

Практическое занятие

РАБОТА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

6.1. Общие сведения

Синхронная машина – это электрическая машина переменного тока частота вращения ротора, которой равна частоте вращения магнитного поля статора и направлена в ту же сторону. Синхронные машины используются как генераторы, двигатели и компенсаторы.

Синхронные генераторы вырабатывают почти всю электроэнергию, производимую и используемую на Земле. Диапазон мощностей выпускаемых синхронных генераторов – от нескольких киловатт до нескольких сотен и тысяч мегаватт; напряжений – от 230 В до 36,75 кВ. Генераторы подразделяются на *турбогенераторы*, непосредственно присоединяемые к быстроходным газовым и паровым турбинам; *гидрогенераторы*, присоединяемые к гидротурбинам, и *генераторы общего назначения*, приводимые во вращение, как правило, двигателями внутреннего сгорания.

Синхронные двигатели выпускаются в диапазоне мощностей от 132 до 30000 кВт с частотой вращения от 250 до 3000 об/мин на напряжение 6 и 10 кВ, 50 Гц. Синхронные двигатели используются, как правило, для электроприводов мощных механизмов с нерегулируемой частотой вращения.

Двигатели, как и генераторы, снабжаются электромашинными либо вентильными (тиристорными) системами возбуждения.

Синхронные двигатели, работающие в режиме холостого хода с опережающим по фазе током, называют *компенсаторами*. Они работают в энергосистеме и имеют возможность регулирования ее коэффициента мощности по значению и характеру. Мощность крупных синхронных компенсаторов составляет 50, 100, 160 МВт.

6.2. Устройство синхронного генератора

Основными частями синхронной машины являются статор и ротор. Статор такой же, как статор асинхронной машины. Сердечник статора собран из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали и укреплен внутри массивного корпуса. С внутренней стороны статора в пазах размещена обмотка переменного тока, обычно трехфазная.

Ротор синхронной машины представляет электромагнит – явнополюсный (рис.6.1, а), состоящий из полюса 1, полюсного наконечника 2

и обмотки возбуждения 3 или неявнополюсный (рис.6.2 б), состоит из полюса 1 и обмотка возбуждения 2.

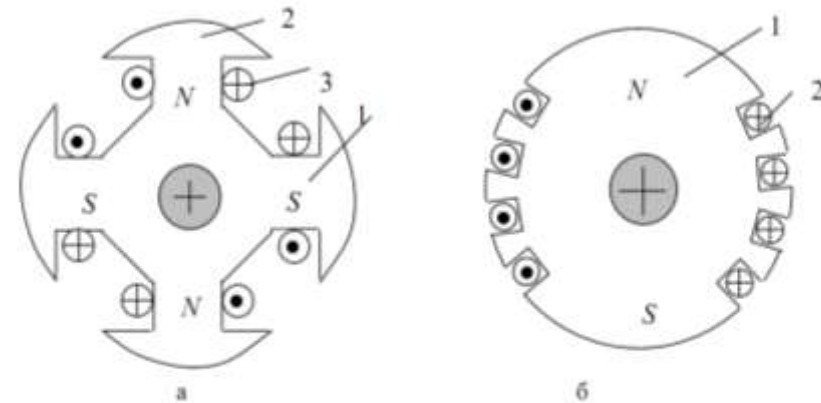


Рис. 6.1. Конструкция ротора синхронной машины а) явнополюсной б) неявнополюсной

Через контактные кольца и щетки от внешнего источника постоянного тока – возбудителя поступает ток в обмотку ротора. Простейшим возбудителем является генератор постоянного тока с самовозбуждением, установленный на валу синхронного генератора. Его мощность составляет 1 + 3% мощности синхронного генератора. С увеличением единичной мощности синхронного генератора возбудитель с коллектором стал ненадежным (истираются щетки, возрастает опасность искрения на коллекторе), поэтому в последнее время все большее применение находят вентильные системы возбуждения с диодами и тиристорами.

У многополюсной синхронной машины ротор имеет p пар полюсов. Токи в обмотке статора образуют тоже p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как у асинхронной машины). Ротор вращается с частотой вращения поля, его синхронная частота вращения равна:

$$n = \frac{60f}{p}$$

Неявнополюсные роторы применяются в синхронных машинах большой мощности, имеющих одну или две пары полюсов и соответственно частоту вращения $n = 3000$ или 1500 об/мин. Неявнополюсные роторы имеют синхронные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами на ТЭС и АЭС. Такие машины называют турбогенераторами. Неявнополюсной ротор изготавливается из массивной стальной поковки – «бочки». Об-

мотка постоянного тока укрепляется в пазах, выфрезированных в роторе по всей его длине.

Явнополюсные роторы применяются в синхронных машинах с большим числом полюсов и, соответственно, относительно низкой частотой вращения. Такие роторы имеют синхронные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с гидравлическими турбинами на ГЭС. Такие генераторы называют гидрогенераторами.

6.3. Принцип действия синхронного генератора

Работа синхронной машины определяется взаимодействием магнитных полей, создаваемых токами в обмотках статора и ротора. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающий (генератор) или тормозной (двигатель) момент.

Рассмотрим режимы работы двухполюсной машины. На обмотку статора подается симметричная система токов и в машине создается вращающееся магнитное поле. В обмотке возбуждения протекают постоянные токи. При отсутствии момента на валу (режим холостого хода), ось полюсов ротора будет совпадать с осью полюсов статора, если пренебречь всеми видами потерь энергии.

Для того чтобы заставить синхронную машину, включенную в сеть, работать в режиме *генератора*, отдавая энергию, необходимо увеличить вращающий механический момент $M_{\text{вп}}$, приложенный первичным двигателем к валу машины. Тогда под действием возросшего вращающего момента ось магнитных полюсов ротора в направлении вращения повернется на некоторый угол θ относительно оси полюсов статора. Так как при этом результирующее магнитное поле, создаваемое наложением магнитных полей статора и ротора, изменится, то ток в обмотках статора также изменится. Взаимодействие этого тока с магнитным полем ротора создает тормозной момент $M_{\text{т}}$, действующий на ротор. Таким образом, получаем преобразование энергии механического движения первичного двигателя в электрическую энергию генератора.

6.4. Уравнения электрического состояния синхронного генератора

При вращении ротора первичным двигателем со скоростью n_2 в обмотке статора индуцируется ЭДС E_1 , изменяющаяся с частотой

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60}$$

где p – число пар полюсов машины.

При подключении обмотки статора к какой-либо нагрузке в ней проходит многофазный ток, который создает вращающееся магнитное поле статора. Частота вращения этого поля:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Магнитные поля статора, ротора и собственно ротор вращаются с одинаковой скоростью, т.е. $n_1 = n_2$, поэтому машину называют синхронной.

В синхронной машине результирующий магнитный поток создается при взаимодействии намагничивающих сил обмотки возбуждения и обмотки статора.

На холостом ходе ток статора (якоря) равен нулю. Следовательно, магнитный поток генератора создается только обмоткой возбуждения. Поток направлен по оси полюсов ротора. Он индуцирует в фазах обмотки якоря ЭДС, которая определяется по формуле:

$$E_0 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot \Phi_u$$

где w_1 – число витков в фазе; $k_{\text{об1}}$ – обмоточный коэффициент обмотки якоря; Φ_u – магнитный поток возбуждения.

Если ток возбуждения невелик, то мал и магнитный поток, и магнитопровод машины не насыщен, магнитное сопротивление незначительно. Поэтому магнитный поток практически определяется только магнитным сопротивлением воздушного зазора между ротором и статором.

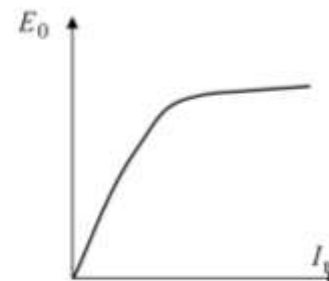


Рис. 6.2. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Холостой ход генератора определяется характеристикой холостого хода $E_0 = f(I_u)$, или $\Phi_u = f(I_u)$. При малых I_u характеристика прямолинейна. При возрастании потока увеличивается магнитное сопротивление магнитопровода. Номинальный режим работы генератора соот-

ветствует изгибу или «колену» кривой характеристики холостого хода, соответственно коэффициент насыщения составляет 1,1...1,4.

Важно, чтобы при получения синусоидальной ЭДС было приблизительно синусоидальное распределение магнитного поля. Для этого в неявнополюсных машинах обмотку возбуждения располагают так, чтобы были уменьшены амплитуды МДС высших гармоник. В явнополюсных машинах этого достигают при помощи увеличением зазора под краями полюсных наконечников.

Пусть трехфазный синхронный генератор работает в автономном режиме при симметричной нагрузке. Такой режим получается, когда к фазам обмотки статора подключены однородные и равные сопротивления. Следовательно, по фазным обмоткам генератора проходят токи. Они будут равны друг другу и сдвинутые по времени относительно друг друга на угол 120° . Эти токи создают магнитное поле якоря, которое вращаются с частотой, равной, частоте вращения ротора. Значит, магнитные потоки возбуждения Φ_a и якоря Φ_s будут взаимно неподвижны, а результирующий поток машины $\Phi_{рез}$ при нагрузке будет создаваться суммарным действием МДС обмоток якоря и возбуждения.

МДС обмотки возбуждения не зависит от нагрузки, значит, в режиме нагрузки результирующий поток генератора будет сильно отличаться от потока на холостом ходу. МДС обмотки якоря в зависимости от характера нагрузки и может оказывать размагничивающее и намагничивающее действие.

В синхронной машине влияние МДС якоря на магнитное поле называют *реакцией якоря*. Поскольку результирующий поток под действием реакции якоря изменяется, то напряжение генератора, работающего в автономном режиме, будет зависеть от характера и величины нагрузки, а также от величины МДС обмотки возбуждения, свойств магнитной системы и т.п.

В *явнополюсной машине* величина воздушного зазора между статором и ротором по всей окружности остается неизменной, поэтому при любой нагрузке результирующий магнитный поток машины и созданная им ЭДС определяются по характеристике холостого хода.

Реакция якоря влияет на рабочие свойства синхронной машины, причем это влияние зависит от характера нагрузки, который определяет различные углы сдвига фаз ψ между ЭДС и током в обмотке якоря.

При активной нагрузке $\psi = 0$ ток в фазе достигает максимума тогда, когда оси полюсов N и S ротора совпадают с осью среднего паза обмотки, а поток якоря Φ_s действует в направлении, перпендикулярном действию потока возбуждения Φ_a (поперек оси полюсов). Значит, поток

якоря действует по поперечной оси машины, подмагничивая одну половину каждого полюса и размагничивая другую. Вектор Φ_s отстает от вектора Φ_a на угол 90° . При этом модуль вектора результирующего потока определяется выражением:

$$\Phi_{рез} = \sqrt{\Phi_a^2 + \Phi_s^2}.$$

Если нагрузка индуктивная $\psi = 90^\circ$, то ток в фазе достигает максимума на четверть периода позже момента, соответствующего максимуму значению ЭДС E_0 . При этом поток якоря Φ_s действует по продольной оси машины против потока возбуждения Φ_a . Результирующий поток машины сильно уменьшается, т.к.:

$$\Phi_{рез} = \Phi_a - \Phi_s.$$

Уменьшается ЭДС якоря E вызвано уменьшением результирующего потока. Следовательно, при индуктивной нагрузке реакция якоря действует на машину размагничивающим образом.

Если нагрузка емкостная $\psi = -90^\circ$, то поток якоря также действует по продольной оси машины, но при этом совпадает по направлению с потоком возбуждения:

$$\Phi_{рез} = \Phi_a + \Phi_s.$$

Таким образом, при емкостной нагрузке, поток реакции якоря подмагничивает синхронную машину, а результирующий поток увеличивается, а так же увеличивается и ЭДС.

Таким образом, опережающий ток (активно-емкостная нагрузка) подмагничивает машину, а отстающий ток (активно-индуктивная нагрузка) размагничивает ее.

Суммарная ЭДС E генератора, при работе под нагрузкой, складывается из ЭДС, наводимой потоком ротора E_0 и ЭДС, наводимой потоком реакции якоря E_s :

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_s.$$

ЭДС E_s пропорциональна потоку Φ_s , а при отсутствии насыщения и току статора I_s , поэтому ее можно рассматривать как ЭДС самоиндукции, индуктированную в обмотке якоря:

$$\dot{E}_s = -jI_s \cdot X_s,$$

где X_s – индуктивное сопротивление синхронной машины, созданное потоком якоря.

В *явнополюсной машине* реакция якоря проявляется следующим образом. Между статором и ротором воздушный зазор не остается постоянным: он расширяется по направлению к краям полюсов и резко

увеличивается в зоне междуполюсного пространства. Так как одна и та же МДС якоря в зависимости от ее пространственного положения создает различные магнитные потоки, то поток якоря будет зависеть не только от величины МДС якоря F_a , но и от положения кривой распределения этой МДС относительно полюсов ротора.

При активной нагрузке $\psi = 0$, когда поток реакции якоря направлен вдоль поперечной оси машины. Хотя МДС якоря F_a распределена синусоидально, кривая распределения индукции будет иметь седлообразную форму. А максимуму МДС F_a соответствует небольшая индукция, т.к. магнитное сопротивление воздушного зазора максимально.

При индуктивной нагрузке $\psi = 90^\circ$, поток якоря направлен по продольной оси машины. Кривая распределения индукции будет симметрична относительно оси полюсов. Так как магнитное сопротивление воздушного зазора в данном месте невелико, то при том же значении МДС F_a индукция имеет большую величину, чем при активной нагрузке.

Метод двух реакций. При анализе различных режимов работы явнополюсной синхронной машины изменение результирующего сопротивления воздушного зазора вызывает трудности. Для их преодоления используют *метод двух реакций*. В соответствии с этим методом МДС якоря F_a представляют в виде суммы двух составляющих: продольной $F_{ad} = F_a \sin \psi$ и поперечной $F_{aq} = F_a \cos \psi$, причем:

$$F_a = \sqrt{F_{ad}^2 + F_{aq}^2}.$$

Продольная составляющая МДС F_{ad} создает продольный поток якоря Φ_{ad} , индуктирующий в обмотке якоря ЭДС E_{ad} , а поперечная составляющая F_{aq} – поперечный поток Φ_{aq} , индуктирующий ЭДС E_{aq} . При этом считают, что эти потоки не оказывают влияния друг на друга.

На основании метода двух реакций ток якоря создающий МДС F_a , представляют в виде двух составляющих: продольной I_d и поперечной I_q . Величину магнитных потоков Φ_{ad} и Φ_{aq} и индуктируемых ими ЭДС E_{ad} и E_{aq} определяют по кривой намагничивания машины. Но кривая намагничивания строится для МДС возбуждения, которая имеет не синусоидальное, а прямоугольное распределение вдоль окружности якоря. Поэтому для того, чтобы воспользоваться этой кривой, МДС F_{ad} и F_{aq} приводят к прямоугольной МДС возбуждения F_a , т.е. находят их экви-

валентные значения F'_{ad} и F'_{aq} умножая их значения на коэффициенты реакции якоря k_d и k_q :

$$F'_{ad} = k_d \cdot F_{ad}; \quad F'_{aq} = k_q \cdot F_{aq}.$$

Физически коэффициенты k_d и k_q характеризуют уменьшение магнитного сопротивления для потока Φ_a по сравнению с потоками Φ_{ad} и Φ_{aq} . Коэффициенты находятся в пределах $k_d = 0,8 \dots 0,95$; $k_q = 0,3 \dots 0,65$.

Для *невполюсной машины* полюсами МДС якоря приводятся к МДС обмотки возбуждения по формуле:

$$F'_a = k_d \cdot F_a.$$

ЭДС работы *явнополюсного генератора* под нагрузкой можно представить как сумму составляющих:

$$\dot{E} = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}.$$

Индуктируемые продольным и поперечным потоками якоря ЭДС E_{ad} и E_{aq} , представляют собой ЭДС самоиндукции, так как потоки Φ_{ad} и Φ_{aq} создаются МДС F_{ad} и F_{aq} , пропорциональными токам I_d и I_q . Поэтому для ненасыщенной машины считается:

$$\dot{E}_{ad} = jX_{ad} \cdot \dot{I}_d; \quad \dot{E}_{aq} = jX_{aq} \cdot \dot{I}_q,$$

где X_{ad} и X_{aq} – индуктивные сопротивления обмотки якоря, соответствующие полям продольной и поперечной реакции якоря.

6.5. Внешняя и регулировочная характеристики синхронного генератора

Внешняя характеристика генератора – это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки. Она снимается при неизменном токе возбуждения и характере нагрузки при постоянной частоте вращения ротора. При номинальной нагрузке I_{1n} генератор имеет номинальное напряжение U_{1n} , что достигается выбором тока возбуждения. Напряжение генератора становится равным ЭДС холостого хода E_0 при уменьшении тока нагрузки до нуля. Форма внешней характеристики зависит от характера нагрузки, что определяется углом сдвига фаз между напряжением и током якоря.

При активной и активно-индуктивной нагрузках $E_0 > U$, значит, при увеличении нагрузки напряжение генератора уменьшается. При активно-емкостной нагрузке $E_0 < U$, следовательно, при увеличении нагрузки напряжение генератора увеличивается. Это объясняется тем, что при активной и активно-индуктивной нагрузках имеется продольная

размагничивающая составляющая (при чисто активной нагрузке угол $(\varphi > 0)$), а при активно-емкостной нагрузке – продольная намагничивающая составляющая реакции якоря.

При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки происходит снижение напряжения. Это изменение напряжения характеризуется величиной (%):

$$\Delta u_{\%} = \left(\frac{U_0 - U_{1n}}{U_{1n}} \right) \cdot 100\%.$$

Коэффициент мощности синхронных генераторов в рабочем режиме обычно составляет $\cos \varphi = 0,95 \dots 0,85$ при отстающем токе. В этом случае $\Delta u_{\%} = 25 \dots 35\%$. Чтобы потребители, подключенные к генератору, работали при номинальном напряжении, применяют специальные устройства, стабилизирующие его выходное напряжение. Сложность регулирующего устройства определяется величиной изменения напряжения, чем оно больше, тем более сложно устройство. Поэтому лучше, чтобы генераторы имели небольшую величину $\Delta u_{\%}$. Но для этого необходимо в неявнополюсных машинах снижать синхронное индуктивное сопротивление, а в явнополюсных машинах путем увеличения воздушного зазора между ротором и статором. Однако это требует увеличения МДС обмотки возбуждения, что влечет за собой увеличение ее размеров и в конечном итоге делает синхронную машину более дорогой.

Регулировочная характеристика – это зависимости тока возбуждения от тока нагрузки $I_a = f(I_l)$ при неизменном напряжении U_l и характере нагрузки, при постоянной частоте вращения ротора.

Регулировочные характеристики показывают, как необходимо регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы поддерживать напряжение генератора неизменным. Из них следует, что с возрастанием индуктивно-активной нагрузки ($\varphi > 0$) необходимо увеличивать ток возбуждения, а с возрастанием активно-емкостной ($\varphi < 0$) – уменьшать его.

6.6. Параллельная работа синхронного генератора с сетью

На электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов, которые параллельно работают на общую электрическую сеть.

При ограниченной мощности каждого из установленных на электростанции генераторов параллельное включение их обеспечивает увеличение общей мощности электростанции, позволяет лучше организо-

вать обслуживание отдельных энергоблоков и повышает надежность энергоснабжения потребителей.

Мощные энергосистемы, позволяют наилучшим образом решать задачу рационального производства и распределения электрической энергии. Для них электрические станции объединяют для параллельной работы. Следовательно, синхронные машины, установленной на электрической станции, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность генератора является очень малой.

При включения генератора на параллельную работу с сетью важной является задача обеспечения наименьшего броска тока в момент присоединения генератора к сети. В противном случае возможны поломка генератора или первичного двигателя, срабатывание защиты.

Чтобы этого не происходило необходимо определенным образом отрегулировать режим работы генератора на холостом ходу и в определенный момент времени включить генератор в сеть. Совокупность этих действий называется **синхронизацией генератора**.

Чтобы синхронизировать генератор с сетью, необходимо обеспечить:

1. Равенство ЭДС E_0 генератора и напряжения сети U .
2. Равенство частот напряжений генератора f_g и сети f_c .
3. Совпадение по фазе напряжений генератора и сети.
4. Одинаковый порядок чередования фаз генератора и сети.

При точном выполнении условий синхронизации после включения генератора в сеть он остается в режиме холостого хода ($I = 0$).

Обычно на электрических станциях используются автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

На практике часто применяют метод самосинхронизации. Его суть состоит в следующем. Генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения, при этом во избежание перенапряжений обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление. Ротор разгоняют до синхронной частоты вращения (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, созданного индуктированием тока в успокоительной обмотке. Затем на обмотку возбуждения подают постоянный ток, это приводит к втягиванию ротора в синхронизм. В момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, но ток не должен превышать $3,5 \cdot I_{1n}$. После втягивания в синхронизм, путем увеличения мощности

приводного двигателя, регулируют до необходимого значения активную мощность генератора.

6.7. Регулирование активной мощности генератора и угловая характеристика

Активная мощность синхронного генератора определяется соотношением

$$P = 3U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ больше полезной активной мощности на относительно малую мощность электрических потерь в обмотке статора. Пренебрегая этими потерями, получим

$$P \approx P_{эм} = 3E_0 \cdot I \cdot \cos \psi.$$

Выразим активную мощность через угол рассогласования θ и получим

$$P = \frac{3E_0 \cdot U}{x} \sin \theta = P_{\max} \sin \theta,$$

где $P_{\max} = \frac{3E_0 \cdot U}{x}$.

Электромагнитный момент, создаваемый синхронной машиной

$$M_{эм} = \frac{P}{\Omega_j} = \frac{3E_0 \cdot U}{x \cdot \Omega_j} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta,$$

где $\Omega_j = \frac{2\pi n}{60}$ – угловая скорость магнитного поля статора;

$$M_{\max} = \frac{3E_0 \cdot U}{x \cdot \Omega_j}.$$

Так как угловая частота постоянна, то момент пропорционален активной мощности.

Зависимость электромагнитного момента (активной мощности) от угла рассогласования представляют собой аналитическое выражение *угловой характеристики* синхронной машины.

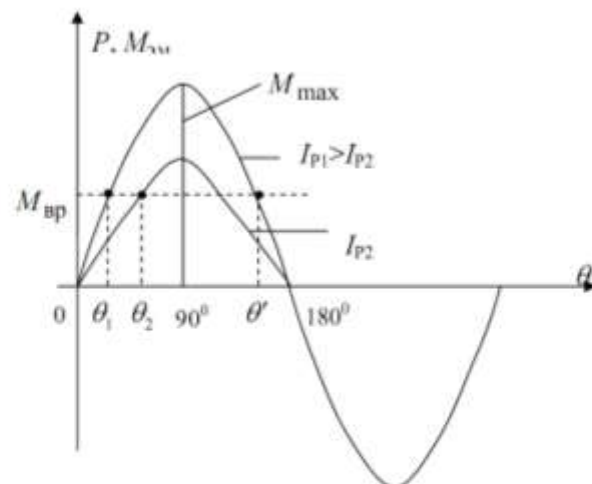


Рис. 6.3. угловая характеристика синхронного генератора

Активная мощность и электромагнитный момент пропорциональны ЭДС и синусу угла рассогласования θ , так как остальные параметры, входящие в формулы практически постоянны.

Амплитуду электромагнитного момента M_{\max} можно регулировать, так как она пропорциональна ЭДС E_0 , зависящей от тока ротора.

Покажем на угловой характеристике (рис. 6.3) значение вращающего момента $M_{тп}$ приводного двигателя в виде горизонтальной пунктирной линии (момент турбины не зависит от θ). В точке пересечения этой прямой с угловой характеристикой (при угле θ_1) $M_{тп} = M_{эм}$ и механическая мощность турбины равна электромагнитной (активной) мощности генератора. При том же вращающем моменте турбины, но меньшем токе ротора угол рассогласования будет больше ($\theta_2 > \theta_1$). Чем больше момент турбины, тем больше активная мощность, отдаваемая генератором в сеть. Мощность максимальна при $\theta = 90^\circ$.

Таким образом, *активная мощность генератора на электростанции регулируется моментом турбины или другого первичного двигателя и не зависит от сопротивления электрических приемников в сети.*

Диспетчер электростанции имеет суточно-почасовой график нагрузки всех потребителей, где указана требуемая активная и реактивная мощность. По указанию диспетчера синхронные генераторы включаются, нагружаются (или разгружаются и отключаются) так, чтобы в любой момент времени обеспечивалась требуемая мощность электроэнергии.

Синхронизм генератора существует, пока вращающий момент турбины уравновешивается электромагнитным моментом сопротивления генератора.

При $0 \leq \theta < 90^\circ$ (восходящий участок) генератор сохраняет синхронизм с сетью, т.е. имеет синхронную частоту вращения и работает устойчиво. Например, при увеличении вращающего момента турбины будет увеличиваться угол θ и, следовательно, электромагнитный момент сопротивления генератора $M_{эм}$ пока не наступит новое равновесие $M_{эп} = M_{эм}$. При этом увеличатся ток статора I , активная мощность P , но частота вращения ротора останется постоянной.

При $\theta = 90^\circ$ электромагнитный момент генератора максимален и при дальнейшем увеличении $M_{эп}$ генератор не может создать равного момента сопротивления ($M_{max} < M_{эп}$). Полюсы ротора «отрываются» от полюсов магнитного поля статора, частота вращения возрастает сверх синхронной и ротор «выпадает» из синхронизма. Это может возникнуть при постоянном вращающем моменте и уменьшении тока ротора (и ЭДС E_0) или снижении напряжения на зажимах генератора (при коротком замыкании в сети).

Амплитудное значение электромагнитного момента (или мощности) называют пределом статической устойчивости синхронной машины в синхронизме.

Для обеспечения динамической устойчивости допускается работа синхронной машины при угле рассогласования, не превышающем 30° при номинальной мощности.

При углах $90^\circ < \theta < 180^\circ$ работа синхронного генератора неустойчива. В этих условиях вращающий момент турбины $M_{эп}$ превышает максимальный тормозной электромагнитный момент генератора $M_{эм}$. Превышение вращающего момента ($M_{эп} > M_{эм}$) способствует дальнейшему ускорению ротора. Это обуславливает дальнейшее возрастание угла рассогласования и новое уменьшение тормозного момента и так происходит до тех пор, пока генератор не выпадает из синхронизма.

«Выпадению» из синхронизма предшествует неустойчивое состояние: неравномерное возрастание угла рассогласования θ до 90° , 180° , 360° и т.д., т.е. «проворачивание» ротора относительно магнитного поля токов статора и чередование режимов генератор-двигатель-генератор, броски тока статора достигают значений, соответствующих при $\theta = 180^\circ$

двойному току короткого замыкания: $I = \frac{2U}{x}$. Это состояние является аварийным.

Из него есть два выхода: отключить генератор от сети или стремиться удержать его в синхронизме, резко увеличивая ток возбуждения ротора. При этом усиливается магнитное поле и возрастает максимальный электромагнитный момент генератора.

Аварийное отключение мощного генератора может привести либо к отключению ряда потребителей соответствующей мощности, что связано с экономическим ущербом, либо перевода нагрузки на оставшиеся генераторы. В этом случае требуется определенное время для увеличения вращающих моментов турбин (увеличение расхода топлива, воды, пара).

6.8. Регулирование реактивной мощности генератора и U-образная характеристика

Рассмотрим влияние тока возбуждения на работу включенного в сеть синхронного генератора при постоянном вращающем моменте первичного двигателя.

Влияние тока возбуждения на реактивную мощность синхронного генератора, работающего в сети, можно пояснить еще и таким образом. При постоянном напряжении сети интенсивность результирующего магнитного поля и потокосцепления должны оставаться неизменными. Поэтому увеличение или уменьшение интенсивности магнитного поля полюсов ротора вызывает такое изменение расположения оси магнитного поля статора относительно ротора, при котором сохраняется результирующее потокосцепление машины: магнитное поле токов статора размагничивает или подмагничивает ротор, что изменяет характер реактивной мощности генератора. Нормально синхронный генератор работает с перевозбуждением.

Таким образом, **изменение тока возбуждения ротора синхронного генератора приводит к изменению характера реактивной мощности: при большом токе ротора (при перевозбуждении) реактивная мощность имеет индуктивный характер, при недо возбуждении – емкостной характер.**

Зависимость тока статора от тока возбуждения ротора при постоянной активной мощности P представляется U-образными характеристиками, показывающими возможность регулирования реактивной мощности.



Рис. 6.4. U-образные характеристики синхронного генератора

Кривая 1 на рис. 6.4 соответствует режиму холостого хода генератора ($P_2 = 0$). По мере возрастания мощности и момента экстремумы характеристик, как и сами характеристики перемещаются выше по кривой $a-b-c$ (кривые 2 и 3). В указанных точках ток статора имеет наименьшее значение, а $\cos\varphi = 1$. С возрастанием нагрузки точки U-образных характеристик, соответствующие $\cos\varphi = 1$, сдвигаются вправо, поскольку необходимо некоторое увеличение тока возбуждения для компенсации реакции якоря и активного падения напряжения в обмотке статора при увеличении тока статора.

6.9. Примеры решения задач

Пример 6.1. Заданы параметры трехфазного синхронного генератора: номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{1ном} = 3,2$ кВ при частоте $f = 50$ Гц; обмотка статора соединена Y; номинальный ток статора $I_{1ном} = 72,2$ А; число пар полюсов $2p = 8$; суммарные потери в режиме номинальной нагрузки $\Sigma P_{ном} = 27$ кВт; мощность на входе генератора $P_{ном} = 340$ кВт. **Определить:** полную номинальную мощность на выходе, КПД, полезную мощность на выходе генератора, коэффициент мощности нагрузки генератора, вращающий момент первичного двигателя.

Решение.

Полная номинальная мощность:

$$S_{ном} = \sqrt{3} \cdot I_{1ном} \cdot U_{1ном} = 1,73 \cdot 72,2 \cdot 3,2 = 399,7 \text{ кВА.}$$

Полезная мощность на выходе генератора:

$$P_{полн} = P_{ном} - \Sigma P_{ном} = 340 - 27 = 313 \text{ кВт.}$$

$$\text{Синхронная частота вращения: } n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/мин.}$$

Момент вращения приводного двигателя:

$$M_{1ном} = \frac{9,55 \cdot 10^3 \cdot P_{ном}}{n_1} = \frac{9,55 \cdot 10^3 \cdot 340}{750} = 4329 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Коэффициент мощности нагрузки генератора:

$$\cos\varphi_{1ном} = \frac{P_{ном}}{S_{ном}} = \frac{313}{399,7} = 0,78.$$

$$\text{КПД генератора: } \eta = \frac{P_{полн}}{P_{ном}} = \frac{313}{340} = 0,92.$$

Пример 6.2. Номинальная мощность гидрогенератора $S_{ном} = 26200$ кВА; номинальное (линейное) напряжение $U_{1ном} = 10,5$ кВ при частоте тока $f = 50$ Гц; обмотка статора соединена Y; синхронная частота вращения $n_1 = 125$ об/мин; число витков в фазе $\omega_1 = 126$; обмоточный коэффициент $k_{1\omega} = 0,94$. Нагрузка активно-индуктивная $\psi = 50^\circ$. **Определить** амплитуду основной гармонической МДС обмотки якоря, ее составляющие по продольной и поперечной осям.

Решение.

Ток в фазе обмотки якоря:

$$I = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{26200}{1,73 \cdot 10,5} = 1442,33 \text{ А.}$$

$$\text{Число пар полюсов: } p = \frac{60f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{125} = 24.$$

Действующее значение продольной и поперечной оси токов якоря

$$I_d = I \cdot |\sin\psi| = 1442,33 \cdot \sin(50^\circ) = 1104,89 \text{ А;}$$

$$I_q = I \cdot |\cos\psi| = 1442,33 \cdot \cos(50^\circ) = 927,11 \text{ А.}$$

Амплитуда продольной и поперечной оси МДС обмотки якоря

$$F_d = 0,45 \cdot m_1 \cdot I_d \cdot k_{1\omega} / p = 0,45 \cdot 3 \cdot 1104,89 \cdot 0,94 / 24 = 7361 \text{ А;}$$

$$F_q = 0,45 \cdot m_1 \cdot I_q \cdot k_{1\omega} / p = 0,45 \cdot 3 \cdot 927,11 \cdot 0,94 / 24 = 6177 \text{ А.}$$

Амплитуда основной гармонической МДС обмотки якоря

$$F = 0,45 \cdot m_1 \cdot I \cdot k_{1\omega} / p = 0,45 \cdot 3 \cdot 1442,33 \cdot 0,94 / 24 = 9609 \text{ А.}$$

Пример 6.3. В одной фазе статора синхронного генератора количество витков $\omega_1 = 24$; обмоточный коэффициент $k_{1\omega} = 0,9$; частота сети $f = 50$ Гц; синхронная частота вращения $n_1 = 1000$ об/мин; магнитный поток $\Phi = 0,05$ Вб. **Определить** число пар полюсов и индуцируемую ЭДС.

Решение.

Число пар полюсов: $p = \frac{60f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3$.

ЭДС в фазе обмотки якоря:

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 24 \cdot 0,9 \cdot 0,05 = 239,76 \text{ В.}$$

6.10. Задачи для самостоятельного решения

Задача 6.1. Заданы параметры трехфазного синхронного генератора: номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{\text{ном}} = 6,3 \text{ кВ}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$; обмотка статора соединена Y; полная номинальная мощность $S_{\text{ном}} = 330 \text{ кВА}$; КПД генератора $\eta = 92 \%$; число пар полюсов $2p = 6$; коэффициент мощности нагрузки генератора $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$. Определить: номинальный ток статора; суммарные потери в режиме номинальной нагрузки; мощность на входе генератора, полезную мощность на выходе генератора, вращающий момент первичного двигателя.

Задача 6.2. Выбрать необходимое число витков обмотки шестиполюсного синхронного генератора, ротор которого вращается с частотой $n_1 = 1000 \text{ об/мин}$, чтобы ЭДС на его выводах была 220 В , если магнитный поток, создаваемый в обмотке возбуждения ротора $\Phi = 0,055 \text{ Вб}$, а обмоточный коэффициент $k_{об} = 0,93$.

Задача 6.3. Ротор трехфазного синхронного генератора имеет 12 полюсов. Частота напряжения на зажимах генератора $f = 50 \text{ Гц}$. Полезная мощность приводного двигателя 5 кВт . Определить вращающий момент на валу генератора.