

Глава 6

Параллельная работа синхронных генераторов

§ 6.1. Способы включения генераторов на параллельную работу

В настоящее время включение генераторов на параллельную работу производится автоматически при помощи автосинхронизаторов.

Операция включения синхронных генераторов на параллельную работу весьма сложна и ответственна. Последствием неправильного включения генератора в сеть в лучшем случае может быть обесточивание шин электростанции, а при известных условиях – повреждение коммутационной аппаратуры и генератора.

Применяются три способа синхронизации при включении генераторов на параллельную работу:

- точная синхронизация, при которой до включения генератора на шины электростанции его напряжение и частота устанавливаются равными напряжению и частоте сети; в момент совпадения фаз напряжений сети и генератора последний включается в сеть;
- самосинхронизация, при которой до включения генератора на шины электростанции его обмотка возбуждения замкнута; частота вращения устанавливается приблизительно равной частоте сети, генератор включается в сеть с последующим возбуждением;
- синхронизация через индуктивное сопротивление, при которой генератор с напряжением и частотой, близкими к напряжению и частоте сети, включается в сеть. Последний способ нашел применение в автономных электростанциях.

Эти методы имеют свои достоинства и недостатки и поэтому применение того или другого из них зависит от назначения электростанции, мощности генераторов, требований к стабильности напряжения и частоты сети и т. д.

Способ точной синхронизации при включении генератора на параллельную работу требует несколько минут на производство операций при соответствующем навыке обслуживающего персонала.

Метод самосинхронизации генераторов позволяет резко сократить продолжительность операции включения генераторов на параллельную работу, причем условия включения упрощаются. Способ самосинхронизации требует выполнения только одного условия: разница в скорости вращения генераторов не должна превышать 2–3 Гц. Продолжительные операции по точной подгонке напряжения и частот генератора и сети отпадают.

Недостатком метода самосинхронизации генераторов является то, что включение генератора сопровождается снижением напряжения на шинах электростанции и бросками тока в цепи генератора. При генераторах равной мощности автономной электростанции снижение напряжения может достигать 35–40 %, а величина броска тока – 1,5–4-кратной величины номинальных значений.

Метод синхронизации генератора в автономных электростанциях с шинами через сопротивление – метод так называемой грубой синхронизации – привлекателен простотой операций, надежностью безаварийного включения. Операции включения генераторов на параллельную работу в этом случае производят в такой последовательности: генератор приводится во вращение и возбуждается, затем по достижении его частотой и напряжением околосинхронных значений, приблизительно равных частоте и напряжению шин, генератор подключается через реактор на шины. Как и при методе самосинхронизации, окончательная синхронизация генератора с сетью происходит сама по себе благодаря создаваемой через сопротивление электрической связи генератора с сетью.

Переходные процессы, возникающие при включении генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации, настолько слабо выражены и кратковременны, за исключением случаев неправильных включений, что они почти не рассматриваются. Наоборот, процессы, связанные с включением генераторов методами самосинхронизации и синхронизации через сопротивления, явно выражены и оказывают существенное влияние на сеть. Изучение этих процессов позволяет исследовать и аварийное включение генераторов при способе точной синхронизации.

При включении генераторов на параллельную работу методом самосинхронизации стремятся выполнять включение так, чтобы изменение напряжения и тока в цепях генераторов и время входа последних в синхронизм были минимальными. Установлено, что для сокращения переходного процесса при самосинхронизации необходимо немедленно давать перевозбуждение подключаемому генератору. Кроме того, требуется, чтобы разность скоростей вращения агрегатов не превосходила 3–5 % синхронной скорости и включение в параллель происходило при ускорении не более 1 Гц/с, причем желательно, чтобы включение производилось тогда, когда разность скоростей вращения подключаемого и работающего генераторов уменьшается, а не увеличивается.

Процесс синхронизации сокращается, если скольжение подключаемого генератора имеет положительное значение, т. е. скорость вращения этого генератора выше синхронной. Процесс самосинхронизации оказывается скоротечным, если величина скольжения такова, что по окончании переходного процесса подключаемый генератор берет нагрузку. Таким образом, включение генератора должно происходить при определенной скорости его вращения, зависящей от степени неравномерности характеристик регуляторов первичных двигателей, и величины общей нагрузки электростанции.

Условия этого метода синхронизации для автономных электростанций можно выразить так: взаимное расположение регуляторных характеристик генераторных агрегатов до момента включения одного из них на параллельную работу с другими должно соответствовать параллельной работе агрегатов с равномерным или пропорциональным распределением нагрузки.

Сокращение длительности переходного процесса в случае положительного скольжения подключаемого генератора по сравнению с длительностью переходного процесса в случае отрицательного скольжения этого генератора наиболее просто можно объяснить на примере двух генераторов.

На рис. 6.1, а показаны регуляторные характеристики работающего (1) и включаемого (2' и 2'') генераторов. Работающий генератор имеет нагрузку и скорость вращения, определяемые на графике рис. 6.1, а точкой А. Подключаемый генератор имеет регуляторную характеристику с большим статизмом и может включаться на параллельную работу с первым генератором либо с положительным скольжением (прямая 2'), либо с отрицательным скольжением (прямая 2'').

Рис. 6.1, б отражает такие же условия исходного режима и включения генераторов на параллельную работу, но относится к случаю, когда подключаемый генератор имеет регуляторную характеристику с меньшим статизмом, чем работающий.

При включении генератора с положительным скольжением его скорость вращения должна измениться на величину $\Delta\omega_1$ – от значения, определяемого точкой Б' (см. рис. 6.1, а и б), до значения скорости в рабочем режиме, характеризуемом точкой В. В случае включения генератора с отрицательным скольжением скорость вращения должна измениться на величину $\Delta\omega_2$ – от значения, определяемого точкой Б'', до значения, соответствующего точке А.

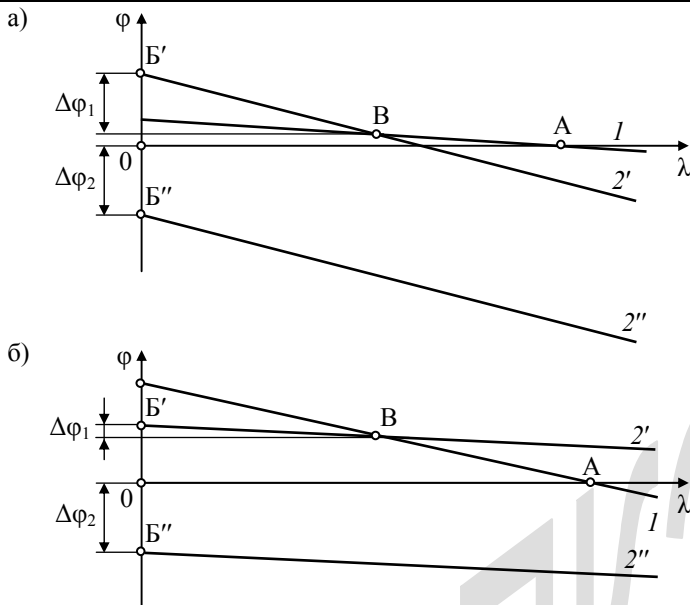


Рис. 6.1. Взаимное расположение регуляторных характеристик генераторных агрегатов до и после их синхронизации методами самосинхронизации и синхронизации через сопротивление. А, Б – точки режимов работы агрегатов в момент включения на параллельную работу; В – точка режима работы после синхронизации агрегатов

Как видно из рисунка, всегда имеет место соотношение $\Delta\varphi_1 < \Delta\varphi_2$ независимо от величины статизма регуляторной характеристики подключаемого и работающего агрегатов. Поэтому длительность процесса синхронизации генераторов при прочих равных условиях в случае отрицательного скольжения будет большей. Когда скольжение имеет положительный знак, включенный генератор принимает на себя нагрузку, работающий же генератор, наоборот, отдает часть нагрузки – это способствует быстрой синхронизации генераторов.

Величина приращения необходимой скорости вращения включаемого агрегата может быть легко определена в каждом отдельном случае при помощи зависимости

$$\varphi_{y2} = \varphi_{\text{ном}} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \lambda_1,$$

где λ_1 – нагрузка агрегата.

Формула позволяет по величине нагрузки работающего агрегата определить скорость вращения включаемого генератора, необходимую по условиям самосинхронизации с учетом степени неравномерности характеристик регуляторов агрегатов.

Динамика процесса синхронизации генератора может быть исследована при включении генераторного агрегата на шины энергосистемы. В этом случае движение агрегата может рассматриваться относительно вектора электромагнитного поля, вращающегося с постоянной синхронной скоростью. Дифференциальные уравнения, описывающие движение агрегата с учетом влияния автоматических регуляторов скорости и напряжения, а также различных возмущающих факторов, имеют достаточно высокий порядок, что затрудняет исследование процесса в общем виде.

В случае пренебрежения влиянием электромагнитных процессов уравнение движения агрегата, на вал которого при параллельном включении с энергосистемой в общем случае действуют различные возмущающие силы, будет иметь такой вид

$$J\Delta\ddot{\theta} + D\Delta\dot{\theta} + C\Delta\theta = \Delta M + \sum_v \Delta M_v \sin(v\omega t + \varphi_v),$$

где ΔM_v – амплитуда возмущающей силы v -й гармоники; $v\omega$ и φ_v – соответственно угловая частота и угол сдвига фазы v -й гармоники.

Если в соответствии с ранее введенными условными обозначениями (см. гл. 5) принять $\alpha = D(2J)^{-1}$, $\omega_c^2 = CJ^{-1}$, $\Delta m = \Delta MJ^{-1}$, $\Delta m_v = \Delta M_v J^{-1}$, а также заменить синус суммы углов суммой функций, то после преобразования этого уравнения по Лапласу изображение обобщенной координаты движения будет иметь вид

$$\Delta\theta(s) = \frac{1}{B(s)} \left\{ \Delta\theta_0(s+a) + \frac{\Delta m}{s} + \sum_v \Delta m_v \frac{a_1 s + a_2}{s^2 + (v\omega)^2} \right\},$$

где $B(s) = s^2 + 2\alpha s + \omega_c^2$ – характеристическая функция системы,

$$a = 2\alpha + \frac{1}{a_0}, \quad a_1 = \sin \varphi_v, \quad a_2 = v\omega \cos \varphi_v, \quad a_0 = \frac{\Delta\theta_0}{\Delta\dot{\theta}_0}.$$

Для обычного соотношения параметров синхронного агрегата корни алгебраического уравнения $B(s) = 0$ являются комплексными сопряженными

$$s_1 = -\alpha + j\beta, \quad s_2 = -\alpha - j\beta,$$

где $\beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}$ и поэтому обратное \mathcal{L} -преобразование изображения угла вылета дает следующую расчетную формулу

$$\begin{aligned} \Delta\theta(t) = & \frac{\Delta m}{\omega_c^2} + \left\{ \Delta\theta_0 \left[\rho_0 \cos(\beta t + \psi_0) + \frac{2\alpha}{\beta} \sin \beta t \right] + \right. \\ & + \frac{\Delta\dot{\theta}_0}{\beta} \sin \beta t - \frac{\Delta m}{\beta\omega_c} \cos(\beta t - \psi_0) + \sum_v \Delta m_v \rho_c \cos(\beta t - \psi_c) \left. \right\} e^{-\alpha t} + \\ & + \sum_v \Delta m_v \rho_B \sin(v\omega t + \psi_B), \end{aligned} \quad (6.1)$$

где амплитудные значения и углы сдвига фаз означают

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2}; \quad \rho_B = \frac{1}{\sqrt{(\omega_c^2 - v^2\omega^2)^2 + 4\alpha^2 v^2 \omega^2}}; \\ \rho_c &= \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{(a_2 - \alpha a_1)^2 + \beta^2 \sin^2 \varphi_v}{(v^2\omega^2 + \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2 \beta^2}}; \\ \psi_0 &= \arctg \frac{\alpha}{\beta}; \quad \psi_B = \varphi_v - \arctg \frac{2\alpha v \omega}{\omega_c^2 - v^2 \omega^2}; \\ \psi_c &= \arctg \frac{a_2 - \alpha a_1}{\beta \sin \varphi_v} - \arctg \frac{2\alpha \beta}{v^2 \omega^2 + \alpha^2 - \beta^2}. \end{aligned}$$

Полученная формула позволяет рассчитать движение ротора синхронного агрегата при включении его на параллельную работу с энергосистемой с учетом возмущающих сил со стороны двигателя. Если влиянием последних можно пренебречь, то электромеханический переходный процесс будет описываться выражением

$$\begin{aligned} \Delta\theta(t) = & \frac{\Delta m}{\omega_c^2} \left\{ \Delta\theta_0 \left[\rho_0 \cos(\beta t + \psi_0) + \frac{2\alpha}{\beta} \sin \beta t \right] + \right. \\ & + \frac{\Delta\dot{\theta}_0}{\beta} \sin \beta t - \frac{\Delta m}{\beta\omega_c} \cos(\beta t - \psi_0) \left. \right\} e^{-\alpha t}, \end{aligned} \quad (6.2)$$

где Δm – величина, пропорциональная нагрузке агрегата, принимаемой им при включении на параллельную работу в соответствии с наклоном регуляторной характеристики.

Из формулы видно, что при достаточной синхронной связи имеет место затухающее колебательное движение с постоянной времени α^{-1} , причем если до нарушения режима ротор генератора испытывал колебательное движение, то начальные условия для нагруженного агрегата в момент нарушения режима суть $\Delta\theta(0) = \Delta\theta_0$ и $\Delta\dot{\theta}(0) = \Delta\dot{\theta}_0$; очевидно, при отсутствии этих колебаний $\Delta\dot{\theta}(0) = 0$.

Начальные условия процесса зависят также от условий включения генератора на параллельную работу, которые в свою очередь определяются выбранным способом синхронизации машины. При любом способе включения генератора величина начального угла вылета ротора не должна превышать предельного значения при данном возбуждении генератора и сопротивлении цепи, а величина начального скольжения $\Delta\dot{\theta}_0 = \omega_{\text{ном}} s_0$ не должна превышать значения, соответствующего опрокидывающему моменту демпферной обмотки по ее спрямленной механической характеристике.

Параметры демпферной обмотки, как видно из полученных формул, в основном определяют скорость протекания переходного процесса, его затухание: чем «жестче» механическая характеристика этой обмотки, тем больше демпферный коэффициент и величина α и, следовательно, тем быстрее протекает процесс.

Параметры генератора, его ток возбуждения и параметры соединительной цепи между шинами генератора и сетью в основном определяют частоту и размах колебаний как при внезапном изменении вращающего момента, так и при включении генератора на параллельную работу. Как видно из формулы (2.93), индуктивное сопротивление соединительной цепи приводит к уменьшению синхронной жесткости, в результате уменьшается частота колебаний β и возрастает их амплитуда.

При значительной величине реактивного сопротивления рост амплитуды колебаний ротора может привести к нарушению синхронизма. Поэтому при проектировании электроустановок необходимо рассчитывать динамический процесс синхронизации генераторов с учетом сопротивлений кабельных мостов и трансформаторов связи с системой.

§ 6.2. Распределение нагрузки по генераторам при параллельной работе

Регуляторную характеристику любых энергетических двигателей с автоматическим регулятором скорости вращения при рассмотрении их параллельной работы принято представлять в виде прямой линии с указанием в необходимых случаях зоны нечувствительности автоматического регулятора, определяемой величиной ε . В этом случае степень непрямолинейности регуляторной характеристики – мерой отклонения формы последней от идеализированной прямолинейной характеристики, пренебрегают. На рис. 6.2 представлен график регуляторной характеристики, аналитическое выражение которого в общем случае имеет вид

$$\varphi = \pm \varphi_y - \delta \lambda \pm \varepsilon, \quad (6.3)$$

где в системе относительных единиц:

$\varphi = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_{ном}}$ – относительное отклонение скорости вращения вала двигателя (его регулятора); ω_0 – условная синхронная скорость вращения; $\varphi_y = \frac{\omega_y - \omega_0}{\omega_{ном}}$ – относительное отклонение скорости вращения

вала двигателя, задаваемое при помощи устройства для дистанционной ступенчатой или плавной настройки; уставка скорости ω_y может быть выше или ниже условной синхронной; δ – наклон (средний) регуляторной характеристики двигателя (он может быть изменен специальным устройством, например у паровой турбины и у дизелей δ может изменяться в пределах 0–0,08); $\lambda = \frac{P}{P_{ном}}$ – относительное изменение нагрузки на валу агрегата; ε – степень нечувствительности измерителя регулятора, характеризующая неулавливаемую измерителем величину отклонения скорости вращения агрегата (под воздействием случайной причины) в сторону ее увеличения ($+\varepsilon$) или в сторону уменьшения ($-\varepsilon$).

Если регулятор двигателя имеет настройку на синхронную скорость вращения ω_0 , то, очевидно, $\varphi_y = 0$ и выражение (6.3) для регулятора, у которого отсутствует сухое трение ($\varepsilon = 0$), примет вид

$$\varphi = -\delta \lambda.$$

При параллельной работе синхронных агрегатов отклонение скорости вращения всех агрегатов от базисной скорости имеет одно и то же значение: $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_n = \varphi_c$, тогда из (6.6) следует

$$\varphi_c = \frac{\sum_{v=1}^n (\pm\varphi_{yv} \pm \varepsilon_v) \frac{k_v}{\delta_v} - \lambda_\Sigma}{\sum_{v=1}^n \frac{k_v}{\delta_v}}. \quad (6.7)$$

Это выражение позволяет определить величину отклонения скорости вращения всех агрегатов различной номинальной мощности от заданной синхронной скорости в зависимости от величины суммарной нагрузки при известных значениях статизма регуляторов, степени нечувствительности измерителей последних и величины отклонения в настройке скорости. Располагая значением φ_c , можно найти распределение общей нагрузки по отдельным агрегатам

$$\lambda_v = \frac{\pm\varphi_{yv} \pm \varepsilon_v - \varphi_c}{\delta_v}. \quad (6.8)$$

Обычно в практике испытаний и наладки параллельной работы агрегатов встречаются два случая расчетов.

В первом случае испытания (или расчеты) начинают, предварительно полагая режим холостого хода общим для всех агрегатов и принимая величину скорости вращения в этом режиме за базисную ($\omega_y = \omega_0$). Тогда, рассматривая изменение относительного отклонения синхронной скорости вращения при увеличении общей нагрузки, в формуле (6.7) следует положить $\varphi_y = 0$, т. е.

$$\varphi_c = \frac{\sum_{v=1}^n \pm \varepsilon_v \frac{k_v}{\delta_v} - \lambda_\Sigma}{\sum_{v=1}^n \frac{k_v}{\delta_v}}, \quad (6.7, a)$$

и, следовательно, распределение нагрузки по агрегатам определяется выражением

$$\lambda_v = \frac{\pm \varepsilon_v - \varphi_c}{\delta_v}. \quad (6.8, a)$$

Во втором случае, наоборот, за исходный режим принимают режим номинальной нагрузки каждого агрегата. Интерес представляет перераспределение нагрузки по агрегатам в случае уменьшения ее сум-

марного значения. Здесь для проведения расчетов необходимо знать уставки относительной скорости агрегатов φ_y ; их различие обусловлено неодинаковой степенью статизма регуляторных характеристик.

Значения величин φ_y можно определить из (6.3), учитывая, что при равномерном распределении нагрузки

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_q = \frac{\sum_{v=1}^n \lambda_v}{n} = \lambda_0$$

и тогда

$$\pm \varphi_{yv} = \pm \varphi_c + \delta_v \lambda_0 \pm \varepsilon_v. \quad (6.9)$$

Располагая значениями φ_y , можно по формулам (6.7), (6.8) определить изменение синхронной скорости вращения и перераспределение нагрузки по агрегатам в случае увеличения или уменьшения суммарной нагрузки.

Указанные формулы дают возможность решить и более сложные задачи статического режима параллельной работы агрегатов на общую нагрузку. Например, может быть найдено перераспределение нагрузок по агрегатам и изменение синхронной скорости вращения при изменении настройки скорости у одного или у нескольких агрегатов.

Анализ полученных формул, помимо их применения для решения практических задач, дает возможность обосновать требования к автоматическим регуляторам агрегатов, работающих параллельно на общую нагрузку. Прежде всего, представляет интерес требование идентичности регуляторных характеристик агрегатов. В случае удовлетворения этого требования отклонение скорости при нагрузке каждого из n агрегатов, равной λ_Σ , определяется из (6.7) при условии

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = \delta_y \text{ и } \varphi_{y1} = \varphi_{y2} = \dots = \varphi_{yn} = \varphi_y,$$

т. е. предполагается, что все агрегаты имеют регуляторы с одинаковым статизмом и одну и ту же настройку синхронной скорости.

Равенство (6.7) при указанных условиях определяет исходный режим всех параллельно работающих ненагруженных агрегатов с синхронной скоростью вращения. Следовательно, без учета ε имеем

$$\varphi_{ce} = \pm \varphi_y - \frac{\lambda_\Sigma \delta_y}{\sum_{v=1}^n k_v}.$$

В случае неидентичных регуляторных характеристик отклонение скорости вращения определяется из (6.7) при том же исходном режиме

$$\varphi_{cd} = \pm \varphi_y - \frac{\lambda_\Sigma}{\sum_{v=1}^n \frac{k_v}{\delta_v}}.$$

Чтобы в том и другом случае отклонение скорости вращения (частоты) было одним и тем же ($\varphi_{ce} = \varphi_{cd}$), необходимо наличие следующего соотношения между параметрами регуляторных характеристик:

$$\frac{\sum_{v=1}^n k_v}{\delta_y} = \sum_{v=1}^n \frac{k_v}{\delta_v}.$$

Для n агрегатов с равными значениями номинальной мощности это выражение дает следующую зависимость:

$$\frac{n}{\delta_y} = \sum_{v=1}^n \frac{1}{\delta_v}.$$

Последние два равенства показывают, что в случае неидентичных регуляторных характеристик часть значений параметра δ_v будет больше величины δ_y , а часть – меньше этой величины.

Таким образом, если распределение нагрузки по агрегатам при идентичных регуляторных характеристиках, как следует из (6.8, а), происходит равномерно, т. е.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = -\frac{\varphi_c}{\delta_y} = \lambda_y, \quad (6.10)$$

то при неидентичных характеристиках распределение нагрузки не может быть равномерным и величина нагрузки отдельного агрегата определяется зависимостью

$$\lambda_v = -\frac{\varphi_c}{\delta_v}.$$

Отсюда

$$\lambda_v = \frac{\delta_y}{\delta_v} \lambda_y. \quad (6.11)$$

Если считать, что общая нагрузка на агрегаты равна сумме их номинальных мощностей, то из последней зависимости можно установить величину перегрузки агрегатов, у которых $\delta_v < \delta_y$, и, наоборот, недогрузку агрегатов, у которых $\delta_v > \delta_y$.

Выражения (6.8) совместно с (6.10) позволяют определить величину необходимой уставки скорости, т. е. смещение регуляторной характеристики каждого агрегата φ_{yv} , обеспечивающее равнодолевую его нагрузку при заданной величине синхронной скорости вращения, а именно:

$$-\frac{\varphi_c}{\delta_y} = \frac{\pm \varphi_{yv} - \varphi_c}{\delta_v},$$

откуда

$$\varphi_{yv} = \left(1 - \frac{\delta_v}{\delta_y} \right) \varphi_c. \quad (6.12)$$

Следовательно, неидентичность регуляторных характеристик обуславливает либо постоянное наблюдение за распределением нагрузки по агрегатам при ее изменении, либо завышение величины мощности или количества агрегатов во избежание перегрузки их части, либо, наконец, применение дополнительных автоматических устройств для обеспечения равномерного распределения нагрузки.

Вернемся к параметру ε . Качественное и количественное влияние последнего на режим параллельной работы агрегатов можно проследить при помощи выражения (6.7). Обозначая изменение относительного отклонения скорости вращения агрегатов, вызываемое влиянием ε , через $\Delta\varphi_\varepsilon$, получим

$$\Delta\varphi_\varepsilon = \varphi_{ce} - \varphi_c = \frac{\sum_{v=1}^n \pm \varepsilon_i \frac{k_v}{\delta_v}}{\sum_{v=1}^n \frac{k_v}{\delta_v}}. \quad (6.13)$$

При идентичных регуляторных характеристиках величина отклонения $\Delta\varphi_\varepsilon$, как следует из этой формулы, определяется степенью «разброса» значений номинальных мощностей агрегатов и нечувствительностью их регуляторов

$$\Delta\varphi_\varepsilon = \frac{\sum_{v=1}^n \pm \varepsilon_v k_v}{\sum_{v=1}^n k_v}. \quad (6.13, a)$$

Если агрегаты одинаковой номинальной мощности, то величина отклонения скорости вращения зависит только от «разброса» значений ε_v

$$\Delta\varphi_\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n \pm \varepsilon_v. \quad (6.13, б)$$

Отклонение синхронной скорости вращения на величину $\Delta\varphi_\varepsilon$ определяет перераспределение нагрузки по агрегатам. Например, нагрузка v -го агрегата изменится на величину

$$\Delta\lambda_{v\varepsilon} = \lambda_{v\varepsilon} - \lambda_v = \frac{\pm \varepsilon_v - (\varphi_{с\varepsilon} - \varphi_c)}{\delta_v},$$

и, подставляя (6.13), получаем

$$\Delta\lambda_{v\varepsilon} = \pm \frac{\varepsilon_v}{\delta_v} - \frac{\sum_{v=1}^n \pm \varepsilon_v \frac{k_v}{\delta_v}}{\delta_v \sum_{v=1}^n \frac{k_v}{\delta_v}}. \quad (6.14)$$

Отсюда для случая идентичных регуляторных характеристик генераторов равной мощности величина изменения нагрузки любого агрегата определяется формулой

$$\Delta\lambda_{v\varepsilon} = \pm \frac{\varepsilon_v}{\delta_y} - \frac{\sum_{v=1}^n \pm \varepsilon_v k_v}{\delta_y \sum_{v=1}^n k_v}, \quad (6.14, а)$$

а если одинаковы и номинальные значения мощностей агрегатов, то

$$\Delta\lambda_{v\varepsilon} = \pm \frac{\varepsilon_v}{\delta_y} - \frac{\sum_{v=1}^n \pm \varepsilon}{n\delta_y}. \quad (6.14, б)$$

Формулы (6.13) и (6.14) показывают, что при отсутствии зоны нечувствительности у регуляторов параллельно работающих агрегатов скорость вращения последних и распределение нагрузки между ними остаются неизменными.

Заметим, что полученные зависимости пригодны для расчета распределения нагрузки между энергетическими двигателями электростанций не только переменного, но и постоянного тока, а также в силовых установках, когда несколько двигателей отдают энергию через редукторную передачу на общий вал.

Особо важное значение настройки регуляторов скорости и систем распределения нагрузок по генераторам имеют в мощных энергосистемах, работающих параллельно.

Пример 6.1. Расчет распределения нагрузки между тремя агрегатами, работающими на общую нагрузку.

Исходные данные

Номер агрегата	Номинальные значения		Статизм регулятора δ , о. е.	Степень нечувствительности регулятора ε , о. е.	Относительная величина мощности агрегата k , о. е.
	мощность агрегата $P_{\text{ном}}$, кВт	частота вращения ω , рад/с			
1	300	52,3	0,05	0,006	0,24
2	750	157	0,02	0,005	0,6
3	200	78,5	0,03	0,004	0,16

Исходный режим – ненагруженные агрегаты включены на параллельную работу

Задача первая. Установить предельную величину суммарной нагрузки, которую могут принять агрегаты без изменения настройки (без перестановки их регулирующих органов) и определить степень нагрузки каждого агрегата при номинальной суммарной мощности.

Регулятор агрегата 2 имеет наименьшую величину статизма и поэтому при увеличении общей нагрузки данный агрегат будет принимать нагрузку в большей степени, чем все остальные. При номинальной его загрузке ($\lambda_2 = 1$) синхронная скорость вращения снизится согласно формуле (6.3) без учета ε на

$$\varphi_c = -\delta_2 \lambda_2 = -0,02$$

и тогда агрегаты 1 и 3 при отсутствии влияния ε примут по (6.8, а) соответственно нагрузку

$$\lambda_1 = \frac{-\varphi_c}{\delta_1} = 0,4; \quad \lambda_3 = \frac{-\varphi_c}{\delta_3} = 0,667.$$

Предельная величина суммарной нагрузки определится из (6.5)

$$\lambda_{\Sigma \max} = k_1 \lambda_1 + k_2 \lambda_2 + k_3 \lambda_3 = 0,803,$$

т. е. агрегаты без перестановки регулирующих органов могут принять 80 % нагрузки от суммарного значения их номинальной мощности.

При нагрузке агрегатов номинальной суммарной мощностью для случая ε со знаком плюс у всех трех регуляторов синхронная скорость изменится в соответствии с формулой (6.7) на

$$\varphi_c = \frac{+\varepsilon_1 \frac{k_1}{\delta_1} + \varepsilon_2 \frac{k_2}{\delta_2} + \varepsilon_3 \frac{k_3}{\delta_3} - \lambda_\Sigma}{\frac{k_1}{\delta_1} + \frac{k_2}{\delta_2} + \frac{k_3}{\delta_3}} = -0,0199,$$

для случая ε со знаком минус – на $\varphi_c = -0,0299$ и для случая, когда влияние ε пренебрежимо мало – на $\varphi_c = -0,0249$. Тогда нагрузка распределится между агрегатами по (6.8) соответственно степени нечувствительности следующим образом:

Степень нечувствительности	λ_1	λ_2	λ_3
$+\varepsilon$	0,518	1,245	0,786
$-\varepsilon$	0,478	1,243	0,863
$\varepsilon = 0$	0,498	1,235	0,83

Отсюда видно, что при номинальной величине суммарной нагрузки генератор 2 будет перегружен на 25 %, а генераторы 1 и 3 будут недогружены примерно на 50 % и 15–20 % соответственно. Из этой же таблицы можно установить, что при изменении степени нечувствительности измерителя регулятора изменения нагрузки каждого из агрегатов могут достигать 8 %.

Задача вторая. Определить необходимые уставки скорости (путем перестановки регулирующих органов), обеспечивающие нагрузку всех агрегатов номинальной мощностью.

Как было установлено выше, при номинальной нагрузке агрегата 2 агрегаты 1 и 3 нагружены соответственно на 40 и 66,7 %. Чтобы эти агрегаты приняли свою номинальную нагрузку ($\lambda_{1\text{ном}} = 1$ и $\lambda_{3\text{ном}} = 1$) при отклонении синхронной скорости вращения на $\varphi_c = -0,02$, следует переставить их регулирующие органы так, чтобы обеспечить значение φ_y , определяемое из формулы (6.9). Пренебрегая влиянием ε , получим

$$\varphi_{y1} = \varphi_c + \delta_1 \lambda_\Sigma = 0,03 \text{ и } \varphi_{y3} = 0,01.$$

Производя проверку по формуле (6.8), имеем

$$\lambda_1 = \frac{\varphi_{y1} - \varphi_c}{\delta_1} = 1 \text{ и } \lambda_3 = 1.$$

Таким образом, у агрегатов 1 и 3 необходимо «поднять» характеристики соответственно на 3 и 1 % относительно значения скорости вращения на холостом ходу.

Величины φ_{y1} и φ_{y3} можно найти иным путем – непосредственно из формулы (6.12)

$$\varphi_{y1} = \left(1 - \frac{\delta_1}{\delta_2}\right) \varphi_c = 0,03 \text{ и } \varphi_{y3} = \left(1 - \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) \varphi_c = 0,01.$$

§ 6.3. Синхронизм генераторов

Движение синхронных агрегатов с момента включения на параллельную работу может быть описано дифференциальными уравнениями Лагранжа (2.92), полученными для синхронного генератора с энергетическим двигателем в форме (2.73). Общую методику исследования синхронизма генераторов рассмотрим на примере двух генераторов, один из которых включается на параллельную работу с другим [41]. Это более общая задача, чем синхронизм генератора с шинами энергосистемы.

Движение двух синхронных агрегатов в общем виде на основе (2.92) описывается системой дифференциальных уравнений (2.88)

$$\begin{aligned} J_1 \Delta \ddot{\theta}_1 + D_1 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) + C_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \Delta M_{д1} - \Delta M_{r1}; \\ J_2 \Delta \ddot{\theta}_2 - D_2 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) - C_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \Delta M_{д2} - \Delta M_{r2}. \end{aligned}$$

Для состояния покоя из этой системы вытекают равенства

$$\left. \begin{aligned} C_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \Delta M_{д1} - \Delta M_{r1}; \\ -C_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \Delta M_{д2} - \Delta M_{r2}, \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

откуда $-\Delta M_{д2} = \Delta M_{д1}$ и $\Delta M_{r2} = -\Delta M_{r1}$.

По условиям колебаний упругой системы с известной жесткостью это означает равенство прилагаемой силы и силы реакции; по условиям параллельной работы генераторов это означает, что нагрузки генераторов равны по величине и противоположны по знаку. Следовательно, при постоянной общей нагрузке изменение нагрузки на $+\Delta M$ у одного генератора будет равнозначно изменению нагрузки на $-\Delta M$ у другого генератора, если они имеют общую синхронную жесткость C_{12} (см.2.87).

Из равенств (6.15) получаем следующую зависимость:

$$\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2 = \frac{\Delta M}{C_{12}}. \quad (6.16)$$

Замена синхронной жесткости каждой машины общей синхронной жесткостью может быть интерпретирована механическим аналогом, состоящим из двух маховиков, соединенных составным валом

(рис. 6.3, а). Если к маховикам приложены противоположно направленные силы $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, то при разных жесткостях участков составного вала C_1 и C_2 справедливо равенство

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 = C_1\Delta\theta'_1 + C_2\Delta\theta'_2.$$

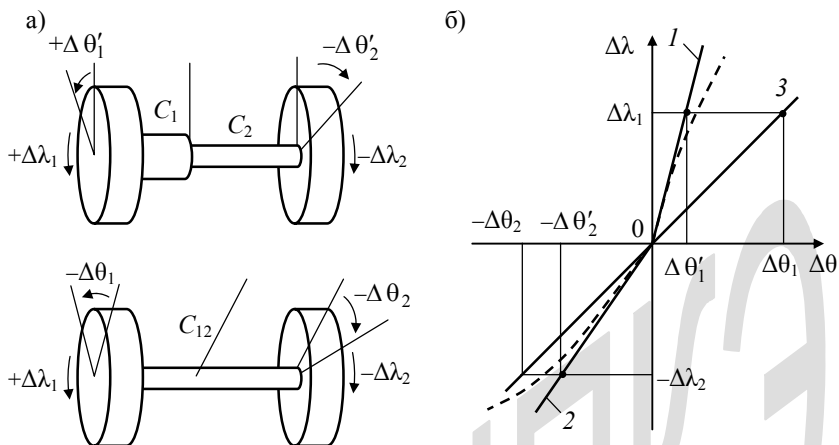


Рис. 6.3. Механический аналог параллельного соединения синхронных машин (а) и его характеристики (б)

При замене составного вала единым эквивалентным валом, жесткость которого C_{12} будет определяться формулой (2.87), действие тех же сил обусловит отклонение маховиков на одинаковые углы, отличные от предыдущих, но сумма углов отклонения в том и другом случае будет одной и той же, т. е.

$$\Delta\theta'_1 + \Delta\theta'_2 = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2.$$

Действие приложенных сил определится формулой, подобной (6.16), с учетом направления сил

$$\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 = \frac{\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2}{C_{12}}, \quad (6.17)$$

и так как $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2$, то

$$C_{12} = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\theta_1} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\theta_2}.$$

На основании приведенных зависимостей на рис. 6.3, б построены характеристики отклонения углов для составного (графики 1, 2) и эк-

вивалентного (график 3) вала механического аналога. Эти графики могут заменять угловые характеристики отдельно взятых двух синхронных машин (штриховые кривые) и их эквивалентную характеристику при параллельной работе.

Возвращаясь к движению синхронных агрегатов, следует отметить, что система дифференциальных уравнений (2.88) описывает процесс при постоянных значениях вращающих моментов, т. е. без учета влияния автоматических регуляторов напряжения и частоты. Следовательно, система уравнений должна быть дополнена уравнениями, учитывающими регуляторы возбуждения (5.39) и скорости (5.49). Так как в данном случае определяется «прочность» синхронной связи между машинами, целесообразно ввести ряд упрощений и пренебречь некоторыми второстепенными параметрами рассматриваемой системы. Можно пренебречь влиянием неравномерности вращения двигателя, запаздыванием регулирующих импульсов и считать, что регулятор скорости – прямого действия с малой массой измерителя и малым влиянием катаракта. При этих условиях общая система уравнений будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} J_1 \Delta \ddot{\theta}_1 + D_1 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) + C_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \Delta \xi_{c1} - C_{B1} \Delta E_{q1} ; \\ J_2 \Delta \ddot{\theta}_2 - D_2 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) - C_{12} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \Delta \xi_{c2} - C_{B2} \Delta E_{q2} ; \\ T_{d01} \Delta \dot{E}_{q1} + \Delta E_{q1} &= k_{\lambda 1} \Delta \dot{\theta}_1 + k_{\theta 1} \Delta \theta_1 ; \\ T_{d02} \Delta \dot{E}_{q2} + \Delta E_{q2} &= k_{\lambda 2} \Delta \dot{\theta}_2 + k_{\theta 2} \Delta \theta_2 ; \\ \delta_{r1} \Delta \xi_{c1} - \frac{1}{p_1 \omega_{ном1}} \Delta \dot{\theta}_1 - k_{\lambda 1} \delta_{r1} C_1 \Delta \theta_1 - \Delta \varphi_{y1} &= 0 ; \\ \delta_{r2} \Delta \xi_{c2} - \frac{1}{p_2 \omega_{ном2}} \Delta \dot{\theta}_2 - k_{\lambda 2} \delta_{r2} C_2 \Delta \theta_2 - \Delta \varphi_{y2} &= 0 . \end{aligned} \right\} (6.18)$$

При помощи преобразования Лапласа из этой системы линейных уравнений можно определить сумму обобщенных координат – углов отклонения роторов машин в виде их изображений

$$\Delta \theta_1(s) - \Delta \theta_2(s) = \frac{A_1(s^6) - A_2(s^6)}{sB(s^6)}, \quad (6.19)$$

где $A_1(s^6)$, $A_2(s^6)$, $B(s^6)$ – полные многочлены шестой степени.

Дальнейшее решение системы уравнений связано с определением корней алгебраического уравнения шестой степени $B(s^6) = 0$.

При исследовании и расчете переходного процесса для конкретных синхронных агрегатов, параметры которых известны, корни этого уравнения могут быть вычислены приближенными методами.

Для определения условий надежной синхронизации следует определить установившуюся часть общего решения системы уравнений (6.18). При помощи этой части решения можно найти искомую величину синхронной связи, удерживающую генераторы в синхронизме.

В соответствии с теоремой о предельном значении [26]

$$\lim_{s \rightarrow 0} sF(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t),$$

где $F(s)$ – изображение функции $f(t)$, установившаяся часть решения (6.19) будет иметь вид

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\Delta\theta_1(t) - \Delta\theta_2(t)] = \frac{A_1(s^0) - A_2(s^0)}{B(s^0)}.$$

Подставляя в правую часть свободные члены многочленов $A_1(s^6)$, $A_2(s^6)$, $B(s^6)$, можно получить выражение, отражающее величину отклонения углов роторов агрегатов в зависимости от их параметров и от величины синхронной жесткости между машинами,

$$\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2 = \frac{\Delta\varphi_{y1}}{\delta_{r1}C_{\Sigma 1}} - \frac{\Delta\varphi_{y2}}{\delta_{r2}C_{\Sigma 2}}, \quad (6.20)$$

где

$$C_{\Sigma 1} = C_{12} - k_{\lambda 1}C_1 + C_{B1}k_{\theta 1};$$

$$C_{\Sigma 2} = C_{12} - k_{\lambda 2}C_2 + C_{B2}k_{\theta 2}.$$

Из равенства (6.20) видно, что при изменении отклонений регулировочных органов двигателей изменяются отклонения углов вылета роторов генераторов. Рис. 6.4 иллюстрирует влияние координаты регулирующего органа на нагрузку параллельно работающих генераторов в соответствии с угловыми характеристиками последних.

На рисунке в системе координат P, θ показаны угловые характеристики генераторов 1 и 2; в системе координат λ, φ – регуляторные характеристики двигателей тех же генераторов. Генераторный агрегат 1 нагружен номинальной мощностью ($P = 0,8$; $\lambda = 1$), имеет синхронную скорость вращения ($\varphi = 0$) и его регуляторная характеристика имеет статизм, соответствующий уставке отклонения скорости φ_{y1} . Генератор 2 имеет меньшую нагрузку, но больший угол вылета ротора θ_{20} , а регуляторная характеристика его энергетического двигателя имеет больший статизм, чем у генератора 1.

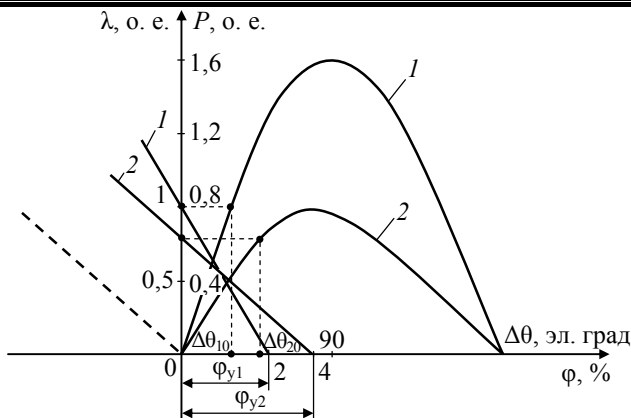


Рис. 6.4. Совмещенные регуляторные характеристики двигателей и угловые характеристики генераторов 1 и 2 при параллельной работе

Как показано на рисунке штриховой линией, при перестановке регулирующего органа агрегата 2 в положение, соответствующее синхронной скорости, угол вылета ротора генератора становится равным нулю, т. е. генератор полностью разгружается.

Полученная зависимость (6.20) подобна (6.17), но отражает отклонение роторов генераторов с учетом влияния регуляторов скорости и напряжения. При изменении нагрузки одного из генераторов имеет место изменение нагрузки другого генератора, но с противоположным знаком, и поэтому

$$\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 = \frac{\Delta\lambda_1}{C_{\Sigma 1}} + \frac{\Delta\lambda_2}{C_{\Sigma 2}}, \quad (6.21)$$

где относительные отклонения характеристик регуляторов представлены отклонениями нагрузок, ибо $\Delta\varphi_y = \delta, \Delta\lambda$. Для одноимпульсных регуляторов скорости ($k_\lambda = 0$) и при отсутствии системы саморегулирования у генераторов ($k_\theta = 0$) последняя зависимость принимает вид (6.17).

Равенство (6.20) показывает, что наличие двухимпульсного регулятора скорости вызывает сужение пределов отклонения углов вылета роторов, а наличие системы саморегулирования увеличивает пределы отклонения этих координат.

Максимально допустимые углы отклонения роторов генераторов по условию устойчивости – условию сохранения синхронизма – должны определяться по значению синхронной жесткости при максимальной величине синхронной мощности генераторов для известного возбуждения

и реактивного сопротивления между ними. Это соответствует критерию устойчивости синхронной машины, включенной на шины энергосистемы,

$$\dot{P}(\theta) = 0.$$

Угол вылета, соответствующий пределу мощности, вычисляется из этого уравнения следующим образом [41]:

$$\theta_{\max} = \arccos\left(\sqrt{e_x^2 + 0,5} - e_x\right), \quad (6.22)$$

где коэффициент e_x в случае включения генератора на сеть через индуктивное сопротивление равен

$$e_x = \frac{x_{qp}E_{q0}}{4(x_d - x_q)U}.$$

Однако при исследовании устойчивого синхронизма параллельно включенных машин по величине синхронной жесткости в качестве предельного значения угла необходимо принимать значение, соответствующее пределу мощности P_{\max} , вычисленному для данной величины синхронной жесткости. В этом случае предельное отклонение роторов определяется так

$$\Delta\theta_{\text{пр}} = \frac{P_{\max} - P_0}{C_0}. \quad (6.23)$$

В качестве иллюстрации на рис. 6.5 показаны характеристики синхронных машин и допустимые предельные углы отклонения роторов для случая параллельной работы ненагруженного генератора с генератором, несущим номинальную нагрузку.

Если величина нагрузки превзойдет предельное значение мощности генератора, последний выйдет из синхронизма; в случае двух генераторов их параллельная работа нарушается. Следовательно, определение условий устойчивого синхронизма генераторов должно производиться с учетом максимально возможного перераспределения нагрузки по агрегатам. Перераспределение нагрузки у параллельно работающих генераторов может быть вызвано различными причинами, в том числе отклонением регулирующих органов вследствие имеющейся у них нечувствительности. Так, например, если степень нечувствительности регуляторов составляет $\pm \varepsilon$, то при степени неравномерности характеристики регулятора δ_r отклонение нагрузки составит $\pm \Delta\lambda = \pm \varepsilon\delta_r^{-1}$. Для любого числа генераторных агрегатов можно при помощи формулы (6.14) установить величины перераспределения нагрузки. Для запаса в расчете целесообразно предельные углы отклонения роторов определить по формуле (6.23).

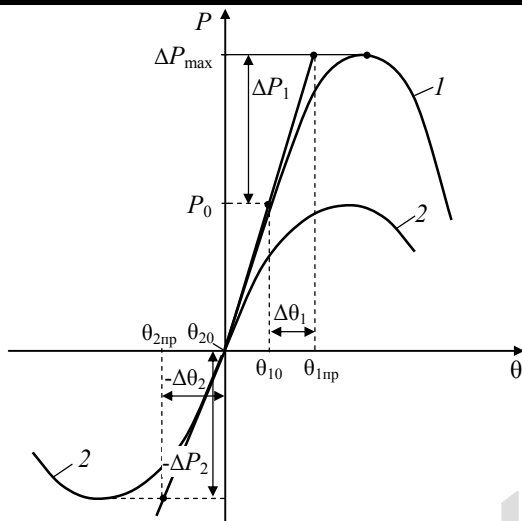


Рис. 6.5. Угловые характеристики генераторов при параллельном соединении:
1 – генератор с номинальной нагрузкой;
2 – генератор без нагрузки

С учетом вышеуказанных замечаний для устойчивого синхронизма генераторных агрегатов с автоматическими регуляторами скорости и напряжения должно соблюдаться неравенство

$$C_{\Sigma 1} C_{\Sigma 2} \geq \frac{C_{\Sigma 2} \Delta P_1 + C_{\Sigma 1} \Delta P_2}{\Delta \theta_{12\text{пр}}}, \quad (6.24)$$

где $\Delta \theta_{12\text{пр}} = \Delta \theta_{1\text{пр}} + \Delta \theta_{2\text{пр}}$ – сумма предельно допустимых отклонений углов роторов машин.

В случае одноимпульсного регулятора скорости и при отсутствии системы саморегулирования это неравенство будет иметь вид

$$C_{12} \geq \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{\Delta \theta_{12\text{пр}}}. \quad (6.24, a)$$

Условие (6.24) является условием надежной синхронной связи между параллельно включенными генераторными агрегатами при отклонении нагрузки величиной $\Delta P_1 = -\Delta P_2$. Если это неравенство не соблюдается, то генераторные агрегаты выпадают из синхронизма.

Экспериментальная проверка действенности критерия синхронной связи генераторов, который здесь положен в основу оценки устойчивого синхронизма, производилась на агрегатах ДГТ–300, дизели которых 6 ЧН 25/34 были укомплектованы генераторами МС 375–500 мощностью 300 кВт с машинным возбуждением.

Эксперимент проводился следующим образом. В режимах параллельной работы генераторов с общей нагрузкой 300 кВт при $\cos \varphi = 1$, с нагрузкой 390 кВт·А при $\cos \varphi = 0,385$ и в режиме холостого хода возбуждение генераторов снижалось до момента выпадения их из синхронизма, а затем повышалось до тех пор, пока не наступала самосинхронизация машин. Двигатели имели автоматические регуляторы с одинаковой степенью неравномерности 4,5 %. Весь процесс, включая нарушение между генераторами синхронной связи и ее восстановление, осциллографировался.

Проверка критерия синхронной связи производилась для значений токов возбуждения генераторов и напряжения на шинах в момент нарушения связи и в момент ее восстановления. Для этих моментов времени рассчитывалось предельное значение мощности и значение синхронной жесткости каждой машины. Это значение мощности определялось по формуле (1.18) для максимального значения угла, вычисленного по (6.22), при значениях напряжения и токов возбуждения, полученных из осциллограмм.

Для случая активной нагрузки машин синхронные жесткости определялись из условия равномерного распределения нагрузки по машинам. Так как регуляторы имели степень нечувствительности 0,6 %, то принималось во внимание возможное перераспределение по машинам нагрузки величиной $\pm \Delta \lambda = \pm \varepsilon \delta_r^{-1} = 0,60 \cdot 0,22 = 0,133$.

На рис. 6.6 показаны угловые характеристики испытываемых генераторов 1 и 2 при снижении возбуждения и характеристики регуляторов дизелей на момент нарушения синхронизма агрегатов, построенные по осциллограммам. Из рисунка видно, что при условии равномерного распределения нагрузки (точка H) максимальная мощность по угловой характеристике второй машины значительно меньше ее нагрузки и поэтому происходит нарушение синхронизма. При отклонении характеристик регуляторов в пределах зоны нечувствительности ($\pm \varepsilon$) величина нагрузки той и другой машины (точки H_1 и H_2) также оказывается больше предельных значений мощности при данном возбуждении – и в этом случае тоже происходит нарушение синхронизма.

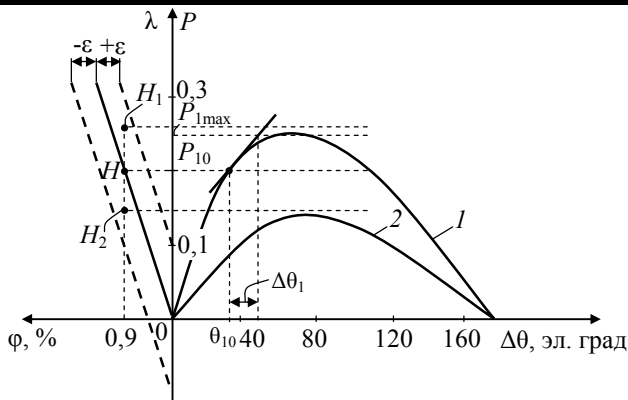


Рис. 6.6. Графики, иллюстрирующие нарушение синхронизма при уменьшении возбуждения двух дизель-генераторов МС 375–500, имеющих регуляторы скорости с одинаковой степенью неравномерности 4,5 % и степенью нечувствительности $\epsilon = \pm 0,6 \%$

Величины синхронных жесткостей машин вычислялись по формуле (2.69). Для активной нагрузки угол вылета ротора находился по второй из формул (1.1), в которой величина нагрузки определялась так

$$z_H = \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 \frac{P_{\text{Г.НОМ}} \cos \varphi_H}{P_H \cos \varphi_{\text{Г.НОМ}}}$$

В остальных случаях синхронные жесткости вычислялись для угла вылета ротора, равного нулю. Общая синхронная жесткость определялась по формуле (2.87).

Отклонение углов вылета роторов машин определялось для известных значений синхронных жесткостей по допустимому отклонению нагрузки в данном режиме: $\Delta\theta = C^{-1} \Delta P$ [41].

Экспериментальные данные и результаты расчета нарушения и восстановления синхронизма двух дизель-генераторов ДГТ-300 помещены в табл. 6.1.

Согласно неравенству (6.24, а) в случае нагруженных генераторов (мощностью 300 кВт при $\cos \varphi = 1$) нарушение синхронизма должно было наступить при $C_{12} < 0,117$. Результаты опыта (см. табл. 6.1) показывают, что нарушение синхронизма произошло при общей синхронной жесткости $C_{12} = 0,06$.

У генераторов, нагруженных реактивной нагрузкой 390 кВ·А, нарушение синхронизма не происходило даже при более низких значениях токов возбуждения, чем в первом случае. Расчеты показывают, что

минимальное значение общей синхронной жесткости составило 0,038, а по условию (6.24, а) оно могло быть еще меньше – 0,017.

Таблица 6.1

	Опыт				Расчет										
	Величина возмущения при нарушении и восстановления синхронизма генератора, о. е.		Напряжение на шинках, о. е.	Общая нагрузка при данном напряжении, о. е.	Максимальный угол вылета ротора генератора, рад		Пределная мощность генератора, о. е.		Синхронная жесткость генератора, о. е.		Общая синхронная жесткость, о. е.	Пределные углы вылета роторов генераторов, рад.			
	1	2			1	2	1	2	1	2		1	2		
Режимы работы генераторов															
	Общая нагрузка 300 кВт, $\cos \varphi = 1$:														
	уменьшение возбуждения		0,583	0,288	0,495	0,396	1,27	1,12	0,245	0,135	0,117	0,121	0,4	0,4	
	увеличение возбуждения		0,322	0,219	0,298	0,071	1,26	1,17	0,082	0,06	0,106	0,082	0,78	0,72	
Общая нагрузка 390 кВ·А, $\cos \varphi = 0,385$:															
	уменьшение возбуждения		0,34	0,22	0,255	0,026	1,3	1,21	0,073	0,049	0,091	0,066	0,038	0,8	0,74
Холостой ход:															
	уменьшение возбуждения		0,41	0,27	0,395	—	1,25	1,15	0,14	0,097	0,18	0,136	0,078	0,77	0,71
	увеличение возбуждения		0,224	0,125	0,212	—	1,26	1,12	0,041	0,026	0,053	0,04	0,023	0,77	0,66
Примечание. В режиме работы генераторов с общей нагрузкой 390 кВ·А и $\cos \varphi = 0,385$ синхронная связь не нарушалась, поэтому параметры режима при увеличении возбуждения не фиксировались.															

Наконец, у генераторов без нагрузки нарушение синхронизма происходило при значении $C_{12} = 0,078$, что было меньше значения 0,143, вычисленного по (6.24, а).

По указанному критерию можно судить о возможности восстановления синхронизма генераторов. Из табл. 6.1 видно, что при увеличении возбуждения восстановление синхронной связи генераторов, на шины которых была включена активная нагрузка, произошло при значении общей синхронной жесткости 0,046. По критерию (6.24, а) эта величина должна превосходить 0,047. Совпадение, как видим, хорошее.

Восстановление синхронизма генераторов, на холостом ходу произошло при значении общей синхронной жесткости 0,023, а по критерию (6.24, а) режим параллельной работы может быть восстановлен, если будет $C_{12} > 0$.

При оценке нарушения или восстановления синхронной связи генераторов следует учитывать влияние степени нечувствительности регуляторов скорости их двигателей на отклонение нагрузки. Это влияние выражается в том, что один из агрегатов, если он не имеет нагрузки, может перейти из генераторного режима в двигательный с потреблением из сети мощности, например, дизелем до 0,2 – 0,25 номинальной.

Вышеуказанные результаты расчетов показывают, что оценка нарушения и восстановление синхронизма на примере дизель-генераторов для различных видов нагрузки по критерию (6.24, а) подтверждается экспериментальными данными.

§ 6.4. Синхронизация генераторов

Самосинхронизация генераторов

Включение генераторов на параллельную работу методом самосинхронизации приводит к резкому сокращению длительности этой операции, но может вызывает значительное снижение напряжения на шинах электростанции.

Метод самосинхронизации генераторов заключается в следующем. Подключаемый генератор без возбуждения, разгоняется до скорости, близкой к синхронной, затем включается на шины с одновременным включением контура возбуждения. В момент включения генератора на шины в обмотку ротора немедленно подается возбуждение, величина которого практически равна величине реакции якоря генератора. Это вызывает быстрое протекание процесса синхронизации и быструю ликвидацию провала напряжения.

Как показывают экспериментальные исследования, переходный процесс при самосинхронизации генераторов характеризуется следующими особенностями: длительность сверхпереходного процесса ничтожна; снижение напряжения на шинах электростанции вплоть до момента его восстановления происходит без явно выраженных колебаний независимо от значения начального скольжения, находящегося в пределах от 0 до 5 %. Если включение генераторов происходит при совмещенных роторах (угол между роторами $\Delta\theta_{12} \approx 0$ или 180 эл. град), то независимо от указанных значений скольжения первоначальный провал напряжения представляет собой максимальный провал; для случая включения при $\Delta\theta_{12} \approx 90$ эл. град. провал напряжения имеет минимальное значение.

Указанные особенности протекания переходного процесса самосинхронизации генераторов позволяют пренебречь при составлении уравнений влиянием сверхпереходных процессов, изменением скорости вращения и скольжения и считать, что включение синхронизируемого генератора происходит в момент ориентации его ротора в направлении вектора магнитного поля обмотки статора, т. е. в момент, когда угол между роторами равен нулю или в неблагоприятном случае, когда угол равен 180 эл. град.

В момент включения генератора на шины бросок тока может быть определен по формуле

$$I_0 = \frac{E'_{q3}}{x'_{d3} + x'_{dr}}, \quad (6.25)$$

где E'_{q3} – эквивалентная ЭДС энергосистемы и параллельно работающих генераторов электростанции; x'_{d3} , x'_{dr} – переходное эквивалентное сопротивление энергосистемы или генераторов и переходное сопротивление включаемого генератора соответственно.

Переходное сопротивление x'_{d3} включает в себя сопротивление работающих генераторов, трансформаторов подстанций, линий электропередачи и трансформаторов связи с энергосистемой.

Напряжение на шинах генератора при его включении до возбуждения может быть определено по формуле

$$U_0 = \frac{E'_{q3} x'_{d3}}{x'_{d3} + x'_{dr}}. \quad (6.26)$$

При самосинхронизации генератора в автономной электростанции бросок тока в цепи синхронизируемых генераторов равен

$$I_0 = \frac{E'_{q1} + e'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{dy}}, \quad (6.25, a)$$

где E'_{q1} – переходная ЭДС работающего генератора; e'_{q2} – переходная ЭДС – остаточная намагниченность – включаемого генератора; x'_{d1} , $x'_{dц} = x'_{d2} + x_{ц}$ – соответственно переходные индуктивные сопротивления работающего и подключаемого генератора с учетом сопротивления цепи ($x_{ц}$).

Минимальная величина напряжения на шинах при включении генератора в этом случае определяется формулой [41]

$$U_0 = \frac{E'_{q1}x'_{dц} + e'_{q2}x'_{d1}}{x'_{d1} + x'_{dц}}, \quad (6.26, a)$$

Синхронизация генераторов через индуктивное сопротивление

Синхронизацию генератора, работающего блочно с силовым трансформатором, можно рассматривать как синхронизацию через индуктивное сопротивление с шинами энергосистемы.

Более общим случаем является синхронизация через реактор машин малой мощности автономных электростанций, т. к. в этом случае отсутствуют шины бесконечной мощности – шины энергосистемы.

Как показал опыт самосинхронизации генераторов равной мощности, величина провала напряжения достигает 35–40 % номинального значения. Из выражения (6.26) для минимального напряжения при включении генератора следует, что если бы индуктивное сопротивление цепи $x_{ц}$ между генератором и шинами было исчезающе мало, то величина провала напряжения достигала бы 50 %. Напротив, при увеличении этого сопротивления провал напряжения можно уменьшить до желаемой величины. На этом принципе основан способ грубой синхронизации генераторов автономных электростанций через реактор. Оказывается, что при таком способе нет необходимости включать генератор возбужденным. Можно выбрать сопротивление реактора таким, что при сохранении достаточной синхронизирующей силы генераторов провал напряжения будет находиться в заданных пределах.

Величина провала напряжения может быть определена, если учесть, что в этом случае для возбужденного генератора $E'_{q2} \neq 0$, и принять во внимание, что наиболее тяжелый случай включения будет тогда, когда роторы генераторов находятся в противофазе ($\Delta\theta = 180$ эл. град).

Расчетная формула примет вид

$$U_0 = \frac{(x'_{d2} + x_p)E'_{q1} - x'_{d1}E'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_p}, \quad (6.27)$$

и так как $E'_{q1} \approx E'_{q2} \approx 1$, то провал напряжения равен

$$\Delta U_0 = \frac{2x'_{d1}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_p}, \quad (6.28)$$

где x_p – приведенное к базисной мощности индуктивное сопротивление реактора.

Бросок тока может быть рассчитан по формуле (6.25, а) при этих же условиях

$$I_0 = \frac{E'_{q1} + E'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_p}. \quad (6.29)$$

Если допустимую кратность тока для этого генератора обозначить k_{j2} , то необходимую величину сопротивления реактора для ограничения тока можно определить по формуле

$$x_p = \frac{2}{k_{j2}k_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}), \quad (6.30)$$

где $k_0 = \frac{S_2}{S_1}$ – коэффициент соизмеримости генераторов по мощности.

Величина сопротивления реактора по условию допустимого снижения напряжения на шинах электростанции может быть установлена из выражения (6.28)

$$x_p = \frac{2x'_{d1}}{\Delta U_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}), \quad (6.31)$$

где ΔU_0 – допустимый провал напряжения.

Сопротивление реактора должно быть выбрано таким, чтобы уравнивающий ток и соответственно снижение напряжения при включении генераторов не превосходили допустимых величин, а синхронизирующие силы были достаточны для надежной синхронизации генераторов.

Влияние сопротивления реактора на синхронную связь можно иллюстрировать при помощи выражения для синхронной жесткости (2.69), написанного для случая включения генератора в сеть через индуктивное сопротивление для явнополюсной машины

$$C = \frac{U_c E_{q0}}{x_{dp}} \cos \theta_0 + \frac{(x_d - x_q) U_c^2}{x_{dp} x_{qp}} \cos 2\theta_0, \quad (6.32)$$

где $x_{dp} = x_d + x_p$, $x_{qp} = x_q + x_p$; для неявнополюсной машины в этом выражении надо положить $x_d = x_q$.

Из выражения (6.32) видно, что величина синхронной связи, удерживающей генераторы в параллельной работе, зависит от сопротивления реактора и будет тем меньше, чем больше это сопротивление. При значительном сопротивлении реактора синхронная машина будет практически лишена возможности передавать энергию в сеть вследствие нарушения ее связи с последней.

Таким образом, при выборе величины индуктивного сопротивления реактора следует учитывать два противоречивых требования: с одной стороны, необходимо увеличивать сопротивление реактора для обеспечения минимального значения провала напряжения при включении машины – см. (6.28), а с другой стороны, – уменьшать это сопротивление для обеспечения достаточной синхронной связи между машиной и сетью. Очевидно, прежде всего сопротивление реактора должно быть выбрано таким, чтобы обеспечить необходимую синхронную связь генератора с сетью.

Синхронная жесткость генератора, включаемого на шины энергосистемы, должна быть такой, чтобы отклонение его ротора под влиянием какого-либо воздействия не превысило предельного угла вылета, определяемого по угловой характеристике. Это условие выражается формулой

$$C \geq \frac{\Delta P}{\Delta \theta_{\text{пр}}} = \frac{P_{\text{max}} - P_0}{\Delta \theta_{\text{пр}}}. \quad (6.33)$$

Согласно этому условию сопротивление блочного трансформатора генератора, включаемого на шины энергосистемы с учетом сопротивления цепи, может быть определено из формулы (6.32)

$$x_p \leq a_x + \sqrt{a_x^2 + b_x}, \quad (6.34)$$

где

$$a_x = \frac{U_c E_{q0} \cos \theta_0 - (x_d + x_q) C}{2C};$$

$$b_x = \frac{x_q (U_c E_{q0} \cos \theta_0 - x_d C) + (x_d - x_q) U_c^2 \cos 2\theta_0}{C}.$$

Если этот генератор включается ненагруженным, когда его напряжение и ЭДС равны единице, к сопротивлению блочного трансформатора (или реактора) предъявляется условие

$$x_p \leq \frac{1}{C} - x_q. \quad (6.34, a)$$

Соотношение между сопротивлением блочного трансформатора с учетом сопротивления цепи и величиной отклонения вращающего

момента может быть вычислено по предельному значению угловой характеристики машины при помощи неравенства

$$\Delta\lambda_\varepsilon < \frac{1}{\cos \varphi_{\text{НОМ}}} \left[\frac{U_c E_{q0}}{x_{dp}} \sin \theta_{\text{max}} + \frac{(x_d - x_q) U_c^2}{2x_{dp} x_{qp}} \sin 2\theta_{\text{max}} \right],$$

где θ_{max} – максимальное значение угла вылета ротора, определяемое по формуле (6.22).

Отсюда можно получить

$$x_p \leq a_p + \sqrt{a_p^2 + b_p}, \quad (6.35)$$

где
$$a_p = \frac{1}{2} \left[\frac{U_c E_{q0}}{\Delta P_\varepsilon} \sin \theta_{\text{max}} - (x_d + x_q) \right]; \quad \Delta P_\varepsilon = \Delta\lambda_\varepsilon \cos \varphi_{\text{НОМ}};$$

$$b_p = \left(x_q E_{q0} \sin \theta_{\text{max}} + \frac{x_d - x_q}{2} U_c \sin 2\theta_{\text{max}} \right) \frac{U_c}{\Delta P_\varepsilon} - x_d x_q.$$

Выбор сопротивления реактора для случая включения на параллельную работу автономных синхронных генераторов производится подобным образом по величине общей синхронной жесткости между ними, определяемой формулой (6.24, а). Для генераторов с постоянным возбуждением имеем

$$C_{12} \geq \frac{\Delta P_{12}}{\Delta \theta_{12}}, \quad (6.36)$$

где ΔP_{12} – суммарная величина нагрузки генераторов, и при известной жесткости работающего генератора можно определить величину необходимой синхронной жесткости включаемого генератора

$$C_2 \geq \frac{C_1 \Delta P_{12}}{C_1 \Delta \theta_{12} - \Delta P_{12}}. \quad (6.37)$$

Для генераторных агрегатов автономных электростанций величина необходимой синхронной жесткости включаемого генератора определяется по (6.24) из алгебраического уравнения [41]

$$(a_3 - b_3 \Delta \theta_{12}) C_2^3 + (a_2 - b_2 \Delta \theta_{12}) C_2^2 + (a_1 - b_1 \Delta \theta_{12}) C_2 + a_0 = 0, \quad (6.38)$$

где $a_3 = k_{02} C_{B2} \Delta P_1$; $a_2 = [(1 + 2k_{02} C_{B2}) \Delta P_1 + (1 + k_{01} C_{B1}) \Delta P_2] C_1$;

$$a_1 = [(1 + k_{02} C_{B2}) \Delta P_1 + (1 + 2k_{01} C_{B1}) \Delta P_2] C_1^2$$
; $a_0 = k_{01} C_{B1} C_1^3 \Delta P_2$;

$$b_3 = k_{02} C_{B2} (1 + k_{01} C_{B1}) C_1$$
; $b_1 = k_{01} C_{B1} (1 + k_{02} C_{B2}) C_1^3$;

$$b_2 = (1 + k_{01} C_{B1} + k_{02} C_{B2} + 2k_{01} k_{02} C_{B1} C_{B2}) C_1^2.$$

Легко убедиться, что для генераторов без системы компаундирования, когда $k_{01} = 0$, $k_{02} = 0$, уравнение (6.38) сводится к равенству (6.37).

При известной величине синхронной жесткости включаемого генератора сопротивление реактора находится по формуле (6.34).

В соответствии с определением потенциальной энергии синхронной машины (2.90) при включении генератора через реактор на параллельную работу с несколькими генераторами его синхронная жесткость должна быть вычислена по значениям общей синхронной жесткости с каждым генератором. При этом получается несколько значений, из которых берется наименьшее и по нему определяется сопротивление реактора.

Следует обратить внимание, что основные расчетные зависимости (6.33) и (6.34) не содержат параметров, характеризующих тип первичного двигателя генератора. Параметры же регулятора двигателя – степень неравномерности и степень нечувствительности, влияющие на величину отклонения нагрузки, являются общими для любого типа двигателя, поэтому полученные зависимости при расчете сопротивления реактора могут быть распространены на все генераторные агрегаты.

*Синхронизация генераторов
через активно-индуктивное сопротивление**

При включении синхронного генератора на параллельную работу в общем случае следует учесть и индуктивное, и активное сопротивления цепи между выводами генератора и шинами.

Принципиальная схема включения генераторов на параллельную работу через активно-индуктивное сопротивление $z_p = \sqrt{x_p^2 + r_p^2}$ и векторная диаграмма параллельной работы генераторов по этой схеме показаны на рис. 6.7. Из векторной диаграммы, пренебрегая активными сопротивлениями статорных обмоток, можно получить следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} E'_{q1} &= U_1 \cos \theta_1 + x'_{d1} I \sin \psi_1; \\ E'_{q2} &= U_1 \cos (\psi_1 - \psi_2 - \theta_1) - [(x'_{d2} + x_p) \sin \psi_2 + r_p \cos \psi_2] I. \end{aligned} \right\} (6.39)$$

* В порядке постановки задачи для автономных дизельных электростанций.

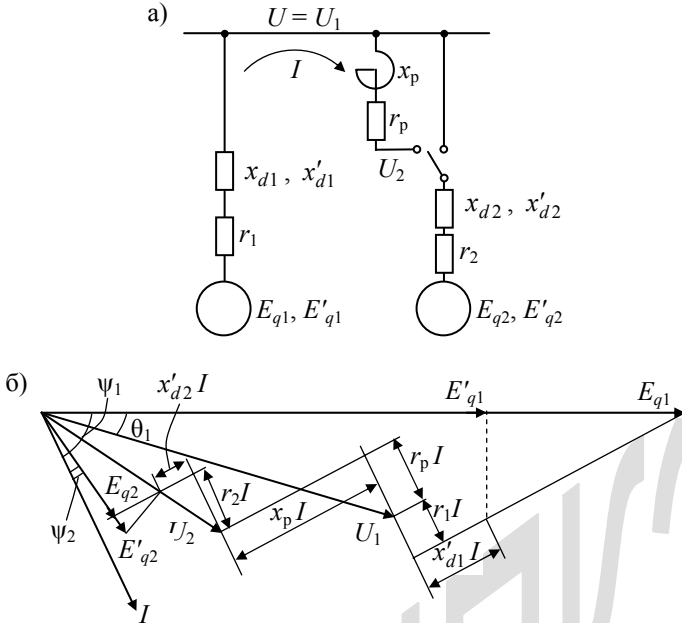


Рис. 6.7. Принципиальная схема (а) и векторная диаграмма (б) включения генераторов на параллельную работу через активно-индуктивное сопротивление

Определение величин провала напряжения и броска тока здесь связано с необходимостью знать значения углов ψ и θ , зависящих в свою очередь от параметров генераторов. Следовательно, искомые величины должны определяться иным путем.

Поставленная задача может быть решена простым способом, если учесть, что переходный процесс при рассматриваемом способе синхронизации генераторов будет проявляться особенно сильно при включении генераторов в противофазе. В силу этого эквивалентная схема включения генераторов на параллельную работу через полное сопротивление может быть представлена в виде простой цепи с последовательным соединением ЭДС и сопротивлений, как показано на рис. 6.8.

Комплексы полных сопротивлений генераторов определяются формулами (1.30), соответственно для явнополюсного и неявнополюсного генераторов

$$\bar{z}'_q = \frac{x'_d x_q + r_a^2}{\sqrt{x_q^2 + r_a^2}} e^{j\varphi_q}, \quad \bar{z}'_d = \frac{x'_d x_d + r_a^2}{\sqrt{x_d^2 + r_a^2}} e^{j\varphi_d},$$

где аргументы комплексных равны по (1.12)

$$\varphi_q = \arctg \frac{x_q}{r_a}, \quad \varphi_d = \arctg \frac{x_d}{r_a}. \quad (6.40)$$

Величина броска тока в цепи генераторов при их включении по схеме, приведенной на рис. 6.8, в противофазе находится по формуле

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}'_{q1} + \bar{E}'_{q2}}{\bar{z}'_{\Sigma}},$$

где $\bar{z}'_{\Sigma} = \bar{z}'_1 + \bar{z}'_p + \bar{z}'_2$ – сумма комплексных полных сопротивлений цепи.

Здесь в соответствии со схемой замещения комплекс сопротивления работающего, например явнополюсного, генератора равен

$$\bar{z}'_1 = \bar{z}'_q = z'_q e^{j\varphi_q};$$

комплекс сопротивления подключаемого, например неявнополюсного, генератора равен

$$\bar{z}'_2 = \bar{z}'_d = z'_d e^{j\varphi_d}.$$

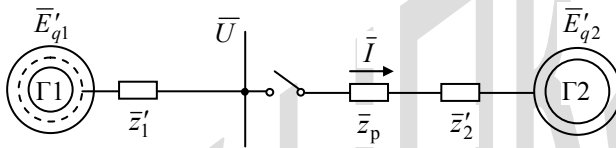


Рис. 6.8. Эквивалентная схема включения генератора на параллельную работу через активно-индуктивное сопротивление

Суммарное сопротивление цепи равно

$$\begin{aligned} \bar{z}'_{\Sigma} &= z'_1 e^{j\varphi_1} + z_p e^{j\varphi_p} + z'_2 e^{j\varphi_2} = z'_1 \cos \varphi_1 + z_p \cos \varphi_p + z'_2 \cos \varphi_2 + \\ &+ j(z'_1 \sin \varphi_1 + z_p \sin \varphi_p + z'_2 \sin \varphi_2) = r_{\Sigma} + jx_{\Sigma} = z_{\Sigma} e^{j\varphi_{\Sigma}}, \end{aligned}$$

где $z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}$, $\varphi_{\Sigma} = \arctg \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}$ – модуль и аргумент комплекса суммарного полного сопротивления цепи.

Комплексы ЭДС генераторов в рассматриваемой схеме замещения равны их модулям, так как аргументы равны нулю, т. е.

$$\bar{E}'_{q1} = E'_{q1} e^{j0} = E'_{q1}, \quad \bar{E}'_{q2} = E'_{q2} e^{j0} = E'_{q2}.$$

Тогда формула для вычисления броска тока в цепи синхронизуемых генераторов примет вид

$$\bar{I} = \frac{E'_{q1} + E'_{q2}}{z_{\Sigma}} e^{-j\varphi_{\Sigma}}, \quad (6.41)$$

где φ_{Σ} – угол сдвига вектора тока относительно вектора суммы ЭДС

Напряжение на шинах при включении генераторов может быть определено из равенства

$$\bar{U} = \bar{E}'_{q1} - \bar{z}'_1 \bar{I}.$$

После подстановки сюда выражения для тока имеем

$$\bar{U} = \frac{(\bar{z}'_2 + \bar{z}_p) \bar{E}'_{q1} - \bar{z}'_1 \bar{E}'_{q2}}{\bar{z}'_{\Sigma}}. \quad (6.42)$$

Преобразование комплексов сопротивлений придает формуле следующий вид:

$$\bar{U} = z'_{\Sigma 2} E'_{q1} e^{j\varphi_{\Sigma 2}} - z'_{\Sigma 1} E'_{q2} e^{j\varphi_{\Sigma 1}}, \quad (6.42, a)$$

где $z'_{\Sigma 1} = \frac{z'_1}{z'_{\Sigma}}$; $z'_{\Sigma 2} = \frac{1}{z'_{\Sigma}} \sqrt{z'^2_2 + 2z'_2 z_p \cos(\varphi_2 - \varphi_p) + z^2_p}$;

$$\varphi_{\Sigma 1} = \varphi_1 - \varphi_{\Sigma}; \quad \varphi_{\Sigma 2} = \arctg \frac{z'_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_{\Sigma}) + z_p \sin(\varphi_p - \varphi_{\Sigma})}{z'_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_{\Sigma}) + z_p \cos(\varphi_p - \varphi_{\Sigma})}.$$

Формулу (6.42) можно представить в другой форме

$$\bar{U} = U e^{j\varphi_U}. \quad (6.43)$$

Модуль и аргумент комплекса напряжения равны

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_x^2}, \quad \varphi_U = \arctg \frac{U_x}{U_r},$$

где $U_r = z'_{\Sigma 2} E'_{q1} \cos \varphi_{\Sigma 2} + z'_{\Sigma 1} E'_{q2} \cos \varphi_{\Sigma 1}$;
 $U_x = z'_{\Sigma 2} E'_{q1} \sin \varphi_{\Sigma 2} + z'_{\Sigma 1} E'_{q2} \sin \varphi_{\Sigma 1}$.

Полученные формулы для напряжения и броска тока в цепи синхронизируемых генераторов характеризуют общий случай их подключения на параллельную работу через индуктивно-активное сопротивление, в том числе и через блочный трансформатор. Действительно, если рассматривается синхронизация генераторов через индуктивное сопротивление x_p , то в указанных формулах можно пренебречь активными сопротивлениями генераторов и положить $r_p = 0$. Тогда расчетные формулы (6.41), (6.42) примут вид

$$\bar{I}_0 = \frac{E'_{q1} + E'_{q2}}{x'_{d\Sigma}} e^{-j\frac{\pi}{2}}, \quad U_0 = \frac{(x'_{d2} + x_p) E'_{q1} - x'_{d1} E'_{q2}}{x'_{d\Sigma}}, \quad (6.44)$$

где $x'_{d\Sigma} = x'_{d1} + x_p + x'_{d2}$. Эти выражения определяют величину броска тока и напряжения на шинах при синхронизации генераторов только через индуктивное сопротивление – реактор или трансформатор – и совпадают с ранее полученными формулами (6.27) и (6.29).

Если индуктивного сопротивления нет ($x_p = 0$), то из этих зависимостей следует, что ток и напряжения определяются только величинами ЭДС и переходными индуктивными сопротивлениями генераторов: вектор тока отстает по фазе от вектора ЭДС на 90° , а вектор напряжения совпадает с ним. При включении в противофазе генератора на шины энергосистемы имеет место тяжелее режима короткого замыкания практически в два раза; наоборот, при включении в фазе напряжение остается неизменным, а ток равен нулю – имеет место режим точной синхронизации.

§ 6.5. Устойчивость генераторов при параллельной работе

Параллельная работа синхронных генераторных агрегатов, имеющих автоматические регуляторы скорости и напряжения, при различных возмущающих воздействиях и в статическом режиме может быть исследована на основании уравнений движения Лагранжа для синхронных агрегатов, дополненных дифференциальными уравнениями регуляторов. Очевидно, порядок систем уравнений будет таким высоким, что исследование задачи в общем виде даже при линейных уравнениях оказывается невозможным. Здесь приходится прибегать к математическому моделированию и решать каждую конкретную задачу при помощи вычислительных машин. Простейший случай – параллельная работа синхронного агрегата на энергосистему, имеющего автоматические регуляторы скорости и напряжения, с рядом принятых допущений и условностей описывается дифференциальным уравнением шестой степени. Очевидно, трудоемкость исследования подобной задачи для двух и более агрегатов будет значительно выше.

Ниже рассматриваются различные случаи работы синхронных агрегатов без учета влияния автоматических регуляторов при наличии периодических возмущающих сил. Решение задач с учетом действия автоматических регуляторов скорости и напряжения может быть получено, если основные уравнения дополнить соответствующими уравнениями динамики этих регуляторов.

Параллельная работа двух генераторных агрегатов при наличии у каждого из них спектра периодических возмущающих сил может быть описана системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} J_1 \Delta \ddot{\theta}_1 + D_1 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) + C (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \sum_{v=1}^k \Delta M_{v1} \sin(v\omega_1 t + \varphi_{v1}) ; \\ J_2 \Delta \ddot{\theta}_2 - D_2 (\Delta \dot{\theta}_1 - \Delta \dot{\theta}_2) - C (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) &= \sum_{v=1}^k \Delta M_{v2} \sin(v\omega_2 t + \varphi_{v2}) , \end{aligned} \right\} \quad (6.45)$$

где J_1, J_2 – моменты инерции агрегатов, каждый из которых представлен в виде одностепенной системы; D_1, D_2 – демпферные коэффициенты, характеризующие эффективность демпферных обмоток генераторов; $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ – синхронная жесткость между машинами; φ_v – угол сдвига фазы любой гармоники возмущающей силы агрегатов.

При исследовании движения двух агрегатов представляет интерес не абсолютное изменение угла вылета каждого ротора, а колебания роторов относительно друг друга, т. е. $\Delta \theta = \Delta \theta_1 - \Delta \theta_2$. Изображение искомой координаты будет иметь вид

$$\Delta \theta(s) = \frac{A_1(s) - A_2(s)}{B(s)} + \sum_{v=1}^k \frac{\Delta m_{v1}(a_1 s + b_1)}{(s^2 + v^2 \omega_1^2) B(s)} - \sum_{v=1}^k \frac{\Delta m_{v2}(a_2 s + b_2)}{(s^2 + v^2 \omega_2^2) B(s)}, \quad (6.46)$$

где $B(s) = s^2 + 2\alpha s + \omega_c^2$ – характеристический многочлен системы; $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, $\omega_c = \sqrt{\omega_{c1}^2 + \omega_{c2}^2}$ – общий декремент затухания и круговая частота свободных колебаний системы; $a_{1(2)} = \sin \varphi_{v1(2)}$, $b_{1(2)} = \omega_{1(2)} \times \cos \varphi_{v1(2)}$ – коэффициенты сдвига фаз возмущающих сил;

$$\Delta m_{v1(2)} = \frac{\Delta M_{v1(2)}}{J_{1(2)}} - \text{приведенная величина возмущающей силы};$$

$$A_{1(2)}(s) = \Delta \theta_{01(2)} s + 2\alpha_{1(2)} (\Delta \theta_{01(2)} - \Delta \theta_{02(1)}) + \Delta \dot{\theta}_{01(2)} \quad (6.47)$$

– функция начальных условий.

Здесь и ниже индексы в скобках означают, что указанная величина или формула имеет аналогичный вид и для другого агрегата.

При обычном соотношении параметров алгебраическое уравнение $B(s) = 0$ имеет комплексные сопряженные корни $s_1 = -\alpha + j\beta$, $s_2 = -\alpha - j\beta$, где $\beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}$, и поэтому обратное \mathcal{L} -преобразование

изображения искомой координаты (6.46) позволяет получить ее оригинал в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta\theta(t) = & \left\{ \frac{\Delta\theta_0}{\beta} [\omega_c \cos(\beta t + \psi_0) + 2\alpha \sin \beta t] + \Delta\dot{\theta}_0 \sin \beta t + \right. \\ & \left. + \sum_{v=1}^k \Delta m_{v1} \rho_1 \sin(\beta t + \psi_1) - \sum_{v=1}^k \Delta m_{v2} \rho_2 \sin(\beta t + \psi_2) \right\} e^{-\alpha t} - \\ & - \sum_{v=1}^k \Delta m_{v1} \rho_{m1} \sin(v\omega_1 t + \psi_{m1}) + \sum_{v=1}^k \Delta m_{v2} \rho_{m2} \sin(v\omega_2 t + \psi_{m2}), \quad (6.48) \end{aligned}$$

где амплитудные значения и фазовые углы означают

$$\begin{aligned} \rho_{1(2)} &= \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{(b_{1(2)} - \alpha a_{1(2)})^2 + a_{1(2)}^2 \beta^2}{(2\alpha^2 + v^2 \omega_{1(2)}^2 - \omega_c^2)^2 + 4\alpha^2 \beta^2}}; \\ \rho_{m1(2)} &= \frac{1}{\sqrt{(v^2 \omega_{1(2)}^2 - \omega_c^2)^2 + 4\alpha^2 v^2 \omega_{1(2)}^2}}; \\ \psi_0 &= \arctg \frac{\alpha}{\beta}; \quad \psi_{m1(2)} = \varphi_{v1(2)} + \arctg \frac{2\alpha v \omega_{1(2)}}{v^2 \omega_{1(2)}^2 - \omega_c^2}; \\ \psi_{1(2)} &= \arctg \frac{a_{1(2)} \beta}{b_{1(2)} - \alpha a_{1(2)}} + \arctg \frac{2\alpha \beta}{2\alpha^2 + v^2 \omega_{1(2)}^2 - \omega_c^2}; \\ \Delta\theta_0 &= \Delta\theta_{10} - \Delta\theta_{20}; \quad \Delta\dot{\theta}_0 = \Delta\dot{\theta}_{10} - \Delta\dot{\theta}_{20}. \end{aligned} \quad (6.49)$$

Полученная формула изменения угла вылета роторов агрегатов относительно друг друга может быть использована для решения различных задач, возникающих при анализе колебательных процессов. Из формулы видно, что переходный процесс, возникающий с момента начала действия возмущающих сил, с течением времени затухает и колебания роторов в последующем установившемся режиме зависят от параметров агрегатов, амплитуды и частоты возмущающих сил. Начальные условия, непосредственно введенные в формулу, позволяют исследовать указанное движение с учетом предварительных колебаний роторов, если таковые наблюдаются.

Установившиеся колебания при наличии периодических возмущающих сил описываются выражением

$$\Delta\theta(\infty) = - \sum_{v=1}^k \Delta m_{v1} \rho_{m1} \sin(v\omega_1 t + \psi_{m1}) + \sum_{v=1}^k \Delta m_{v2} \rho_{m2} \sin(v\omega_2 t + \psi_{m2}). \quad (6.50)$$

Например, для двигателя внутреннего сгорания изменение вращающего момента в общем случае описывается суммой гармонических составляющих, и поэтому последнее выражение показывает, что такие двигатели генераторов обусловят постоянное колебание их роторов в установившемся режиме. Амплитуда колебаний ρ_{m1} и ρ_{m2} , как видно из формул (6.50), при частоте возмущающих сил, значительно превосходящих частоту свободных колебаний, будет ничтожно малой и, наоборот, будет возрастать при сближении значений этих частот.

В общем случае наличие у двигателя внутреннего сгорания спектра гармонических возмущающих сил, вызванных не только нормальным рабочим процессом сгорания топлива в цилиндрах, но и нарушением этого процесса, позволяет считать, что полное устранение таких колебаний практически невозможно.

Представляет интерес рассмотреть колебания при параллельной работе идентичных синхронных агрегатов. Если обозначить основные параметры машин $J_1 = J_2 = J_0$, $D_1 = D_2 = D_0$, $C_1 = C_2 = C_0$, то общие параметры и коэффициенты обоих генераторов примут значения

$$\alpha = \frac{D_0}{J_0}, \quad c = \frac{C_0}{2}, \quad \omega_c^2 = \frac{C_0}{J_0}. \quad (6.51)$$

Отсюда видно, что частота свободных колебаний идентичных генераторных агрегатов при параллельном включении совпадает с частотой свободных колебаний одного генератора при параллельном включении его с энергосистемой, но декремент затухания процесса в два раза больше, чем у отдельно взятого агрегата (см. 5.15). По этой причине и характеристическая частота параллельно включенных машин β_0 , которая фиксируется при экспериментальном исследовании на осциллограммах в виде колебаний скорости вращения, будет отличаться от характеристической частоты отдельно включенного генератора. Отношение этих величин определяется формулой [41]

$$\frac{\beta_0}{\beta_{1(2)}} = \sqrt{\frac{1-\gamma}{1-0,25\gamma}}, \quad (6.52)$$

где $\gamma = \frac{D_{1(2)}^2}{C_{1(2)}J_{1(2)}}$ – комплексный параметр одного синхронного агрегата.

График зависимости (6.52) построен на рис. 6.9.

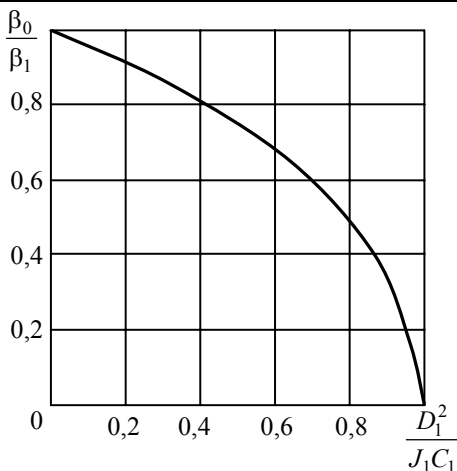


Рис. 6.9. График изменения характеристической частоты при параллельном включении однотипных генераторных агрегатов в зависимости от величины комплексного параметра

Если комплексный параметр для генераторных агрегатов имеет малые значения, то, как видно из графика, характеристические частоты практически совпадают. Следовательно, динамические характеристики агрегатов могут быть определены для агрегата, включенного в сеть, и распространены на случай включения агрегатов на параллельную работу между собой. Однако для агрегатов, имеющих большую величину комплексного параметра, т. е. обладающих эффективными демпферными обмотками, такой прием, как видно из рис. 6.9, может внести значительную погрешность.

Колебания идентичных агрегатов, включенных на параллельную работу, могут быть определены из формулы (6.50) при известных параметрах (6.51), причем если ограничиться частотой и амплитудой основной гармоники возмущающих сил, считая их равными у обеих машин, то формула колебаний будет иметь вид

$$\Delta\theta(\infty) = \Delta m_v \rho_m [-\sin(\omega_B t + \psi_{m1}) + \sin(\omega_B t + \psi_{m2})], \quad (6.53)$$

$$\text{где } \Delta m_v = \Delta m_{v1} = \Delta m_{v2} = \frac{\Delta M}{J_0}; \rho_m = \frac{1}{\sqrt{(\omega_B^2 - \omega_c^2)^2 + 16\alpha_0^2 \omega_B^2}}; \quad (6.54)$$

$$\psi_{m1(2)} = \varphi_{1(2)} + \arctg \frac{4\alpha_0 \omega_B}{\omega_B^2 - \omega_c^2}.$$

Очевидно, что при отсутствии сдвига фаз между возмущающими силами обоих агрегатов ($\varphi_1 = \varphi_2$) колебания роторов относительно друг друга отсутствуют; наоборот, при сдвиге фаз на 180° , например при $\varphi_1 = 0$ и $\varphi_2 = \pi$, амплитуда колебаний достигает максимальных значений – несколько меньше удвоенной амплитуды колебаний, возникающих при параллельной работе с сетью одного агрегата. Уменьшение амплитуды, как видно из сравнения формул (5.26) и (6.54) для ρ_v и ρ_m , вызвано увеличенным значением общего декремента затухания.

Таким образом, нельзя в общем случае использовать результаты исследования параллельной работы одного агрегата с энергосистемой для оценки параллельной работы двух подобных агрегатов.

Для апробации предложенного метода расчета движения синхронного агрегата на основе уравнения Лагранжа с введением представления синхронной жесткости машины при включении ее на параллельную работу были проведены экспериментальные исследования движения агрегата при исчезновении вращающего момента со стороны энергетического двигателя путем прекращения подачи энергоносителя.

Переходный электромеханический процесс описывается уравнением Лагранжа (2.92)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial V}{\partial \Delta\theta} + \frac{\partial F}{\partial \Delta\theta} = \Delta M_d - \Delta M_r. \quad (6.55)$$

В случае прекращения подачи энергоносителя тормозной момент ΔM_r – исчезает, а вращающий момент ΔM_d изменит знак и независимо от вида двигателя может считаться постоянным.

Наиболее верно такое приближение для турбогенератора при посадке стопорных клапанов турбины без отключения выключателя генератора; у двигателя внутреннего сгорания при вращении его без подачи топлива момент на валу, строго говоря, будет иметь пульсирующий характер вследствие компрессии воздуха в цилиндрах и переменной величины момента инерции, однако пульсация момента имеет настолько малую амплитуду и высокую частоту, что при исследовании движения агрегата этими явлениями можно пренебречь.

Движение агрегата с момента прекращения подачи его двигателю энергоносителя описывается на основании общего уравнения Лагранжа (6.55) выражением

$$J\Delta\ddot{\theta} + D\Delta\dot{\theta} + C\Delta\theta = -\Delta M_d, \quad (6.56)$$

где ΔM_d – тормозной момент, появляющийся у двигателя генератора.

Начальные условия процесса будут зависеть от исходного режима, который определяет величину угла вылета ротора $\Delta\theta_0$ и скорость его изменения $\Delta\dot{\theta}_0$ в момент начала процесса.

Решение уравнения (6.56), определяющее затухающее колебательное движение, целесообразно представить в следующем виде:

$$\Delta\theta(t) = -\frac{\Delta m_d}{\omega_c^2} + \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{\Delta m_d}{\omega_c} + \omega_c \Delta\theta_0 \right) \sin(\beta t + \psi_c) + \Delta\dot{\theta}_0 \sin \beta t \right] e^{-\alpha t}, \quad (6.57)$$

$$\text{где } \omega_c = \sqrt{CJ^{-1}}, \quad \alpha = 2DJ^{-1}, \quad \beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}, \quad \psi_c = \operatorname{arctg} \frac{\beta}{\alpha} \quad (6.58)$$

соответственно круговая частота свободных колебаний агрегата, коэффициент затухания, характеристическая угловая частота и угол сдвига фазы колебаний; Δm_d – тормозной момент на валу, о. е.

Колебательное движение ротора генератора после затухания переходного процесса происходит около нового значения угла вылета, определяемого первым членом формулы (6.57).

Скорость изменения угла, т. е. относительная скорость вращения агрегата, может быть найдена обычным путем – дифференцированием полученного решения

$$\Delta\dot{\theta}(t) = \frac{1}{\beta} \left\{ \left(\frac{\Delta m_d}{\omega_c} + \omega_c \Delta\theta_0 \right) [\beta \cos(\beta t + \psi_c) - \alpha \sin(\beta t + \psi_c)] + \Delta\dot{\theta}_0 (\beta \cos \beta t - \alpha \sin \beta t) \right\} e^{-\alpha t}. \quad (6.59)$$

Из выражений (6.57) и (6.59) видно, что возникающие колебания угла вылета ротора и скорости вращения агрегата затухают с постоянной времени $T = \alpha^{-1}$. Быстрота затухания пропорциональна коэффициенту демпфирования и обратно пропорциональна суммарному моменту инерции агрегата, причем если затухающие колебания угла происходят около нового его значения, то колебания скорости – около прежней синхронной скорости вращения агрегата.

На рис. 6.10 представлены для сравнения экспериментальная кривая изменения скорости вращения агрегата ДГР 150/750, а также кривые изменения угла вылета ротора и его скорости вращения, рассчитанные по формулам (6.57), (6.59). Из сравнения графиков видно хорошее совпадение расчетных значений, как по амплитуде, так и по частоте колебаний с реальными показателями движения испытываемого дизель-генератора.

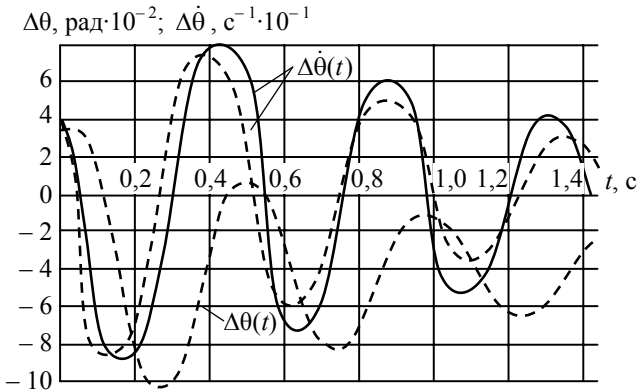


Рис. 6.10. Переходный процесс в агрегате ДГР 150/750, вызванный внезапным отключением топлива: экспериментальная (сплошная) и расчетные (штриховые) кривые изменения угла вылета и скорости вращения ротора генератора

Полученные результаты позволяют утверждать, что осциллограммы свободного движения генераторного агрегата, включенного параллельно с сетью, в случае прекращения подачи к двигателю энергоносителя могут быть использованы для определения основных динамических свойств агрегата в целом. При известном моменте инерции агрегата и при известных параметрах генератора, позволяющих определить его синхронную жесткость, осциллограмма указанного режима позволяет по кривым затухания процесса найти труднорассчитываемую величину демпферного коэффициента машины.

Пример 6.2. Расчет колебаний ротора дизель-генератора при параллельной работе с сетью неограниченной мощности в случае внезапного прекращения подачи топлива.

Исходные данные. Дизель 6ЧН 18/22: $N = 225$ лс; $n = 750$ об/мин. Генератор ГСС 114–8: $P_r = 150$ кВт; $U = 400$ В; $\cos \varphi = 0,8$; $p = 4$; $x_d = 1,44$; $x_q = 0,74$; $x'_d = 0,21$; $r_a = 0,012$; $T_{d0} = 1,57$ с; $J = 7,4$ кг·м·с² (суммарный); $D = 15$ кг·м·с. Предварительная нагрузка составляет 25 % номинальной при колебаниях скорости вращения агрегата с амплитудой $\Delta\dot{\theta}_0 = 0,4$ с⁻¹. В момент прекращения подачи топлива отклонение скорости равно амплитудному значению; тормозной момент $\Delta M_d = 0,24$; возбуждение генератора сохраняется прежним, коэффициент мощности в тормозном режиме емкостной и равен $\cos \varphi = 0,8$.

Расчет

1. Сопротивление генератора и нагрузки до нарушения режима

$$x_{дн} = x_d + x_n = 3,84, \quad x_{qn} = 3,14, \quad r_{ан} = 3,2,$$

так как

$$z_n = \frac{P_\Gamma \cos \varphi_n}{P_n \cos \varphi_\Gamma} = 4, \quad x_n = z_n \sin \varphi = 2,4, \quad r_n = z_n \cos \varphi = 3,2.$$

2. ЭДС генератора до нарушения режима по (1.5)

$$E_{q0} = \frac{x_{дн}x_{qn} + r_{ан}^2}{z_n \sqrt{x_{qn}^2 + z_{ан}^2}} = \frac{3,84 \cdot 3,14 + 3,2^2}{4 \sqrt{3,14^2 + 3,2^2}} = 1,24.$$

3. Угол вылета ротора до нарушения режима по (1.1)

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \arctg \frac{x_{qn} \cos \alpha - r_{ан} \sin \varphi}{z_n + r_{ан} \cos \alpha + x_{qn} \sin \varphi} = \\ &= \arctg \frac{3,14 \cdot 0,8 - 3,2 \cdot 0,6}{4 + 3,2 \cdot 0,8 + 3,14 \cdot 0,6} = 7,08 \text{ эл. град}; \\ \theta_{0м} &= \frac{7,08}{p} = 1,77^\circ = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ рад.} \end{aligned}$$

4. Сопротивление нагрузки в установившемся режиме после затухания переходного процесса

$$z_y = \frac{P_\Gamma \cos \varphi_n}{\Delta P_d \cos \varphi_\Gamma} = \frac{1 \cdot 0,8}{0,24 \cdot 0,8} = 4,17.$$

5. Угол вылета ротора в установившемся режиме после затухания переходного процесса по (1.1) для $r_a \approx 0$

$$\theta_y = 7,33 \text{ эл. град.}$$

6. Синхронная жесткость генераторов по (2.69) в установившемся режиме с прежним возбуждением

$$C_c = \frac{1 \cdot 1,24}{1,44} \cos 7^\circ 20' + \frac{0,7}{1,44 \cdot 0,7} \cos 14^\circ 40' = 1,52.$$

7. Синхронная жесткость генератора, приведенная к валу двигателя,

$$C = p C_c M_{\Gamma, \text{ном}} = 4 \cdot 1,52 \cdot 215 = 1300 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

8. Угловая частота свободных колебаний

$$\omega_c = \sqrt{\frac{C}{J}} = \sqrt{\frac{1300}{7,4}} = 13,3 \text{ с}^{-1}.$$

9. Декремент затухания, характеристическая угловая частота и угол сдвига фазы переходного процесса по (6.58)

$$\alpha = \frac{D}{2J} = \frac{15}{2 \cdot 7,4} = 1, \quad \beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha} = 13,2, \quad \psi_c = \arctg \frac{\beta}{\alpha} = 85^\circ 40'.$$

10. Начальные условия переходного процесса

$$\Delta\theta_{0M} = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ рад}, \quad \Delta\dot{\theta}_0 = 40 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1},$$

$$\Delta m_d = \frac{\Delta M_d}{J} = \frac{0,24 M_{г.ном}}{J} = 7,8.$$

11. Расчетная формула изменения угла вылета ротора по (6.57)

$$\Delta\theta(t) = -4,4 \cdot 10^{-2} + [7,62 \cdot 10^{-2} \sin(13,2t + 85^\circ 40') + 3 \cdot 10^{-2} \sin 13,2t] e^{-t}.$$

График этой формулы построен на рис. 6.10. Максимальный размах угла вылета 0,12 рад или $6^\circ 52'$, что соответствует 27,5 эл. град.

12. Расчетная формула изменения скорости вращения агрегата по (6.59)

$$\Delta\dot{\theta}(t) = [\cos(13,2t + 85^\circ 40') - 0,076 \sin(13,2t + 85^\circ 40') + 0,4(\cos 13,2t - 0,076 \sin 13,2t)] e^{-t}.$$

График этой зависимости также построен на рис. 6.10. Максимальное отклонение скорости вращения $0,86 \text{ с}^{-1}$, что соответствует

$$\Delta n = \frac{60 \cdot 0,86}{2\pi} = 8,22 \text{ об/мин.}$$

§ 6.6. Синхронизация энергосистем

При нарушении устойчивости параллельной работы энергосистем начинается асинхронный режим, при котором одна часть энергосистемы работает несинхронно относительно другой ее части. Длительно такой режим недопустим, поэтому противоаварийная автоматика производит разделение энергосистем на несинхронно работающие части.

Возникает проблема восстановления синхронной работы. Ее необходимо решать с учетом специфики ситуации в сравнении с синхронизацией одного генератора, при его включении на параллельную работу с энергосистемой.

Специфика ситуации заключается в следующем. Один генератор может включаться методом самосинхронизации или точной синхронизации. При синхронизации частей энергосистемы метод самосинхронизации исключается. Включение возможно только методом точной синхронизации. Следует учитывать и различие в подгонке параметров синхронизируемого источника. При включении одного генератора это делается сравнительно просто – напряжение и частота синхронизируемого генератора сравнительно легко подгоняется к параметрам сети.

Включение генератора в момент $\delta = 0^\circ$ также не вызывает особых затруднений.

При синхронизации двух частей энергосистемы условия включения остаются теми же самыми: $U_1 = U_2$, $f_1 = f_2$, $\delta = 0^\circ$. Особое беспокойство вызывает второе условие – равенство частот синхронизируемых частей энергосистемы. Подчеркнем этот момент – подгонять надо частоту не одного отдельно взятого генератора, а целой части энергосистемы, только что перешедшей в поставарийный режим.

На рис. 6.11, а представлены две энергосистемы, соединенные межсистемной линией передачи. В аварийной ситуации линия отключена и энергосистемы работают несинхронно с частотами f_1 и f_2 . Для упрощения анализа каждая энергосистема представлена эквивалентным генератором Г1 и Г2.

На рис. 6.11, б показана векторная диаграмма напряжений U_1 и U_2 в момент включения на параллельную работу. Будем полагать, что перед включением линии выполняются условия $U_1 = U_2$ и $\delta = 0^\circ$. В то же время $\omega_1 > \omega_2$, поэтому после включения линии связи ротор генератора Г1 продолжит свое движение со скольжением относительно другой энергосистемы Г2. Возникает отклонение угла δ , вследствие чего генератор Г1 будет принимать на себя нагрузку $P_{обм} = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta$ и начнет тормозиться. Скольжение ротора Г1 прекратится тогда, когда будет исчерпан запас кинетической энергии.

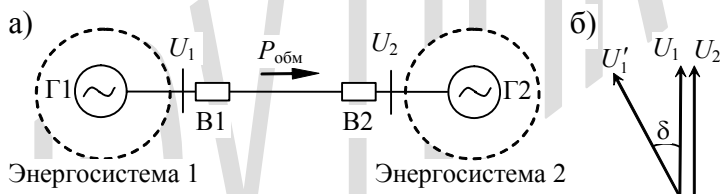


Рис. 6.11. Схема объединенной энергосистемы

Для второй энергосистемы обменная мощность является дополнительной генерацией. Под действием этой мощности генераторы второй энергосистемы будут ускоряться. Этот фактор следует учитывать при оценке вылета по углу первого генератора.

Возможны два варианта переходного процесса. Вылет по углу δ не превышает 180° . В этом случае ротор Г1 будет тормозиться, и угол начнет уменьшаться. Начнутся качания роторов одной энергосистемы

относительно другой. Постепенно качания затухают, и наступает синхронная работа системы как единого целого.

По второму варианту вылет угла составляет $\delta > 180^\circ$, после чего наступает асинхронный режим.

Нас интересует первый вариант включения с постепенным затуханием колебательного процесса, завершающегося успешной синхронизацией.

Оценим количественно для условий реальной энергосистемы, при каком скольжении $\Delta f = f_1 - f_2$ вылет по углу не превысит 180° и включение приведет к успешной синхронизации.

Кинетическая энергия вращающейся машины определяется формулой

$$W = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (6.60)$$

где $J = \frac{GD^2}{4g}$ – момент инерции машины; ω – частота вращения.

Определим кинетическую энергию для обеих энергосистем. Для второй энергосистемы

$$W_2 = \frac{J_2\omega_2^2}{2}. \quad (6.61)$$

Для первой энергосистемы будем иметь

$$W_1 = \frac{J_1\omega_1^2}{2} = \frac{J_1(\omega_2 + \Delta\omega)^2}{2} = \frac{J_1\omega_2^2}{2} + \frac{2J_1\omega_2\Delta\omega}{2} + \frac{J_1\Delta\omega^2}{2}. \quad (6.62)$$

Рассмотрим энергосистемы, одинаковые по мощности и составу агрегатов. Для них примем $P_1 = P_2 = P$, $J_1 = J_2 = J$, $\omega_1 \cong \omega_2 \cong \omega$. Поскольку $J\Delta\omega^2$ малая величина, то

$$\Delta W = W_1 - W_2 = J\omega\Delta\omega.$$

Умножим ΔW на $\frac{\omega P_{с.ном}}{\omega P_{с.ном}}$ и тогда получим

$$\Delta W = \frac{J\omega^2}{P_{с.ном}} P_{с.ном} \Delta\omega_* = T_J P_{с.ном} \Delta\omega_*, \quad (6.63)$$

где T_J – инерционная постоянная времени энергосистемы; $P_{с.ном}$ – номинальная мощность энергосистемы; $\Delta\omega_* = \Delta\omega/\omega$ – относительное значение скорости.

Перейдем теперь к расчету синхронной мощности генератора Г1, которая будет тормозить ротор генератора. Когда генератор синхронно работает на энергосистему (см. рис. 6.12), то его режим определяется точкой «а» на пересечении характеристик $P(\theta)$ и P_T . В точке «d» ре-

жим неустойчивый. При любом бесконечно мало отклонении из точки «d» режим или перейдет в точку «a» (если $P_r > P_T$), или при $P_r < P_T$ угол будет расти и пройдет значение $\theta = 180^\circ$. Режим генератора будет асинхронным.

При синхронизации генератора мощность турбины мала и расходуется только на покрытие потерь холостого хода. В таком случае характеристика турбины на рис. 6.12 будет соответствовать линии 2', а точка «d» займет положение «d'». Пройдя режим в точке «d'», генератор потеряет устойчивость и перейдет в двигательный режим. Отсюда вытекает критерий устойчивости при синхронизации – вылет по углу за счет кинетической энергии ΔW не должен превышать значения $\theta_{d'}$.

Для этого энергия торможения $W_{\text{торм}} = \int_0^\pi P_{\text{max}} \sin \theta d\theta$ должна полностью «скомпенсировать» кинетическую энергию ΔW .

Если $W_{\text{торм}} \geq \Delta W$, то условие стабильности сохраняется. При $W_{\text{торм}} < \Delta W$ мощность торможения до точки «d'» недостаточна и энергосистема перейдет в асинхронный режим.

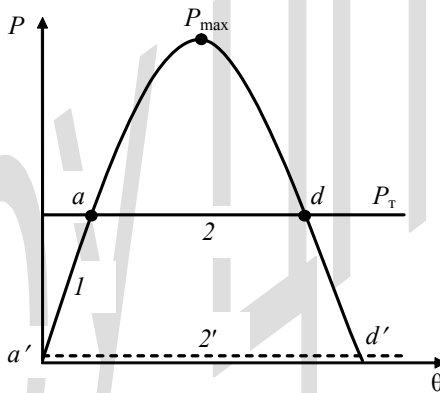


Рис. 6.12. Угловая характеристика $P(\theta)$

Перейдем непосредственно к расчету энергии торможения $W_{\text{торм}}$. Для этого воспользуемся средним значением мощности за полупериод

$$P_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} P_{\text{max}}. \text{ Тогда для энергии торможения получим}$$

$$W_{\text{торм}} = P_{\text{ср}} \frac{\tau}{2} = \frac{2}{\pi} P_{\text{max}} \frac{\tau}{2}, \quad (6.64)$$

где $\tau = \Delta f^{-1}$ - время, определяемое частотой поворотов ротора (по аналогии $T = f^{-1}$)

Здесь энергия торможения выражена через максимальное значение мощности P_{max} , что соответствует режиму с углом $\theta = 90^\circ$ на характеристике $P(\theta)$.

Заменим P_{max} на номинальное значение $P_{\text{с.ном}}$, принимая $P_{\text{с.ном}} = \alpha P_{\text{max}}$, (для угла $\theta = 30^\circ$ имеем $P_{\text{ном}} = P_{\text{max}} \sin \theta = 0,5 P_{\text{max}}$, и в этом случае $\alpha = 0,5$). Формула (6.64) принимает вид

$$W_{\text{торм}} = \frac{2}{\alpha \pi} P_{\text{с.ном}} \frac{\tau}{2}. \quad (6.65)$$

Пропускная способность межсистемных ЛЭП обычно составляет 5–10 % от установленной мощности энергосистемы. Примем $P_{\text{ЛЭП}} = \beta P_{\text{с}}$, где $\beta = 5 - 10 \%$.

Время τ определяется частотой поворотов ротора $\tau = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{f_0 \Delta f^*}$.

Подставляя это значение в (6.65), получим

$$W_{\text{торм}} = \frac{1}{\alpha \pi} P_{\text{с.ном}} \frac{1}{f_0 \Delta f^*}. \quad (6.66)$$

Приравняем энергию ускорения ΔW и торможения $W_{\text{торм}}$

$$T_J P_{\text{с.ном}} \Delta f^* = \frac{1}{\alpha \pi} \beta P_{\text{с.ном}} \frac{1}{f_0 \Delta f^*}. \quad (6.67)$$

Из этого уравнения определим

$$\Delta f^* = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha \pi f_0 T_J}}. \quad (6.68)$$

Найдем искомые величины для энергосистемы с параметрами $T_J = 10$ с, $f_0 = 50$ Гц, $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,05$. Подставляя в (6.68), получим $\Delta f^* = 0,008$ или, в герцах, $\Delta f = 0,4$ Гц.

Вывод формулы для расчета допустимого скольжения Δf^* при синхронизации двух энергосистем проведен с рядом упрощений: не учтен асинхронный момент в процессе синхронизации, анализ ограничен простой схемой энергообъединения из двух равновеликих энерго-

систем и др. Однако, несмотря на ряд упрощений, выполненный анализ позволяет оценить возможные пределы по частоте скольжения, при которых синхронизация будет успешной. Как видно из (6.68), для реальной энергосистемы главным фактором успешности синхронизации является снижение скольжения Δf_* перед включением межсистемной линии передачи.

Вылет ротора по углу до значения 180° практически недопустим. Для сохранения устойчивости синхронной работы необходим некоторый запас, к тому же включение может произойти при $\delta \neq 0$, что отрицательно повлияет на устойчивость. Учитывая эти обстоятельства, рекомендуется синхронизировать энергосистемы со скольжением не более 0,1–0,2 Гц.

Подчеркнем сам факт необходимости достаточно точной подгонки частоты в момент синхронизации. Противоаварийная автоматика (АЧР, САОН, АРС и др.) не обеспечивает восстановление частоты 50 Гц с такими малыми отклонениями. В решении этой проблемы многое зависит от действий диспетчера энергосистемы [27].