналом станции (ручная синхронизация), или с помощью автоматических устройств (автоматическая синхронизация).

Включение возбужденного генератора в сеть сопровождается уравнительным током. Величина и характер этого тока зависит от того, насколько точно выполняются условия синхронизации. Уравнительный ток вызывает толчки мощности. Толчок активной мощности через генератор передается на турбину. Толчок реактивной мощности воспринимается только генератором.

В случае $E''_{d2} = E''_{dc} = E''_d$ величина уравнительного тока равна

$$i_{yp} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2 E''_d}{x''_{d2} + x_{св} + x''_{dc}} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (3.17)$$

где E''_{d2} и E''_{dc} – продольные э.д.с. синхронизируемого генератора и эквивалентного генератора энергосистемы за сверхпереходным индуктивным сопротивлением x''_{d2} и x''_{dc} по продольной оси;

$x_{св}$ – эквивалентное индуктивное сопротивление связи;

δ – угол сдвига фаз между E''_{d2} и E''_{dc} .

При угле $\delta = 0$ уравнильный ток равен нулю. В этом и заключается основное преимущество точной синхронизации: если момент включения выбран правильно, то включение происходит без толчка уравнильного тока.

Наибольшее значение уравнильного тока получается при угле $\delta = 180^\circ$, когда $\sin \frac{\delta}{2} = 1,0$. В этом случае величина уравнильного тока равна

$$i_{yp} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2E_d''}{x_{d2}'' + x_{cв}'' + x_{dc}''}. \quad (3.18)$$

Особо значительным уравнильный ток может быть при включении генератора на шины «бесконечной» мощности. Так как при этом сопротивление связи $x_{cв} = 0$ и $x_{dc}'' = 0$, то получим следующее уравнение для уравнильного тока

$$i_{yp} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2E_d''}{x_{d2}''}. \quad (3.19)$$

В этом случае уравнильный ток в два раза больше ударного тока короткого замыкания на выводах генератора. Это весьма опасный режим для генератора, поскольку возникающие механические усилия уже в четыре раза больше механических усилий, которые создаются при коротком замыкании на выводах генератора. Отсюда следует, что нельзя включать генератор при таких условиях.

Величина и характер уравнильного тока зависит от точности соблюдения условий синхронизации. Рассмотрим, к чему приводит несоблюдение того или иного условия. В целях упрощения анализа будем полагать, что не выполняется какое-либо одно условие, а два других выполняются абсолютно точно.

Первый случай: $U_2 \neq U_c$, $f_2 = f_c$, $\delta = 0$. К моменту включения генератора его напряжение не выравнено с напряжением сети. Под действием разности напряжений потечет уравнильный ток. По своему характеру этот ток реактивный. Если напряжение генератора больше напряжения сети $U_2 > U_c$, то для генератора уравнильный ток будет отстающим. Известно, что индуктив-

ный ток размагничивает генератор. Если напряжение генератора меньше напряжения сети $U_g < U_c$, то для генератора уравнивающий ток будет опережающим, намагничивающим. В обоих случаях за счет дополнительного намагничивания или размагничивания напряжения генератора и сети будут выравнены.

Второй случай: $U_g = U_c$, $f_g = f_c$, $\delta \neq 0$. Включение генератора производится, когда угол δ не равен нулю. Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 3.5.

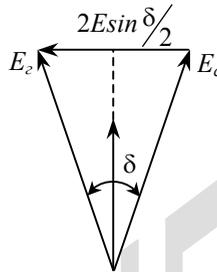


Рис.3.5. Векторная диаграмма напряжений и токов

При малых значениях угла δ уравнивающий ток в основном будет активным. В момент включения генератора возникает толчок активной мощности. Этот толчок воспринимается и генератором, и турбиной. Если э.д.с. генератора E_g опережает э.д.с. сети E_c , то в первый момент генератор примет на себя активную нагрузку, вследствие чего ротор начнет тормозиться и угол δ будет уменьшаться. Если э.д.с. генератора E_g отстает от э.д.с. сети E_c , то синхронный момент будет отрицательным и генератор начнет работать в режиме синхронного двигателя, потребляя активную мощность из сети. За счет этого ротор ускорится и угол δ начнет уменьшаться.

Третий случай: $U_g = U_c$, $f_g \neq f_c$, $\delta = 0$. Включение генератора производится при неравенстве частот генератора и сети. Если частота генератора больше частоты сети $f_g > f_c$, то под действием избыточного момента ротор генератора начнет опережать ротор эквивалентного генератора энергосистемы. С появлением угла δ генератор примет на себя активную нагрузку, вследствие чего его ротор начнет тормозиться. Чем больше разность частот, тем большим будет вылет угла. При значительном расхождении частот ротор

генератора может не войти в синхронизм на первом цикле, а несколько раз провернуться на угол 360° в асинхронном режиме до успешной или неуспешной синхронизации. Это будет сопровождаться значительными толчками уравнивающего тока и мощности. При частоте генератора ниже частоты сети $f_2 < f_c$ ротор генератора начнет отставать от ротора эквивалентного генератора энергосистемы. Появится уравнивающий момент, который будет ускорять ротор с последующей успешной или неуспешной синхронизацией.

3.8. Принцип улавливания момента синхронизма

Для создания устройства улавливания момента синхронизма (угол $\delta = 0$) используют так называемое напряжение скольжения. Это напряжение может быть получено следующим образом. Вторичные обмотки трансформаторов напряжения генератора и сети включаются по схеме рис. 3.6.

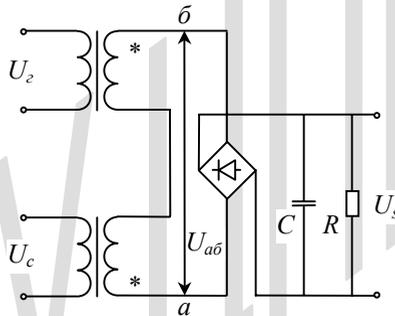


Рис.3.6. Схема получения напряжения скольжения

Напряжение между точками «а» и «б» равно

$$U_{ab} = U_2 - U_c.$$

Поскольку

$$u_2 = U_2 \sin \omega_2 t, \quad u_c = U_c \sin \omega_c t,$$

то

$$u_{ab} = U_2 \sin \omega_2 t - U_c \sin \omega_c t.$$

При $U_2 = U_c = U$ получим:

$$u_{a\bar{b}} = U(\sin \omega_z t - \sin \omega_c t) = 2U \sin \frac{\omega_z - \omega_c}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_z + \omega_c}{2} t .$$

График напряжения скольжения $u_{a\bar{b}}$ показан на рис. 3.7.

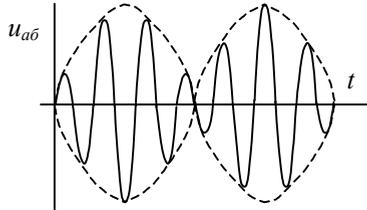


Рис.3.7. График напряжение скольжения

Из графика видно, что напряжение скольжения $u_{a\bar{b}}$ представляет собой гармоническое колебание в функции двух частот, равных полусумме и полуразности угловых частот вращения генератора и сети.

Величину $2U \sin \frac{\omega_z - \omega_c}{2} t$ можно рассматривать как амплитуду гармонического колебания с частотой $\frac{\omega_z + \omega_c}{2}$, т.е.

$$u_{a\bar{b}} = U_s \cos \frac{\omega_z + \omega_c}{2} t ,$$

где

$$U_s = 2U \sin \frac{\omega_z - \omega_c}{2} t .$$

Для создания элементов синхронизатора эта амплитуда представляет наибольший интерес. Известно, что для выделения амплитуды переменного напряжения необходимо произвести выпрямление и сглаживание – при этом выходное напряжение за выпрямителем будет пропорционально амплитуде приложенного напряжения. Из рис. 3.6 видно, что напряжение скольжения $u_{a\bar{b}}$ приложено к выпрямителю, на выходе которого имеется сглаживающий фильтр RC . При соответствующем выборе параметров этого фильтра напряжение на его выходе равно

$$u_s = kU \sin \frac{\omega_z - \omega_c}{2} t .$$

Это напряжение называется напряжением скольжения.

Принимая во внимание, что $\omega_s - \omega_c = \omega_s$, получим:

$$u_s = kU \sin \frac{\omega_s t}{2},$$

и поскольку $\omega_s t = \delta$, то

$$u_s = kU \sin \frac{\delta}{2}. \quad (3.20)$$

Таким образом, напряжение скольжения u_s является функцией угла δ . Максимальное значение напряжения скольжения u_s получается при угле $\delta = 180^\circ$. При угле $\delta = 0$ напряжение скольжения равно $u_s = 0$. Отсюда следует возможность контроля времени прохождения угла δ через ноль. Для этого нет необходимости непосредственно измерять угол δ , а достаточно контролировать момент, когда напряжение скольжения равно $u_s = 0$. Эту операцию можно выполнить посредством реле, у которого возврат якоря происходит при нулевом напряжении.

3.9. Способы контроля напряжения и частоты

Контроль напряжения генератора не вызывает особых затруднений и может быть выполнен с помощью обычного электромагнитного реле напряжения. Схема элемента контроля равенства напряжений показана на рис. 3.8.

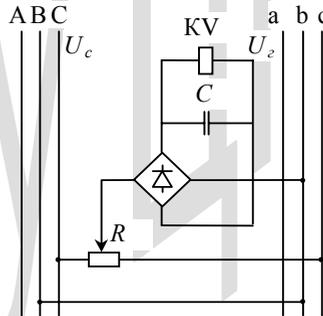


Рис.3.8. Схема элемента контроля равенства напряжений

Фазы В трехфазной системы вторичных напряжений генератора и сети соединяются между собой. Между фазами С включается потенциометр R . Реле KV включается через выпрямитель между средней точкой потенцио-

метра R и фазой b . При таком включении на реле KV подается напряжение скольжения u_s .

Диаграмма напряжения, приложенного к реле в различные моменты времени, показана на рис.3.9.

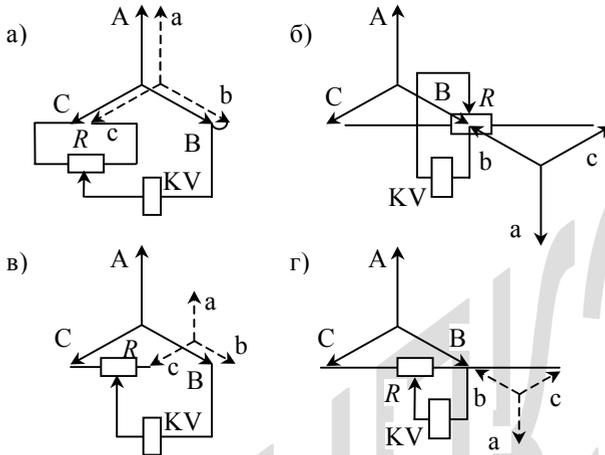


Рис.3.9. Диаграммы, поясняющие принцип действия элемента контроля равенства напряжений

Если напряжение генератора U_g и сети U_c равны, то при угле $\delta = 0$ (фазы совпадают, рис.3.9, а) на реле KV подается линейное напряжение U_{bc} . При угле $\delta = 180^\circ$ напряжение на реле не подается (рис.3.9, б), и оно отпускает свой якорь.

Когда величины напряжений генератора и сети не равны между собой, реле будет находиться под напряжением при всех значениях угла, в том числе и при угле $\delta = 180^\circ$. Действительно, при угле $\delta = 0$ (рис.3.9, в) на реле подается напряжение, не равное нулю. Когда угол $\delta = 180^\circ$ (рис. 3.9, г), то напряжение, подаваемое на реле, также не равно нулю, и якорь реле отпускаться не будет.

Итак, равенство напряжений определяется состоянием реле: если якорь реле не отпускается, то напряжения не равны; если в определенные моменты времени якорь реле отпускается, то напряжения равны.

Контроль частоты генератора также не вызывает особых затруднений. При точной синхронизации генератор возбужден и для контроля частоты можно применить электрическое реле. В аварийных условиях частота

энергосистемы может отличаться от 50 Гц, поэтому правильное контролировать не частоту генератора, а его скольжение относительно сети.

В автоматических синхронизаторах для контроля скольжения генератора применяются простые электромагнитные реле. Их использование возможно, так как контроль скольжения производится косвенным образом, при этом контролируется скорость изменения напряжения скольжения u_s . Ранее

было показано, что напряжение скольжения равно $u_s = k \sin \frac{\delta}{2}$. При малых значениях угла δ напряжение скольжения равно $u_s = k\delta$ и далее

$$\frac{du_s}{dt} = k' \frac{d\delta}{dt} = k' \omega_s, \quad (3.21)$$

откуда следует, что о скольжении генератора можно судить по скорости изменения напряжения скольжения u_s .

Принцип выполнения схемы контроля скольжения поясняется на рис.3.10.

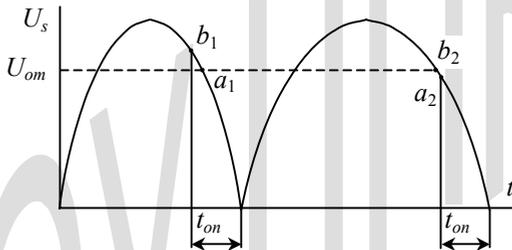


Рис.3.10. График работы элемента контроля скольжения

Электромагнитное реле KL включается на напряжение скольжения u_s . При максимальном значении напряжения скольжения u_s якорь реле подтянут и контакты разомкнуты. Реле срабатывает, когда напряжение на его катушке равно или меньше напряжения отпускания U_{omn} . На рисунке показаны моменты срабатывания реле KL (точки « a_1 » и « a_2 »). Здесь представлено два цикла изменения напряжения скольжения u_s : первый — со сравнительно большой скоростью и второй — с меньшей скоростью изменения u_s .

В схеме имеется реле времени (так называемое реле опережения), выдержка времени которого отсчитывается с некоторого момента t_{on} до момента, когда напряжение скольжения равно $u_s = 0$.

Далее осуществляется проверка изменения напряжения скольжения u_s от напряжения отпускания U_{omn} до нуля в течение контрольного времени t_{on} . Если за контрольное время t_{on} напряжение скольжение успевает измениться от U_{omn} до нуля, то это означает, что скорость его изменения велика, если же не успевает – скорость мала.

Скорость изменения напряжения скольжения u_s , а следовательно, и скольжение генератора определяется на основании очередности срабатывания реле KL и реле времени КТ. Так, при большом скольжении прежде всего срабатывает реле времени, а затем действует реле KL. При небольшом скольжении первым срабатывает реле KL, а затем срабатывает реле времени. Это свидетельствует о допустимом скольжении генератора.

3.10. Выравнивание напряжения и частоты генератора

Выше были рассмотрены элементы, контролирующие равенство напряжений и частот генератора и сети. При равенстве этих величин они дают разрешающий сигнал на включение синхронизируемого генератора.

Если напряжение генератора не равно напряжению сети $U_g \neq U_c$ и частота генератора не равна частоте сети $f_g \neq f_c$, то прежде чем включить генератор, необходимо выровнять эти величины.

Выравнивание напряжения. Принципиально элемент выравнивания напряжения можно выполнить на основе реле напряжения. В случае неравенства напряжений генератора и сети он будет подавать импульсы на устройство изменения возбуждения генератора в сторону «прибавить» или «убавить» в зависимости от знака рассогласования.

В ряде случаев такой элемент не требуется. Генераторы снабжаются автоматическими регуляторами напряжения, поэтому выравнивание напряжений с достаточной для практических целей точностью обеспечивается автоматически. Предположим, что регулятор напряжения генератора настроен на уставку

Глава 3. Синхронизация генераторов

$U_{ном} \pm \Delta U$, где ΔU – отклонение напряжения от среднего значения. При включении генератора напряжение сети может оказаться равным $U_{ном} \mp \Delta U$. В таком случае расхождение напряжений составит величину $2\Delta U$.

Поскольку отклонение напряжения на сборных шинах в нормальном режиме возможно в пределах $\Delta U = \pm 5\% U_{ном}$, то максимальное расхождение напряжения в момент синхронизации составит не более $\Delta U = 10\% U_{ном}$, что вполне допустимо с точки зрения толчка уравнивающего тока.

Исключение составляют генераторы, на которых установлены регуляторы возбуждения сильного действия. Они имеют высокий коэффициент усиления, в силу чего при включении генератора в сеть с разницей напряжения в $\Delta U = 10\% U_{ном}$ могут возникнуть длительные колебания реактивной мощности. Для устранения такого режима регуляторы возбуждения сильного действия имеют блок подгонки уставки по напряжению, который подводит значение уставки АРВ к значению напряжения энергосистемы и запрещает включение, если разность этих значений больше $\Delta U = 1 - 2\% U_{ном}$.

Выравнивание частот. Выравнивание частот устройствами, работающими на электрическом принципе, осуществляется двумя электромагнитными реле КF1 и КF2, включенными на напряжение скольжения u_s (рис.3.11).

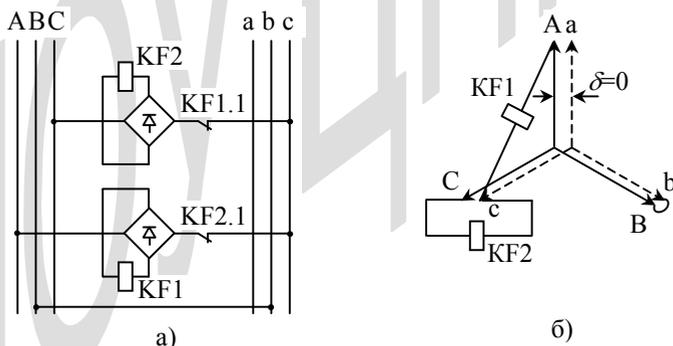


Рис.3.11 Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) элемента выравнивания частот

Реле KF2 включается на напряжение фазы с генератора и фазы С сети. Реле KF1 включается на напряжение фазы с генератора и фазы А сети. Фазы В трехфазных систем напряжений генератора и сети соединены между собой. При таком соединении напряжения скольжения на этих реле сдвинуты относительно друг друга на угол $\delta = 60^\circ$ (рис. 3.12).

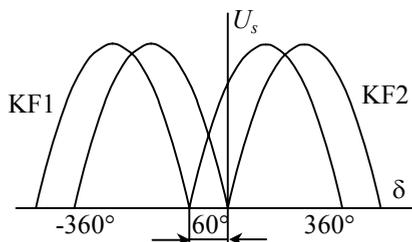


Рис.3.12. График работы элемента выравнивания частот

При угле $\delta = 0$ напряжение на реле KF2 равно нулю. На реле KF1 напряжение равно нулю при угле $\delta = -60^\circ$. Уставки срабатывания реле KF1 и KF2 выбираются одинаковыми.

Если частота генератора больше частоты сети, то вектор напряжения U_a начнет опережать вектор U_A и угол δ будет расти в положительном направлении. Из рис. 3.12. видно, что при положительном росте угла δ вначале появляется напряжение U_{KF1} , а затем напряжение U_{KF2} . Реле KF1 срабатывает первым и подает импульс на сигнал «убавить» частоту. Схема выполняется так, что как только срабатывает одно из реле (KF1 или KF2), другое реле блокируется и не срабатывает.

При частоте генератора меньше частоты сети вектор сети U_a отстает от вектора напряжения U_A . Угол δ растет в отрицательном направлении. В случае отрицательного изменения угла δ сначала появляется напряжение U_{KF2} , а затем – напряжение U_{KF1} . В этом случае первым работает реле KF2 и дает импульс на «прибавить» частоту. Реле KF1 не работает.

Для ограничения длительности импульсов на «прибавить» и «убавить» сигнал от реле KF1 и KF2 дополнительно проходит через контакты реле времени. Обычно выдержка этого реле устанавливается в пределах $t = 0,2 - 0,3$ с, так что независимо от величины скольжения, на механизм из-

менения числа оборотов регулятора частоты вращения турбины поступают одинаковые по продолжительности импульсы.

3.11. Классификация автоматических синхронизаторов

Оптимальным моментом включения синхронизируемого генератора в сеть является момент прохождения угла δ через ноль. Для включения выключателя требуется время. Это означает, что синхронизатор должен подавать импульс на включение выключателя с некоторым опережением по времени t_{on} . Время опережения должно равняться собственному времени срабатывания выключателя и других вспомогательных реле и контакторов, находящихся в схеме между синхронизатором и выключателем. Только в этом случае синхронизация будет происходить без толчков уравнительного тока.

Точная синхронизация разрешается при выполнении трех условий: $\delta = 0$, $f_z = f_c$ и $U_z = U_c$. Практически не требуется абсолютно точное выравнивание частот. Синхронизация допускается при разности частот $f_s = 0,2 - 0,3$ Гц или при скольжении $\omega_s = 1,2 - 1,9$ рад/с.

Если синхронизация происходит с расчетным скольжением $\omega_{s\text{don}} = const$, то $\delta_{on} \equiv t_{on}$, где t_{on} – время опережения; δ – угол опережения. Следовательно, для того чтобы контакты выключателя замыкались в момент, когда угол $\delta = 0$, автоматический синхронизатор может создавать опережение или по времени t_{on} , или по углу δ_{on} .

В зависимости от того, как создается опережение (по времени t или углу δ), существующие синхронизаторы разделяют на два типа: синхронизаторы с постоянным временем опережения, момент срабатывания которых определяется непосредственно заданным временем опережения и синхронизаторы с постоянным углом опережения, момент срабатывания которых определяется заданным углом опережения.

При переменной частоте $\omega \neq const$ опережение по углу не равнозначно опережению по времени. Следовательно, синхронизатор с постоянным опережением по углу δ не всегда правильно улавливает момент подачи сигнала на включение выключателя. В этом отношении синхронизаторы с

постоянным временем опережения t_{on} выгодно отличаются от синхронизаторов с постоянным углом опережения, в силу чего этот тип синхронизаторов получил наибольшее распространение.

3.12. Принципы создания опережения по углу и по времени

Опережение по углу. Постоянное опережение по углу может быть получено включением электромагнитного реле на напряжение скольжения u_s и настройкой его на напряжение срабатывания u_{cp} . Поскольку между напряжением скольжения u_s и углом δ существует зависимость $u_s = 2U \sin \frac{\delta}{2}$, то реле, настроенное на срабатывание при напряжении u_{cp} , будет работать при вполне определенном значении угла δ .

Контроль скольжения в синхронизаторе с постоянным углом опережения осуществляется следующим образом. Два реле KV1 и KV2, включенные на напряжение скольжения u_s (рис. 3.13), настраиваются на напряжение срабатывания u_{cp1} и u_{cp2} соответственно. Тем самым эти реле фиксируют значения углов δ_1 и δ_2 .

С помощью реле времени KT задается контрольное время t_k . Пуск реле времени осуществляется посредством реле KV1. Реле KV2 подает «плюс» источника питания на промежуточное реле KL1

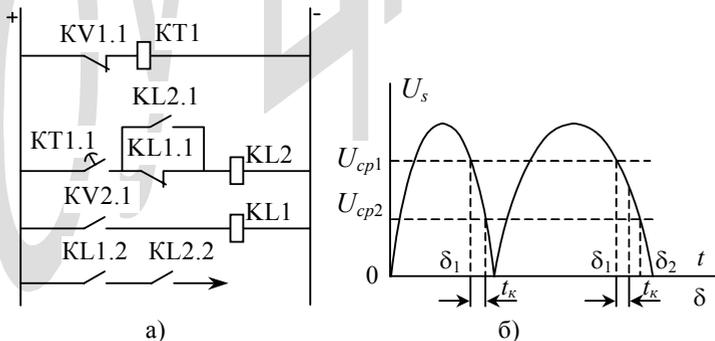


Рис.3.13. Схема (а) и график (б) элемента контроля скольжения

Если скольжение велико (первый цикл изменения напряжения скольжения u_s на рис.3.13), то изменение угла от значения δ_1 до δ_2 произойдет быстрее, чем будет исчерпан контрольный интервал времени. Это свидетельствует о недопустимом скольжении. Фиксация этого события происходит за счет определенной очередности срабатывания реле.

Схема работает следующим образом. При $u_s = u_{c p1}$ срабатывает реле KV1 и запускает реле времени КТ1. С этого момента начинается отсчет контрольного времени. Затем срабатывает реле KV2 и подает «плюс» на реле KL1. При большом скольжении реле KV2 сработает раньше контрольного времени t_k и схема будет заблокирована.

В случае небольшого скольжения (второй цикл изменения напряжения скольжения u_s), изменение угла от δ_1 до δ_2 происходит медленнее, за больший промежуток времени, чем контрольное время t_k . Сигнал проходит через замкнутые контакты KL1.1 на выходное реле KL2.

Последовательно включенные контакты KL1.2 и KL2.2 обеспечивают появление сигнала на выходе схемы при срабатывании реле KV2, что происходит при заданном значении угла δ .

Опережение по времени. Принцип создания постоянного опережения по времени заключается в том, что контролируется момент прохождения через ноль не напряжения скольжения u_s , а некоторого вспомогательного напряжения u'_s , сдвинутого относительно первого на постоянное время t_{on} .

Схема создания опережения по времени состоит из дифференцирующего трансформатора ДТ, включенного на напряжение скольжения u_s , и поляризованного реле KL с двумя обмотками (рис. 3.14).

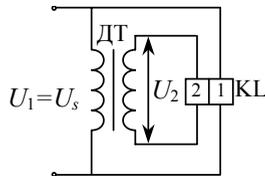


Рис.3.14. Схема устройства опережения по времени

Первая обмотка реле включается на напряжение скольжения u_s , вторая – на вторичное напряжение дифференцирующего трансформатора. Напряжение на вторичной обмотке этого трансформатора $u_2 = \frac{du_1}{dt}$. Так как

$$u_1 = u_s = 2U \sin \frac{\omega_s t}{2}, \quad (3.22)$$

то

$$u_2 = \frac{du_s}{dt} = \omega_s U \cos \frac{\omega_s t}{2}. \quad (3.23)$$

Реле отпускает свои контакты, когда $u'_s = k_1 u_1 + k_2 u_2 = 0$. Учитывая принятые обозначения, условие отпускания якоря реле запишем в виде:

$$2k_1 U \sin \frac{\omega_s t}{2} + k_2 \omega_s U \cos \frac{\omega_s t}{2} = 0, \quad (3.24)$$

откуда

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_s t}{2} = - \frac{k_2 \omega_s}{2k_1}. \quad (3.25)$$

При небольших углах $\operatorname{tg} \frac{\omega_s t}{2} \cong \frac{\omega_s t}{2}$, следовательно

$$t = - \frac{k_2}{k_1}. \quad (3.26)$$

Таким образом, время сдвига напряжения u'_s по отношению к напряжению скольжения u_s практически не зависит от скольжения генератора и всегда отрицательно, т.е. напряжение u'_s опережает по времени напряжение скольжения u_s . Реле, отпуская якорь в момент прохождения напряжения u'_s через ноль, подает сигнал с постоянным опережением по времени относительно момента прохождения через ноль напряжения u_s .

3.13. Автосинхронизатор АСТ–4

Автоматический синхронизатор АСТ–4 предназначен для включения генератора по методу точной синхронизации и является синхронизатором с постоянным временем опережения.

Элемент подгонки частоты вращения реагирует не на абсолютную частоту синхронизируемого генератора, а на его скольжение. В этом случае синхронизатор правильно подгоняет частоту вращения генератора не только при нормальном режиме энергосистемы, когда частота равна 50 Гц, но и в аварийном режиме, сопровождающемся отклонением частоты от номинального значения. Лабораторные испытания показывают, что синхронизатор работает правильно при посадках частоты до 45 Гц.

На работу синхронизатора не оказывает существенного влияния изменение напряжения генератора и сети. При отклонении напряжения в пределах $\Delta U = \pm 15\%$ от номинального значения все элементы синхронизатора функционируют нормально.

Время опережения синхронизатора настраивается с учетом времени срабатывания выключателя и практически остается постоянным независимо от скольжения. В диапазоне разности частот $f_s = 0,04 - 0,25$ Гц разброс времени опережения не превышает трех электрических градусов [3, 5].

По своим техническим и эксплуатационным характеристикам синхронизатор АСТ–4 является одним из лучших автоматических синхронизаторов, в силу чего он получил наибольшее распространение на станциях.

Схема синхронизатора АСТ–4 показана на рис.3.15.

Синхронизатор АСТ–4 состоит из следующих основных элементов: дифференцирующего трансформатора и реле опережения, реле контроля разности частот, реле контроля разности напряжений и устройства для подгонки частоты.

Учитывая, что генераторы снабжаются автоматическими регуляторами напряжения, обеспечивающими подгонку напряжения генератора к напряжению сети с расхождением не более $\Delta U = \pm 10\% U_{ном}$, синхронизатор выполняется без устройства подгонки напряжения.

На синхронизатор подается напряжение со стороны генератора и сети. Фазы В трехфазных систем напряжения генератора и сети соединяются между собой. Оперативный ток напряжением 100 В подается от аккумуляторной батареи.

Дифференцирующий трансформатор и реле опережения создают постоянное время опережения подачи импульса на включение. Уставка времени опережения регулируется с помощью сопротивления в цепи обмотки реле KV1, включенной на напряжение скольжения u_s .

Реле контроля разности частот KF1 контролирует скольжение генератора. Заключение о величине скольжения делается на основании очередности срабатывания реле контроля частоты и реле времени опережения. При скольжении меньшем или равном допустимому, первым срабатывает реле контроля частоты, а затем работает реле опережения. Определенная очередность срабатывания этих реле учитывается в исполнительном элементе синхронизатора. Контроль равенства напряжений осуществляется с помощью реле KV2. Если напряжения генератора и сети равны, то в определенные моменты времени при угле $\delta = 180^\circ$ напряжение на реле KV2 становится равным нулю и реле отпускает свой якорь. Нормально замкнутые контакты реле KV2.1 заведены в схему исполнительного элемента. При напряжении $U_p = 0$ контакты замыкаются и подготавливают цепочку исполнительного элемента.

Элемент подгонки частоты включает в себя реле скольжения «прибавить» и «убавить», реле времени и цепочку включения МИЧО. Принцип действия реле подгонки скорости был рассмотрен в 3.10. Из рис. 3.15 видно, что пуск реле времени КТ1 осуществляется нормально открытым контактом реле KF2.2 («убавить» частоту) или реле KF3.2 («прибавить» частоту). Как только срабатывает одно из этих реле, например реле KF2, оно своим контактом KF2.2 запускает реле времени, а контактом KF2.3 подает импульс на МИЧО.

Реле времени состоит из реле КТ1, конденсатора C1 и резистора R1. Конденсатор C1 подключается параллельно обмотке реле КТ1. Зарядка конденсатора происходит через резистор R1, так что при замыкании контакта KF2.2 или KF3.2 напряжение на конденсаторе, а следовательно, и на обмотке реле КТ1 нарастает постепенно, с постоянной времени $T = R1 C1$. Как только напряжение достигнет напряжения срабатывания реле КТ1, последнее срабатывает и контакт КТ1.3 разорвет цепь питания МИЧО. Контакт КТ1.1 разрывается цепь зарядки конденсатора, а контакт КТ1.2 переключает конденсатор на разрядное сопротивление R2, тем самым реле времени готовится к повторному действию. Выдержка времени реле регулируется резистором R1.

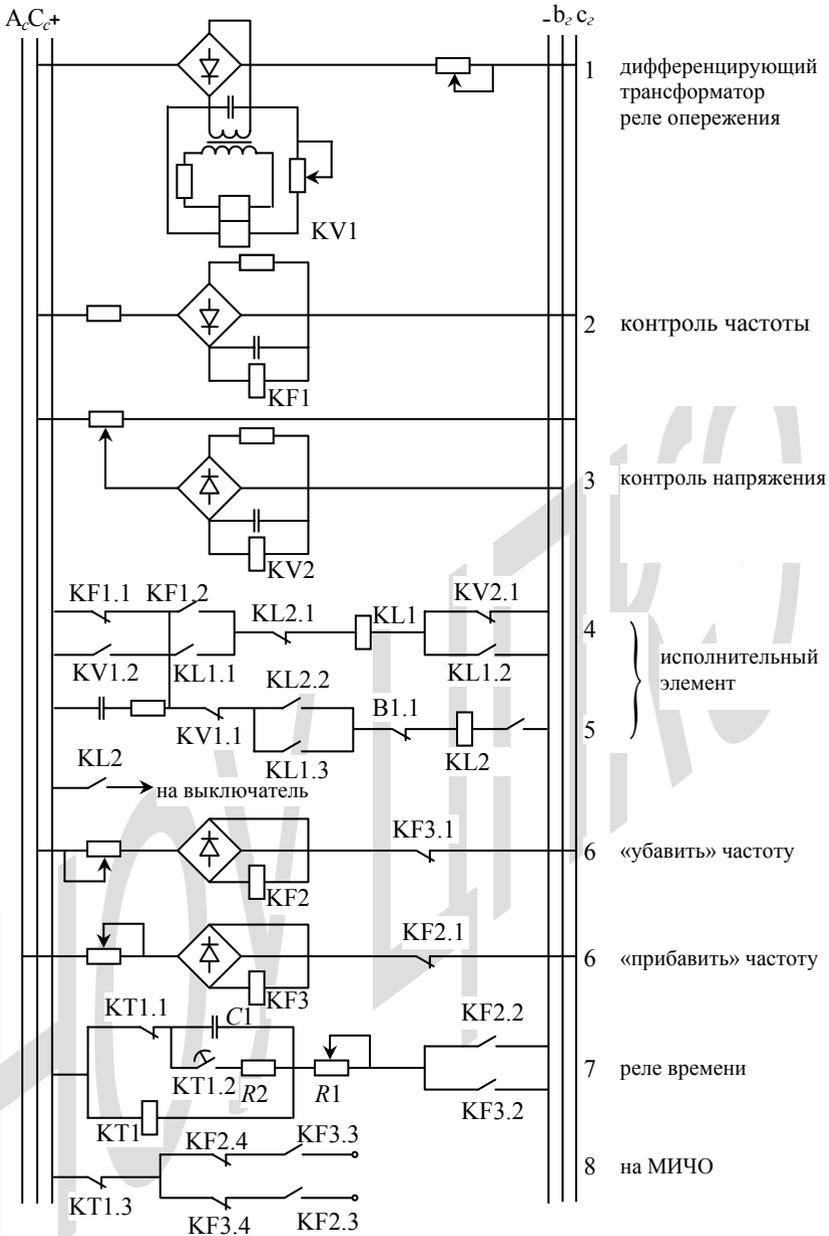


Рис.3.15 Схема синхронизатора АСТ-4

Исполнительный элемент включает в себя промежуточное реле KL1 и реле исполнения KL2. Пуск реле KL1 состоится только в случае, если контакты KV2.1 реле контроля напряжения замкнуты. Это происходит только при равенстве напряжений генератора и сети $U_g = U_c$ и угле $\delta = 180^\circ$. Таким образом, синхронизатор готовится к подаче импульса на включение в момент прохождения угла через 180° .

Следует иметь в виду, что положение контактов реле изображено на схеме для случая, когда обмотки реле не возбуждены. Рассмотрим изменение угла δ от 180° до 360° . При угле $\delta = 180^\circ$ напряжение скольжения u_s достигает максимума. В этом случае контакты KV1.2 и KF замкнуты. Следовательно, при угле $\delta = 180^\circ$ и условии $U_g = U_c$ реле KL1 запускается.

Реле KV2 работает кратковременно. При увеличении угла более чем 180° , на обмотке реле появляется напряжение (см. рис.3.9) и контакты KV2.1 размыкаются. Как только реле KL1 работает, оно своими контактами KL1.1 и KL1.2 самоудерживается.

Дальнейшее состояние реле KL1 зависит от очередности срабатывания реле KV1 и KF1. Если при подходе угла δ к 360° первым отпускается якорь реле KF1 и его контакты KF1.1 замыкаются, то цепь питания реле KL1 будет разорвана и импульс на включение генератора не пройдет. Это правильно, поскольку при такой очередности отпускания реле KV1 и KF1 скольжение велико и включение генератора недопустимо. Если же скольжение будет меньше или равно допустимому, то сначала отпустит свой якорь реле KF1 и замкнет контакт KF1.1, а уже после этого отпустит якорь реле KV1 и разомкнет свой контакт KV1.2. В этом случае цепь питания реле KL1 сохраняется и сигнал пройдет на включение. Так как реле KL1 возбуждено, то его контакт KL1.3 замкнут. При значении угла δ близком к 360° на обмотке реле KV2 есть напряжение и контакты KV2.2 замкнуты. Срабатывание реле KL2 зависит только от состояния контакта KV1.1. В момент времени $t = t_{on}$ реле отпустит свой якорь и этот контакт замкнется. Таким образом, сигнал на включение реле KL2 будет подан при соблюдении всех необходимых условий и в точно установленное время. В свою очередь реле KL2 контактом KL2.3 подаст сигнал на включение выключателя синхронизируемого генератора.

3.14. Автосинхронизатор СА–1

Основными элементами автосинхронизатора СА–1 являются элемент контроля скольжения синхронизируемого генератора и элемент выбора момента включения при угле $\delta = 0$. Для этой цели используется напряжение скольжения $u_s(\delta)$, которое получается в результате обработки напряжений генератора $u_g = U_g \sin \omega_g t$ и сети $u_c = U_c \sin \omega_c t$. При равенстве напряжений $U_g = U_c$, получим

$$u_g - u_c = 2U_c \sin \frac{\omega_g - \omega_c}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_g + \omega_c}{2} t \quad (3.27)$$

и после выпрямления напряжение скольжения равно $u_s(\delta) = 2U_c \sin \frac{\delta}{2}$.

Если напряжение генератора $U_g = U_c \pm \Delta U$, где ΔU расхождение напряжений по величине, то после некоторых преобразований получим

$$u_g - u_c = 2U_c \sin \frac{\omega_g - \omega_c}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_g + \omega_c}{2} t \pm \Delta U \sin \omega_g t. \quad (3.28)$$

Рассмотрим влияние величины $\Delta U \sin \omega_g t$ на напряжение скольжения. При равной нулю разности напряжений $\Delta U = 0$ напряжение скольжения равно $u_s(\delta) = 2U_c \sin \frac{\delta}{2}$ и при угле $\delta = 0$ также равно нулю. Это обстоятельство и используется в элементах синхронизатора для фиксации факта прохождения нулевого значения угла.

При отличной от нуля разности напряжений $\Delta U \neq 0$ выражение $\Delta U \sin \omega_g t$ оказывает влияние на работу измерительных элементов. Особый интерес представляет это влияние на величину выпрямленного напряжения при малых значениях угла δ : при разности напряжений $\Delta U \neq 0$ и угле $\delta = 0$ напряжение скольжения $u_s(\delta) \cong \Delta U$. График напряжения скольжения $u_s(\delta)$ при разности напряжений $\Delta U \neq 0$ показан на рис. 3.16 (кривая 1).

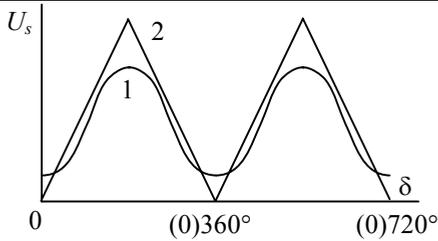


Рис.3.16. Напряжение скольжения $u_s(\delta)$.

Из графика видно, что в области углов $\delta \approx 0$, напряжение скольжения нечетко фиксирует момент равенства нулю угла δ ($\delta = 0$) и это является существенным недостатком автосинхронизатора АСТ-4.

Для устранения этого недостатка в МЭИ [2] разработан бесконтактный синхронизатор СА-1, содержащий измерительный преобразователь (фазометр), выходное напряжение которого линейно зависит от угла (рис. 3.16, кривая 2). Разность напряжений до 30 % не влияет на характеристику преобразователя.

Сигнал на включение определяется по условию

$$k_1 u_s + k_2 \frac{du_s}{dt} t_{on} + k_3 \frac{d^2 u_s}{dt^2} \frac{t_{on}^2}{2} = 0, \quad (3.29)$$

т.е. контролируется не только значение $k_1 u_s = 0$, но и введены сигналы по первой и второй производным.

Алгоритм действия автосинхронизатора СА-1 аналогичен алгоритму действия синхронизатора АСТ-4.

3.15. Сравнение методов синхронизации и их область применения

Каждый из рассмотренных способов синхронизации имеет свои преимущества и недостатки и применение одного из них зависит от конкретных условий. Прежде чем определить область применения способа синхронизации, напомним их основные преимущества и недостатки.

К основным преимуществам способа самосинхронизации относятся:

- простота включения синхронизируемого генератора на параллельную работу;
- возможность быстрого включения генератора в сеть при авариях, связанных с изменениями частоты во время синхронизации;
- простота схемы и аппаратуры;
- надежность работы устройства.

Два первых преимущества проявляются в первую очередь в аварийных режимах, когда имеется отклонение частоты от номинального значения и требуется весьма быстрое включение генератора в сеть. В нормальном режиме энергосистемы эти преимущества не столь значительны, поскольку задержка при включении генератора на 2 – 3 минуты не играет существенной роли.

Простота схемы и надежность работы в первую очередь необходимы для автоматизированных гидростанций, поскольку пуск и останов гидроагрегатов производится сравнительно часто.

Недостатком способа самосинхронизации является большой уравнительный ток. Напомним, что величина уравнительного тока при самосинхронизации определяется только параметрами генератора и схемой электрических соединений и не зависит от того, сколь тщательно выполняется операция синхронизации. От качества работы аппаратуры зависит лишь длительность протекания уравнительного тока.

Основным преимуществом точной синхронизации является возможность синхронизации без толчка уравнительного тока. По другим показателям точная синхронизация уступает способу самосинхронизации. Правда, применение в автосинхронизаторе типа АСТ–4 элемента подгонки частоты, реагирующего на разность частот генератора и сети, обеспечивает возможность проведения точной синхронизации и в аварийных режимах, сопровождающихся изменениями частоты.

Что касается надежности работы устройства, то здесь преимущества явно на стороне самосинхронизации. Аппаратура точной синхронизации содержит сравнительно большое количество реле и контактов и, следовательно, ее действие менее надежно. Особенно четко должен работать элемент выбора момента включения генератора. Ошибка в действии этого элемента приводит к

включению в неблагоприятный момент времени, когда угол $\delta \neq 0$. Возможные в этом случае толчки уравнительного тока могут оказаться недопустимыми.

Критерием допустимости применения метода самосинхронизации является величина уравнительного тока. Когда уравнительный ток не превосходит значение $3,5 I_{ном}$, самосинхронизация считается допустимой. Однако при рекомендации метода самосинхронизации необходимо учитывать и следующее обстоятельство. Критерий $I_{ур} \leq 3,5 I_{ном}$ установлен из тех соображений, что уравнительный ток такого значения не вызывает серьезных повреждений в генераторах, которые рассчитаны на действие больших по величине токов короткого замыкания. Но опыт применения самосинхронизации показал, что следует обеспечить надежность не только самого генератора, но и другой аппаратуры, подверженной действию уравнительного тока, и в первую очередь приходится учитывать воздействия на выключатель.

В нормальном режиме, как правило, операция включения и отключения производится с небольшими токами. Так, при отключении генератор разгружается, и выключатель разрывает цепь с небольшим током. При включении генератора по методу точной синхронизации в момент включения уравнительный ток также невелик. В таком режиме выключатель может работать большое число раз без каких-либо заметных изменений в его контактной системе.

Обычно на гидростанциях устанавливается аппаратура и самосинхронизации и точной синхронизации. В нормальном режиме, когда нет необходимости в быстром пуске генератора, последний синхронизируют методом точной синхронизации. В аварийном режиме для быстрого включения резервных гидрогенераторов пользуются методом самосинхронизации. В этом режиме применение метода самосинхронизации является обязательным, независимо от мощности генератора и схемы его включения.

Вследствие большой надежности метод самосинхронизации рекомендуется также на полностью автоматизированных гидростанциях при отсутствии дежурного персонала.