ЧАСТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ:

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ

Учебное пособие

Чебоксары 2019

УДК 621.311

ББК 31.279

Булычев А.В., Ларионова Е.Г.

Б90 Электромеханические переходные процессы в электрических системах: примеры и задачи с решениями. Учебное пособие – Чебоксары: ИПК РЗА, 2019. – 123 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы анализа и моделирования электромеханических переходных процессов систем электроснабжения, общие вопросы сохранения статической и динамической устойчивости электропередачи при включении и отключении цепи ЛЭП, при коротких замыканиях в электроэнергетической системе и действиях противоаварийной автоматики.

Пособие предназначено для специалистов в области электроэнергетики, обучающихся на курсах повышения квалификации, а также для студентов и магистрантов электроэнергетических специальностей вузов.

Научный редактор А.В. Булычев, д-р техн. наук, профессор

УДК 621.316.11
ББК 31.279

© ИПК РЗА, 2019

© А.В. Булычев, 2019

ISBN 978-5-6042431-0-7

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетическими системами (ЭЭС) принято называть совокупность взаимосвязанных элементов, объединенных общими технологическими процессами производства, передачи, распределения и преобразования электрической энергии.

Основные элементы, входящие в состав электроэнергетической системы, можно разделить по функциональным признакам на три группы.

Электрические станции, которые осуществляют преобразование энергии топлива, воды и других источников в электрическую энергию с напряжением, как правило, до 20 кВ. Основное технологическое оборудование электрических станций – это котлы, турбоагрегаты, гидроагрегаты (тепловые и гидравлические турбины и генераторы).

Электрические сети, обеспечивающие передачу и распределение электрической энергии на определенной территории. В их состав входят линии электропередачи, подстанции и распределительные устройства.

Приемники электрической энергии, предназначенные для преобразования электрической энергии в другой вид энергии, необходимый в данном месте.

Режим ЭЭС – это некоторое ее состояние, определяемое составом включенных и готовых к включению основных элементов.

Режим, в свою очередь, характеризуется схемой электрических соединений элементов ЭЭС и параметрами, определяющими процесс производства, передачи и распределения электрической энергии в каждый момент (значения токов, напряжений, мощностей и частоты). *Режимы различаются по скорости* изменения параметров, и, соответственно, разделяются на *установившиеся (стационарные) и переходные.*

В *установившемся* режиме система надежно обеспечивает потребителя электрической энергией нормированного, достаточно постоянного качества. При этом было бы желательно, чтобы режим

системы был совершенно неизменным. Однако такого полностью установившегося режима реально существовать не может. Нагрузка в системе колеблется: непрерывно происходят малые изменения числа подключенных потребителей, их мощности, состава. Кроме этих малых отклонений также довольно часто происходят крупные большие изменения, связанные с изменениями величины вырабатываемых и потребляемых мощностей и конфигурации системы (включения и отключения генераторов, линий передач, трансформаторов). Такие изменения – переходы от одного режима к другому – называются *переходными* режимами (процессами).

Переходные процессы возникают в электрических системах как в условиях нормальной эксплуатации (включение и отключение элементов системы, изменения мощности нагрузок и генераторов), так и в результате аварий (короткое замыкание (КЗ), обрыв нагруженной цепи в линии, выпадение синхронной машины из синхронизма).

При любом переходном процессе изменяется ток, передаваемая мощность, коэффициент мощности, уровень напряжения и частота. Но кроме этого, нарушается баланс между механическим моментом на валу электрической машины и электромагнитным моментом, что приводит к изменению скорости вращения роторов электрических машин. Таким образом, основное внимание в данном учебном пособии уделяется вопросам устойчивости совместного движения роторов электрических машин, объединенных в параллельную работу электрическими связями в электроэнергетических системах.

Переходные процессы в системах начинаются с возмущений – начальных отклонений параметров режима. Обычно различают большие и малые возмущения в системе.

Малые возмущения в действующей энергосистеме присутствуют непрерывно. Существование этих возмущений связано с непрерывным изменением нагрузки, действием регулирующих устройств и т.д. Говоря об установившемся режиме, в сущности, имеют в виду режим малых возмущений.

Большими возмущениями считают начальные отклонения параметров режима, вызванные какими-либо резкими изменениями в электроэнергетической системе: КЗ, коммутационными переключениями в электрической сети и т.д.

В зависимости от типа возмущений различают два основных вида устойчивости системы.

Статическая устойчивость – способность системы возвращаться в исходное состояние, или близкое к исходному, после малых возмущений.

Динамическая устойчивость – способность системы возвращаться в исходное состояние, или близкое к исходному, после действия больших возмущений.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Синхронной принято назвать электрическую машину переменного тока, ротор которой вращается с такой же скоростью, что и вращающееся магнитное поле статора, то есть синхронно с полем статора. Любая синхронная машина имеет две основные части: неподвижную – статор и вращающуюся – ротор, разделенные воздушным зазором. На статоре расположены обмотки трех фаз A, B, C, а на роторе – обмотка возбуждения f (рисунок 1).

Ротор синхронной оси имеет две оси симметрии: продольную (ось d) и поперечную (ось q).

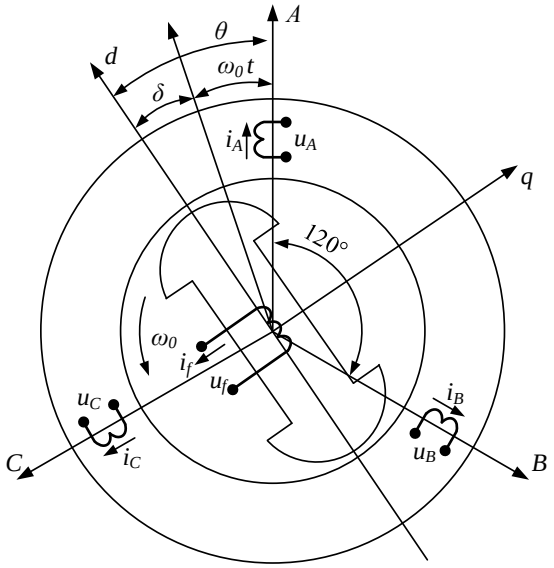


Рисунок 1

К основным допущениям, превращающим реальную синхронную машину в математическую модель, относятся:

– отсутствие насыщения магнитопровода;
– отсутствие потерь в сердечнике;

– синусоидальное распределение магнитного поля в воздушном зазоре;

– полная симметрия фазных обмоток статора.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема синхронной явнополюсной машины без демпферных обмоток, где стрелками указаны принятые положительные направления токов и напряжений, а также координатных осей статора и ротора.

Из рисунка 2 видно, что рассматриваемая машина содержит четыре магнитосвязанных контура.

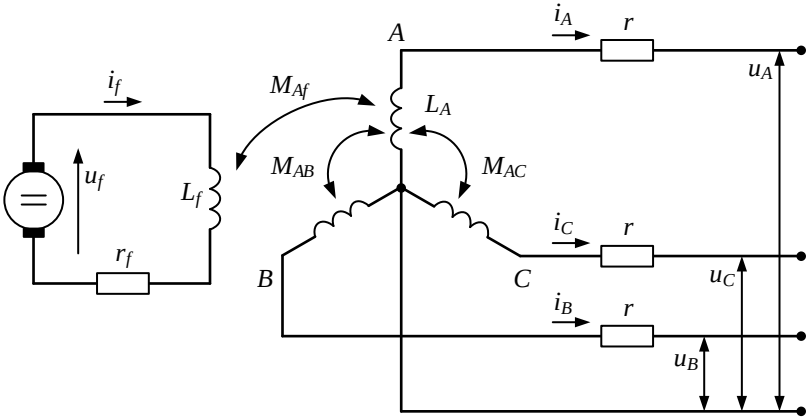


Рисунок 2

На основании законов Кирхгофа и Фарадея записываются дифференциальные уравнения:

$$
\begin{aligned}
u_A &= -Ri_A - \frac{d\psi_A}{dt};\\
u_B &= -Ri_B - \frac{d\psi_B}{dt};\\
u_C &= -Ri_C - \frac{d\psi_C}{dt};\\
u_f &= R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt},
\end{aligned}
\qquad (1.1)
$$

где R, R_f – активные сопротивления соответственно контуров каждой фазы и цепи возбуждения;

$\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_f$ – результирующие потокосцепления соответствующих обмоток; t – время.

Раскрываются выражения для потокосцеплений, которые при принятых допущениях представляют собой линейные зависимости от тока рассматриваемого контура и токов магнитосвязанных с ним контуров:

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f;$$
$$\psi_B = M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f;$$
$$\psi_C = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Bf} i_f;$$
$$\psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f f.$$

Во вращающейся синхронной машине значение L_f неизменно, а остальные значения L и M зависят от положения ротора, и следовательно являются функциями времени. Таким образом, коэффициенты системы дифференциальных уравнений контуров обмоток являются переменными величинами, что усложняет решение этой системы уравнений.

Для упрощения решения необходимо преобразовать дифференциальные уравнения контуров обмоток машины с переменными коэффициентами в уравнения с постоянными коэффициентами. При этом совершается переход от неподвижной трехосной системы отсчета (A, B, C) к вращающейся вместе с ротором двухосной системе $(d, q, 0)$ и записывается система уравнений в следующем виде:

$$i_d = \frac{2}{3}[i_A cos\gamma + i_B \cos(\gamma - 120) + i_C \cos(\gamma + 120)];$$
$$i_q = \frac{2}{3}[i_A sin\gamma + i_B \sin(\gamma - 120) + i_C \sin(\gamma + 120)]; \qquad (1.2)$$
$$i_0 = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C),$$

где i_d, i_q, i_0 – соответственно продольный, поперечный и нулевой токи статора.

Для симметричных режимов при соединении обмоток в звезду с изолированной нейтралью и при несимметричных режимах $i_0 = 0$.

Обратные соотношения при известных токах i_d и i_q имеют следующий вид:

$$i_A = i_d cos\gamma + i_q sin\gamma;$$
$$i_B = i_d \cos(\gamma - 120) + i_q \sin(\gamma - 120); \quad (1.3)$$
$$i_C = i_d \cos(\gamma + 120) + i_q \sin(\gamma + 120).$$

Выражаются напряжение, потокосцепление и ток через составляющие d и q:

$$u_d = -Ri_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt};$$
$$u_q = -Ri_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \frac{d\gamma}{dt}; \quad (1.4)$$
$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}.$$

В приведенных уравнениях в системе относительных единиц потокосцепления

$$\psi_d = L_d i_d + M_{ad} i_f;$$
$$\psi_q = L_q i_q; \quad (1.5)$$
$$\psi_f = M_{ad} i_d + L_f i_f,$$

где L_d – синхронная продольная индуктивность обмотки статора;

L_q – синхронная поперечная индуктивность обмотки статора;

M_{ad} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора в продольной оси;

L_f – индуктивность обмотки возбуждения.

Относительные значения индуктивностей равны соответствующим им индуктивным сопротивлениям:

$$L_d = X_d;\ M_{ad} = X_{ad}; L_q = X_q;\ L_f = X_f.$$

Переход к новым переменным в координатах $d, q, 0$ позволил преобразовать исходную систему уравнений (1.1) в систему уравнений (1.4), где все коэффициенты постоянны и, таким образом, указанные выше трудности решения уравнений устранены. Этот переход к новым координатам впервые предложили российский ученый А.А. Горев. и американский инженер Р. Парк.

Угол γ изменяется во времени по следующему закону:

$$\gamma = (\omega_{\text{c}} + \Delta\omega)t + \gamma_0,$$

где ω_{c} – синхронная угловая скорость вращения ротора;

$\Delta\omega$ – угловая скорость ротора относительно синхронно вращающейся оси;

γ_0 – начальный угол.

Следовательно,

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_{\text{c}} + \Delta\omega$$

или в относительных единицах

$$\frac{d\gamma}{dt} = 1 + s,$$

где s – скольжение ротора относительно синхронной оси.

Тогда уравнения (1.4) записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \frac{d\psi_d}{dt} - (1+s)\psi_q; \\ u_q &= -Ri_q - \frac{d\psi_q}{dt} + (1+s)\psi_d. \end{aligned} \qquad (1.6)$$

В уравнения для статора входят два вида ЭДС:

– трансформаторные:

$$\frac{d\psi_d}{dt}, \qquad \frac{d\psi_q}{dt};$$

– ЭДС вращения:

$$(1+s)\psi_q, \qquad (1+s)\psi_d.$$

Уравнения (1.6) описывают электромагнитные процессы, происходящие в синхронной машине. Обычно при анализе электромагнитных процессов в синхронных машинах пренебрегают изменениями их угловых скоростей вращения ($s = 0$) и тогда уравнения (1.6) выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q; \\ u_q &= -Ri_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d. \end{aligned}$$

1.1. Реакция якоря в синхронной машине

При холостом ходе возбужденного синхронного генератора в обмотке статора нет тока, и в магнитной системе машины имеется лишь одно основное магнитное поле (поле ротора), созданное намагничивающей силой обмотки возбуждения.

При включении генератора на симметричную нагрузку в обмотках статора (якоря) появляется 3-х фазная симметричная система токов, которая образует вращающееся магнитное поле. Незначительная часть магнитных силовых линий этого поля замыкается только вокруг проводников обмотки статора (якоря), не пронизывая ротор, и образует поле рассеяния статора. Основная часть силовых линий, замыкаясь вокруг проводников обмотки статора, пронизывает сердечник ротора и образует магнитное поле якоря. В результате взаимодействия поля статора (якоря) и основного поля образуется результирующее магнитное поле машины, которое отличается от основного как по величине, так и по форме.

Воздействие магнитного поля якоря на основное поле принято называть *реакцией якоря*. Реакция якоря оказывает значительное влияние на работу машины и зависит от величины и характера нагрузки. Для выяснения вопроса о влиянии реакции якоря на работу синхронной машины целесообразно рассмотреть случаи работы генератора при нагрузках предельного характера, а именно: активной, индуктивной и емкостной.

Активная нагрузка ($\psi_1 = 0$).

При чисто активной нагрузке ток статора I_1 и ЭДС холостого хода E_0 совпадают по фазе, т.е. одновременно достигают своих максимальных и минимальных значений. По линиям магнитной индукции, представленным на рисунке 3, видно, что МДС статора F_1 направлена перпендикулярно МДС возбуждения $F_{в0}$.

Такое воздействие МДС статора (якоря) на МДС возбуждения вызовет искажения результирующего поля машины: под набегающим краем полюса магнитное поле машины ослабляется, а

под сбегающим – усиливается. Вследствие насыщения магнитной цепи результирующее магнитное поле машины несколько ослабляется.

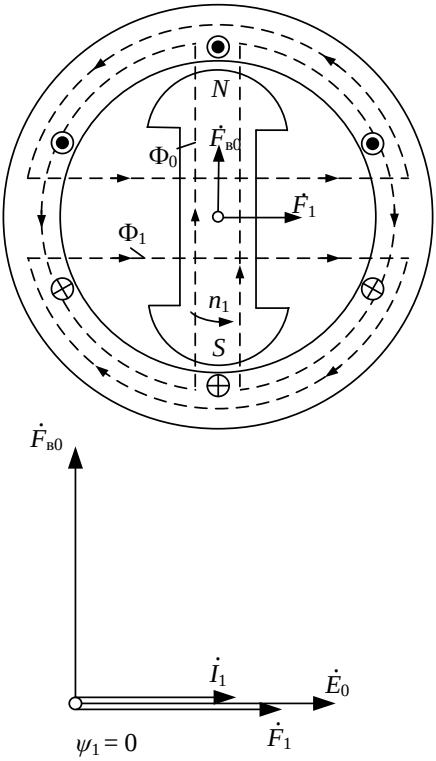
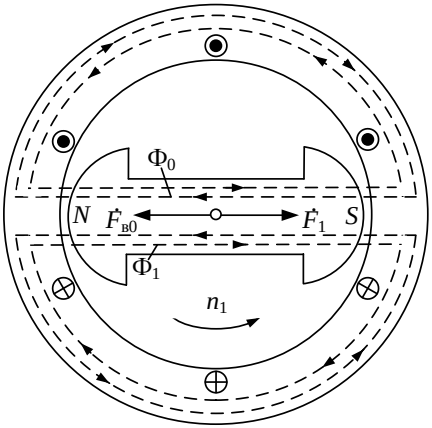


Рисунок 3

Индуктивная нагрузка ($\psi_1 = 90°$).

Под чисто индуктивной нагрузкой понимают такую, при которой ток статора отстает по фазе от ЭДС холостого хода на 90°. Поэтому он достигает максимального значения лишь после того, как соответствующий полюс ротора повернется по направлению вращения на 90° (рисунок 4). В этом случае МДС статора (якоря) F_1 действует вдоль оси полюсов ротора встречно МДС возбуждения $F_{в0}$. Будучи направленным навстречу основному полю, продольное поле якоря ослабляет (размагничивает) его. Следовательно, реакция

якоря при чисто индуктивной нагрузке носит продольно-размагничивающий характер. Она уменьшает результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины. Это приводит к уменьшению ЭДС, наводимой в обмотке статора, а при автономной работе генератора – еще и к понижению напряжения на его зажимах.



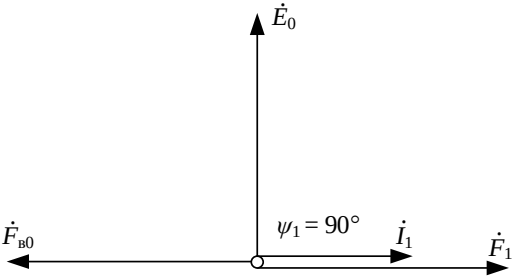


Рисунок 4

Емкостная нагрузка ($\psi_1 = -90°$).

При чисто емкостной нагрузке ток статора I_1 опережает по фазе ЭДС E_0 на 90°. Поэтому ток в фазе статора достигает максимального значения, когда соответствующий полюс еще не дошел на 90° до положения, в котором он находился при чисто активной нагрузке (рисунок 5). Магнитодвижущая сила статора F_1 действует по оси

полюсов согласно с МДС возбуждения $F_{в0}$. При этом происходит усиление магнитного поля возбуждения.

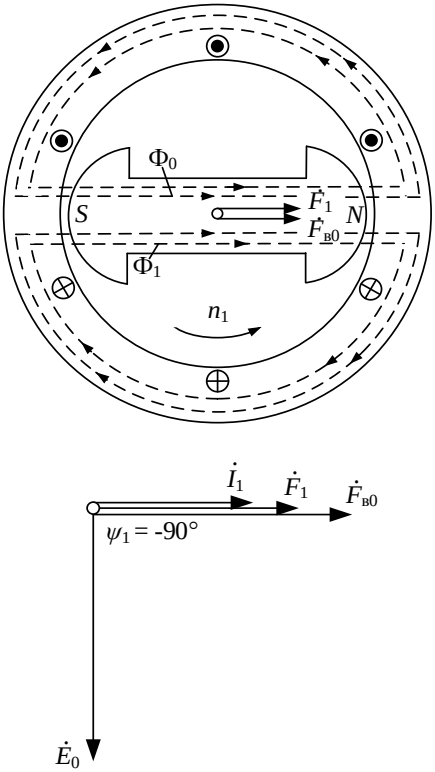


Рисунок 5

Таким образом, при чисто емкостной нагрузке синхронного генератора реакция якоря оказывает продольно-намагничивающее действие. Магнитное поле при этом не искажается.

1.2. Параллельная работа синхронной машины с сетью

В современных энергосистемах на параллельную работу с сетью включены большинство электростанций, чем достигается высокая надежность энергоснабжения потребителей и возможность маневрирования энергоресурсами.

Все параллельно работающие синхронные генераторы должны отдавать в сеть ток одинаковой частоты f. Следовательно их частоты вращения должны быть обратно пропорциональны числу пар полюсов:

$$n_1 = \frac{60\,f}{p_1}, n_2 = \frac{60\,f}{p_2}, n_3 = \frac{60\,f}{p_3} \text{ и т. д.}$$

При включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью могут возникнуть чрезмерно большой бросок тока и ударные электромагнитные моменты. Чтобы не допустить этого, необходимо отрегулировать режим работы синхронного генератора на холостом ходу перед его включением. Совокупность этих подготовительных операций называют синхронизацией генератора.

Включение генератора на параллельную работу выполняется при следующих условиях:

– напряжение включаемого генератора $U_{\text{Г}}$ должно быть равно напряжению сети $U_{\text{С}}$;

– частота генератора $f_{\text{Г}}$ должна быть равной частоте сети $f_{\text{С}}$;

– чередование фаз генератора и сети должно быть одинаково;

– напряжения генератора $U_{\text{Г}}$ и сети $U_{\text{С}}$ должны совпадать по фазе.

При этом векторы напряжений генератора и сети, показанные на рисунке 6, совпадают и вращаются с одинаковой скоростью:

$$\dot{U}_{\text{ГА}} - \dot{U}_{\text{СА}} = 0, \dot{U}_{\text{ГВ}} - \dot{U}_{\text{СВ}} = 0,\ \dot{U}_{\text{ГС}} - \dot{U}_{\text{СС}} = 0.$$

Из-за неправильной синхронизации может возникнуть серьезная авария. Если напряжения генератора $U_{\text{Г}}$ и сети $U_{\text{С}}$ в момент включения находятся в противофазе, то это эквивалентно КЗ при удвоенном напряжении, и при включении ток достигает $2I_{\text{КЗ}}$, возникают ударные электромагнитные силы и моменты.

Рассматривается сеть, имеющая бесконечную мощность, т.е. напряжение и частота сети имеют постоянное значение $U_{\text{С}} = const$ и $f_{\text{С}} = const$. Тогда напряжение параллельно работающего генератора равно напряжению сети $U_{\text{Г}} = U_{\text{С}}$.

В зависимости от конструкции ротора различают два типа синхронных генераторов: неявнополюсные и явнополюсные.

Неявнополюсные синхронные машины, как правило, имеют большую мощность и являются быстроходными (1500 и 3000 об/мин или, соответственно, 157 и 314 рад/с). Они используются на тепловых и атомных электростанциях и приводятся во вращение с помощью быстроходных турбин.

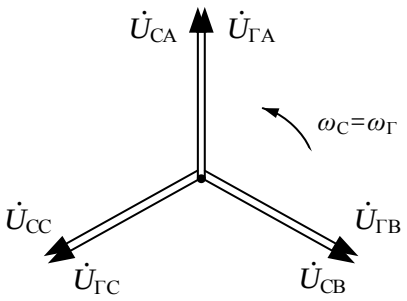


Рисунок 6

У неявнополюсных синхронных машин синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям равны по величине $X_d = X_q$, и выражение характеристики мощности для синхронной машины имеет следующий вид:

$$P = \frac{E_q \cdot U_С}{X_d} \sin \delta. \qquad (1.7)$$

Угловая характеристика активной мощности неявнополюсной синхронной машины показана на рисунке 7.

Явнополюсные синхронные генераторы выполняют на все мощности при скоростях вращения 1500 об/мин (157 рад/с) и меньше. Их используют, как правило, на гидроэлектростанциях совместно с тихоходными турбинами.

У явнополюсных синхронных машин синхронные индуктивные сопротивления по продольной X_d и поперечной X_q осям различаются по величине, и выражение характеристики мощности для синхронной машины записывается таким образом:

$$P = \frac{E_q \cdot U_\text{C}}{X_d}\sin\delta + \frac{{U_\text{C}}^2}{2}\frac{X_d - X_q}{X_d X_q}\cos 2\delta = P_I + P_{II}. \qquad (1.8)$$

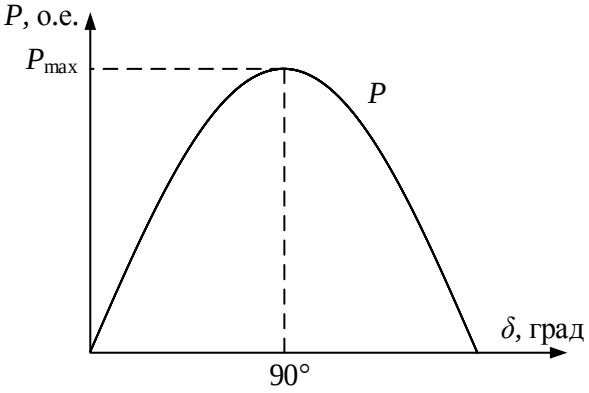


Рисунок 7

Угловая характеристика активной мощности явнополюсной синхронной машины показана на рисунке 8.

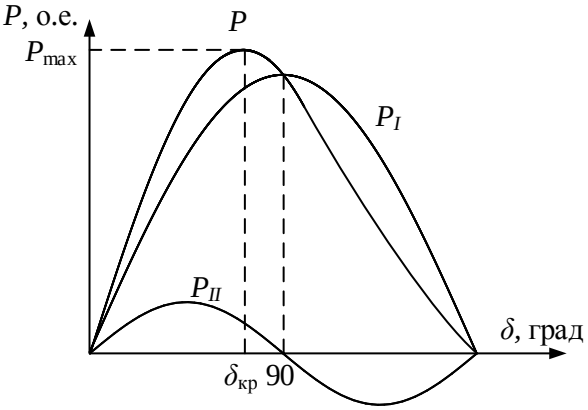


Рисунок 8

Далее рассматриваются синхронные режимы параллельной работы синхронных машин.

Изменение реактивной мощности. Режим синхронного компенсатора.

– Если условия синхронизации выполнены и синхронный генератор (СГ) включен на параллельную работу с сетью, то ЭДС генератора и напряжение сети равны $\dot{E} = \dot{U}_{\mathrm{C}}$, а ток $I = 0$, то машина не принимает никакой нагрузки.

– Если после синхронизации увеличить ток возбуждения у СГ (машина перевозбуждена), то $\dot{E} > \dot{U}_{\mathrm{C}}$, следовательно возникает ток I, отстающий от $\Delta\dot{U}$, $\dot{E}$ и $\dot{U}_{\mathrm{C}}$ на 90°.

Машина будет отдавать в сеть индуктивный ток и реактивную мощность.

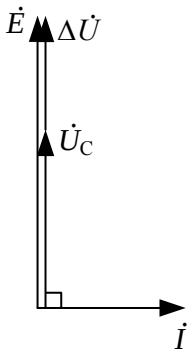


Рисунок 9

– Если после синхронизации увеличить ток возбуждения у СГ (машина недовозбуждена), то $\dot{E} < \dot{U}_{\mathrm{C}}$, следовательно возникает ток I, отстающий от $\Delta\dot{U}$, но опережающий $\dot{E}$ и $\dot{U}_{\mathrm{C}}$ на 90°. Значит машина будет отдавать в сеть емкостный ток и потреблять из сети реактивную мощность.

Таким образом, перевозбужденная синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости, а недовозбужденная машина эквивалентна индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная лишь реактивным током, называется синхронным компенсатором. Такие компенсаторы применяются для компенсации коэффициента мощности и поддержания нормального уровня напряжения в сети.

Изменение активной мощности. Режим генератора и двигателя.

– Чтобы включенный на параллельную работу СГ принял на себя активную нагрузку и работал в режиме генератора, необходимо увеличить движущий механический момент (например, увеличив поступление пара в турбину).

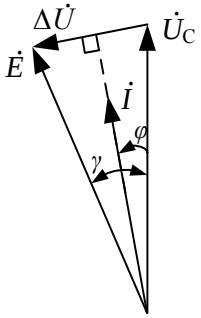


Рисунок 10

Вектора ЭДС генератора будут опережать напряжение сети $\dot{U}_C$ на угол γ и возникнет ток I, отстающий от $\Delta\dot{U}$ на 90°, но при этом $-90° < \varphi < 90°$.

В этом случае машина отдает активную мощность в сеть.

– Если притормозить ротор СГ, создав на валу механическую нагрузку, то ЭДС генератора $\dot{E}$ будет отставать от напряжения сети $\dot{U}_C$ на угол γ и возникнет ток I, отстающий от $\Delta\dot{U}$ на 90°, но при этом $90° < \varphi < 270°$.

В этом случае машина работает в режиме двигателя, потребляя активную мощность из сети.

Зависимость тока статора I_1 от тока в обмотке возбуждения $i_в$ при неизменной активной нагрузке генератора выражается графически *U*-образной кривой. *U*-образные кривые синхронного генератора на рисунке 12 показывают, что любой нагрузке генератора соответствует такое значение тока возбуждения i_f, при

котором ток статора I_1 становится минимальным и равным только активной составляющей.

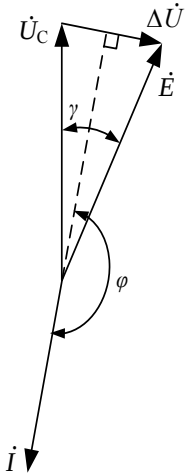


Рисунок 11

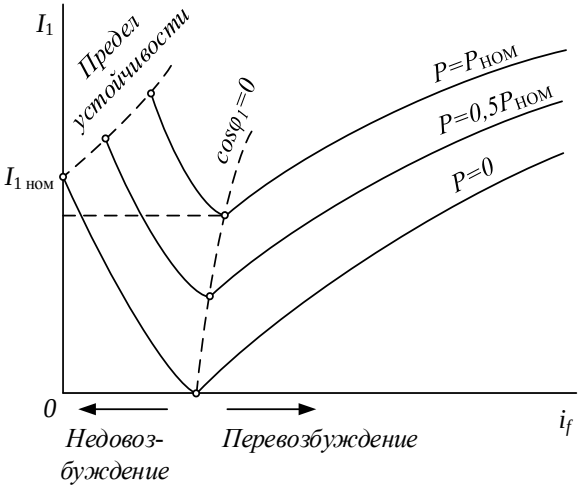


Рисунок 12

Правые части кривых соответствуют перевозбужденной машине и отдаче в сеть индуктивного тока и реактивной мощности, а левые части – недовозбужденной машине и отдаче в сеть

емкостного тока и потреблению реактивной мощности.

2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Уравнение относительного движения ротора электрической машины

Движение вращающейся части ротора генератора можно описать при помощи второго закона Ньютона следующими уравнениями:

$$J_0\alpha = \Delta M; \tag{2.1}$$

$$\Delta M = M_{\text{Т}} - M, \tag{2.2}$$

где J_0 – момент инерции ротора;

α – угловое ускорение турбины;

ΔM – небаланс моментов, действующих на вал;

Учитывая, что $\alpha = d\omega/dt$, можно записать уравнение движения ротора следующим образом:

$$J_0\frac{d\omega}{dt} = \Delta M; \tag{2.3}$$

$$\frac{J_0\omega_0}{S_{\text{ном}}}\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta M}{M_{\text{ном}}} = \Delta M_*; \tag{2.4}$$

$$T_J\frac{d\omega_*}{dt} = \Delta M_*, \tag{2.5}$$

где $T_J = J_0{\omega_0}^2/S_{\text{ном}}$ – постоянная инерции ротора, имеющая размерность времени и численно равная времени разворота ротора из неподвижного состояния до номинальной синхронной скорости.

При расчетах электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах вместо небаланса моментов для упрощения используется, как правило, небаланс между мощностью турбины и электрической (электромагнитной) мощностью генератора:

$$\Delta P = P_{\text{Т}} - P; \tag{2.6}$$

$$T_J\frac{d\omega}{dt} = \Delta P. \tag{2.7}$$

Параметры движения ротора генератора, а именно его угловое ускорение α, угловая скорость ω и угол θ (рисунок 1) связаны между собой через производные:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}; \quad (2.8)$$

$$\theta = \omega_0 t + \delta; \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2}; \quad (2.10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (2.11)$$

При подстановке правых частей выражений (2.6) и (2.9) в уравнение движения ротора генератора (2.7) это уравнение принимает окончательную форму

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_\text{Т} - P. \quad (2.12)$$

Выражение (2.11) можно записать и в других формах (таблица 1), различающиеся тем, что некоторые или все его составляющие выражены в именованных единицах.

Таблица 1 – Формы уравнения движения ротора генератора

Уравнение движения ротора генератора	T_J	t	δ	P
$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_\text{Т} - P$	рад	рад	рад	о.е.
$\omega_0 T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_\text{Т} - P$	с	рад	рад	о.е.
$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_\text{Т} - P$	с	с	рад	о.е.
$\frac{T_J}{360 f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_\text{Т} - P$	с	с	эл.град	о.е.
$\frac{T_J S_\text{б}}{360 f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_\text{Т} - P$	с	с	эл.град	кВт

2.2. Понятие о статической устойчивости

Под статической устойчивостью электрической системы понимается ее способность возвращаться в исходное состояние при малых возмущениях.

На рисунке 13 представлена модель электрической системы, которая содержит вращаемый турбиной Т генератор Г, повышающий трансформатор Т1, линию электропередач, понижающий трансформатор Т2 и приемную электрическую систему С. Генератор через эквивалентные трансформаторы и линии работает на шины приемной системы. Турбина создает вращающий момент $M_{\text{Т}}$, под действием которого генератор вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω_f. На шинах генератора Г и приемной системы С присутствуют напряжения U_{Γ} и $U_{\text{С}}$.

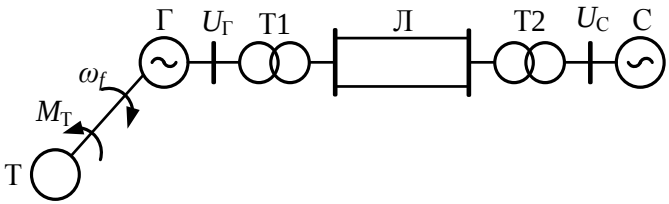


Рисунок 13

Мощность приемной системы настолько велика по сравнению с мощностью рассматриваемой электропередачи, что можно считать, что напряжение на шинах неизменно по амплитуде и фазе при любых изменениях режима на электропередаче. В этом случае шины приемной системы называют шинами бесконечной мощности (ШБМ).

Принимаются следующие допущения:

– отсутствует автоматическое регулирование возбуждения;

– активные сопротивления элементов электрической системы равны нулю;

– линия электропередачи не генерирует зарядной мощности;

– скорость вращения приемной системы ω_{Γ} постоянна.

Учитывая данные допущения, можно изобразить схему замещения рассматриваемой электрической системы (рисунок 14).

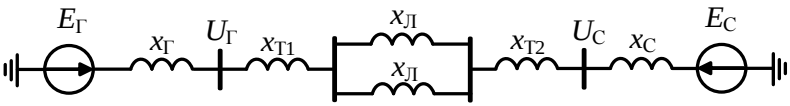


Рисунок 14

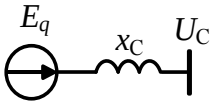


Рисунок 15

Результирующее индуктивное сопротивление сети определяется из рисунка 15 по следующему выражению:

$$x_{\text{С}} = x_d + x_{\text{Т1}} + \frac{x_{\text{Л}}}{2} + x_{\text{Т2}}.$$

На рисунке 16 показана векторная диаграмма нормального режима работы электропередачи. Учитывая неравенства $OA = E_q \sin\delta$ и $BC = I_{\text{а}} x_{\text{С}}$ вытекает соотношение

$$I_{\text{а}} x_{\text{С}} = E_q \sin\delta,$$

где $I_{\text{а}}$ – активный ток;

δ – угол сдвига вектора ЭДС E_q относительно вектора напряжения приемной системы $U_{\text{С}}$.

Умножив обе части равенства на $U_{\text{С}}/x_{\text{С}}$, можно получить следующее выражение:

$$U_{\text{С}} I_{\text{а}} = \frac{E_q U_{\text{С}}}{x_{\text{С}}} \sin\delta$$

или

$$P = \frac{E_q U_{\text{С}}}{x_{\text{С}}} \sin\delta,$$

где P – активная мощность, выдаваемая генератором.

При постоянстве ЭДС E_q и напряжения U_C изменение передаваемой мощности P может быть обусловлено лишь соответствующим изменением угла δ.

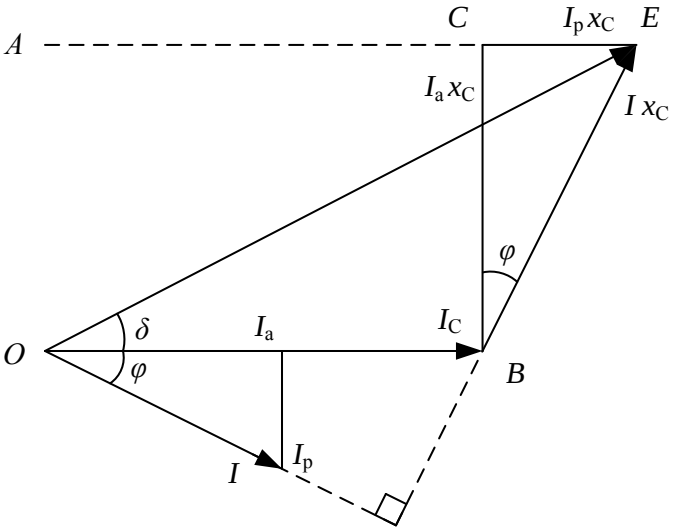


Рисунок 16

Предполагается, что точка a – режимная точка. В этой точке мощности генератора и турбины уравновешивают друг друга. При увеличении угла δ на величину $\Delta\delta$ мощность, следуя синусоидальной зависимости, также возрастет на некоторую величину ΔP. Из рисунка видно, что в точке a положительному приращению угла $\Delta\delta$ соответствует также положительное изменение мощности генератора ΔP. Мощность турбины от угла δ не зависит и остается постоянной величиной. В результате изменения мощности генератора равновесие моментов турбины и генератора нарушается. При увеличении мощности на валу машины возникает избыточный момент тормозящего характера, т.к. тормозящий момент генератора преобладает над вращающим моментом турбины. Тормозящий момент вызывает замедление ротора генератора, что вызывает перемещение ротора в сторону уменьшения угла δ. В итоге в точке a восстанавливается исходный

режим работы. В результате уменьшения угла точка *a’’* также стремится к своему исходному состоянию.

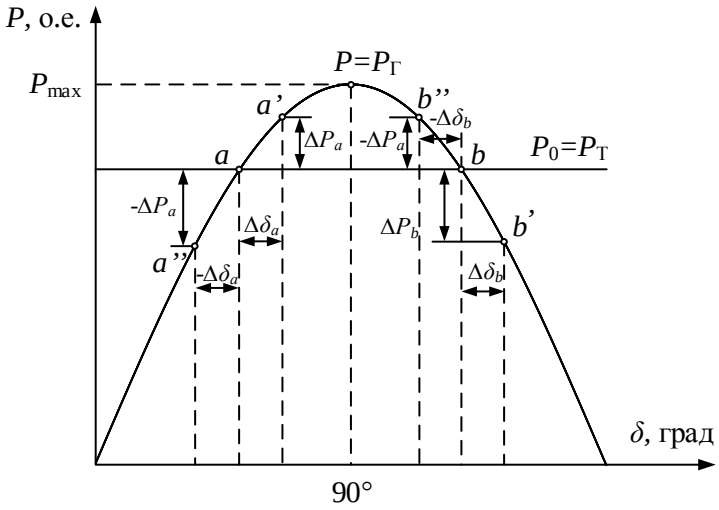


Рисунок 17

Рассматривается режим работы в точке *b*. Если уменьшить мощность генератора в точке *b*, то на валу ротора генератора возникает ускоряющий избыточный момент, который увеличивает угол δ. С ростом угла мощность генератора ещё уменьшается, это приводит к дополнительному увеличению ускоряющего момента, таким образом возникает лавинообразный процесс, который называют выпадением из синхронизма. Процесс выпадения из синхронизма и асинхронный режим, в котором в итоге оказывается генератор, характеризуется непрерывным перемещением вектора ЭДС E_q относительно напряжения приемной системы $U_{\text{С}}$.

Если в точке *b* мощность генератора увеличить, то возникнет избыточный тормозной момент, который вызовет перемещение рабочей точки системы в точку *a*.

Таким образом, точка *a* характеристики мощности является точкой устойчивого равновесия моментов турбины и генератора, точка *b* – точкой неустойчивого равновесия. Аналогично все точки

на возрастающей части синусоидальной характеристики мощности являются точками устойчивой работы системы, а точки на падающей части характеристики – точками неустойчивой работы.

Отсюда вытекает следующий формальный признак статической устойчивости: приращения угла $\Delta\delta$ и мощности ΔP синхронной машины должны иметь один и тот же знак, т.е.

$$\frac{\Delta P}{\Delta\delta} > 0 \text{ или } \frac{dP}{d\delta} > 0.$$

Полученный признак статической устойчивости называют практическим критерием статической устойчивости.

2.3. Метод малых колебаний для анализа статической устойчивости электрических систем

Метод малых колебаний основывается на теоремах Ляпунова. Он предполагает следующий порядок расчета статической устойчивости с помощью метода малых колебаний:

1. Составляется система нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают электромеханический переходный процесс.
2. Переменным, которые входят в данную систему, даются малые приращения: $\delta_0 + \Delta\delta$.
3. Нелинейные функции, которые входят в эту систему уравнений, раскладываются в ряд Тейлора. В этом ряду слагаемые, содержащие приращения $\Delta\delta^2$ и выше, отбрасываются, тем самым получают линеаризованную систему уравнений.
4. Составляется характеристическое уравнение, которое имеет следующий вид:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \ldots + a_n = 0.$$

5. Вычисляются корни характеристического уравнения. Их количество определяется порядком.
6. На основании теорем Ляпунова судят об устойчивости или неустойчивости исследуемой системы.

Метод малых колебаний можно применить для анализа

статической устойчивости системы, схема которой приведена на рисунке 14. При небольших возмущениях движение ротора описывается уравнением

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{\text{Т}} - P.$$

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P - P_{max} \sin\delta.$$

Правая часть уравнения нелинейна, поэтому оно не имеет аналитического решения. Но при малых отклонениях от положения равновесия оказывается возможным линеаризовать это уравнение, приведя его к виду дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами. Функция $\Delta P = P_0 - P_{max} \sin\delta$ разлагается в ряд Тейлора в области δ_0, с помощью некоторых преобразований получается выражение

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{1}{T_J}\frac{dP}{d\delta}\Delta\delta = 0.$$

Решением этого уравнения является изменение во времени в соответствии с выражением

$$\Delta\delta = K_1 e^{p_1 t} + K_2 e^{p_2 t},$$

где p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения

$$p^2 + \frac{1}{T_J}\frac{dP}{d\delta} = 0,$$

которые равны

$$p_{1,2} = \pm\sqrt{-\frac{1}{T_J}\frac{dP}{d\delta}} \pm j\sqrt{\frac{1}{T_J}\frac{dP}{d\delta}}.$$

При $dP/d\delta > 0$ корни являются чисто мнимыми, при $dP/d\delta < < 0$ – чисто вещественными. В случае мнимых корней $p_{1,2} = \pm j\omega$, где $\omega = \sqrt{\frac{1}{T_J}\frac{dP}{d\delta}}$ решение характеристического уравнения будет иметь вид $\Delta\delta = K_1 e^{j\omega t} + K_2 e^{-j\omega t}$.

Изменение угла в соответствии с этим выражением происходит по закону незатухающих гармонических колебаний в окрестности

δ_0. Через некоторое время после нарушения исходного состояния установится первоначальный режим. Система в этом случае устойчива.

Если корни характеристического уравнения вещественные ($p_{1,2} = \pm\rho$), то изменение угла носит апериодический характер. Наличие положительного вещественного корня приводит к нарастанию $\Delta\delta$, угол постоянно увеличивается и система потеряет устойчивость.

2.4. Виды нарушения статической устойчивости

В электрической системе постоянно возникают малые возмущения, создаваемые изменениями нагрузки, переключениями в электрической схеме, различными эксплуатационными переключениями и т.д. Время, место и причина возникновения возмущений носят случайный характер. Эти возмущения вызывают соответственно свободные изменения параметров режима электроэнергетической системы. Движения могут быть нарастающими, затухающими, колебательными или апериодическими.

Если возникшее под действием случайных возмущений движение приводит к возвращению системы в исходный режим, то такое состояние системы называют устойчивым. В противном случае происходит нарушение нормальной работы системы.

Различают три вида нарушения статической устойчивости: апериодическое (сползание), самораскачивание, самовозбуждение.

Сползание. Пусть мощность турбины увеличилась и стала по величине равной максимальной электрической мощности, которая может быть передана от генератора в систему (рисунок 18). Тогда установившийся режим возможен только в одной точке d. При возмущениях, действующих в сторону увеличения угла δ, происходит прогрессирующее увеличение избыточной механической мощности и угла, в результате чего генератор выпадает из синхронизма. Причем угол изменяется без колебаний

(апериодически), сначала медленно, а затем все ускоряясь, как бы скатываясь, сползая (рисунок 19).

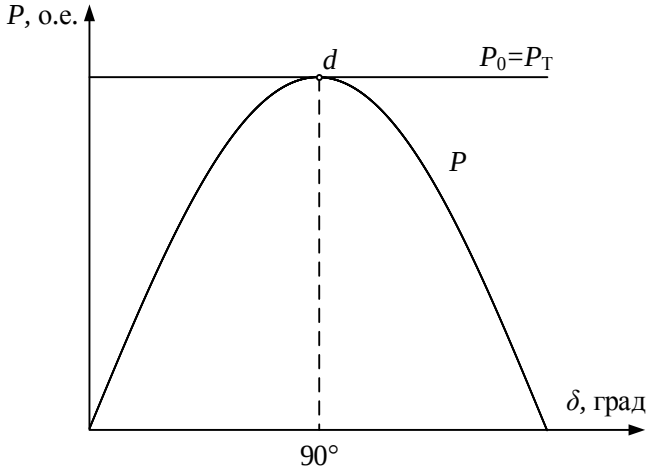


Рисунок 18

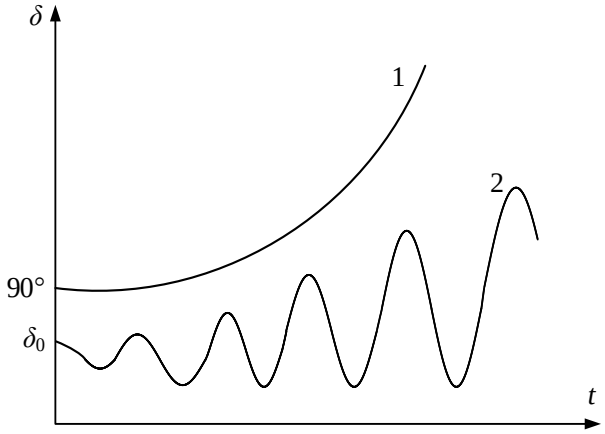


Рисунок 19

1 – спозание;

2 – самораскачивание.

Самораскачивание. В настоящее время все генераторы и синхронные двигатели снабжаются автоматическими регуляторами

возбуждения (АРВ). Гидравлические и паровые турбины имеют автоматические регуляторы скорости (АРС). Для того чтобы регуляторы выполняли свои функции, они должны быть соответствующим образом настроены, т. е. в регуляторах должны быть установлены такие коэффициенты усиления и выбраны параметры, которые обеспечивают его нормальную работу. При очень большом коэффициенте усиления, например по отклонению напряжения в АРВ, могут возникнуть колебания в системе возбуждения, которые вызовут нарастающие колебания угла δ и выпадение затем из синхронизма машины. Такое нарушение статической устойчивости происходит из-за самораскачивания, вызванного неправильной настройкой регулятора (рисунок 19, 2). Процесс самораскачивания может возникнуть и при неправильной настройке регуляторов скорости.

Самовозбуждение. Генераторы, работающие на разгруженную линию или сосредоточенную емкость, могут самовозбуждаться. Реакция якоря синхронной машины при этом имеет намагничивающий характер, т. е. действует в том же направлении, что и магнитный поток, создаваемый током ротора. Возникает такой режим работы генераторов, при котором на их зажимах и на линии электропередачи устанавливается напряжение, не отвечающее току возбуждения генератора. При появлении самовозбуждения оперативный персонал теряет возможность управлять устанавливающимся напряжением. Напряжение в отдельных точках системы при самовозбуждении может настолько превышать допустимые значения, что возникает опасность для изоляции линии и трансформаторов. Нарастание напряжения и тока в процессе самовозбуждения может происходить апериодически (синхронное самовозбуждение) или колебательно (асинхронное самовозбуждение). Амплитуда возникающих колебаний ограничивается насыщением стали электрических машин и трансформаторов. АРВ не в состоянии подавить этот быстроразвивающийся процесс.

Работа синхронной машины на емкость не всегда

сопровождается ее самовозбуждением. Самовозбуждение возникает при определенном соотношении между параметрами генератора и линии.

Далее рассматривается турбогенератор на дальнюю передачу, отключенную на приемном конце (рисунок 20).

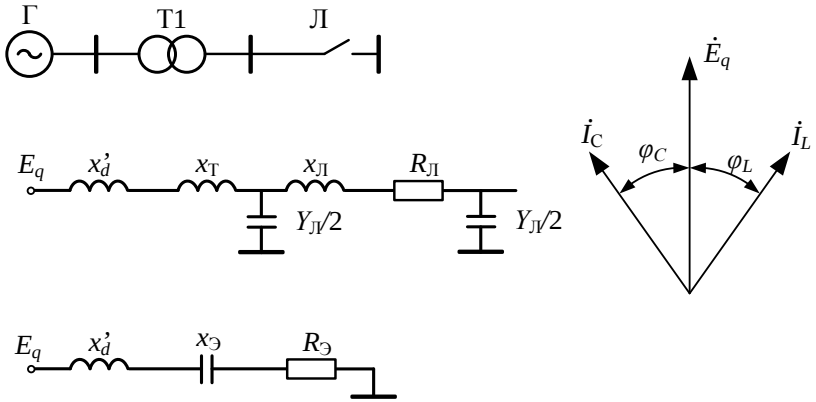


Рисунок 20

В соответствии со схемой замещения ток статора машины, подключенной к емкостному и активному сопротивлениям

$$I = \frac{E_q}{\sqrt{{R_Э}^2 + \left(x'_{d\Sigma} - x_Э\right)^2}};$$

$$\varphi = arctg\left(\frac{x'_d - x_Э}{R_Э}\right),$$

где $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_Т$.

Самовозбуждение генератора возникает при протекании по обмотке статора емкостного тока, опережающего по фазе ЭДС E_q и подмагничивающего генератор. Условие возникновения самовозбуждения можно записать в виде неравенства: $x_Э > x'_d$.

У неявнополюсных машин (турбогенераторов, асинхронных двигателей) исключена возможность появления синхронного самовозбуждения. Этот вид самовозбуждения может возникнуть

только у явнополюсных машин. Но имеется зона асинхронного самовозбуждения I, которая в плоскости $x_Э$ и $R_Э$ ограничивается полуокружностью (рисунок 21).

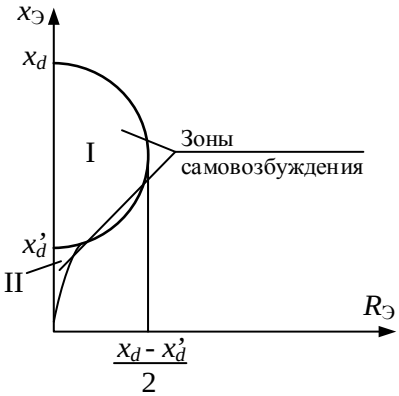


Рисунок 21

Этой области соответствуют неравенства:

$$x'_d < x_Э < x_d;\ R_Э \le \frac{x_d - x'_d}{2}.$$

При $x_Э > x'_d$ появляется вторая зона асинхронного самовозбуждения II.

2.5. Предел и запас статической устойчивости

Пределом мощности по статической устойчивости называется максимальное значение активной мощности, которое может быть передано потребителю без нарушения статической устойчивости.

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению вычисляется по следующей формуле:

$$k_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} \cdot 100\%.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности определяется по выражению:

$$k_P = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} \cdot 100\%.$$

Методическими указаниями установлены минимальные запасы статической устойчивости, %:

– в нормальном режиме 20 (по активной мощности) и 15 (по напряжению);

– в послеаварийном режиме 8 (по активной мощности) и 10 (по напряжению).

Запас статической устойчивости зависит от следующих условий:

– функционирование АРВ на генераторе;

– тип АРВ.

Определяются коэффициенты запаса статической устойчивости исходя из этих условий.

1. Расчет без АРВ: $\Delta x = x_d$.

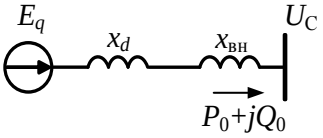


Рисунок 22

При этом ЭДС генератора E_q является постоянной величиной.

Эквивалентное сопротивление

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{вн}.$$

Максимальная активная мощность

$$P_{max\,1} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}}.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

$$k_{P\,1} = \frac{P_{max\,1} - P_0}{P_0} \cdot 100\%.$$

В качестве управляющих воздействий используются отклонение тока и напряжения от заданных параметров срабатывания.

2. Расчет с АРВ пропорционального действия: $\Delta x = x'_d$. АРВ$_п$ способны поддерживать постоянной $E'_q = const$.

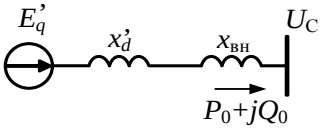


Рисунок 23

Переходное эквивалентное сопротивление

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{вн}.$$

Максимальная активная мощность

$$P_{max\,2} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}}.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

$$k_{P\,2} = \frac{P_{max\,2} - P_0}{P_0} \cdot 100\%.$$

3. Расчет с АРВ сильного действия: $\Delta x = 0$. АРВ$_с$ способны поддерживать постоянной $U_Г = const$.

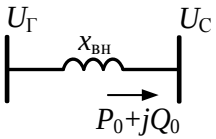


Рисунок 24

Максимальная активная мощность

$$P_{max\,3} = \frac{U_Г \cdot U_c}{x_{вн}}.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

$$k_{P\,3} = \frac{P_{max\,3} - P_0}{P_0} \cdot 100\%.$$

ПРИМЕР 1

Для заданной схемы на рисунке 25 известны следующие параметры:

Генератор Г: $x_d = 1{,}8, x'_d = 0{,}461$.

Трансформатор Т1: $x_{\text{Т1}} = 0{,}197$.

Воздушная линия ВЛ: $x_{\text{Л1}} = x_{\text{Л2}} = 0{,}7;\ x_{\text{ЛЭ}} = 0{,}35$.

Трансформатор Т2: $x_{\text{Т2}} = 0{,}142$.

Система С: $U_{\text{С}} = 1;\ P_0 = 0{,}583;\ Q_0 = 0{,}362$.

Рисунок 25

Определить коэффициенты запаса статической устойчивости для 3-х случаев:

1) АРВ отключен;
2) АРВ$_{\text{п}}$;
3) АРВ$_{\text{с}}$.

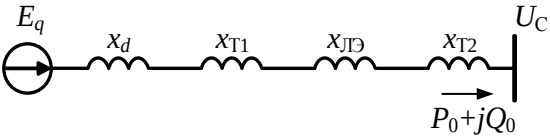


Рисунок 26

Решение

1) АРВ отключен.

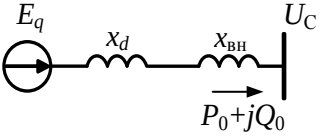


Рисунок 27

Внешнее сопротивление

$$x_{\text{вн}} = x_{\text{Т1}} + x_{\text{ЛЭ}} + x_{\text{Т2}} = 0{,}197 + 0{,}35 + 0{,}142 = 0{,}689.$$

Эквивалентное сопротивление

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{\text{вн}} = 1{,}8 + 0{,}689 = 2{,}489.$$

ЭДС генератора

$$E_q = \sqrt{\left(U_{\text{C}} + \frac{Q_0 x_{d\Sigma}}{U_{\text{C}}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_{d\Sigma}}{U_{\text{C}}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0{,}362 \cdot 2{,}489}{1}\right)^2 + \left(\frac{0{,}583 \cdot 2{,}489}{1}\right)^2}$$

$$= 2{,}392.$$

Максимальная активная мощность

$$P_{max\,1} = \frac{E_q \cdot U_{\text{C}}}{x_{d\Sigma}} = \frac{2{,}392 \cdot 1}{2{,}489} = 0{,}961.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

$$k_{P\,1} = \frac{P_{max\,1} - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{0{,}961 - 0{,}583}{0{,}583} \cdot 100\% = 64{,}8\%.$$

2) АРВ$_{\text{п}}$

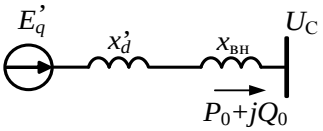


Рисунок 28

Переходное эквивалентное сопротивление

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{\text{вн}} = 0{,}461 + 0{,}689 = 1{,}15.$$

Переходная ЭДС генератора

$$E'_q = \sqrt{\left(U_{\text{C}} + \frac{Q_0 x'_{d\Sigma}}{U_{\text{C}}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x'_{d\Sigma}}{U_{\text{C}}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0{,}362 \cdot 1{,}15}{1}\right)^2 + \left(\frac{0{,}583 \cdot 1{,}15}{1}\right)^2} = 1{,}567.$$

Максимальная активная мощность

$$P_{max\,2} = \frac{E'_q \cdot U_\text{С}}{x'_{d\Sigma}} = \frac{1{,}567 \cdot 1}{1{,}15} = 1{,}362.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

$$k_{P\,2} = \frac{P_{max\,2} - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{1{,}362 - 0{,}583}{0{,}583} \cdot 100\% = 133{,}7\%.$$

Применение АРВ с пропорциональным действием повышает запас устойчивости более чем в 2 раза.

3) АРВ$_\text{с}$

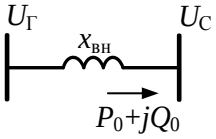


Рисунок 29

Напряжение на шинах генератора

$$U_\text{Г} = \sqrt{\left(U_\text{С} + \frac{Q_0 x_\text{вн}}{U_\text{С}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_\text{вн}}{U_\text{С}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0{,}362 \cdot 0{,}689}{1}\right)^2 + \left(\frac{0{,}583 \cdot 0{,}689}{1}\right)^2} =$$

$$= 1{,}312.$$

Максимальная активная мощность

$$P_{max\,3} = \frac{U_\text{Г} \cdot U_\text{С}}{x_\text{вн}} = \frac{1{,}312 \cdot 1}{0{,}689} = 1{,}905.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности

$$k_{P\,3} = \frac{P_{max\,3} - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{1{,}905 - 0{,}583}{0{,}583} \cdot 100\% = 226{,}7\%.$$

3. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1. Понятие о динамической устойчивости

Динамическая устойчивость – способность электрической системы возвращаться в исходное состояние после большого возмущения.

Для оценки динамической устойчивости электрической системы рассматриваются явления, возникающие при внезапном отключении одной из двух параллельных цепей ЛЭП одномашинной энергосистемы (рисунок 30).

Схема замещения электрической системы в нормальном режиме и при отключении цепи приведена на рисунке 31, *а, б*.

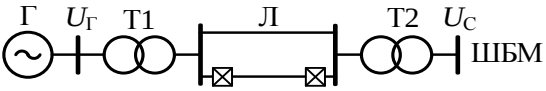


Рисунок 30

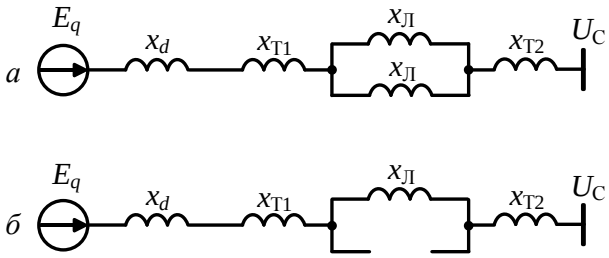


Рисунок 31

Индуктивное сопротивление системы, равное

$$x_I' = x_d' + x_{Т1} + \frac{x_Л}{2} + x_{Т2},$$

определяет амплитуду угловой характеристики мощности генератора $P_I(\delta)$ в исходном нормальном режиме:

$$P_{\max I} = \frac{E_q U_С}{x_I}.$$

После отключения одной из цепей линии электропередачи будет получено новое значение, большее, чем в нормальном режиме

$$x_I = x_d + x_{\text{Т}1} + x_{\text{Л}} + x_{\text{Т}2},$$

так как индуктивное сопротивление линии при отключении цепи ЛЭП возрастает с $0{,}5x_{\text{Л}}$ до $x_{\text{Л}}$.

Амплитуда угловой характеристики $P_{\text{II}}(\delta)$ при отключенной цепи уменьшается и составит

$$P_{\max\text{II}} = \frac{E_q U_{\text{С}}}{x_{\text{II}}}.$$

Угловые характеристики мощности в нормальном режиме и при отключении цепи ЛЭП показаны на рисунке 32.

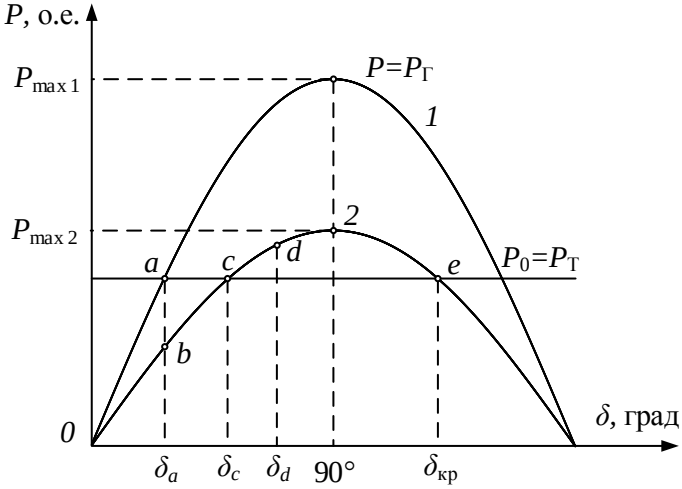


Рисунок 32

Исходный режим работы, предшествующий отключению цепи, определяется точкой *a* на первой угловой характеристике мощности (1) нормального режима при мощности P_0 и угле δ_0. При внезапном отключении одной из цепей ЛЭП ротор не успевает из-за инерции мгновенно изменить угол δ. Поэтому режим будет характеризоваться точкой *b* на второй угловой характеристике мощности генератора (2). После уменьшения его мощности возникает избыточный ускоряющий момент, под действием

которого угловая скорость ротора, а следовательно, и угол δ увеличиваются. С увеличением угла мощность генератора возрастает по второй характеристике (2).

В процессе ускорения ротор генератора по инерции проходит точку c, после которой его вращающий момент становится опережающим. Ротор начинает затормаживаться и, начиная с точки d, его угловая скорость уменьшается. При этом возникают затухающие колебания вокруг нового установившегося режима, соответствующего точке c. Если угловая скорость ротора возрастает до значения, соответствующего точке e или другим точкам на нисходящей части характеристики $P = f(\delta)$, то генератор выпадает из синхронизма.

Следовательно, об устойчивости системы можно судить по изменению угла δ во времени. Изменение угла δ на рисунке 32 соответствует устойчивой работе системы. При изменении δ по кривой, изображенной на рисунке 32, система неустойчива.

Основной причиной нарушений динамической устойчивости электрических систем являются короткие замыкания, резко уменьшающие амплитуду характеристики мощности.

3.2. Характеристики мощности при различных КЗ и выбор расчетного случая

Для расчета аварийной угловой характеристики используется схема замещения, в которой в генераторе протекает ток прямой последовательности. Комплексная схема замещения аварийного режима представлена на рисунке 33 и включает дополнительное сопротивление шунта $x_{\text{к}}$, которое состоит из схем обратной и нулевой последовательностей.

Схему замещения, показанную на рисунке 33 можно последовательно преобразовать из «звезды» в «треугольник», в котором

$$x_E = x_a + x_{\text{к}} + \frac{x_a \cdot x_{\text{к}}}{x_b};$$

$$x_U = x_b + x_к + \frac{x_b \cdot x_к}{x_a};$$

$$x_{EU} = x_a + x_b + \frac{x_a \cdot x_b}{x_к}.$$

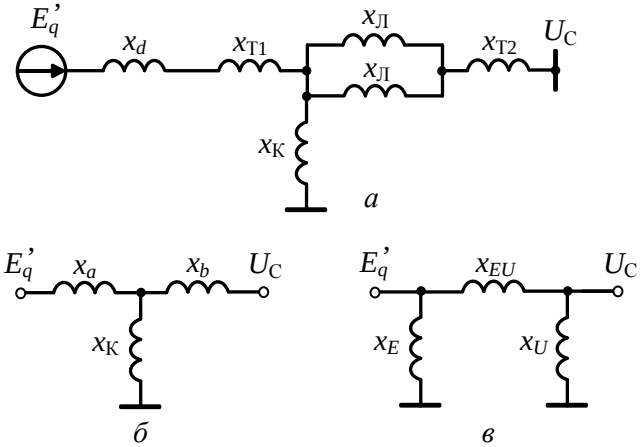


Рисунок 33

Значения шунтирующего сопротивления $x_к$ зависят от вида КЗ [6], и представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения $x_к$ для различных видов короткого замыкания

Вид КЗ $К^{(n)}$	$x_к$
$К^{(3)}$	0
$К^{(2)}$	$x_{2\Sigma}$
$К^{(1)}$	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$
$К^{(1,1)}$	$x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}$

Сопротивления x_E и x_U, подключенные непосредственно к ЭДС E_q' и напряжению $U_С$, на активную мощность генератора в аварийном режиме существенно не влияют и могут не учитываться. При этом вся активная мощность генератора передается через сопротивление $x_{EU} = x_{II}$, связывающее ЭДС генератора E_q' с

напряжением приемной системы U_C. Это сопротивление называют взаимным сопротивлением**.** С уменьшением сопротивления шунта $x_к$ сопротивление x_{EU} увеличивается, что приводит к снижению амплитуды угловой характеристики мощности. Угловые характеристики мощности в нормальном режиме и режиме однофазного, двухфазного, двухфазного на землю и трехфазного КЗ представлены на рисунке 34. Наиболее тяжелый аварийный режим будет при трехфазном КЗ в начале ЛЭП, когда сопротивление x_{EU} бесконечно велико, а амплитуда угловой характеристики мощности равна нулю. Самый легкий аварийный режим соответствует однофазному КЗ, при котором сопротивление шунта КЗ будет максимальным.

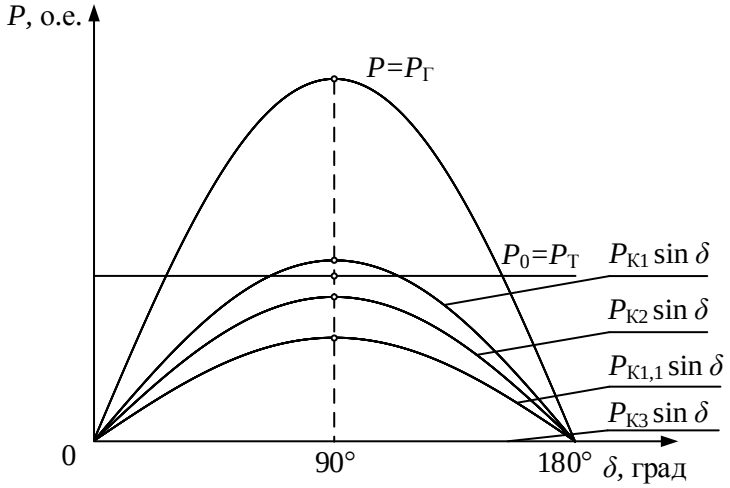


Рисунок 34

Нетрудно заметить, что любое КЗ приводит к увеличению сопротивления передачи и, следовательно, к уменьшению амплитуды характеристики мощности.

В качестве расчетного случая для анализа динамической устойчивости принято рассматривать двухфазное КЗ на землю К(1,1).

3.3. Правило площадей и критерий динамической устойчивости

На рисунке 35 рассматривается простейшая электрическая система с двумя параллельными ЛЭП.

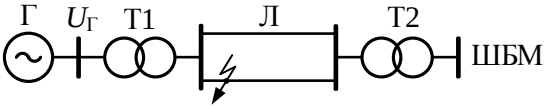


Рисунок 35

В качестве сильного возмущения принимается несимметричное короткое замыкание на линии (например, двухфазное КЗ на землю). Строятся угловые характеристики мощности генератора, соответствующие исходному (нормальному) режиму P_I, аварийному (режиму КЗ) P_{II}, и послеаварийному (поврежденная цепь отключена) P_{III} режимам.

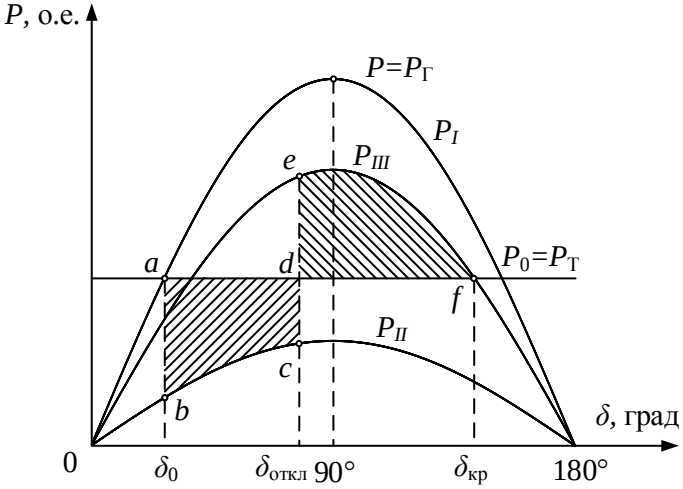


Рисунок 36

Отдаваемая генератором мощность и угол между ЭДС E'_q и напряжением $U_С$ в нормальном режиме обозначены соответственно P_0 и δ_0.

При появлении КЗ происходит сброс передаваемой генератором мощности с $P_I(\delta_0)$ до $P_{II}(\delta_0)$, вследствие чего появляется избыточная мощность $\Delta P_{II}(\delta) = P_0 - P_{II}(\delta)$, которая вызывает ускорение ротора генератора. При этом рабочая точка режима перемещается по угловой характеристике мощности $P_{II}(\delta)$ в направлении увеличения угла δ $(\delta > \delta_0)$.

Если отключению поврежденной цепи соответствует угол $\delta_{\text{откл}}$, то ротор генератора во время ускорения запасет кинетическую энергию

$$A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} \Delta P_{II}(\delta)\, d\delta = F_{abcd},$$

которая соответствует заштрихованной площади F_{abcd}, называемой площадью ускорения.

Отключение поврежденной цепи электропередачи приводит к возрастанию передаваемой в сеть мощности с $P_{II}(\delta_{\text{откл}})$ до $P_{III}(\delta_{\text{откл}})$. Так как $P_{III}(\delta_{\text{откл}}) > P_0$, то появляется тормозной момент для ротора генератора, соответствующий мощности $\Delta P_{III}(\delta) = P_{III}(\delta) - P_0$, где $\delta > \delta_{\text{откл}}$. Однако угол δ продолжает увеличиваться до тех пор, пока не будет израсходована запасенная во время ускорения кинетическая энергия ротора генератора.

Во время торможения может быть израсходована энергия, предельное значение которой для интервала изменения угла δ, равного $\delta_{\text{откл}} - \delta_{\text{кр}}$, определяется выражением

$$A_{\text{торм}} = \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} \Delta P_{III}(\delta)\, d\delta = F_{def}.$$

Заштрихованная площадь F_{def} является площадью торможения и соответствует кинетической энергии, которая может быть израсходована ротором генератора во время торможения.

Сохранению динамической устойчивости и возвращению рабочей точки режима в точку a' соответствует условие

$$A_{\text{уск}} \leq A_{\text{торм}},$$

вытекающее из сравнения площадей F_{abcd} и F_{def}.

Математическое выражение условия через угловые характеристики мощности режимов записывается следующим образом:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} (P_0 - P_{II})\, d\delta - \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{III} - P_0)\, d\delta = 0. \qquad (3.1)$$

3.4. Вычисление предельного угла и предельного времени отключения

Используя это правило площадей, можно дать оценку динамической устойчивости простейшей электрической системы и получить формулы для расчетов. Например, требуется знать, как быстро нужно отключить короткое замыкание, чтобы генератор не успел выпасть из синхронизма. Или какое время перерыва электроснабжения можно допустить без нарушения технологического процесса у потребителя, т. е. без выпадения синхронных двигателей из синхронизма и снижения по этой причине их скорости.

Для этого нужно узнать предельно допустимый угол выбега ротора синхронной машины $\delta_{\text{пр}}$, при котором следует начать тормозить ротор генератора (или ускорять ротор двигателя), чтобы не допустить выпадения из синхронизма. Этот угол определяется из правила площадей.

Из равенства (3.1) находится предельный по условию сохранения динамической устойчивости угол отключения поврежденной цепи ЛЭП:

$$\delta_{\text{откл пр}} = \arccos \frac{P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) - P_{max\,II} cos\delta_0 + P_{max\,I} cos\delta_{\text{кр}}}{P_{max\,III} - P_{max\,II}}. \qquad (3.2)$$

Предельное время отключения КЗ $t_{\text{откл пр}}$ соответствует получаемому по (3.2) предельному углу отключения. Для произвольного момента времени связь этих величин отражается

уравнением движения (2.11). Аналитическое решение его возможно только для частного случая, а именно полного разрыва связи генератора с шинами приемной системы, когда $P = P_{II}(\delta) = 0$, что происходит при трехфазном КЗ на одной из цепей ЛЭП. При этом уравнение (2.11) упрощается и принимает вид

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0.$$

Решение этого уравнения методом последовательного интегрирования при постоянных

$$c_1 = \left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{t=0} = 0 \text{ и } c_2 = \delta_0$$

позволяет получить угол

$$\delta = \frac{P_0}{2T_J t^2} + \delta_0,$$

откуда можно найти значение предельного времени отключения трехфазного КЗ:

$$t_{\text{откл пр}} = \sqrt{\frac{2T_J(\delta_{\text{откл пр}} - \delta_0)}{P_0}}. \qquad (3.3)$$

Если угол δ выразить в градусах, а постоянную времени T_J – в секундах, то формула (3.3) примет вид

$$t_{\text{откл пр}} = \sqrt{\frac{T_J(\delta_{\text{откл пр}} - \delta_0)}{9000P_0}}. \qquad (3.4)$$

По формуле (3.4) определяется предельное время перерыва электроснабжения синхронной машины по условиям невыпадения из синхронизма (по условиям обеспечения синхронной динамической устойчивости).

3.5. Метод последовательных интервалов

Метод последовательных интервалов разработан для практического анализа динамической устойчивости энергосистем. Метод последовательных интервалов при необходимой точности

дает наглядное представление о взаимосвязи между параметрами режима в динамических процессах. С помощью этого метода можно установить предельное время отключения элемента с коротким замыканием, учесть действие автоматических регуляторов возбуждения, изменение реакции статора во времени и другие явления. Метод последовательных интервалов позволяет получать приближенное решение уравнения движения ротора генератора

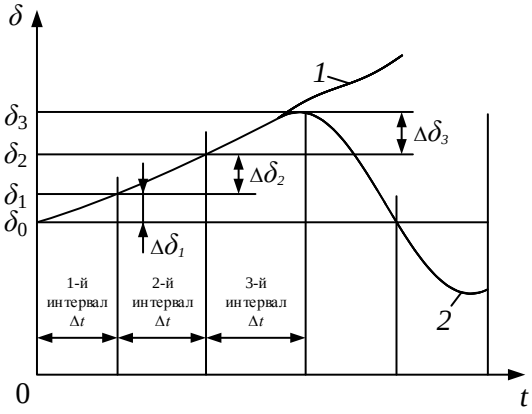


Рисунок 37

1 – при выпадении генераторов из синхронизма;

2 – при возвращении в исходный режим.

Он позволяет найти изменение угла δ во время переходного процесса. По изменению угла во времени можно судить о том, что происходит с синхронной машиной: выпадает ли она из синхронизма или, совершив «выбег», возвращается в исходное положение (рисунок 37).

Метод заключается в следующем: весь переходный процесс разбивается на ряд небольших, равных по величине интервалов времени Δt, в которых избыточная мощность принимается неизменной, т.е.

$$\Delta P = P_{\text{Т}} - P = const.$$

И для каждого интервала последовательно вычисляется приращение угла $\Delta\delta$.

В практических расчетах значение интервала принимается в пределах 0,05-0,1 с в зависимости от длительности КЗ и характеристик устройств системной автоматики. Желательно, чтобы начало и конец выбранных интервалов совпадали с моментами отключения (включения) выключателей и действия автоматики.

Применение метода последовательных интервалов рассматривается на примере расчета переходного процесса при несимметричном КЗ в схеме с эквивалентным синхронным двигателем, получающим питание от системы бесконечно большой мощности.

Весь процесс разбивается на равные интервалы времени.

В момент возникновения КЗ мощность, получаемая двигателем, падает и возникает избыточная тормозящая мощность ΔP_0. Решается уравнение движения ротора и находится приращение угла при нулевых начальных условиях в течение первого интервала

$$\Delta\delta_1 = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_0}{T_J}\Delta t^2;\ \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1.$$

По значению этого приращения находится угол в конце первого интервала и избыток мощности ΔP_1 в конце первого или в начале второго интервала:

$$\Delta P_1 = P_0 - P_{\max II}\sin\delta_1.$$

Во втором интервале ротор тормозится под действием избытка мощности ΔP_1 и некоторой отрицательной начальной скорости, которая имела место в конце первого интервала. Эту скорость торможения более точно можно найти, приняв, что в течение первого интервала действует избыток мощности, равный полусумме избытков в его начале и конце.

Тогда скорость торможения в конце первого интервала или в начале второго равна:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_1 = \frac{\Delta P_0 + \Delta P_1}{2T_J}\Delta t.$$

В результате решения уравнения движения ротора для второго интервала получается следующее выражение:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_2 = \frac{\Delta P_1}{2T_J}\Delta t + C_1,$$

где C_1 – постоянная интегрирования определяется по начальным условиям второго интервала:

$$C_1 = \left(\frac{d\delta}{dt}\right)_1.$$

Интегрируя еще раз, можно получить к концу второго интервала

$$\delta_2 = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_1}{T_J}\Delta t^2 + \left(\frac{d\delta}{dt}\right)_1 \Delta t + C_2,$$

где C_2 – постоянная интегрирования определяется по начальным условиям второго интервала:

$$C_2 = \delta_1.$$

Тогда приращение угла на втором интервале будет

$$\Delta\delta_2 = \delta_2 - \delta_1 = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_1}{T_J}\Delta t^2 + \frac{\Delta P_0 + \Delta P_1}{2T_J}\Delta t^2 =$$

$$= \frac{1}{2}\frac{\Delta P_0}{T_J}\Delta t^2 + \frac{\Delta P_1}{T_J}\Delta t^2 = \Delta\delta_1 + \frac{\Delta P_1}{T_J}\Delta t^2.$$

Вводится следующее обозначение:

$$K = \frac{\Delta t^2}{T_J}.$$

Или, если выразить t или T_J в секундах, а δ в градусах, то

$$K = \frac{18000\,\Delta t^2}{T_J}.$$

В итоге получаются формулы для расчетов методом последовательных интервалов:

приращение угла на первом интервале

$$\Delta\delta_1 = K\frac{\Delta P_0}{2};$$

на втором интервале

$$\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + K\Delta P_1,$$

на n-ом интервале

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + K\Delta P_{n-1}.$$

Если в начале некоторого интервала m происходит переход с одной угловой характеристики на другую, например при отключении поврежденной цепи линии, то избыток мощности резко изменяется от ΔP_{m-1}^{I} до ΔP_{m-1}^{II}. Тогда при вычислении приращения угла в первом интервале после перехода на новую характеристику избыток мощности определяется как полусумма ΔP_{m-1}^{I} и ΔP_{m-1}^{II}. При этом приращение угла на интервале с номером m будет равно

$$\Delta\delta_m = \Delta\delta_{m-1} + K\frac{\Delta P_{m-1}^{I} + \Delta P_{m-1}^{II}}{2}.$$

Расчет методом последовательных интервалов ведется до тех пор, пока угол δ не начнет уменьшаться или пока не станет ясно, что угол превысил значение 180°, т.е. двигатель выпал из синхронизма. Обычно расчет переходного процесса ведут до первого максимума угла, но в отдельных случаях бывает необходимо проверять устойчивость и во втором цикле качаний.

ПРИМЕР 2

Определить, восстановится ли синхронизм при отключении генератора от нагрузки и повторном включении через время $t_{\text{вкл}} = 0{,}13$ с.

Дано: $P = 4\sin\delta$; $P_0 = 2$; $T_J = 5$ с.

Решение

Угловая характеристика мощности генератора и характеристика мощности турбины показаны на рисунке 38.

Из рисунка 38 определяются площадка ускорения и площадка торможения по следующим выражениям:

- площадка ускорения

$$F_{\text{у}} = \int_0^{\delta_{\text{пр вкл}}} (P_0 - 0)\, d\delta;$$

- площадка торможения

$$F_{\text{т}} = \int_{\delta_{\text{пр вкл}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{max} \sin\delta - P_0)\, d\delta.$$

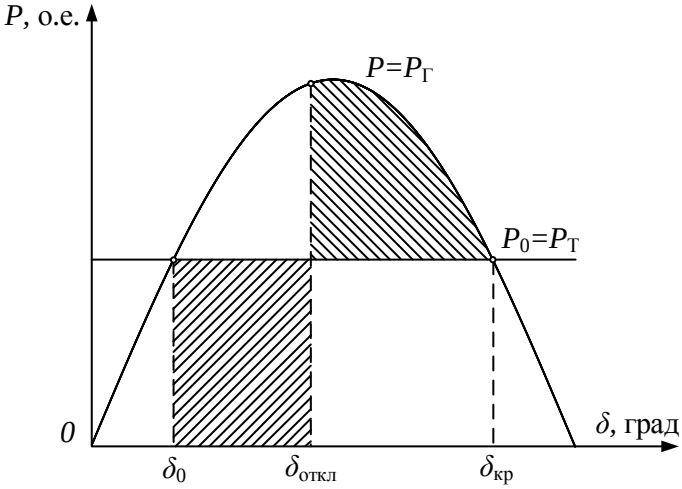


Рисунок 38

Критический угол равен

$$\delta_{\text{кр}} = 180° - \delta_0 = 180° - 30° = 150°.$$

Приравниваются площадки торможения и ускорения: $F_{\text{у}} = F_{\text{т}}$.

$$\int_0^{\delta_{\text{пр вкл}}} (P_0 - 0)\, d\delta = \int_{\delta_{\text{пр вкл}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{max} \sin\delta - P_0)\, d\delta;$$

$$P_0\delta_{\text{пр вкл}} - P_0\delta_0 =$$

$$= -P_{max}\cos\delta_{\text{кр}} + P_{max}\cos\delta_{\text{пр вкл}} - P_0\delta_{\text{кр}}$$

$$+ P_0\delta_{\text{пр вкл}};$$

$$P_0\left(\delta_{\text{кр}} - \delta_0\right) + P_{max}\cos\delta_{\text{кр}} = P_{max}\cos\delta_{\text{пр вкл}};$$

$$\cos\delta_{\text{пр вкл}} = \frac{P_0\left(\delta_{\text{кр}} - \delta_0\right) + P_{max}\cos\delta_{\text{кр}}}{P_{max}} =$$

$$= \frac{2\cdot\frac{\pi}{180}\cdot(150° - 30°) + 4\cdot\cos 150°}{4} = 0{,}181.$$

Предельный угол включения генератора равен

$$\delta_{\text{пр вкл}} = 79{,}5°.$$

Определяется предельное время включения генератора по следующей формуле:

$$t_{\text{пр вкл}} = \sqrt{\frac{2\cdot T_J\cdot(\delta_{\text{пр вкл}} - \delta_0)}{18000\cdot P}} = \sqrt{\frac{2\cdot 5\cdot(79{,}5° - 30°)}{18000\cdot 2}} = 0{,}117 \text{ с}.$$

Так как $t_{\text{вкл}} = 0{,}13 \text{ с} > t_{\text{пр вкл}} = 0{,}117$, то генератор выпадет из синхронизма.

ПРИМЕР 3

Определить, останется или выпадет из синхронизма генератор, если произойдет мгновенный наброс нагрузки.

Дано: $P = 4\sin\delta$; $P_{01} = 2$; $P_{02} = 3$; $\delta_{01} = 30°$; $\delta_{02} = 48{,}5°$.

Решение

Площадки ускорения и торможения записываются в следующем виде

$$F_{\text{у}} = \int_{\delta_{01}}^{\delta_{02}} (P_{02} - P_{max}\sin\delta)\,d\delta;\ F_{\text{т}} = \int_{\delta_{02}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{max}\sin\delta - P_{02})\,d\delta.$$

Критический угол равен $\delta_{\text{кр}} = 180° - \delta_{02} = 180° - 48{,}5° = 131{,}5°$.

Площадка ускорения определяется следующим образом:

$$F_{\text{у}} = \int_{30°}^{48{,}5°} (3 - 4\sin\delta)\,d\delta =$$

$$= 3\cdot(48{,}5° - 30°)\frac{\pi}{180} + 4\cdot(\cos 48{,}5° - \cos 30°) =$$

$$= 0{,}156.$$

Площадка торможения находится по следующему выражению:

$$F_{\text{т}} = \int_{48,5°}^{131,5°} (4\sin\delta - 3)\, d\delta =$$

$$= -4 \cdot \cos 131,5° + 4 \cdot \cos 48,5° - 3 \times$$

$$\times (131,5° - 48,5°)\frac{\pi}{180} = 0,96.$$

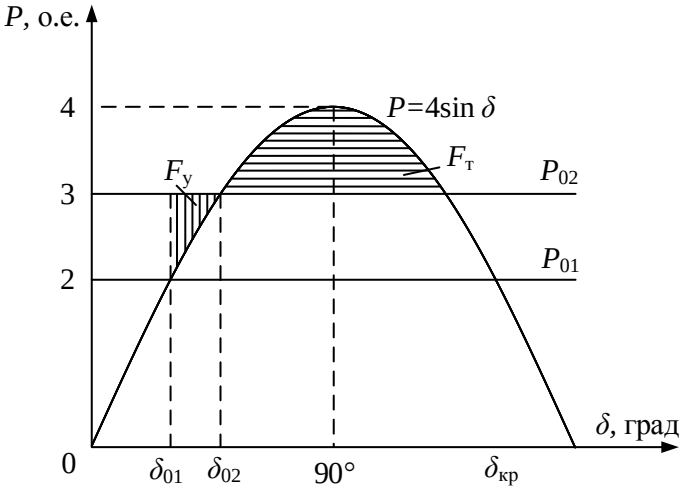


Рисунок 39

Сравниваются площадки ускорения и торможения:

$$F_{\text{т}} > F_{\text{у}}.$$

По результату сравнения можно сделать вывод, что генератор останется в синхронизме.

ПРИМЕР 4

Определить предельное время отключения поврежденной цепи ЛЭП в СЭС, схема которой изображена на рисунке 40, *а*, при трехфазном КЗ в начале линии.

Параметры элементов системы в нормальном режиме: генератор Г: $x_d = 0{,}183$; трансформатор Т1: $x_{\text{Т1}} = 0{,}142$; линия Л: $x_{\text{Л}} = 0{,}624$; трансформатор Т2: $x_{\text{Т2}} = 0{,}117$.

Решение

Предельное время отключения трехфазного КЗ определяется по предельному углу отключения, значение которого можно определить по методу площадей. Строятся угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов. В аварийном режиме при трехфазном КЗ мощность, передаваемая в сеть, равна нулю.

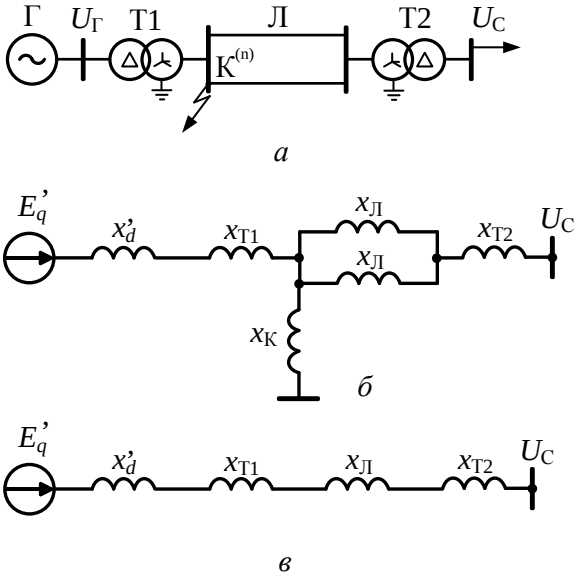


Рисунок 40

Схемы замещения СЭС для нормального и послеаварийного режимов показаны на рисунке 40, *б*, *в*. Результирующие сопротивления в системе:

– в нормальном режиме

$$x_I = x_d + x_{\text{Т1}} + 0{,}5x_{\text{Л}} + x_{\text{Т2}} = 0{,}183 + 0{,}142 + 0{,}312 + 0{,}117 = \\ = 0{,}754;$$

– в послеаварийном режиме

$$x_{III} = x_d + x_{\text{Т}1} + x_{\text{Л}} + x_{\text{Т}2} = 0{,}183 + 0{,}142 + 0{,}624 + 0{,}117 = \\ = 1{,}066.$$

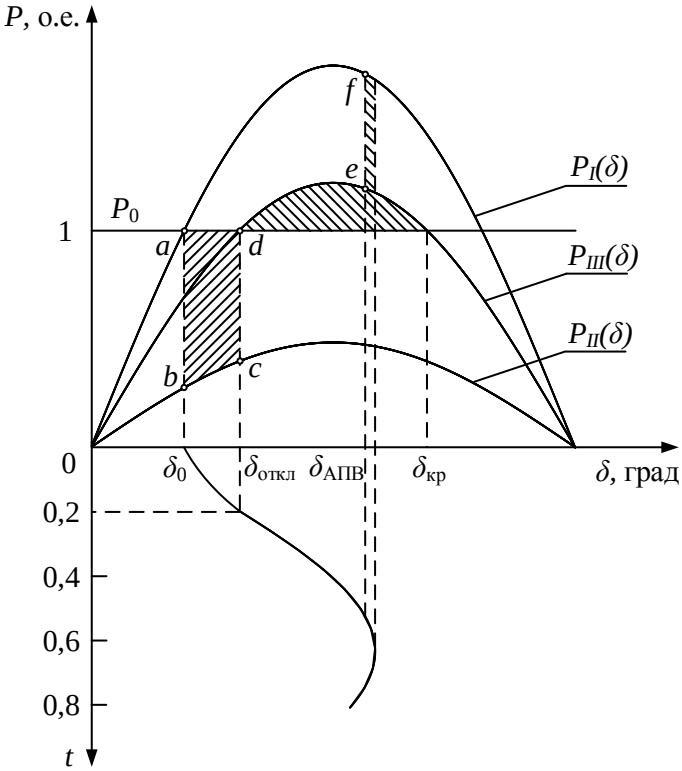


Рисунок 41

Угловые характеристики мощности:

– в нормальном режиме

$$P_I = \frac{E_q U_{\text{С}}}{x_I} \sin\delta = \frac{1{,}33 \cdot 1}{0{,}754} \sin\delta = 1{,}77 \sin\delta\,;$$

– в послеаварийном режиме

$$P_{III} = \frac{E_q U_{\text{С}}}{x_{III}} \sin\delta = \frac{1{,}33 \cdot 1}{1{,}066} \sin\delta = 1{,}25 \sin\delta.$$

По характеристике нагрузки и угловым характеристикам мощности находится угол между E_q и $U_{\text{С}}$ в нормальном режиме

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{\max I}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1{,}77}\right) = 34{,}4°;$$

критический угол в послеаварийном режиме

$$\delta_{\text{кр}} = \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{\max III}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1{,}25}\right) = 126{,}9°.$$

Предельный угол отключения поврежденной цепи ЛЭП вычисляется по формуле при $P_{II} = 0$:

$$\delta_{\text{откл пр}} = \arccos\frac{P_0\left(\delta_{\text{кр}} - \delta_0\right) + P_{max\,III}\cos\delta_{\text{кр}}}{P_{max\,III}} =$$

$$= \arccos\frac{1(126{,}9 - 34{,}4)\dfrac{\pi}{180} + 1{,}25\cos 126{,}9}{1{,}25} =$$

$$= 46{,}5°.$$

Предельное время отключения трехфазного КЗ

$$t_{\text{откл пр}} = \sqrt{\frac{T_J(\delta_{\text{откл пр}} - \delta_0)}{9000P_0}} = \sqrt{\frac{12{,}9\cdot(46{,}5 - 34{,}4)}{9000\cdot 1}} = 0{,}13\text{ с}.$$

ПРИМЕР 5

Проверить динамическую устойчивость СЭС из предыдущего примера при переходящем двухфазном КЗ на землю в начале одной цепи ЛЭП с последующим трехфазным АПВ. Длительность КЗ $t_{\text{КЗ}} = 0{,}2$ с, продолжительность бестоковой паузы АПВ $t_{\text{АПВ}} = 0{,}4$ с. Параметры элементов системы в аварийном режиме:

$$x_{2\text{Г}} = 0{,}142;\ x_{2\text{Т}1} = x_{0\text{Т}1} = x_{\text{Т}1} = 0{,}142;$$

$$x_{2\text{Т}2} = x_{0\text{Т}2} = x_{\text{Т}2} = 0{,}117;\ x_{2\text{Л}} = x_{\text{Л}} = 0{,}624; x_{0\text{Л}} = 2{,}06.$$

Решение

Оценивается устойчивость СЭС при двухфазном КЗ по характеру изменения угла δ во времени. Эта зависимость рассчитывается методом последовательных интервалов.

Угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов рассчитаны в примере 4. Определяется угловая характеристика мощности системы в аварийном режиме.

Схема замещения СЭС для этого режима показана на рисунке 40, где дополнительное сопротивление, обусловленное несимметрией, через результирующее сопротивление обратной последовательности находится по выражению

$$x_{2\text{рез}} = \frac{(x_{2\text{Г}} + x_{2\text{Т1}})(0{,}5x_{2\text{Л}} + x_{2\text{Т2}})}{x_{2\text{Г}} + x_{2\text{Т1}} + 0{,}5x_{2\text{Л}} + x_{2\text{Т2}}} =$$

$$= \frac{(0{,}142 + 0{,}142)(0{,}312 + 0{,}117)}{(0{,}142 + 0{,}142 + 0{,}312 + 0{,}117)} = 0{,}17$$

и результирующее сопротивление нулевой последовательности

$$x_{0\text{рез}} = \frac{x_{0\text{Т1}}(0{,}5x_{0\text{Л}} + x_{0\text{Т2}})}{x_{0\text{Т1}} + 0{,}5x_{0\text{Л}} + x_{0\text{Т2}}} = \frac{0{,}142(1{,}03 + 0{,}117)}{0{,}142 + 1{,}03 + 0{,}117} = 0{,}126$$

определяется следующим образом:

$$x_{\Delta} = \frac{x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}}}{x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}} = \frac{0{,}17 \cdot 0{,}126}{0{,}17 + 0{,}126} = 0{,}072.$$

Взаимное сопротивление между рассматриваемыми точками системы в аварийном режиме

$$x'_{II} = x'_d + x_{\text{Т1}} + 0{,}5x_{\text{Л}} + x_{\text{Т2}} + \frac{(x'_d + x_{\text{Т1}})(0{,}5x_{\text{Л}} + x_{\text{Т2}})}{x_{\Delta}} =$$

$$= 0{,}754 + \frac{(0{,}183 + 0{,}142)(0{,}312 + 0{,}117)}{0{,}072} = 2{,}66.$$

Уравнение угловой характеристики мощности

$$P_{II} = \frac{E'_q U_{\text{С}}}{x'_{II}} \sin\delta = \frac{1{,}33 \cdot 1}{2{,}66} \sin\delta = 0{,}5 \sin\delta.$$

Принимается длительность интервала равной $\Delta t = 0{,}1$ с, при которой постоянная

$$K = \frac{18000\,\Delta t^2}{T_J} = \frac{18000 \cdot 0{,}1^2}{12{,}9} = 14.$$

и рассчитывается зависимость $\delta = f(t)$.

Первый интервал.

Избыточная мощность в начале первого интервала

$$\Delta P_0 = P_0 - P_{\max II}\sin\delta_0 = 1 - 0{,}5\sin 34{,}4° = 1 - 0{,}282 = 0{,}718.$$

Приращение угла δ_1 в течение первого интервала

$$\Delta\delta_1 = K\frac{\Delta P_0}{2} = 14\cdot\frac{0{,}718}{2} = 5°.$$

Угол δ_1 в конце первого интервала

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 34{,}4 + 5 = 39{,}4°.$$

Второй интервал.

Мощность генератора в конце первого интервала

$$P_1 = P_{\max II}\sin\delta_1 = 0{,}5\sin 39{,}4° = 0{,}318.$$

Избыточная мощность в начале второго интервала

$$\Delta P_1 = P_0 - P_{\max II}\sin\delta_1 = 1 - 0{,}318 = 0{,}682.$$

Приращение угла на втором интервале

$$\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + K\Delta P_1 = 5 + 14\cdot 0{,}682 = 14{,}5°.$$

Угол в конце второго интервала будет равен

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta_2 = 39{,}4 + 14{,}5 = 53{,}9°.$$

Третий интервал.

В начале третьего интервала происходит отключение поврежденной цепи ЛЭП. Мощность генератора и избыточная мощность до отключения поврежденной цепи

$$P_2' = P_{\max II}\sin\delta_2 = 0{,}5\sin 53{,}9° = 0{,}404;$$

$$\Delta P_2' = P_0 - P_2' = 1 - 0{,}404 = 0{,}596.$$

Мощность генератора и избыток мощности после отключения поврежденной цепи

$$P_2'' = P_{\max III}\sin\delta_2 = 1{,}25\sin 53{,}9° = 1{,}01;$$

$$\Delta P_2'' = P_0 - P_2'' = 1 - 1{,}01 = -0{,}01.$$

Приращение угла в третьем интервале

$$\Delta\delta_3 = \Delta\delta_2 + 0{,}5K(\Delta P_2' + \Delta P_2'').$$

Угол δ_3 в конце третьего интервала

$$\delta_3 = \delta_2 + \Delta\delta_3 = 53{,}9 + 18{,}5 = 72{,}4°.$$

Четвертый и пятый интервалы.

Расчет четвертого и пятого интервалов выполняются так же, как и расчет второго интервала, только мощность генератора уже вычисляется по угловой характеристике мощности послеаварийного режима.

Шестой интервал.

В начале шестого интервала (при $t = t_{\text{КЗ}} + t_{\text{АПВ}} = 0{,}2 + 0{,}4 = 0{,}6$ с) срабатывает устройство АПВ. Расчет шестого интервала выполняется аналогично расчету третьего интервала, только используются угловые характеристики мощности послеаварийного и нормального режимов.

Таблица 3 – Результаты расчетов динамической устойчивости

t, с	δ, град	P	ΔP	$\Delta\delta$, град	Примечание
0	34,4	0,282	0,718	5	Расчет по $P_{II}(\delta)$
0,1	39,4	0,318	0,682	14,5	Расчет по $P_{II}(\delta)$
0,2	53,9	0,404	0,596	18,5	Переход с $P_{II}(\delta)$
		1,01	-0,01		на $P_{III}(\delta)$
0,3	72,4	1,19	-0,19	15,8	Расчет по $P_{III}(\delta)$
0,4	88,2	1,25	-0,25	12,3	Расчет по $P_{III}(\delta)$
0,5	100,5	1,23	-0,23	9,1	
0,6	109,1	1,18	-0,18	3,1	Переход с $P_{III}(\delta)$
		1,67	-0,67		на $P_I(\delta)$
0,7	112,2	1,64	-0,64	-5,9	Расчет по $P_I(\delta)$
0,8	106,3	-	-	-	Расчет по $P_I(\delta)$

Последующие интервалы рассчитываются аналогично расчету второго интервала, только используется угловая характеристика мощности нормального режима.

Результаты расчетов сводятся в таблицу. Полученные данные свидетельствуют о том, что динамическая устойчивость СЭС при двухфазном КЗ на землю с последующим трехфазным АПВ сохраняется. Без АПВ система не сохранила бы устойчивость, так как предельный угол отключения двухфазного КЗ на землю

$$\delta_{\text{откл пр}} = \arccos\frac{P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) - P_{max\,II}cos\delta_0 + P_{max\,I}cos\delta_{\text{кр}}}{P_{max\,III} - P_{max\,II}} =$$

$$= \arccos\frac{1(126{,}9 - 34{,}4)\frac{\pi}{180} + 0{,}5\cos 34{,}4° - 1{,}25\cos 126{,}9°}{1{,}25 - 0{,}5} = 53°,$$

а при фактической длительности КЗ $t_{\text{КЗ}} = 0{,}2$ с угол отключения КЗ больше и равен 53,9°.

4. АСИНХРОННЫЙ ХОД И РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ

4.1. Асинхронный ход

Когда синхронная машина выпадет из синхронизма, возникает асинхронный ход (асинхронный режим). Его может вызвать потеря возбуждения, нарушение динамической устойчивости после резкого возмущения или нарушение статической устойчивости сильно перегруженной системы при малом возмущении. После выпадения из синхронизма угловая скорость ротора становится больше синхронной, если машина работала генератором, или меньше синхронной, если она работала двигателем.

В асинхронном режиме синхронная машина кроме момента, обусловленного ее возбуждением, развивает еще и асинхронный момент.

Асинхронный момент обусловлен свободными токами, наводимыми в обмотке возбуждения и в демпферных контурах вследствие движения ротора машины по отношению к магнитному полю, созданному внешними ЭДС (т.е. по отношению к полю статора, вращающемуся с постоянной частотой сети).

Асинхронный момент имеет пульсирующий характер. Он может быть представлен в виде двух составляющих: знакопеременного и среднего асинхронного момента (рисунок 42).

Знакопеременный момент возникает из-за несимметрии ротора в продольной и поперечной осях. Причем эта несимметрия имеется как у роторов явнополюсных, так и неявнополюсных (турбогенераторов и турбодвигателей) машин за счет наличия на их роторах обмотки возбуждения, находящейся обычно в продольной оси. Пульсирующий момент заставляет ротор вращаться с переменной скоростью во время проворота относительно поля статора, что и создает в свою очередь пульсацию скольжения около некоторого среднего значения $s_{\text{ср}}$.

Пульсирующий момент не оказывает существенного влияния на протекание асинхронного режима, и в расчетах им обычно пренебрегают.

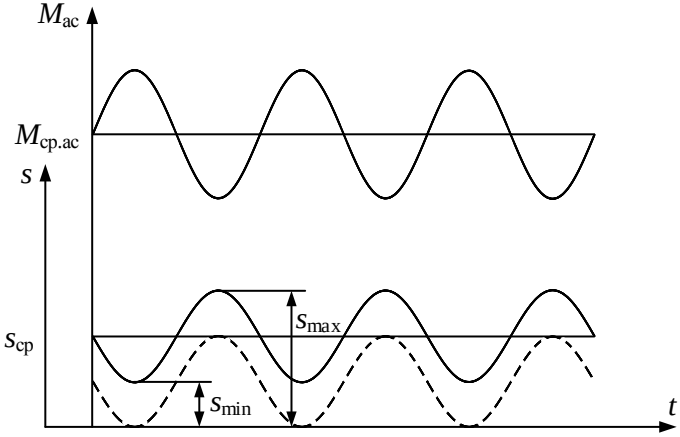


Рисунок 42

Средний асинхронный момент невозбужденной синхронной машины, включенной непосредственно на шины неизменного напряжения и работающей при скорости, отличной от синхронной, вычисляют по формуле:

$$M_{ср.ac} = \frac{U^2}{2}\left[\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d}\frac{sT'_d}{1+(sT'_d)^2} + \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d}\frac{sT''_d}{1+(sT''_d)^2} + \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q}\frac{sT''_q}{1+\left(sT''_q\right)^2}\right],$$

где U – напряжение на зажимах машины;

x_d – синхронное сопротивление машины

x'_d – переходное сопротивление;

x''_d – сверхпереходное сопротивление;

x_q – синхронное сопротивление в поперечной оси;

x''_q – сверхпереходное сопротивление в поперечной оси;

T'_d – постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора;

T''_d – постоянная времени демпферной обмотки в продольной оси при замкнутых обмотке статора и обмотке возбуждения;

T_q'' – постоянная времени демпферной обмотки в поперечной оси при замкнутой обмотке статора;

s – скольжение.

Из приведенной выше формулы для определения асинхронного момента видно, что средний асинхронный момент состоит из трех составляющих:

1) составляющей момента, образующейся за счет взаимодействия обмотки возбуждения с полем статора, – M_d';

2) составляющей, образующейся за счет взаимодействия демпферной обмотки в продольной оси с полем статора, – M_d'';

3) составляющей, образующейся за счет взаимодействия демпферной обмотки в поперечной оси с полем статора, – M_q''.

Тогда можно записать следующим образом:

$$M_{\text{ср.ас}} = M_d' + M_d'' + M_q''.$$

На рисунке 43 изображены асинхронная характеристика и ее составляющие для мощного турбогенератора.

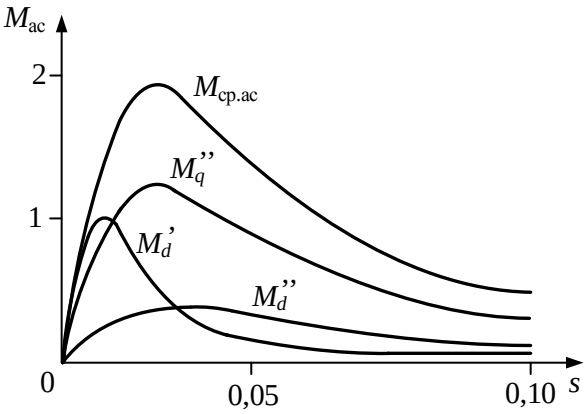


Рисунок 43

Видно, что выпав из синхронизма, такая синхронная машина, работая со скольжением при условии, что на ее зажимах поддерживается номинальное напряжение, может нести номинальную активную нагрузку. Однако в асинхронном режиме

синхронная машина, потребляя большую реактивную мощность, перегревается. Кроме того, во время асинхронного хода из-за пульсации мощности генераторов возникают значительные колебания мощности по линиям связи с системой, что, в свою очередь, приводит к существенным колебаниям всех параметров режима системы. Поэтому асинхронный режим должен быть прекращен. В случае, когда асинхронный ход начинается по линии связи электрической станции с системой, асинхронный ход прекращают отключением этой связи (размыканием). Когда на станции из синхронизма выпадает один из генераторов, возможна ресинхронизация, т.е. восстановление синхронной работы генератора. При перерывах электроснабжения синхронные двигатели обычно выпадают из синхронизма. Если на предприятии, где установлены двигатели, предусмотрен их самозапуск, они разгоняются до подсинхронных оборотов и производится их ресинхронизация. В противном случае двигатели отключаются от сети защитой от асинхронного хода.

4.2. Ресинхронизация

Если при асинхронном ходе мгновенное значение скольжения пройдет через нуль, то может произойти ресинхронизация, т.е. восстановление синхронной работы электрической машины. Для ресинхронизации синхронной машины необходимо, чтобы скорость вращения ротора машины была достаточно близкой к синхронной скорости, т.е. среднее скольжение было достаточно малым.

На рисунке 42 видно, что скольжение изменяется за время одного проворота ротора относительно вращающегося поля статора от s_{min} до s_{max}, так как на среднее значение мощности (момента) накладываются синусоидальные колебания синхронной мощности то ускоряющей, то тормозящей ротор генератора. Если среднее значение скольжения $s_{\text{ср}}$ уменьшить так, чтобы мгновенное значение проходило бы через нуль $s_{min} = 0$, то ресинхронизация становится возможной.

Уменьшение $s_{\text{ср}}$ генератора тепловой станции достигается снижением механического момента путем закрытия регулирующих клапанов паровой турбины, генератора гидростанции – закрытием направляющего аппарата гидротурбины.

Чтобы облегчить ресинхронизацию следует до момента прохождения мгновенного скольжения через нуль увеличить возбуждение с тем, чтобы в момент, когда $s_{min} = 0$, оно было бы близким к номинальному.

Для уменьшения $s_{\text{ср}}$ синхронного двигателя, выпавшего из синхронизма, необходимо подобрать соответствующее сопротивление в цепи возбуждения так, чтобы асинхронная характеристика стала круче.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ресинхронизация двигателей практически всегда происходит, если среднее скольжение будет:

$$S_{\text{ср}} < S_{\text{доп}} = 0{,}065\sqrt{\frac{M_{B\,max}}{T_J}},$$

где $M_{B\,max}$ – максимальное значение синхронного момента при форсировке возбуждения (из каталога для двигателей);

T_J – постоянная инерции ротора.

Максимальное значение синхронного момента можно определить, используя формулу

$$M_{B\,max} = \frac{U_{\text{C}} E_m}{x_d},$$

где U_{C} – напряжение системы;

E_m – ЭДС при форсированном возбуждении.

Если после аварии и кратковременного асинхронного хода генератору удается ресинхронизировать, то говорят, что «система обладает результирующей устойчивостью». Если при восстановлении электроснабжения двигателей после его нарушения удается обеспечить нормальную работу электропривода, то считают, что произошел «успешный самозапуск».

4.3. Асинхронный ход генераторов электростанции

Далее рассматривается процесс асинхронного хода электростанции (группы генераторов), работающих через линию электропередачи в приемную систему. В состав электропередачи могут входить промежуточные подстанции, от шин которых питается нагрузка (узлы нагрузки). Аналогичную схему имеет межсистемная связь, объединяющая две электрические системы (рисунок 44).

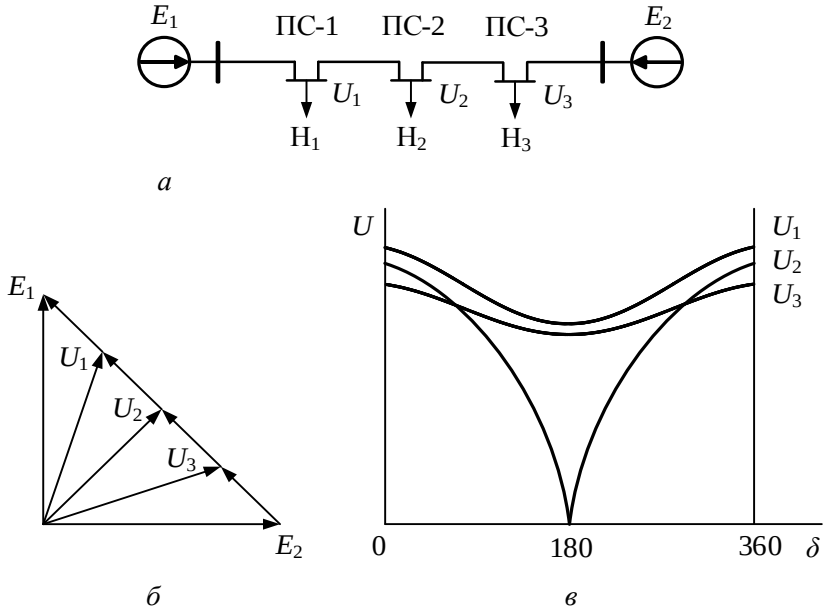


Рисунок 44

На промежуточных подстанциях ПС-1, ПС-2, ПС-3 включены нагрузки Н1, Н2, Н3.

Асинхронный ход по передаче может возникнуть при нарушении статической устойчивости из-за перегрузки или при нарушении динамической устойчивости системы после сильного

возмущения. После возмущения во время выпадения из синхронизма и последующего асинхронного хода напряжения в узлах нагрузки начинают изменяться. Напряжения в узлах будут изменяться и в том случае, если нарушения синхронной работы энергосистемы не произойдет, а возникнут только качания генераторов энергосистемы после возмущения относительно точки устанавливающегося устойчивого режима.

Характер изменения напряжений можно определить из векторных диаграмм электропередачи, зная, что векторы ЭДС E_1 и E_2 жестко связаны с роторами эквивалентных синхронных генераторов, а выбег генератора в сторону ускорения соответствует вращению его вектора ЭДС против часовой стрелки. В результате можно получить зависимость величин напряжений в узлах нагрузки от изменения угла δ между векторами ЭДС генераторов энергосистемы. Видно, что степень снижения напряжения на промежуточных подстанциях зависит от их расположения. В одной из точек сети (на ПС-2) при угле δ, равном 180° напряжение снижается до нуля. Эта точка называется электрическим центром качаний.

Потребители, получающие питание от подстанции ПС-2, а также и от других подстанций ПС-1, ПС-3 при асинхронном ходе будут периодически (до прекращения асинхронного хода) попадать в ситуацию, аналогичную нарушению электроснабжения, и двигатели в этих узлах могут остановиться. Однако на потребителей, получающих питание от подстанций, которые расположены непосредственно в энергосистемах (особенно в избыточных), произошедшая авария может вообще не повлиять. Подключение нагрузки на промежуточных подстанциях снижает запасы статической устойчивости электропередачи. Чем ближе к станции или энергосистеме узел нагрузки, тем это снижение меньше.

5. УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ

Система электроснабжения содержит питающие и распределительные сети, трансформаторы, компенсирующие устройства (синхронные компенсаторы, конденсаторы) и устройства, в которых электрическая энергия используется в производственных или бытовых целях. Эти устройства называются приемниками электрической энергии (нагрузками).

Узлами нагрузки называются места подключения отдельных систем электроснабжения к высоковольтным сетям электрических систем.

При нормальной работе систем электроснабжения и во время различных пусков и остановок оборудования происходят нормальные переходные процессы.

Отключение отдельных элементов и короткие замыкания в них приводят к аварийным переходным процессам.

Установившиеся режимы и переходные процессы в системах электроснабжения должны удовлетворять общим требованиям, которые сформулированы применительно к электрической системе в целом.

Переходные процессы в системах электроснабжения можно различать по виду возмущения (малое, большое, длительное). В нормальном режиме системы при малых его возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости синхронных двигателей, синхронных компенсаторов, больших групп асинхронных двигателей, которые, имея мощность, соизмеримую с мощностью питающих их генераторов, могут оказаться неустойчивыми, причем эта неустойчивость может проявиться в виде специфического явления, называемого лавиной напряжения.

Пуски двигателей, резкие колебания момента на их валу и т.д. приводят к изменениям значения и фазы напряжения в узлах нагрузки. Отклонения этих величин не должны превышать допустимых пределов. Влияние резких изменений режима двигателей обычно заметно проявляется в распределительных сетях

в виде колебаний напряжения. Более медленные изменения режимов двигателей, связанные с технологическими процессами, в которых участвуют двигатели, преимущественно отражаются на уровнях напряжения в питающих сетях (на отклонении напряжения).

Такие нарушения режима, как короткие замыкания в элементах питательных сетей, отключения и повторные включения синхронных двигателей, самозапуск асинхронных двигателей после перерывов питания, самовозбуждение и самораскачивание двигателей при работе на емкостное сопротивление и т.д., могут существенно сказываться на режиме всей системы электроснабжения, поэтому переходные процессы в ее элементах рассматриваются не только с точки зрения обеспечения их надежности и устойчивости, но и с точки зрения обеспечения надежности всей системы электроснабжения.

Переходные процессы в узлах нагрузки могут рассматриваться с двух точек зрения:

- поведения собственно нагрузки при переходных процессах и влияния этих процессов на работу потребителей (например, ухудшение качества продукции при изменении скорости двигателей во время изменения напряжения или частоты, мигание ламп при колебаниях напряжения и т.п.);
- влияния переходных процессов в нагрузке на режим системы в целом (например, самозапуск двигателей может привести к недопустимому снижению напряжения в системе и даже к нарушению ее устойчивости).

Кроме того, процессы, непрерывно происходящие в какой-либо нагрузке, могут оказывать неблагоприятное влияние на работу остальных потребителей системы.

5.1. Асинхронные электродвигатели и их основные характеристики

Классический асинхронный электродвигатель содержит два основных узла: неподвижный статор с трехфазной обмоткой,

размещенной в пазах сердечника, и вращающийся ротор со своей трехфазной обмоткой. Обмотка ротора может быть постоянно замкнутой накоротко, или иметь выводы для подключения внешних цепей через скользящие контакты.

Короткозамкнутая обмотка ротора обычно состоит из ряда медных или алюминиевых стержней, расположенных в пазах и замкнутых по торцам кольцами. У двигателей с контактными кольцами (двигатели с фазным ротором) в пазы ротора укладывается трехфазная обмотка, аналогичная обмотке статора. Обмотка соединяется звездой, а три свободных вывода присоединяются к трем контактным кольцам, закрепленным на роторе, которые вместе с неподвижными щетками обеспечивают электрическую связь с неподвижными внешними резисторами или закорачивающими перемычками.

Трехфазная система токов обмотки статора создает магнитное поле, вращающееся с угловой (синхронной) скоростью

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p},$$

где f_1 - частота питающей сети;

p - число пар полюсов обмотки статора.

Обмотки статора и ротора находятся в этом вращающемся магнитном поле и в них индуктируются ЭДС. Полагая, что результирующий магнитный поток имеет синусоидальную форму для действующего значения ЭДС обмотки статора, можно записать следующее выражение:

$$E_1 = 4{,}44\, k_{\text{об}\,1} f_1 w_1 \Phi,$$

где Ф - амплитуда магнитного потока;

$k_{\text{об}\,1}$ - обмоточный коэффициент обмотки статора, учитывающий длину шага обмотки;

w_1 - число витков на фазу в обмотке статора.

Под действием ЭДС E_2 в замкнутой обмотке ротора возникает ток. На проводники этой обмотки с током, находящиеся в магнитном поле, действуют электромагнитные силы. Вследствие этого ротор двигателя вращается по направлению вращения магнитного поля.

Скорость вращения ротора двигателя ω_2 меньше синхронной скорости вращения магнитного поля ω_1. Относительное значение разности этих величин есть скольжение

$$s = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\omega_1}.$$

Частота ЭДС ротора пропорциональна разности скоростей вращения магнитного поля и ротора, т.е. скольжению

$$f_2 = sf_1$$

При неподвижном роторе $f_1 = f_2$ и действующее значение ЭДС обмотки ротора равно

$$E_{2k} = 4{,}44\ k_{об2} f_1 w_2 \Phi.$$

При вращающемся роторе

$$E_2 = 4{,}44\ k_{об2} f_1 s w_2 \Phi,$$

где $k_{об2}$ – обмоточный коэффициент обмотки ротора;

w_2 - число витков на фазу в обмотке ротора.

ЭДС в обмотке ротора изменяется пропорционально скольжению

$$E_2 = sE_{2k}.$$

Отношение ЭДС обмоток статора и ротора в неподвижном состоянии принято называть коэффициентом трансформации асинхронной машины

$$k_E = \frac{E_1}{E_{2k}} = \frac{w_1 k_{об1}}{w_2 k_{об2}}.$$

Физические процессы в асинхронном двигателе во многом сходны с процессами, происходящими в трансформаторе. Поэтому по аналогии с трансформатором для научного анализа асинхронных машин целесообразно использовать схему замещения.

Если при неподвижном роторе правомерность представления асинхронного двигателя схемой замещения не вызывает сомнений, то при вращающемся роторе это требует обоснования.

Так, при вращающемся роторе, кроме изменения ЭДС E_2, в зависимости от скольжения изменяется и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора:

$$x_2 = sx_{2k}.$$

Здесь x_{2k} и x_2 - индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора при неподвижном и вращающемся роторе.

С учетом этого, используя приведенные к обмотке статора величины, для цепи ротора можно записать следующее уравнение:

$$s\dot{E}'_{2k} + j\dot{I}'_2 s x'_{2k} + j\dot{I}'_2 R'_2 = 0.$$

Разделив это уравнение на s и решив его относительно $\dot{I}'_2$, получим:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_{2k}}{\frac{R'_2}{s} + jx'_{2k}}.$$

Это уравнение цепи, в которой к источнику ЭДС $\dot{E}'_{2k}$ подключено комплексное сопротивление

$$\frac{R'_2}{s} + jx'_{2k}.$$

Как видно, только активная составляющая этого сопротивления зависит от скольжения.

В результате приведения $\dot{E}_2$ к цепям статора получим следующее равенство:

$$\dot{E}'_{2k} = k_E \dot{E}'_{2k} = \frac{w_1 k_{об1}}{w_2 k_{об2}} 4{,}44\, k_{об2} f_1 w_2 \dot{\Phi} = 4{,}44\, k_{об1} f_1 w_1 \dot{\Phi} = \dot{E}_1 = \dot{E}.$$

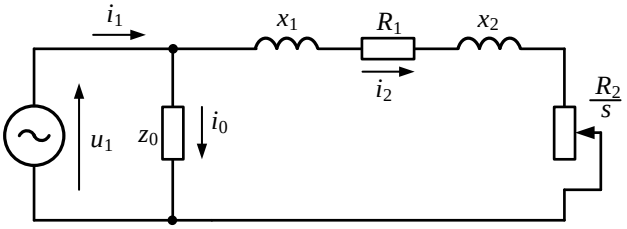
Таким образом, имея равные ЭДС ротора и статора с одной частотой, можно представить их цепи в виде одной схемы замещения [1].

На рисунке 45, *а* показана Т-образная схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

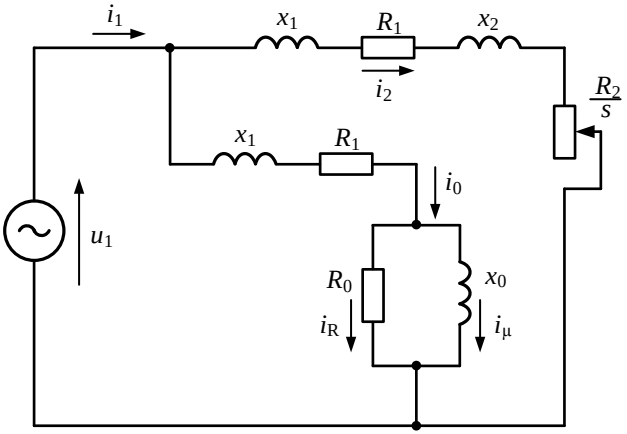
На схеме обозначены: R_0 и x_0 - эквивалентное сопротивление потерь в стали и индуктивное сопротивление намагничивания; R_1 и x_1 - активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; I_0 - ток намагничивания; I_μ и I_R - индуктивная и активная составляющие тока намагничивания; U_1 - фазное напряжение питания.

В некоторых случаях более удобно пользоваться Г-образной схемой замещения, в которой ветвь намагничивания вынесена на зажимы источника питания (рисунок 45, *б*). Для расчетов, где

допустимо отклонение параметров схемы в пределах 5 %, их можно принять равными параметрам исходной Т-образной схемы замещения. Если необходима более высокая точность, то параметры должны определяться с учетом поправочных коэффициентов [1].



а



б

Рисунок 45

Преобразование энергии в асинхронных электродвигателях неизбежно сопровождается потерями: электрическими, магнитными, механическими и добавочными.

Активная мощность P_1, подводимая к трехфазному асинхронному электродвигателю из питающей сети, частично

расходуется на покрытие магнитных потерь в стали и электрических потерь в обмотке статора, вычисляется по следующему выражению:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi.$$

Активная мощность, которая передается со статора на ротор, определяется в соответствии со схемой замещения

$$P_Э = 3(I_2')^2 \frac{R_2}{s}.$$

Эта мощность поступает на ротор через магнитное поле, что и определило ее название – электромагнитная мощность.

Часть электромагнитной энергии расходуется в обмотке ротора в виде электрических потерь, а оставшаяся часть преобразуется в полную механическую мощность.

Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше полной механической мощности на величину механических и добавочных потерь.

Отношение полезной механической мощности на валу к потребляемой активной электрической мощности – есть коэффициент полезного действия КПД асинхронного двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

разность между этими двумя мощностями равна суммарным потерям:

$$\Delta P = P_1 - P_2.$$

Следует подчеркнуть, что на заводской табличке двигателя указываются номинальные значения: полезной мощности на валу; линейного напряжения питания; КПД и коэффициента мощности.

Например, если на табличке указаны $P_н = 15$ кВт, $U_н = 380$ В, $\cos\varphi_н = 0{,}8$, $\eta_н = 0{,}75$, то двигатель потребляет из сети в номинальном режиме мощность

$$P_1 = \frac{P_н}{\eta_н} = \frac{15}{0{,}75} = 20 \text{ кВт}.$$

Важное практическое значение имеет зависимость вращающего момента асинхронного электродвигателя от скольжения.

Электромагнитный вращающий момент M, развиваемый асинхронным двигателем, связан с электромагнитной мощностью следующим соотношением [литература]:

$$M = \frac{P_э}{\omega_1} = 3(I_2')^2 \frac{R_2'}{s\omega_1}.$$

Следует отметить, что вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален активной мощности, которая выделяется в активном сопротивлении обмотки ротора.

Используя схему замещения, эту связь можно выразить через параметры статора и ротора:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{s\omega_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2\right]}.$$

Анализируя приведенную выше формулу, можно получить достаточно полное представление о механических свойствах асинхронных двигателей.

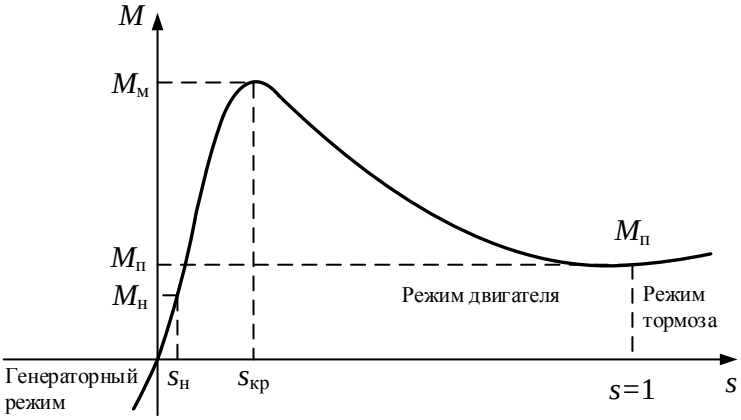
Прежде всего необходимо отметить, что вращающий момент двигателя зависит от трех групп величин: первая – величины, определяемые конструкцией электродвигателя (R_1, R_2', x_1, x_2'); вторая – величины, характеризующие источник питания (уровень напряжения и частота); третья – величины, связанные с механической нагрузкой (момент сопротивления, скольжение или скорость вращения ротора).

На рисунке 46, *а* показана естественная механическая характеристика асинхронного двигателя при неизменных напряжении и частоте источника питания.

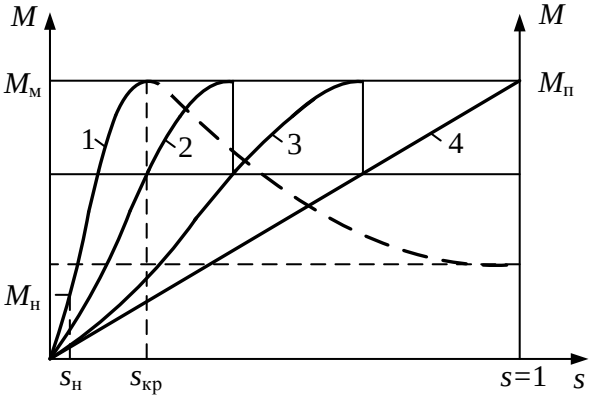
Важное значение для оценки рабочих свойств асинхронной машины в режиме двигателя $(0 < s < 1)$ имеют особые точки механической характеристики, соответствующие пусковому моменту $M_п$, максимальному – $M_м$ и номинальному вращающему моменту $M_н$.

Во время пуска двигателя в ход, пока ротор неподвижен,

скольжение равно 1, поэтому ЭДС и ток обмотки ротора максимальны.



а



б

Рисунок 46

Соответственно ток обмотки статора превышает номинальный ток двигателя в несколько раз. Двигатель развивает сравнительно небольшой вращающий момент, который и принято называть пусковым.

Несоответствие между пусковым током и пусковым моментом связано с преобладанием индуктивной составляющей в сопротивлении обмотки ротора в период пуска, а вращающий момент, как уже отмечалось, пропорционален активному сопротивлению этой обмотки.

Пусковой момент двигателя определяется следующим образом:

$$M_{\text{п}} = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_1[(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Для того, чтобы двигатель развернулся под нагрузкой, его пусковой момент должен быть больше момента сопротивления рабочего механизма. Под действием пускового момента ротор двигателя начинает вращаться, скольжение уменьшается, а вращающий момент увеличивается.

При некотором значении скольжения $s_{\text{кр}}$, называемом критическим, вращающий момент двигателя достигает максимального значения $M_{\text{м}}$.

Взяв производную от электромагнитного вращающего момента по скольжению и приравняв ее нулю, можно получить уравнение относительно скольжения. Решение этого уравнения дает значение скольжения, при котором вращающий момент имеет максимальное значение:

$$s = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{{R_1}^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Здесь знак плюс соответствует двигательному, а минус – генераторному режимам работы машины.

Используя это значение скольжения, можно определить максимальный вращающий момент двигателя:

$$M_{\text{м}} = \frac{3U_1^2}{2\omega_1\left[R_1 + \sqrt{{R_1}^2 + (x_1 + x_2')^2}\right]}.$$

Для электродвигателей мощностью более 1 кВт практически всегда $R_1 \ll (x_1 + x_2')$, и можно принять $R_1 = 0$. Тогда формулы для критического скольжения и максимального вращающего момента упрощаются

$$s \approx \pm \frac{R_2'}{x_1 + x_2'};$$

$$M_{\text{м}} = \frac{3U_1^2}{2\omega_1(x_1 + x_2')}.$$

Отношение текущего значения вращающего момента к максимальному позволяет получить упрощенное широко используемое выражение для механической характеристики двигателя в относительных единицах:

$$\frac{M}{M_{\text{м}}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}.$$

Это соотношение дает возможность построить механическую характеристику по каталожным данным.

Номинальный вращающий момент двигателя соответствует номинальному скольжению, значение которого обычно находится в диапазоне от 0,01 до 0,1, причем меньшие значения относятся к крупным, а большие – к мелким двигателям.

Вращающий момент определяется следующим образом:

$$M_{\text{м}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{60\, P_{2\text{н}}}{2\, pn_{\text{н}}} = 9{,}55\frac{P_{2\text{н}}}{n_{\text{н}}}\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}}\right),$$

где $P_{2\text{н}}$ - номинальная полезная механическая мощность на валу, Вт;

$\omega_{\text{н}} = 2\, pn_{\text{н}}/60$ – номинальная угловая скорость вращения ротора, 1/с;

$n_{\text{н}}$ - номинальная частота вращения ротора, об/мин.

При работе двигателя с малыми скольжениями от 0 до $s_{\text{кр}}$, к которым относится и номинальное, увеличение скольжения под действием тормозного момента вызывает увеличение вращающего момента двигателя. Благодаря этому обеспечивается устойчивая работа двигателя.

При скольжении больше $s_{кр}$ работа двигателя неустойчива, т.к. на этом участке характеристики увеличение скольжения сопровождается уменьшением вращающего момента.

Механические характеристики асинхронных двигателей могут быть весьма разнообразными, но обычно соблюдаются определенные соотношения между основными параметрами. Для обеспечения успешного пуска двигателя, необходимо иметь $M_п/M_м > 1$, а для нормальной работы под нагрузкой, как правило, выдерживается соотношение $M_м/M_п = 1{,}8 - 2{,}5$.

Механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором можно изменять путем включения дополнительных сопротивлений в цепь ротора. На рисунке 46, *б* показано семейство механических характеристик двигателя с фазным ротором при различных сопротивлениях в цепи ротора. Как видно, можно подобрать такие сопротивления, при которых пусковой момент становится равным (или близким) по величине максимальному вращающему моменту двигателя, а характеристика – линейной (4).

Таким образом, у двигателя с фазным ротором регулируется скорость вращения ротора и обеспечивается достаточно плавный пуск, если последовательно уменьшать сопротивления в цепи ротора и переходить от одной к другой искусственной характеристике 4, 3, 2 до естественной 1, когда внешние сопротивления снижаются до нуля.

5.2. Устойчивость узлов нагрузки при слабых возмущениях

5.2.1. Расчетные модели узлов нагрузки

Слабые возмущения могут возникать под действием питающей энергетической системы (изменения напряжения и частоты), а также в результате изменений режимов работы самой СЭС и ее электроприемников (пуски, колебания момента и перегрузки двигателей по условиям технологического процесса; изменение

количества питающих линий; регулирование значений отдельных параметров режима; оперативные переключения в распределительной сети и т.п.). В таких условиях электроснабжения свойства и тип электроприемников узла нагрузки оказывают существенное влияние на его устойчивость.

Если узлы нагрузки по суммарной потребляемой мощности соизмеримы с мощностью питающей ЭЭС или электрически удалены от источников электрической энергии, то режим их работы при слабых возмущениях может оказаться неустойчивым.

Статическую устойчивость узла промышленной нагрузки рассчитывают в такой последовательности:

1) замещают узел нагрузки расчетной моделью и определяют ее параметры;

2) выделяют существенные параметры и критерии устойчивости для данной схемы электроснабжения;

3) оценивают предельный режим по критическим значениям существенных переменных и запасу устойчивости.

Узел нагрузки с асинхронными двигателями замещают расчетной моделью в виде эквивалентного асинхронного двигателя, движение которого описывается теми же уравнениями, что и реальных двигателей.

Разнотипность синхронных двигателей в узлах нагрузки небольшая, что позволяет учитывать их по фактическим параметрам и параметрам нормального режима. Замещение больших и разнородных по технологическому использованию групп синхронных двигателей выполняют раздельно по явно- и неявнополюсным двигателям ввиду различия их асинхронных характеристик, механических постоянных инерции и характеристик приводимых механизмов.

Узел нагрузки, содержащий асинхронные и синхронные двигатели, представляют комплексной расчетной моделью. Ее параметры могут устанавливаться замещением отдельных составляющих нагрузки, описываться статическими

$$P_{\text{Н}} = F_1(U, \omega);\ Q_{\text{Н}} = F_2(U, \omega)$$

или динамическими характеристиками

$$P_{\text{Н}} = F_3\left(U, \omega, t, \frac{dU}{dt}, \frac{d\omega}{dt}, \ldots\right);$$

$$Q_{\text{Н}} = F_2\left(U, \omega, t, \frac{dU}{dt}, \frac{d\omega}{dt}, \ldots\right).$$

Устойчивость узла нагрузки анализируют по схеме замещения всей СЭС и параметрам ее режима. В зависимости от конкретных условий расчетную схему электроснабжения приводят к виду, наиболее эффективно обеспечивающему возможность применения того или иного практического критерия статической устойчивости.

Можно выделить четыре разные расчетные модели узлов нагрузки, которые отличаются друг от друга возможностью использования различных критериев статической устойчивости:

1) напряжение в узле нагрузки является независимой переменной, не зависящей от режима работы электроприемников, что позволяет рассчитывать устойчивость независимо от каждой из характерных групп электроприемников (рисунок 47, *а*) по ее основным критериям;

2) характерные группы электроприемников радиально связаны через внешние сопротивления с шинами узла нагрузки (рисунок 47, *б*), напряжение на которых не зависит от режима работы электроприемников;

3) характерные группы электроприемников связаны с системой через общее сопротивление, и независимой величиной режима является напряжение системы (рисунок 47, *в*);

4) модель, аналогичная предыдущей, но учитывающая наличие дополнительных источников реактивной мощности на шинах нагрузки (рисунок 47, *г*).

5.2.2. Статическая устойчивость асинхронных двигателей

Оценка устойчивости узла нагрузки, независимая по выделенным отдельно группам асинхронных и синхронных двигателей, выполняется для расчетных моделей узла нагрузки согласно рисунку 47, *а* и *б*. Существенной независимой переменной

в этом случае является напряжение на шинах узла нагрузки, и для оценки его устойчивости используются основные критерии устойчивости. При этом необходимо учитывать характеристики приводимых механизмов и их загрузку.

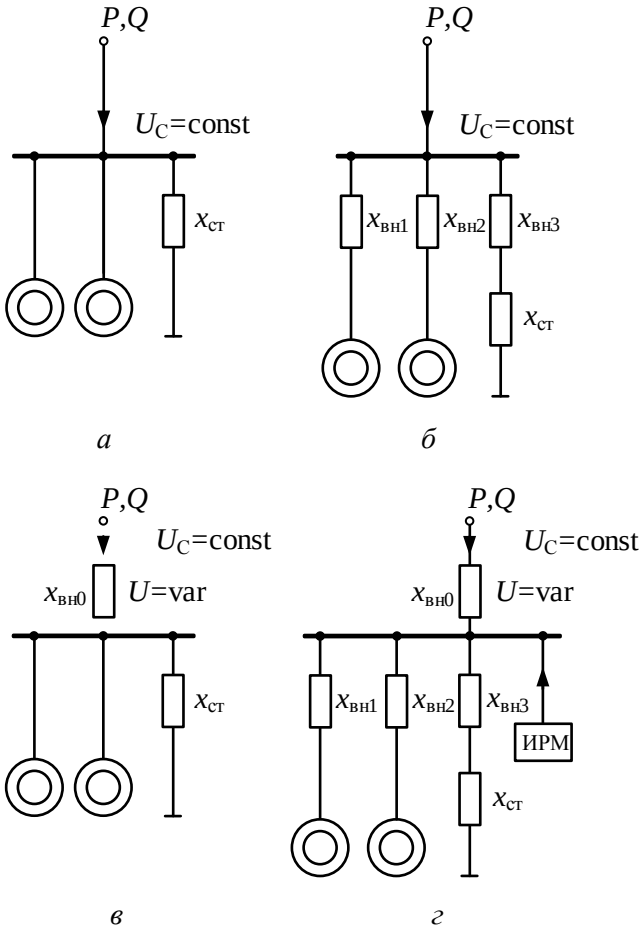


Рисунок 47

Для асинхронных двигателей (или их эквивалента) основным условием нарушения устойчивости является граничное равенство

$$\frac{d(M - M_{\text{мех}})}{ds} = 0.$$

При $M_{\text{мех}} = const$ и непосредственном подключении двигателей к шинам узла нагрузки критические параметры, соответствующие предельному режиму его статической устойчивости, определяются выражениями

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2}{x_s + x_\Sigma};$$

$$P_{max} = \frac{{U_{\text{С}}}^2}{2(x_s + x_\Sigma)},$$

которые соответствуют опрокидывающему моменту асинхронного двигателя.

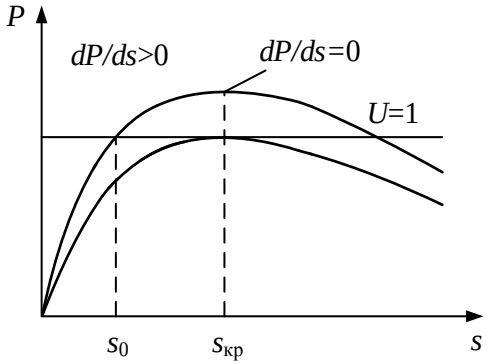


Рисунок 48

Поскольку опрокидывающий момент пропорционален квадрату напряжения на зажимах двигателя, со снижением напряжения он уменьшается. Напряжение, при котором опрокидывающий момент становится равным нагрузке двигателя, называется критическим. Определяется оно выражением

$$U_{\text{С кр}} = \sqrt{2mP_{\text{ном}}x_s},$$

где m – коэффициент загрузки эквивалентного двигателя.

При напряжении, меньшем, чем критическое, асинхронные двигатели узла нагрузки затормаживаются.

При подключении двигателей к узлу нагрузки через индивидуальное внешнее сопротивление $z_{\text{вн1}}, z_{\text{вн2}}, z_{\text{вн3}}$ (рисунок 47, *б*) расчет критических параметров режима и запаса

устойчивости выполняется аналогично, только с учетом этих сопротивлений.

Пренебрегая активными сопротивлениями, можно получить $x_s' = x_s + x_{\text{вн}}$.

Расчетные выражения при этом имеют следующий вид:

$$s_{\text{кр}}' = \frac{r_2}{x_s + x_{\text{вн}}} = \frac{s_{\text{кр}}}{1 + \frac{x_{\text{вн}}}{x_s}};$$

$$P_{max}' = \frac{{U_{\text{С}}}^2}{2(x_s + x_{\text{вн}})} = \frac{P_{max}}{1 + \frac{x_{\text{вн}}}{x_s}};$$

$$U_{\text{С кр}}' = \sqrt{2mP_{\text{ном}}(x_s + x_{\text{вн}})} = U_{\text{С кр}}\sqrt{1 + \frac{x_{\text{вн}}}{x_s}}.$$

Коэффициенты запаса устойчивости определяются по следующим выражениям:

$$k_{\text{з}\,s} = \frac{s_{\text{ном}} - s_{\text{кр}}'}{s_{\text{ном}}}100 \text{ или } k_{\text{з}\,U} = \frac{U_{\text{С}} - U_{\text{С кр}}'}{U_{\text{С}}}100.$$

Наличие внешнего сопротивления при подключении к узлу нагрузки асинхронных двигателей уменьшает запас статической устойчивости узла нагрузки.

Выражение для определения критического напряжения на зажимах двигателя можно записать в виде

$$U_{\text{Д кр}} = I_2'\sqrt{\left(\frac{r_2}{s_{\text{кр}}'}\right)^2 + {x_s}^2} = U_{\text{С кр}}\frac{\sqrt{1 + \frac{1}{1 + \frac{x_{\text{вн}}}{x_s}}}}{\sqrt{2}}.$$

5.2.3. Статическая устойчивость синхронных двигателей

Статическая устойчивость синхронных двигателей, подключенных к узлу нагрузки с неизменными значениями напряжения и частоты, нарушается при граничном условии

$$\frac{d(M - M_{\text{мех}})}{d\delta} = 0.$$

С учетом выражения угловой характеристики это условие можно представить в следующем виде:

$$\frac{d(M - M_{\text{мех}})}{d\delta} = \frac{dE_q}{d\delta}\frac{U_{\text{С}}}{x_d + x_{\text{вн}}}\sin\delta + \frac{U_{\text{С}}E_q}{x_d + x_{\text{вн}}}\cos\delta = 0.$$

При отсутствии устройств АРВ двигателей производная $dE_q/d\delta = 0$ и предельный по статической устойчивости режим соответствует значению угла $\delta = \pi/2$, когда

$$P_{max} = \frac{U_{\text{С}}E_q}{x_d + x_{\text{вн}}};$$

$$U_{\text{С кр}} = \frac{mP_{\text{ном}}(x_d + x_{\text{вн}})}{E_q}.$$

ЭДС E_q в долях ее значения при холостом ходе определяется выражением

$$E_q = \frac{{U_{\text{С}}}^4 - {U_{\text{С}}}^2 Q\left(x_{d\Sigma} + x_{q\Sigma}\right) + (P^2 + Q^2)x_{d\Sigma}x_{q\Sigma}}{U_{\text{С}}\sqrt{{U_{\text{С}}}^4 - 2{U_{\text{С}}}^2 Q x_{q\Sigma} + (P^2 + Q^2){x_{q\Sigma}}^2}},$$

где $x_{d\Sigma} = x_d + x_{\text{вн}}$; $x_{q\Sigma} = x_q + x_{\text{вн}}$.

При наличии АРВ пропорционального типа синхронный двигатель по аналогии с генератором можно представить в виде переходного сопротивления x'_d и ЭДС $E' = const$. В этом случае критическое напряжение на зажимах двигателя выражается зависимостью

$$U'_{\text{С кр}} = \frac{mP_{\text{ном}}(x'_d + x_{\text{вн}})}{E'}$$

и всегда меньше критического напряжения, определяемого выражением при отсутствии устройства АРВ, так как переходное сопротивление значительно меньше синхронного.

Наличие внешнего сопротивления при подключении к узлу нагрузки асинхронных и синхронных двигателей снижает предельное по статической устойчивости значения максимальной активной мощности и повышает значение критического напряжения в узле нагрузки. Это, в свою очередь, ужесточает требования к стабильности питающего напряжения.

5.2.4. Устойчивость узла нагрузки, присоединенного к центру питания через общее сопротивление

Если группы двигателей узла нагрузки присоединены к центру питания с напряжением $U_{\text{С}} = const$ через электрическую сеть (рисунок 47, *в*), то условия устойчивости узла нагрузки существенно зависят от параметров электрической сети ($z_{\text{вн}}$) и режима работы всех электроприемников.

В этом случае напряжение U в узле нагрузки является величиной переменной и его значение будет зависеть от изменения указанных факторов. Поэтому устойчивость узла нагрузки оценивают на основе независимой переменной – напряжения в узле нагрузки, используя косвенные критерии:

$$\frac{dU_{\text{С}}}{dU} > 0$$

или

$$\frac{d\Delta Q}{dU} < 0.$$

Переменные режима можно аналитически связать между собой, воспользовавшись статическими характеристиками узла нагрузки

$$P_{\text{Н}} = F_1(U) \text{ и } Q_{\text{Н}} = F_2(U);$$

$$U_{\text{С}} = \sqrt{\left(U + \frac{P_{\text{н}} r_{\text{вн}} + Q_{\text{н}} x_{\text{вн}}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{н}} x_{\text{вн}} + Q_{\text{н}} r_{\text{вн}}}{U}\right)^2}. \qquad (5.1)$$

Исследование этого выражения в области значений функций $P_{\text{Н}} = F_1(U, \omega)$; $Q_{\text{Н}} = F_2(U, \omega)$ преследует цель установить координаты $U_{\text{С}\,min}$ и $U_{\text{кр}}$ минимума функции, которые соответствуют границе статической устойчивости $dU_{\text{С}}/dU = 0$ (рисунок 49).

В соответствии с критерием $d\Delta Q/dU < 0$ статическую устойчивость оценивают по нарушению в узле нагрузки баланса реактивной мощности, вызываемого снижением напряжения. Для точки равновесия режима должно выполняться условие баланса $Q_{\text{С}} = Q_{\text{Н}}$, а в ее окрестности – неравенство $d(Q_{\text{С}} - Q_{\text{Н}})/dU > 0$.

Метод исследования приращения реактивной мощности $\Delta Q = Q_{\text{С}} - Q_{\text{Н}}$ выбирают в зависимости от исходной информации об узле нагрузки. Если известны статические характеристики нагрузки, то условия статической устойчивости определяют в соответствии как координаты предельного режима сохранения статической устойчивости по (5.1) и зависимости

$$Q_{\text{эк}} = Q_{\text{Н}} + \frac{\left({P_{\text{Н}}}^2 + {Q_{\text{Н}}}^2\right)x_{\text{эк}}}{U^2}.$$

При этом координаты предельного режима сохранения статической устойчивости соответствуют экстремальной точке ($U_{\text{С кр}}, Q_{\text{эк}}$) критерия устойчивости $dU_{\text{С}}/dU > 0$.

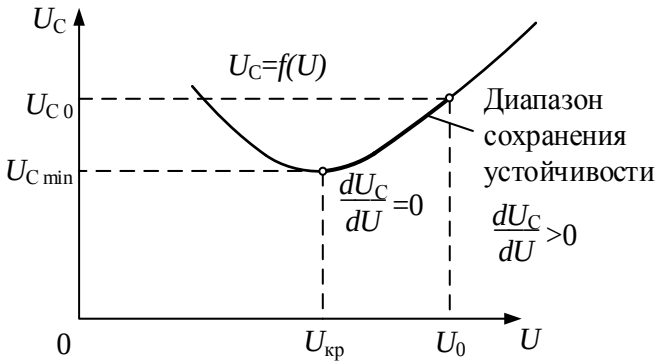


Рисунок 49

Если статические характеристики нагрузки неизвестны, то статическую устойчивость узла нагрузки анализируют графическим исследованием выражения

$$\Delta Q = Q_0 - (Q_{\text{СД}} + Q_{\text{АД}})$$

по зависимостям составляющих ее правой части от напряжения в узле нагрузки. Цель графоаналитического анализа – установить границу статической устойчивости режима по условию

$$d\Delta Q/dU = 0.$$

ПРИМЕР 6

На рисунке 50 изображена схема питания синхронного двигателя СНД 18-61-20. Определить максимально допустимую нагрузку двигателя, исходя из условия сохранения его статической устойчивости, запас статической устойчивости двигателя в нормальном режиме.

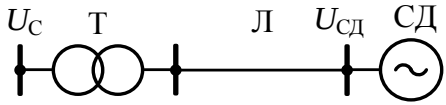


Рисунок 50

Исходные данные:

Синхронный двигатель:

$P_{ном} = 3{,}2$ МВт; $S_{СД\,ном} = 3{,}73$ МВА; $\eta = 95{,}8$ %; $m = 0{,}75$; $n = 300$ об/мин ; $x_{d\,ном} = 1{,}3$; $x_{q\,ном} = 0{,}85$; $\cos\varphi = 0{,}9$.

Трансформатор: $S_{Т\,ном} = 40$ МВА; $u_К = 10{,}5$ %.

ЛЭП: $x_{0\,Л} = 0{,}319$ Ом/км; $l = 6$ км.

Решение

Параметры элементов схемы и параметры режима двигателя приводятся к базисным значениям напряжения

$$U_б = 6 \text{ кВ } (U_б = 1)$$

и мощности

$$S_б = S_{СД\,ном} = 3{,}73 \text{ МВА}.$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_Т = \frac{u_К \cdot S_б}{100 \cdot S_{Т\,ном}} = \frac{10{,}5 \cdot 3{,}73}{100 \cdot 40} = 0{,}0098.$$

Сопротивление ЛЭП:

$$x_Л = x_{0\,Л} \cdot l \cdot \frac{S_б}{{U_б}^2} = 0{,}319 \cdot 6 \cdot \frac{3{,}73}{6^2} = 0{,}198.$$

Сопротивление двигателя:

$$x_d = x_{d\,ном} \cdot \frac{S_б}{S_{СД\,ном}} = 1{,}3.$$

$$x_q = x_{q\,\text{ном}} \cdot \frac{S_\text{б}}{S_\text{СД ном}} = 0{,}85.$$

Внешнее сопротивление сети:

$$x_\text{вн} = x_\text{Т} + x_\text{Л} = 0{,}0098 + 0{,}198 = 0{,}208.$$

Активная и реактивная нагрузки двигателя

$$P_0 = \frac{mP_\text{ном}}{S_\text{б}} = \frac{0{,}75 \cdot 3{,}2}{3{,}73} = 0{,}643.$$

$$Q_0 = P_0 \operatorname{tg}\varphi = 0{,}643 \operatorname{tg}(\arccos 0{,}9) = -0{,}312.$$

Напряжение в системе для исходного режима

$$U_{\text{С}\,0} = \sqrt{\left(U_\text{б} + \frac{Q_0 x_\text{вн}}{U_\text{б}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_\text{вн}}{U_\text{б}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0{,}312 \cdot 0{,}208}{1}\right)^2 + \left(\frac{0{,}643 \cdot 0{,}208}{1}\right)^2} = 1{,}07.$$

ЭДС двигателя в исходном режиме

$$E_q = \frac{{U_\text{б}}^4 - {U_\text{б}}^2 Q_0 (x_q + x_d) + ({P_0}^2 + {Q_0}^2) x_q x_d}{U_\text{б}\sqrt{{U_\text{б}}^4 - 2{U_\text{б}}^2 Q_0 x_q + ({P_0}^2 + {Q_0}^2){x_q}^2}} =$$

$$= \frac{1^4 - 1^2 \cdot 0{,}312 \cdot (0{,}85 + 1{,}3) + (0{,}643^2 + 0{,}312^2) \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}3}{1\sqrt{1^4 + 2 \cdot 1^2 \cdot 0{,}312 \cdot 0{,}85 + (0{,}643^2 + 0{,}312^2) \cdot 0{,}85^2}} =$$

$$= 1{,}61.$$

Максимальное значение активной мощности в системе

$$P_{max} = \frac{U_{\text{С}\,0} E_q}{x_d + x_\text{вн}} = \frac{1{,}07 \cdot 1{,}61}{1{,}3 + 0{,}208} = 1{,}14.$$

Значение напряжения в системе, соответствующее границе статической устойчивости двигателя

$$U_{\text{С кр}} = \frac{P_0 (x_d + x_\text{вн})}{E_q} = \frac{0{,}643 \cdot (1{,}3 + 0{,}208)}{1{,}61} = 0{,}602.$$

Запас статической устойчивости двигателя по напряжению

$$k_{\text{з}\,U} = \frac{U_{\text{С}\,0} E_q}{x_d + x_\text{вн}}.$$

5.3. Пуск и остановка двигателей

5.3.1. Условия и схема пуска

Пуском двигателя называется процесс перехода двигателя и связанного с ним механизма из неподвижного состояния в состояние вращения с номинальной скоростью. В процессе пуска двигатель должен развивать вращающий момент, необходимый для преодоления момента сопротивления механизма и инерции масс роторов двигателя и механизма.

Таким образом, при пуске двигатель получает из сети большое количество энергии, что и отражается в увеличении потребляемого тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному составляет у асинхронных двигателей с фазным ротором 1,5-2, у двигателей с короткозамкнутым ротором – 5-8.

Протекание больших токов в обмотках двигателя вызывает сильный нагрев двигателя при пуске, а также снижение напряжения на его зажимах. При необходимости проводят различные мероприятия, облегчающие пуск.

Условия пуска разделяют на легкие, нормальные и тяжелые.

При легких условиях пуска пусковой момент (это момент при скольжении s = 1,0, т.е. когда двигатель еще стоит) должен быть не менее 10–15 % номинального, при нормальных условиях – 50–75 %, при тяжелых–100 % и выше. Такое деление определяется характеристиками механизма, приводимого данным двигателем.

Для управления пуском и ограничения пусковых токов могут применяться разные схемы пуска. Далее рассматриваются основные, обычно применяемые схемы:

- автотрансформаторный пуск осуществляется по схеме, показанной на рисунке 51, *а*. При пуске включается сначала выключатель В1, затем выключатель В2. Двигатель начинает разгоняться при пониженном напряжении, потребляя сравнительно небольшой ток. После того как асинхронный двигатель достигнет номинальных оборотов, а синхронный будет синхронизирован,

выключатель В1 отключается, включается шунтирующий выключатель В3 и на двигатель подается нормальное напряжение. Поскольку автотрансформатор достаточно дорог и, кроме того, создает толчки намагничивающего тока при переключениях, схема автотрансформаторного пуска применяется редко;

- реакторный пуск производится в соответствии со схемой на рисунке 51, *б*. С помощью выключателя В1 двигатель подключается к сети через реактор. Двигатель начинает разгоняться и по мере уменьшения тока напряжение на двигателе возрастает за счет снижения падения напряжения в реакторе. При достижении асинхронным двигателем номинальных оборотов включается шунтирующий выключатель В2. При реакторном пуске синхронного двигателя выключатель В2 включается после того как двигатель войдет в синхронизм.

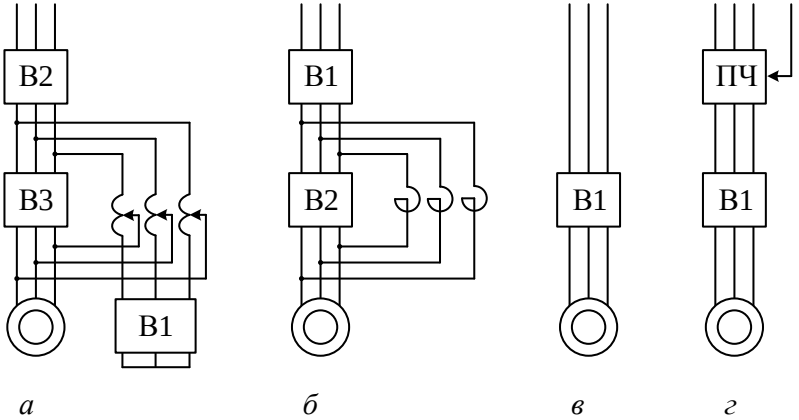


Рисунок 51

Сопротивление реактора определяется по следующему выражению:

$$x_P = U_{\text{ном}}\left(\frac{1}{I_{\text{доп}}} - \frac{1}{I_{\text{пуск}}}\right),$$

где $I_{\text{доп}}$ – значение тока, до которой нужно ограничить пусковой ток;

$I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток двигателя.

Недостаток схемы – достаточно большие затраты на пусковое оборудование. Схема применяется для пуска двигателей средней мощности (до 12,5 МВт).

- прямой пуск (рисунок 51, *в*) осуществляется подачей выключателем полного напряжения на двигатель. Преимущества прямого пуска – простота схемы и сокращение времени пуска. Применяется для пуска двигателей небольшой мощности;
- частотный пуск (рисунок 51, *г*) производится подключением двигателя к мощному преобразователю частоты (ПЧ). Изменением частоты и амплитуды выходного напряжения ПЧ добиваются плавного увеличения оборотов пускаемого двигателя. При этом при включении в сеть толчков тока не происходит.

Такая схема используется для пуска очень крупных двигателей (например, для пуска в двигательном режиме синхронных машин на гидроаккумулирующих станциях).

5.3.2. Пусковая мощность и время пуска

Пусковой мощностью называют мощность, которую развивает стоящий двигатель в момент появления на его зажимах номинального напряжения. Если пусковая мощность (начальный пусковой момент) двигателя больше мощности (момента сопротивления) механизма, то скорость агрегата начинает нарастать, т.е. происходит разгон двигателя до тех пор, пока не наступит равновесие между моментами двигателя и механизма.

При несинхронном относительно поля статора вращении ротора двигателя в его обмотках создается ЭДС, индуктируемая вращающимся полем статора. Индуктируемая ЭДС имеет частоту скольжения sf_0. Поскольку обмотки ротора асинхронного двигателя замкнуты, в них возникает ток и создается магнитное поле, которое вращается с угловой скоростью $s\omega_0$ относительно ротора. Ротор вращается с угловой скоростью $\omega_0(1-s)$. Следовательно, поле ротора неподвижно относительно вращающегося с угловой

скоростью ω_0 поля статора. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора и создают вращающий момент электродвигателя.

При анализе процесса пуска рассматриваются следующие величины:

- начальный толчок тока статора (в момент подключения двигателя к сети);
- длительность разгона до номинальной скорости (для асинхронных двигателей) или подсинхронной скорости (для синхронных), которая составляет 0,95 и более по сравнению с синхронной;
- изменение токов статора и ротора в процессе разгона.

Знание этих величин важно, в частности, для оценки механических усилий, действующих на обмотки, возможности прямого пуска (без специальных пусковых устройств) и для определения нагрева обмоток.

Значение начального толчка периодической слагающей тока статора определяется следующим образом:

$$I''_{\text{по}} = \frac{U_{\text{С}}}{x''_d + x_{\text{вн}}},$$

где $U_{\text{С}}$ – напряжение сети в той точке, где оно может быть принято не зависящим от режима двигателя;

x''_d – сверхпереходное сопротивление по отношению к цепи статора;

$x_{\text{вн}}$ – внешнее сопротивление по отношению к цепи статора.

Напряжение на зажимах двигателя в момент включения будет равно

$$U_{\text{д}} = I''_{\text{по}} x''_d = \frac{U_{\text{С}} x''_d}{x''_d + x_{\text{вн}}}.$$

Время разгона можно найти, зная закон движения двигателя под воздействием избыточного момента. Этот закон нам известен и устанавливается уравнением движения двигателя

$$-\tau_J \frac{ds}{dt} = P_{\text{э}} - P_{\text{м}}.$$

Это уравнение позволяет определить время $t_{\text{р}}$, соответствующее изменению скольжения от s_1 до s_2:

$$t_{\text{р}} = -\tau_J \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{\Delta P},$$

где $\Delta P = P_{\text{э}} - P_{\text{м}}$.

Время разгона $t_{\text{р}}$, необходимое для достижения синхронной угловой скорости – это время, за которое скольжение двигателя изменяется от $s_1 = 1$ до $s_2 = 0$, т.е.

$$t_{\text{р}} = -\frac{\tau_J}{\Delta P}(s_2 - s_1)$$

при условии, что $\Delta P = const$. Если $\Delta P = P_{\text{ном}}$, тогда в относительных единицах $\Delta P^* = 1$.

5.3.3. Остановка двигателей

Как только двигатель отключается от сети, он начинает останавливаться. Когда двигатель начинает останавливаться (выбегать) не будучи отключенным от сети, то происходит опрокидывание двигателя. Оно может наступить, когда произойдет достаточно глубокое снижение напряжения на выводах двигателя, при котором максимальный момент, развиваемый двигателем, становится равным моменту сопротивления механизма или еще меньше. Если все это происходит случайно, эти явления называют нарушениями электроснабжения.

В тех случаях, когда двигатель отключается намеренно воздействием на выключатель или от защит, начинается его нормальная остановка. Время остановки (торможения) двигателя определяется той же формулой, что и при разгоне:

$$t_{\text{торм}} = -\tau_J \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{\Delta P}.$$

Если $\Delta P = P_{\text{ном}} = P_{\text{м}}$, тогда в относительных единицах

$$\Delta P^* = -1 \text{ и } t_{\text{торм}} = \tau_J.$$

Время остановки двигателя под действием постоянной избыточной тормозящей мощности (момента), равной номинальной мощности, будет равно постоянной времени инерции ротора двигателя и механизма τ_J.

При остановках агрегата, приводимого синхронным двигателем, все эти установки собственных нужд продолжают работать на полную мощность. Остановка мощного агрегата при свободном выбеге продолжается достаточно долго (до ~30 мин). Если время остановки агрегата сократить (ускорить процесс остановки), то можно уменьшить расход электроэнергии на собственные нужды. Сократить время остановки возможно за счет создания дополнительных потерь в двигателе.

Потери в электрической машине складываются из потерь в стали (магнитные потери), в меди (электрические потери) и механических потерь.

При отключении электродвигателя от сети возбуждение отключается, его магнитное поле гасится, и агрегат тормозится только за счет механических потерь. Если при отключении двигателя от сети возбуждение перевести на уровень холостого хода, то при наличии АРВ двигатель будет тормозиться из-за активных магнитных потерь в статоре и механических потерь в электродвигателе и механизме и останавливаться быстрее.

5.4. Устойчивость узлов нагрузки при больших возмущениях. Самозапуск электродвигателей.

5.4.1. Общая характеристика

Двигатели при кратковременном перерыве питания или снижении напряжения могут остановиться даже в том случае, если через некоторое время электроснабжение будет восстановлено. Все зависит от продолжительности перерыва или величины снижения напряжения. При этом возникает ущерб, который может быть

значительным, особенно при расстройстве сложного технологического цикла.

Восстановление нормальной работы электропривода после кратковременного перерыва электроснабжения или глубокого снижения напряжения называется самозапуском. Главной задачей самозапуска является сохранение работоспособности технологической линии или агрегата при кратковременном нарушении электроснабжения.

Для обеспечения самозапуска двигателей, подключенных на общие шины питания, требуется комплексное решение вопросов, связанных с работой электродвигателя и его схемы управления питающей электрической сети, приводимого механизма. В некоторых случаях самозапуск может быть запрещен по условиям техники безопасности или технологического процесса.

5.4.2. Процессы самозапуска

Процесс самозапуска отличается от процесса пуска.

К основным отличиям можно отнести следующие факторы:

- в момент восстановления напряжения все двигатели или их значительная часть вращаются, при пуске – стоят;
- при отключении от сети вращающиеся двигатели, подключенные к питающим шинам, развивают на шинах ЭДС E_q; в момент восстановления напряжения на шинах периодическая составляющая тока самозапуска в начальный момент времени равна

$$I_{\text{п}0} = \frac{U_{\text{С}} - E_q}{Z_{\Sigma}}.$$

Ток при пуске находится по следующему выражению:

$$I_{\text{п}0} = \frac{U_{\text{С}}}{Z_{\Sigma}};$$

- самозапуск происходит при нагруженных механизмах, что увеличивает длительность разгона и нагрев двигателей;
- в самозапуске участвует одновременно, чаще всего, группа

двигателей, что приводит к значительному снижению напряжения на зажимах двигателей и соответственно уменьшается вращающий момент.

Процесс самозапуска состоит из двух этапов: 1) этапа выбега (торможения) и 2) этапа разгона и восстановления нормального режима. Для синхронных двигателей второй этап состоит из разгона до подсинхронной скорости $s \leq s_{\text{доп}}$ и вхождения в синхронизм.

Самозапуск считается успешным, если после восстановления напряжения агрегат длительно работает на номинальных оборотах с нормальной производительностью приводимого механизма и нагрузкой электродвигателя.

Рассматриваются отдельно процессы, происходящие при выбеге и разгоне электродвигателей.

5.4.3. Выбег при самозапуске

Как только нарушится электроснабжение, электромагнитный момент двигателя уменьшается или исчезает вовсе и начинается процесс остановки (выбег) агрегата двигатель-механизм под действием момента сопротивления механизма.

Выбег электродвигателей может быть одиночным или групповым.

Одиночный выбег начинается тогда, когда один электродвигатель оказывается отсоединенным от сети и от других двигателей, либо когда другие двигатели электрически удалены, т.е. находятся за реактором или трансформатором. Выбег такого двигателя еще называется свободным. Если отключаются двигатели, подключенные к одной системе шин и взаимное влияние которых друг на друга велико, то начинается групповой выбег. Процесс выбега в значительной степени определяется характеристиками приводимых механизмов. Он зависит также и от момента инерции агрегата, от его загрузки и начальной скорости. При близком КЗ двигатели тормозятся быстрее за счет возникновения дополнительного тормозного момента при подпитке КЗ.

Движение ротора двигателя при одиночном выбеге описывается уравнением:

$$\tau_j \frac{ds}{dt} = P_{\text{м}}.$$

Мощность $P_{\text{м}}$ для различных механизмов по-разному зависит от скорости вращения агрегата. Для двигателей, приводящих механизмы, у которых $\gamma = 0$, т.е. практически постоянный механический момент сопротивления $M_{\text{м}} = P_{\text{м}} = P_0$, имеем

$$\tau \frac{d\omega}{dt} = -P_0.$$

Тогда зависимость угловой скорости от времени свободного выбега будет иметь следующий вид

$$\omega = \omega_{\text{нач}} - P_0 \frac{t}{\tau_j},$$

где $\omega_{\text{нач}}, \omega$ – начальная и текущая угловые скорости двигателя при выбеге;

P_0 – нагрузка двигателя (момент сопротивления);

τ_J – постоянная инерции вращающихся масс ротора двигателя и механизма, с;

t – время, с.

Для механизмов, имеющих $\gamma = 1$ и $\gamma = 2$, тем же способом можно получить зависимость угловой скорости двигателя при свободном выбеге от времени. Эти зависимости показаны на рисунке 52, где хорошо видно, как снижение угловой скорости двигателя при выбеге зависит от характеристики механизма.

У любого двигателя, отключенного от источника питания, при выбеге в обмотке статора наводится ЭДС. У асинхронных двигателей ЭДС невелика, у синхронных – значительна. А так как значение тока при восстановлении напряжения при неблагоприятной фазе включения зависит от значения ЭДС, то желательно чтобы последняя была бы небольшой. Поэтому необходимо создать достаточную для затухания ЭДС выдержку времени. На большей части двигателей ЭДС затухает быстрее, чем происходит снижение угловой скорости. Так, у асинхронного

двигателя, приводящего в движение водяной насос, через 0,5 с после отключения скорость составляет 0,9, а ЭДС – 0,47 номинальных значений. Так как у свободно выбегающего двигателя ЭДС затухает достаточно быстро, ее фаза относительно напряжения сети в момент восстановления напряжения большого значения не имеет. У двигателей с фазным ротором затухание ЭДС можно ускорить быстрым вводом пускового сопротивления.

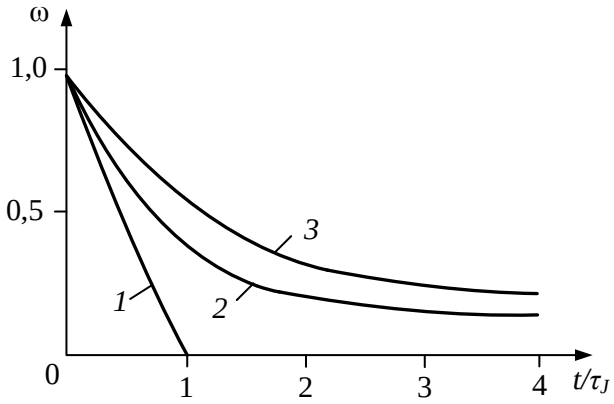


Рисунок 52

$1-(\gamma=0); 2-(\gamma=1); 3-(\gamma=2).$

У синхронных двигателей в первый момент после отключения напряжение возрастает, так как двигатели работают обычно с перевозбуждением, выдавая в нормальном режиме реактивную мощность в сеть. Поскольку ток в обмотке возбуждения в момент отключения двигателя от сети некоторое время еще сохраняется, то и ЭДС двигателя снижается медленно. Для ускорения снижения ЭДС используют различные способы, применение которых зависит от схемы возбуждения синхронного двигателя. Можно выделить среди них два основных: 1) включение обмотки возбуждения на гасительное сопротивление; этот способ пригоден для системы возбуждения, где гашение поля производится с помощью специального контактора (автомата гашения поля – АГП), чаще

всего эта схема гашения поля применяется при машинном возбуждении; 2) перевод тиристорного возбудителя в инверторный режим в статических системах возбуждения.

Однако на практике нет необходимости гасить поле полностью. Достаточно напряжение на двигателе довести до значения $(0{,}5 \dots 0{,}6)U_{\text{ном}}$, при котором допустимо несинхронное включение.

Групповой выбег происходит при отключении шин, от которых осуществлялось питание нескольких двигателей. Двигатели при этом оказываются связанными между собой через общие шины. Запасенная ими кинетическая энергия различается по величине у разных двигателей. Имеющие больший запас энергии переходят в генераторный режим и у них на валу появляется дополнительный тормозной момент (по сравнению с моментом при свободном выбеге).

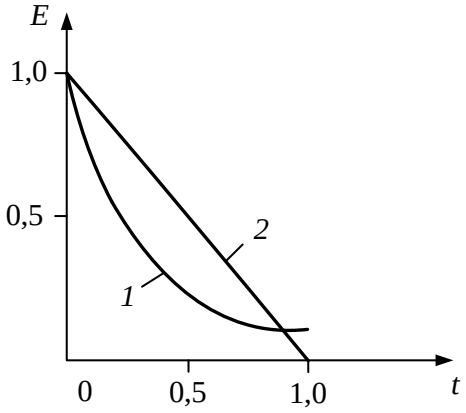


Рисунок 53

1 – обмотка ротора замкнута на гасительное сопротивление;

2 – тиристорный возбудитель переведен в инвенторный режим

Двигатели, имеющие меньший запас кинетической энергии, получают дополнительный вращающий момент за счет подпитки от первых. Выбег всех двигателей происходит при этом по одному закону, синхронно. Но с уменьшением напряжения синхронный

(групповой) выбег нарушается и при напряжении равном $\approx 0{,}25U_{\text{ном}}$ продолжается как одиночный. Процесс группового выбега зависит не только от параметров двигателей и механизмов, но и от параметров сети. Выбег отдельных двигателей или групп, разделенных реакторами или трансформаторами, может рассматриваться вне связи одной группы с другой.

5.4.4. Ток включения при самозапуске

Следующей операцией при самозапуске является операция восстановления напряжения на двигателях. Бросок тока в момент подачи напряжения определяется по выражению (8.1). Видно, что ток самозапуска в самом худшем случае, когда вектор напряжения сети $U_{\text{С}}$ и ЭДС двигателя E_q находятся в противофазе, может значительно превышать пусковой:

$$I_{\text{п}0} = \frac{U_{\text{С}} + E_q}{Z_{\Sigma}}.$$

Однако E_q асинхронного двигателя затухает быстро, к моменту восстановления напряжения ЭДС невелика, и ток включения при самозапуске $I_{\text{п}0}$ ненамного превышает пусковой.

В синхронном двигателе ЭДС в момент восстановления электроснабжения может быть равна напряжению сети и даже превышать его. Соответственно и ток включения может почти в два раза превышать пусковой и вызвать повреждения в двигателе. Однако, если в момент нарушения электроснабжения начинать гасить поле ротора, ЭДС синхронного двигателя быстро снижается и бросок тока при самозапуске, как и у асинхронного двигателя будет практически равным пусковому.

В случаях несинхронного включения, когда поле ротора двигателя интенсивно не гасится, для всех двигателей мощностью до 2000 кВт самозапуск считается допустимым, если ток включения не будет превышать 1,7 пускового, т.е.

$$I_{\text{п}0\ \text{доп}} \leq 1{,}7\frac{1}{x''_d}.$$

Для более мощных двигателей вопрос о возможности самозапуска должен решаться совместно с заводом-изготовителем.

5.4.5. Напряжение при самозапуске

При восстановлении электроснабжения напряжение на зажимах двигателем определяется в соответствии со схемой замещения, составленной для данного случая подключения двигателя к сети (рисунок 54).

Расчетное сопротивление асинхронного двигателя $x_{\text{Д}}$, участвующего в самозапуске, определяется следующим образом:

$$x_{\text{Д}} \approx z_{\text{Д}} = \frac{S_{\text{б}} {U_{\text{ном}}}^2}{S_{\text{п}} {U_{\text{б}}}^2}.$$

где $S_{\text{б}}$ – базисная мощность, кВА;

$U_{\text{б}}$ – базисное напряжение, кВ;

$S_{\text{п}}$ – расчетная пусковая мощность двигателя при номинальном напряжении и заданном скольжении, кВА.

Пусковая мощность двигателя вычисляется по формуле:

$$S_{\text{п}} = \frac{P_{\text{ном}} k}{\cos\varphi_{\text{ном}}\, \eta_{\text{ном}}},$$

где $P_{\text{ном}}, \cos\varphi_{\text{ном}}, \eta_{\text{ном}}$ – номинальные параметры двигателя;

k – кратность пускового тока двигателя при скольжении s в момент восстановления питания при номинальном напряжении.

В расчетах часто принимают, что в интервале скольжений

$$1 > s > s_{\text{кр}}$$

индуктивное сопротивление двигателя неизменно и равно значению, имеющему место при неподвижном роторе, и тогда можно вычислить:

$$x_{\text{Д}} = \frac{S_{\text{б}} \cos\varphi_{\text{ном}}\, \eta_{\text{ном}} {U_{\text{ном}}}^2}{P_{\text{ном}} k_1 {U_{\text{б}}}^2},$$

где k_1 - кратность пускового тока.

Это предположение является допущением, так как сопротивление двигателя незначительно изменяется при изменении скольжения в указанных пределах.

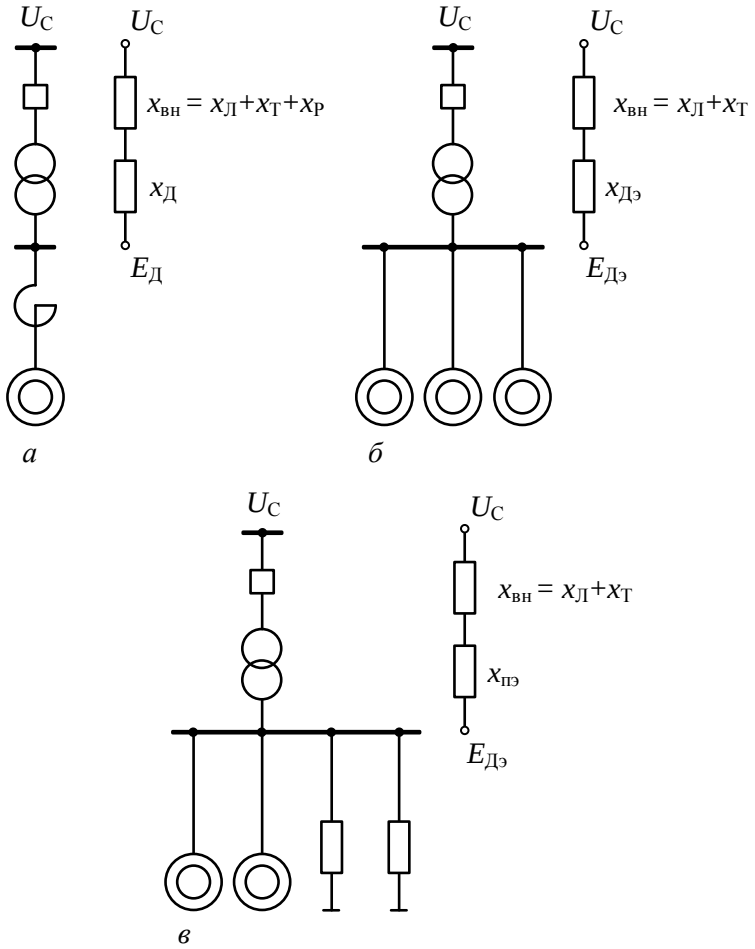


Рисунок 54

Тогда при одиночном самозапуске асинхронного или развозбужденного синхронного двигателя напряжение на его зажимах составит

$$U_Д = U_С \frac{x_Д}{x_{вн} + x_Д},$$

где $x_{\text{вн}}$ – суммарное сопротивление всех элементов сети (внешнее по отношению к двигателю) от точки, где напряжение $U_{\text{С}}$ может быть принято неизменным (обычно сторона высокого напряжения понижающего трансформатора) до зажимов двигателя.

Если в самозапуске участвует группа двигателей, подключенных к одной секции шин распределительного устройства, то суммированием пусковых мощностей отдельных двигателей получают пусковую мощность эквивалентного двигателя $S_{\text{пэ}}$ и его расчетное сопротивление

$$x_{\text{д}} = \frac{S_{\text{б}} {U_{\text{ном}}}^2}{S_{\text{пэ}} {U_{\text{б}}}^2}.$$

Необходимо учитывать, что расчеты по приведенным формулам выполняются с определенными погрешностями, обусловленными принятыми допущениями. Однако эти погрешности вполне допустимы при практических расчетах.

5.4.6. Разгон при самозапуске

Асинхронный двигатель при наличии напряжения на его зажимах будет разгоняться только в том случае, если развиваемый им вращающий момент будет больше момента сопротивления механизма. Для обеспечения разгона двигателя достаточно выполнить условие:

$$M_{\text{ас}} > M_{\text{сопр}}.$$

Двигатель при самозапуске разгоняется медленнее, чем при пуске. Более длительный разгон вызывает больший нагрев двигателя. Поэтому успешным считается такой самозапуск, когда двигатель разгонится до рабочей скорости и при этом температура его обмоток не превысит допустимого значения.

Самозапуск асинхронного двигателя выполняется следующими операциями:

1. Определяется снижение угловой скорости за время перерыва электроснабжения, угловая скорость и скольжение в момент восстановления напряжения.

2. Определяется напряжение на зажимах двигателя в момент восстановления электроснабжения.

3. Вращающий момент двигателя при полученных напряжении и скольжении определяется по формуле:

$$P = \frac{2P_{max}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}.$$

4. Момент сопротивления механизма определяется по его характеристике, которая должна быть задана, или по формуле:

$$M_{\text{с}} = M_{\text{тр}} + \left(kM_{\text{ном}} - M_{\text{тр}}\right)(1 - s)^{\gamma},$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения;

γ – показатель степени, характеризующий данный механизм.

5. Если условие $M_{\text{ас}} > M_{\text{с}}$ выполняется, то самозапуск обеспечен.

Иногда производят упрощенный расчет для определения возможности самозапуска. Достаточно получить значение напряжения на зажимах электродвигателя $U_{\text{Д}} > (0{,}55 \dots 0{,}65)U_{\text{ном}}$, чтобы считать, что самозапуск будет успешным. Но такой прием возможен только для электродвигателей механизмов, момент сопротивления которых зависит от угловой скорости (скольжения).

Для облегчения анализа процесса разгона синхронного двигателя после восстановления электроснабжения можно представить его состоящим из двух этапов: разгона до подсинхронной угловой скорости и ресинхронизации (процесса вхождения в синхронизм).

Подсинхронная угловая скорость (подсинхронные обороты, подсинхронное скольжение) – это установившаяся скорость вращения при работе синхронного двигателя в асинхронном режиме.

Разгон невозбужденного синхронного двигателя до подсинхронных оборотов происходит под действием асинхронного момента, состоящего из трех составляющих:

$$M_{\text{ср.ас}} = \frac{U^2}{2}\left(\frac{x_d - x_d'}{x_d\, x_d'} \cdot \frac{s\, T_d'}{1 + (s\, T_d')^2} + \frac{x_d' - x_d''}{x_d'\, x_d''} \cdot \frac{s\, T_d''}{1 + (s\, T_d'')^2} + \frac{x_q - x_q''}{x_q\, x_q''} \cdot \frac{s\, T_d''}{1 + (s\, T_d'')^2}\right).$$

Каждая из этих составляющих определяется так же, как и вращающий момент асинхронного двигателя. Действительно, каждая из трех составляющих асинхронного момента при скольжениях

$$s_{\text{кр1}} = \frac{1}{T'_d}, s_{\text{кр2}} = \frac{1}{T''_d}, s_{\text{кр3}} = \frac{1}{T''_d} \tag{8.1}$$

имеет максимумы, равные

$$M'_{d\,max} = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d}\right);\ M''_{d\,max} = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d}\right);$$
$$M''_{q\,max} = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q}\right). \tag{8.2}$$

С учетом этих выражений формулу можно записать в виде

$$M_{\text{ср.ас}} = \frac{2M'_{d\,max}U^2}{\frac{s}{s_{\text{кр1}}} + \frac{s_{\text{кр1}}}{s}} + \frac{2M''_{d\,max}U^2}{\frac{s}{s_{\text{кр2}}} + \frac{s_{\text{кр2}}}{s}} + \frac{2M''_{q\,max}U^2}{\frac{s}{s_{\text{кр3}}} + \frac{s_{\text{кр3}}}{s}}.$$

Если принять, что $x''_d \approx x''_q$ и $T''_d \approx T''_q$ (что вполне справедливо для двигателей с неявнополюсным ротором), получим, что зависимости от скольжения M''_d и M''_q будут совпадать, так как $s_{\text{кр2}} = s_{\text{кр3}}$ и $M''_{s\,max} = M''_{q\,max}$. Тогда суммарный асинхронный момент синхронного двигателя достаточно представить в виде двух составляющих: момента, созданного за счет взаимодействия с обмоткой возбуждения и момента, обусловленного демпферной обмоткой $M_{\text{ср.ас}} = M'_d + M''$ (рисунок 55).

Здесь следует отметить то, что при наличии в обмотке возбуждения очень большого гасительного сопротивления $M'_d \to 0$, $M_{\text{ср.ас}}$ будет равен M'', в этом случае можно получить момент синхронного двигателя полностью идентичный моменту асинхронного двигателя. Так же как и асинхронный, синхронный двигатель будет разгоняться, если $M_{\text{ср.ас}} > M_{\text{сопр}}$. Подсинхронное скольжение, до которого разгонится двигатель, определится точкой пересечения характеристик асинхронного момента и момента сопротивления механизма $s_{\text{ср}}$.

Все условия, которые следует выполнить для успешного

самозапуска асинхронного двигателя, справедливы и для первого этапа разгона синхронного двигателя.

Второй этап разгона – это вхождение в синхронизм (ресинхронизация). Существует некоторая величина скольжения $s_{доп}$, при которой возможна синхронизация двигателя как при пуске, так и при самозапуске. Если фактическое скольжение превышает эту величину, двигатель в синхронизм не втягивается. Величина $s_{доп}$ определяется по формуле:

$$s_{ср} < s_{доп} = 0{,}065\sqrt{\frac{M_{B\,max}}{\tau_J}},$$

где $M_{B\,max}$ – максимальное значение синхронного момента при форсировке возбуждения;

τ_J – постоянная инерции ротора.

Тогда условие успешного вхождения в синхронизм может быть записано как $s_{ср} < s_{доп}$.

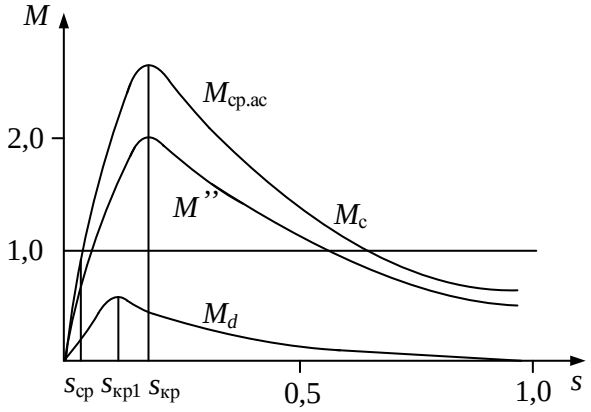


Рисунок 55

Добиться нужного подсинхронного скольжения можно двумя путями: уменьшением нагрузки, что возможно при вращении двигателя только при наличии электромагнитной муфты сцепления или подбором соответствующего сопротивления в цепи обмотки

возбуждения таким образом, чтобы крутизна кривой асинхронного момента $M_{\text{ср.ас}}$ увеличилась. Тогда в обоих случаях установившееся скольжение $s_{\text{ср}}$ уменьшится.

Возможность вхождения в синхронизм можно оценить и путем сравнения момента сопротивления механизма при скольжении 0,05 с асинхронным моментом при том же скольжении. Должно выполниться неравенство $M_{\text{ас } 0{,}05} \geq M_{\text{с } 0{,}05}$.

Такой способ прост, поскольку $M_{\text{ас } 0{,}05}$ приводится в каталогах, но является приближенным и дает при расчетах большой запас.

ПРИМЕР 7

На промышленном предприятии от общих шин питаются синхронные и асинхронные двигатели.

Параметры эквивалентных двигателей:

асинхронного $P_{\text{АД}} = 15$ МВт; $\cos\varphi = 0{,}85$; $x_k = 0{,}15$; $\tau_J = 6$ с;

синхронного $P_{\text{СД}} = 8$ МВт; $\cos\varphi = 0{,}9$; $x'_d = 0{,}22$; $\tau_J = 4$ с.

Определить предельное время перерыва электроснабжения двигателей. Значение величины предельного времени позволяет правильно выбрать параметр срабатывания по времени в устройствах АВР.

Решение

1. Определяется предельное время перерыва для асинхронного двигателя.

Принимается базисная мощность

$$S_{\text{б}} = \frac{P_{\text{АД}}}{\cos\varphi} = \frac{15}{0{,}85} = 17{,}65 \text{ МВА}.$$

Тогда

$$P_0 = \frac{15}{17{,}65} = 0{,}85.$$

Максимальная мощность двигателя

$$P_{max} = \frac{U^2}{2x_k} = \frac{1}{2 \cdot 0{,}15} = 3{,}33.$$

2. Определяются исходное и предельное скольжения:

$$s_{0\,\text{пр}} = s_{\text{кр}}\left(\frac{P_{max}}{P_0} \pm \sqrt{\left(\frac{P_{max}}{P_0}\right)^2 - 1}\right) =$$

$$= 0{,}15\left(\frac{3{,}33}{0{,}85} \pm \sqrt{\left(\frac{3{,}33}{0{,}85}\right)^2 - 1}\right) = 0{,}59 \pm 0{,}57;$$

$$s_0 = 0{,}02 \text{ и } s_{\text{пр}} = 1{,}16.$$

Строятся зависимости электромагнитной мощности $P_{\text{э}}$ и мощности механизма $P_{\text{м}}$ от скольжения (рисунок 56).

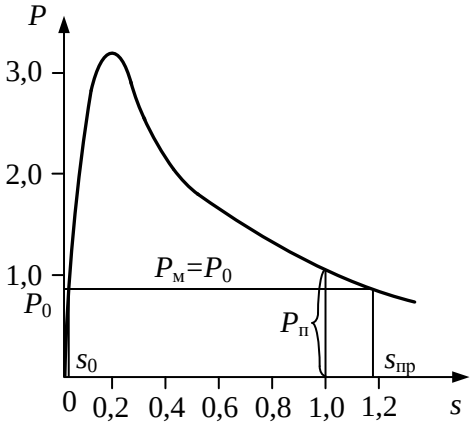


Рисунок 56

Видно, что двигатель может быть запущен в любой момент, когда будет подано напряжение, т.к. пусковая мощность двигателя здесь больше механической $P_{\text{п}} > P_{\text{м}} = P_0$. Поэтому в данном случае предельное время перерыва электроснабжения $t_{\text{пр}} = \infty$.

3. Определяется предельное время перерыва электроснабжения для синхронного двигателя. В качестве базисной мощности принимается

$$S_{\text{б}} = \frac{P_{\text{СД}}}{\cos\varphi} = \frac{8}{0{,}9} = 8{,}9 \text{ МВА}.$$

Тогда можно получить

$$P_0 = \frac{8}{8{,}9} = 0{,}9.$$

ЭДС двигателя

$$E_q = 1 + x'_d \sin\varphi = 1 + 0{,}22 \cdot \sin(\arccos 0{,}9) =$$
$$= 1 + 0{,}22 \cdot 0{,}44 = 1{,}1.$$

Максимальная мощность двигателя

$$P_{max} = \frac{E_q U_ш}{x'_d} = \frac{1{,}1 \cdot 1}{0{,}22} = 5.$$

Начальный угол равен

$$\delta_0 = \arcsin\frac{P_0}{P_{max}} = \arcsin\frac{0{,}9}{5} = 10{,}4°.$$

Критический угол

$$\delta_{кр} = 180° - 10{,}4° = 169{,}6°.$$

Находится предельный угол по условиям невыпадения из синхронизма:

$$\delta_{пр} = \arccos\frac{\frac{\pi}{180} \cdot P_0\left(\delta_{кр} - \delta_0\right) + P_{max}\cos\delta_{кр}}{P_{max}} =$$
$$= \arccos\frac{\frac{\pi}{180} \cdot 0{,}9 \cdot (169{,}6 - 10{,}4) + 5 \cdot \cos 169{,}6}{5} =$$
$$= 118{,}7°.$$

Предельное время перерыва электроснабжения синхронного двигателя по условиям невыпадения из синхронизма (по условиям обеспечения синхронной динамической устойчивости) будет следующим:

$$t_{пр} = \sqrt{\frac{\left(\delta_{кр} - \delta_0\right) \cdot \tau_J}{9000 \cdot P_0}} = \sqrt{\frac{(118{,}7 - 10{,}4) \cdot 4}{9000 \cdot 0{,}9}} = 0{,}21 \text{ с}.$$

Если по условиям технологического процесса на предприятии требуется, чтобы при нарушениях электроснабжения синхронные двигатели не выпадали из синхронизма, необходимо обеспечить величину времени перерыва электроснабжения менее 0,21 с.

Такой перерыв питания двигателей с помощью АВР обеспечить трудно, а в большинстве случаев – невозможно.

Добиться минимального времени перерыва электроснабжения можно с помощью схемных решений.

ПРИМЕР 8

Проверить, при каком остаточном напряжении может быть осуществлен самозапуск технологической машины с постоянным моментом сопротивления $m_{\text{с}} = 0{,}7$; $\tau_J = 2$ с при следующих параметрах приводного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: $m_{\text{пуск}} = 1{,}2$; $m_{max} = 2{,}2$; $s_{\text{ном}} = 0{,}05$. Перерыв в электроснабжении $t_{\text{пер}} = 1{,}4$ с.

Решение

Скольжение, до которого затормозится агрегат при перерыве в электроснабжении:

$$s = \frac{m_{\text{с}} \cdot t_{\text{пер}}}{\tau_J} = \frac{0{,}7 \cdot 1{,}4}{2} = 0{,}5.$$

Критическое скольжение, до которого затормозится двигатель:

$$\frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}} = m_{max} + \sqrt{{m_{max}}^2 - 1} = 4{,}16;\ s_{\text{кр}} = 4{,}16 \cdot 0{,}05 = 0{,}21.$$

Строится механическая характеристика приводного двигателя. Скольжению $s = 0{,}5$ соответствует $m = 1{,}7$. Чтобы при восстановлении питающего напряжения электромагнитный момент был выше момента сопротивления машины ($m_{\text{с}} \geq 0{,}8 - 0{,}85$), остаточное напряжение на зажимах двигателя должно быть

$$U_{\text{ост}} = \sqrt{\frac{0{,}85}{1}} = 0{,}7.$$

6. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УЗЛОВ НАГРУЗКИ

6.1. Общая характеристика мероприятий по повышению устойчивости

Все мероприятия по повышению устойчивости энергосистем можно разделить на две группы: требующие больших капитальных затрат (переход к передаче электроэнергии на более высоком напряжении, сооружение дополнительных линий электропередач, установка асинхронизированных синхронных генераторов и т.д.) и не требующие их (устройства и системы автоматического регулирования, релейная защита и устройства резервирования при отказе выключателей в основной высоковольтной сети 220-1150 кВ, устройства повторного включения, противоаварийная автоматика).

К устройствам и системам автоматического регулирования, повышающим статическую устойчивость, относятся, прежде всего, системы автоматического регулирования возбуждения сильного действия генераторов (АРВ-СД) и системы автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ).

Установка АРВ-СД на генераторах позволяет увеличить запасы статической устойчивости за счет компенсации влияния индуктивного сопротивления генераторов, что дает повышение предельной передаваемой мощности. АРВ-СД устанавливаются на генераторах мощных электростанций и на всех турбогенераторах мощностью 200, 300, 500 МВт и выше.

Системы АРЧМ обеспечивают регулирование частоты и оптимизацию распределения мощности между энергосистемами и электростанциями. Также они обеспечивают ограничение перетоков мощности по сильно загруженным или слабым внутрисистемным и межсистемным связям.

Все элементы основной системообразующей сети (ЛЭП, трансформаторы, шины) оснащены быстродействующими релейными защитами. Время срабатывания основных защит с

учетом времени отключения выключателя составляет 3-4 периода. Такие скорости отключения положительно сказываются на динамической устойчивости. Устройства защиты должны обязательно отключить повреждение, так как работа с неотключенным КЗ невозможна. При необходимости используются средства резервирования (устройства резервирования отказа выключателя – УРОВ), производящие отключение всех выключателей, через которые к месту КЗ протекает ток, при отказе основной защиты или выключателя.

Все воздушные линии и шины многих подстанций высоковольтной сети оснащены устройствами повторного включения (АПВ). Наряду с трехфазными АПВ (ТАПВ) применяются однофазные АПВ (ОАПВ). Восстанавливая при неустойчивых повреждениях или ложных срабатываниях защиты работу воздушных линий, АПВ в ряде случаев способствует повышению динамической устойчивости и тем самым предотвращению развития аварии, восстановлению нормальной работы сети.

К противоаварийной автоматике (ПА) относят большое число устройств, предотвращающих развитие аварии и их распространение на соседние районы энергосистемы. Устройства ПА могут быть разделены на четыре группы:

1) в первую группу входят устройства, предназначенные для предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и действующие в тех случаях, когда присутствует угроза нарушения устойчивости параллельной работы электростанций и энергосистем. Эти устройства дозированно воздействуют на разгрузку электропередач, снижая генерируемую мощность (отключение части генераторов на ГЭС, импульсная разгрузка паровых турбин и ограничение их мощности в послеаварийном режиме) в избыточной (отправной) части энергосистемы и отключая менее ответственную нагрузку с помощью системы автоматического отключения нагрузки (САОН), с одновременной быстрой мобилизацией резервов в дефицитной (приемной) энергосистеме. В случаях крайней необходимости

проводится деление энергосистемы. Сюда относят и устройства, управляющие продольной и поперечной компенсацией: форсировкой конденсаторных батарей продольной компенсации и отключением шунтирующих реакторов электропередач. Используются также устройства, осуществляющие электрическое торможение генераторов, повышение напряжения сети в послеаварийном режиме изменением параметра срабатывания АРВ генераторов, управление мощностью электропередач и вставок постоянного тока;

2) ко второй группе относятся устройства автоматической ликвидации асинхронных режимов (АЛАР), которые выполняют отключение электропередачи при возникновении по ней асинхронного хода;

3) к третьей группе относят устройства, предназначенные для автоматического ограничения повышений частоты и напряжения и ограничения снижения этих параметров режима. Эти устройства действуют на отключение генераторов и холостых линий при повышении частоты и напряжения и на отключение неответственных потребителей и отключение шунтирующих реакторов, изменение параметров срабатывания АРВ генераторов при снижении частоты и напряжения в энергосистеме;

4) в четвертую группу входят устройства ПА, способствующие восстановлению нормального режима. Эти устройства осуществляют автоматический ввод резервного источника питания (АВР), пуск резервных гидрогенераторов и перевод их из режима СК в активный режим; обратное включение потребителей, отключенных устройствами АЧР и САОН.

Перечисленные мероприятия по повышению устойчивости могут быть использованы как для повышения статической, так и динамической устойчивости, а также решать другие задачи управления режимами энергосистемы. Например, основное назначение автоматического повторного включения (АПВ) на воздушных линиях – увеличение надежности электроснабжения. Кроме того, успешное АПВ может существенно повысить

устойчивость системы. Далее рассмотрены наиболее часто применяемые в настоящее время мероприятия по повышению устойчивости электрических систем.

6.2. Улучшение устойчивости электроэнергетической системы при успешном АПВ

Около 50 % КЗ на воздушных линиях имеет неустойчивый характер, и после отключения поврежденного участка линии на время, необходимое для деионизации перекрытого дугой промежутка, на линию вновь может быть подано напряжение и восстановлены нормальные условия работы электропередачи. Для этого применяется как трехфазное (ТАПВ), так и пофазное (однофазное) АПВ (ОАПВ), при ТАПВ предусматривается при любом виде КЗ одновременное отключение и включение трех фаз, при ОАПВ – только поврежденных фаз.

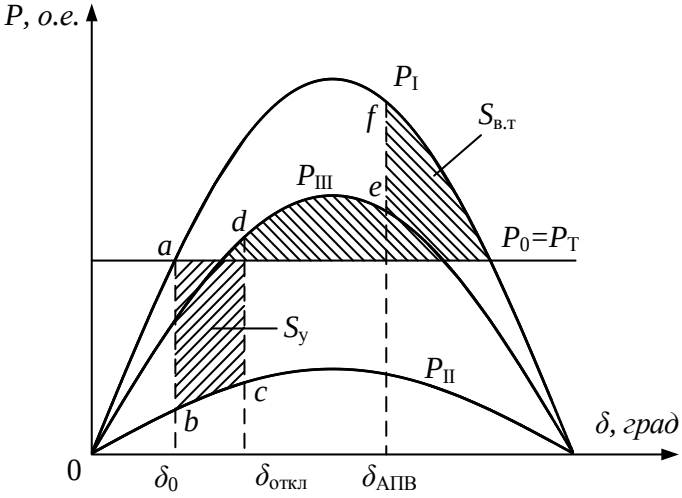


Рисунок 57

Если на линии предусмотреть трехфазное АПВ (ТАПВ), то при своевременном успешном ТАПВ отключенной цепи (на рисунке 57,

точка *e*) достигается некоторое увеличение возможной площадки торможения $S_{в.т}$ в результате перехода с характеристики мощности послеаварийного режима на характеристику нормального. На рисунке 57 показаны точки перехода с характеристики исходного режима на характеристику аварийного *a–b*, с характеристики аварийного режима на характеристику послеаварийного *c–d*, с характеристики послеаварийного режима на характеристику исходного *e–f*.

Рассмотрим, как протекает переходный процесс при КЗ на электропередаче, состоящей из трех участков, с последующими успешными ТАПВ и ОАПВ. Несимметричное КЗ происходит на головном участке, когда другая цепь участка находится в ремонте (рисунок 58).

В момент возникновения и в течение КЗ процесс протекает одинаково: электромагнитная мощность сбрасывается до значения, соответствующего режиму КЗ, (рисунок 59, *a*) и изменяется в соответствии с характеристикой этого режима. Однако в момент отключения КЗ в случае ТАПВ происходит сброс передаваемой мощности до нуля, при ОАПВ – сохраняется передача мощности по здоровым фазам.

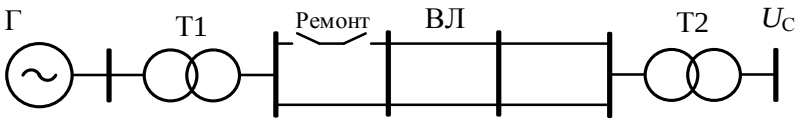


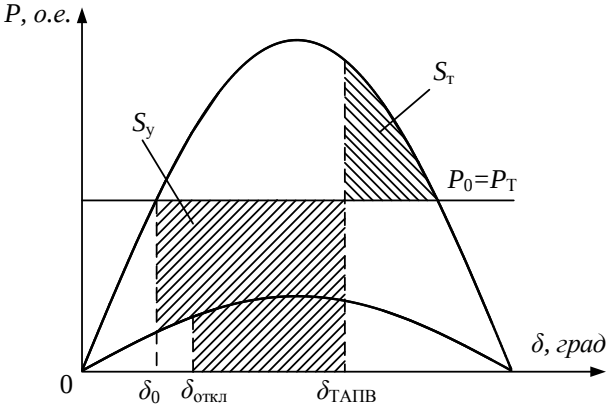
Рисунок 58

Таким образом, площадка торможения при пофазном отключении увеличивается (рисунок 59), что приводит к улучшению динамической устойчивости системы.

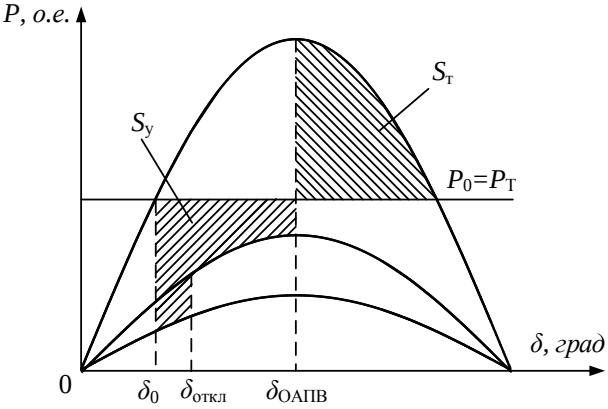
Схемы замещения электропередачи с одной и двумя отключенными фазами изображены на рисунке 60.

В схемах замещения $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ – сопротивления обратной и нулевой последовательностей:

$$x_{2\Sigma} = x_{2Г} + x_{Т1} + x_{Л} + x_{Т2};\ x_{0\Sigma} = x_{Т1} + x_{0Л} + x_{Т2}.$$



а



б

Рисунок 59

Предполагается, что нейтрали трансформаторов заземлены, а активные сопротивления схемы малы и не учитываются.

Сравнивая угловые характеристики при отключении одной и двух фаз линии электропередачи, можно заметить, что результаты

пофазного отключения при двухфазном КЗ менее благоприятны, чем при однофазном (рисунок 61).

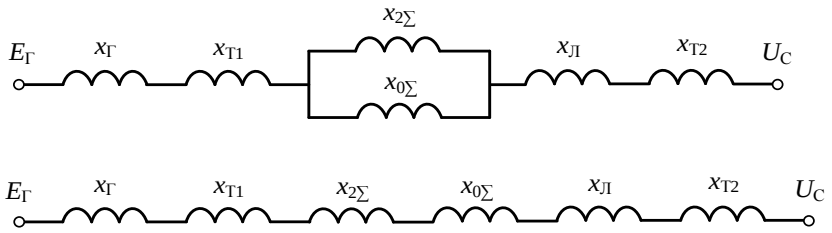


Рисунок 60

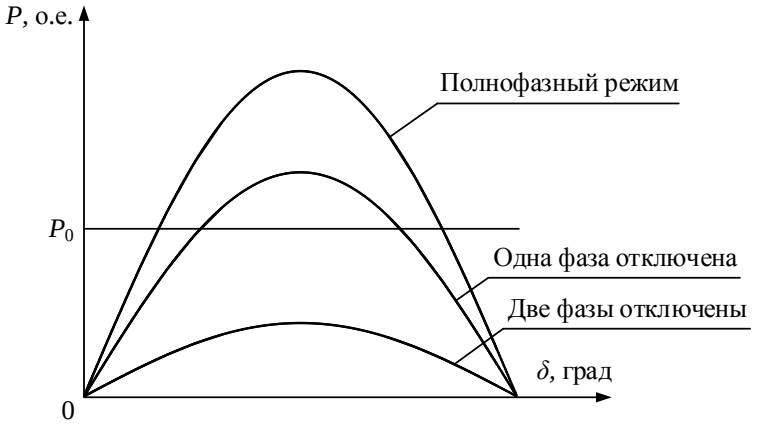


Рисунок 61

Здесь следует отметить, что неполнофазный режим характерен сильной несимметрией токов и напряжений, поэтому при его использовании необходимо провести расчеты напряжений и токов в линии электропередачи в неполнофазном режиме. Тогда можно будет окончательно судить о возможности применения ОАПВ.

6.3. Импульсная разгрузка паровых турбин

Причиной нарушения устойчивости электрической системы является возникновение небаланса мощностей (моментов) на валу агрегата генератор-турбина. Если бы при авариях в электрической

системе момент турбины $M_{\text{Т}}$ можно было изменять так же быстро, как изменяется момент генератора $M_{\text{э}}$, то избыточный момент на валу $\Delta M = M_{\text{Т}} - M_{\text{э}}$ был бы сведен к минимуму и возможность нарушения устойчивости была бы практически исключена.

Современные паровые и гидравлические турбины оснащены электрогидравлическими системами регулирования скорости. Эти системы позволяют вводить электрические сигналы от различных устройств и в том числе от устройств противоаварийной автоматики (ПА). Изменение мощности турбины в нормальном режиме производится относительно медленно с помощью механизма изменения скорости вращения. При авариях в электрической системе от системных устройств ПА может поступить управляющий сигнал на экстренную разгрузку паровых турбин. Этот сигнал поступает в систему регулирования турбины, которая воздействует на регулирующий клапан, быстро закрывает его и прекращает подвод пара к турбине. Изменение мощности турбины при такой аварийной разгрузке определяется так называемой импульсной характеристикой (рисунок 62).

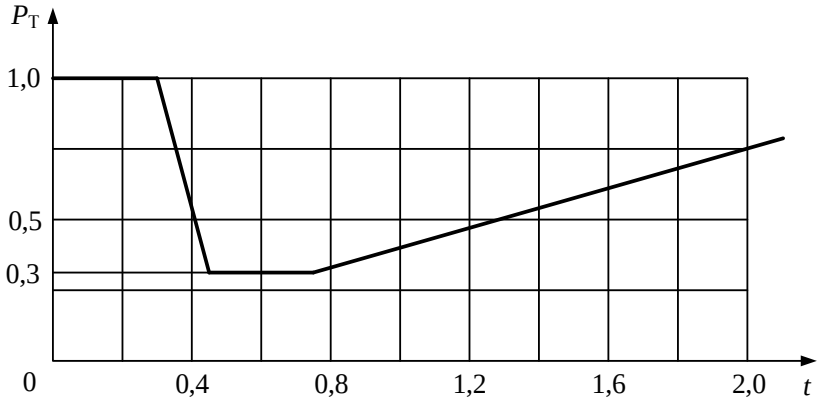


Рисунок 62

Запаздывание начала изменения мощности турбины объясняется инерцией гидравлической части системы

регулирования. Разгрузка на 100 % невозможна из-за наличия пара в камере промперегрева.

Импульсная разгрузка паровых турбин обеспечивает динамическую устойчивость системы за счет существенного увеличения площадки торможения (рисунок 63).

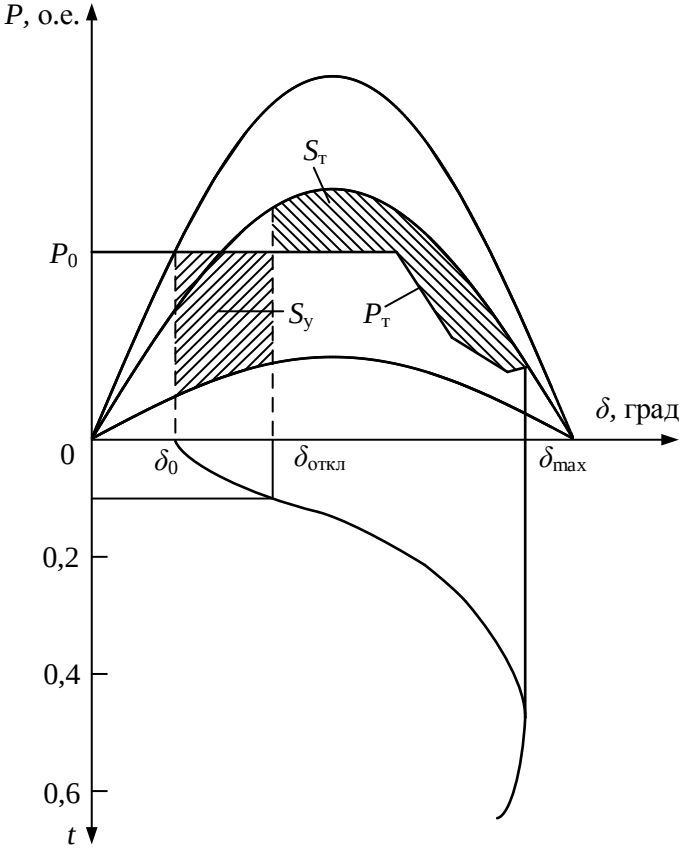


Рисунок 63

Аналогичное управление мощностью гидравлической турбины невозможно из-за возникновения гидравлического удара при быстром закрытии направляющего аппарата и поэтому на гидростанциях в подобных случаях используют отключение

генераторов. Хотя в отдельных случаях на тепловых станциях прибегают к отключению генераторов, но применение здесь такого способа нежелательно, так как восстановление мощности агрегата тепловой станции занимает много времени.

6.4. Отключение части генераторов

Устойчивость станции может быть повышена при коротких замыканиях на линии передачи отключением части генераторов.

Предположим, что при трехфазном КЗ в начале линии в схеме (рисунок 64, *а*) устойчивость системы нарушается, так как площадка торможения меньше площадки ускорения $S_{\text{у}} < S_{\text{т}}$.

Тогда при отключении части генераторов снижается суммарная механическая мощность турбин и одновременно изменяется угловая характеристика электрической мощности.

Снижение механической мощности пропорционально числу отключенных генераторов:

$$P_0' = P_0 \frac{n - \Delta n}{n},$$

где Δn – число отключаемых генераторов;

P_0, P_0' – мощность эквивалентного генератора соответственно до и после отключения.

Уменьшение максимума угловой характеристики при наличии на генераторах АРВ-СД и блочной схеме станции незначительно:

$$P'_{\max III} = P_{\max III} \frac{\frac{x_{\text{T1}}}{n} + x_{\text{вн}}}{\frac{x_{\text{T1}}}{n - \Delta n} + x_{\text{вн}}},$$

где $x_{\text{вн}} = x_{\text{Л}} + x_{\text{T2}}$.

При тех же условиях, если станция неблочного типа, угловая характеристика не изменяется вовсе, так как не изменяется x_{T1}. В результате площадка торможения возрастает и устойчивость системы сохраняется.

При отключении генераторов постоянная инерции эквивалентного генератора уменьшается: $T_J' = T_J(n - \Delta n)$,

где T_J – постоянная инерции одного из n однотипных генераторов, приведенная к его мощности.

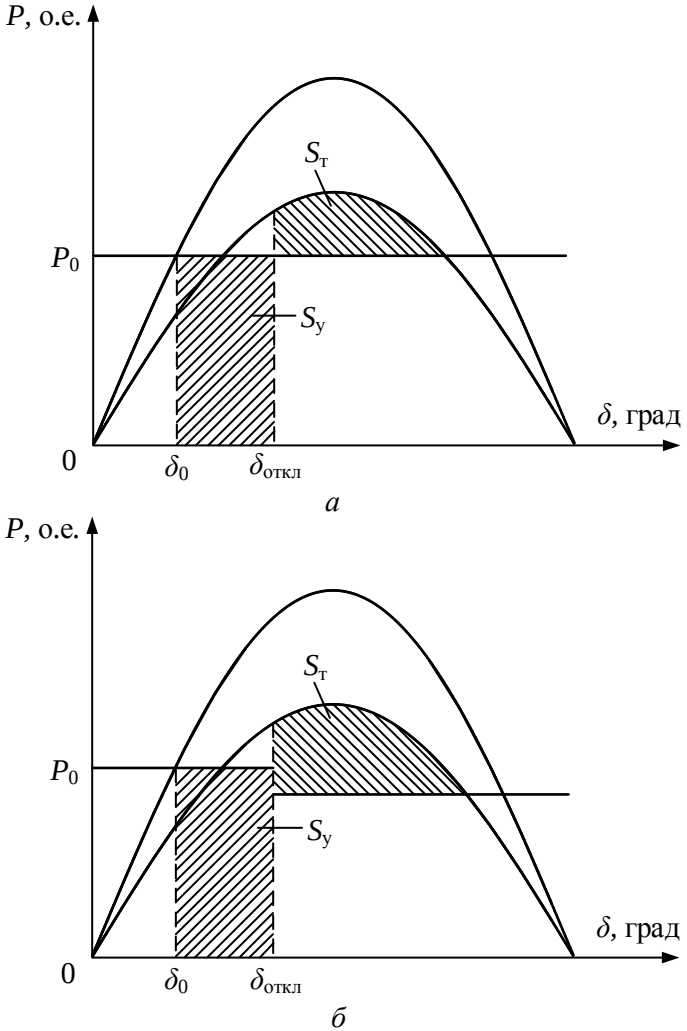


Рисунок 64

Это обстоятельство снижает эффективность мероприятия, так как после отключения части генераторов оставшиеся начинают выбегать быстрее. Обычно число отключаемых генераторов

составляет около 20 % общего числа генераторов станции. Рассмотренное мероприятие чаще используется на гидроэлектростанциях, так как послеаварийное восстановление нормального режима здесь происходит быстрее, чем на тепловых электростанциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 192 с.

2. Винославский В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения. – К.: Высшая школа, 1989. – 422 с.

3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

4. Гуревич Ю.И. Устойчивость нагрузки в электрических системах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.

5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.

6. Щедрин В.А. Примеры расчетов симметричных и несимметричных повреждений в электроэнергетических системах. – Чебоксары: ИПК РЗА, 2017. – 140 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ 6

1.1. Реакция якоря в синхронной машине..... 11

1.2. Параллельная работа синхронной машины с сетью 14

2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 22

2.1. Уравнение относительного движения ротора электрической машины 22

2.2. Понятие о статической устойчивости 24

2.3. Метод малых колебаний для анализа статической устойчивости электрических систем..... 28

2.4. Виды нарушения статической устойчивости 30

2.5. Предел и запас статической устойчивости 34

3. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 40

3.1. Понятие о динамической устойчивости..... 40

3.2. Характеристики мощности при различных КЗ и выбор расчетного случая 42

3.3. Правило площадей и критерий динамической устойчивости 45

3.4. Вычисление предельного угла и предельного времени отключения 47

3.5. Метод последовательных интервалов..... 48

4. АСИНХРОННЫЙ ХОД И РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ 62

4.1. Асинхронный ход..... 62

4.2. Ресинхронизация..... 65

4.3. Асинхронный ход генераторов электростанции 67

5. УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ 69

5.1. Асинхронные электродвигатели и их основные характеристики 70

5.2. Устойчивость узлов нагрузки при слабых возмущениях 80

5.2.1. Расчетные модели узлов нагрузки 80

5.2.2. Статическая устойчивость асинхронных двигателей 82

5.2.3. Статическая устойчивость синхронных двигателей 85

5.2.4. Устойчивость узла нагрузки, присоединенного к центру питания через общее сопротивление 87

5.3. Пуск и остановка двигателей 91

5.3.1. Условия и схема пуска 91

5.3.2. Пусковая мощность и время пуска 93

5.3.3. Остановка двигателей 95

5.4. Устойчивость узлов нагрузки при больших возмущениях. Самозапуск электродвигателей. 96

5.4.1. Общая характеристика 96

5.4.2. Процессы самозапуска 97

5.4.3. Выбег при самозапуске 98

5.4.4. Ток включения при самозапуске 102

5.4.5. Напряжение при самозапуске 103

5.4.6. Разгон при самозапуске 105

6. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УЗЛОВ НАГРУЗКИ 113

6.1. Общая характеристика мероприятий по повышению устойчивости 113

6.2. Улучшение устойчивости электроэнергетической системы при успешном АПВ..... 116

6.3. Импульсная разгрузка паровых турбин 119

6.4. Отключение части генераторов 122

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 125

ЧАСТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Перечень программ повышения квалификации НОУ ДПО «ИПК РЗА»:

- Релейная защита в распределительных электрических сетях. Новые технологии
- Режимы нейтрали современных распределительных электрических сетей 6-35 кВ. Защита от перенапряжений
- Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Новые технологии
- Управление режимами компенсации емкостных токов замыкания на землю
- Определение места повреждения на линиях электропередачи. Аппаратные и программные методы
- Дальнее и ближнее резервирование защит трансформаторов ответвительных подстанций
- Расчеты релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем
- Резидентное и прикладное программное обеспечение микропроцессорных устройств производства «НПП Бреслер»
- Моделирование процессов в электроэнергетических системах
- Электрооборудование. Новые функциональные возможности
- Электроснабжение. Новые технологии
- Оборудование, выпускаемое «НПП Бреслер». Применение в проектах и эксплуатация
- Способы выполнения автоматики управления дугогасящими реакторами производства «НПП Бреслер»
- Программно-технический комплекс мониторинга и управления энергообъектом BresMon производства «НПП Бреслер»
- Особенности проверки сложных устройств РЗиА при помощи оборудования серии «РЕТОМ»
- Проверка и настройка высокочастотной аппаратуры релейной защиты и автоматики с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-ВЧ
- Особенности испытаний энергооборудования при помощи оборудования серии «РЕТОМ»
- Применение испытательного оборудования серии «РЕТОМ» для диагностики устройств РЗА и первичного оборудования энергетики

Директор ИПК РЗА
доктор технических наук, профессор А.В. Булычев

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
БРЕСЛЕР

Разработка и производство микропроцессорных устройств РЗА с 1992 года

- Защиты подстанционного оборудования класса напряжения 6-35, 110-220 кВ
- Средства регистрации аварийных событий и определения места повреждения одно -, двусторонним и волновым принципами
- Комплексные решения по заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ
- Устройство БАВР для подстанций 6-35 кВ

тел.: (8352) 36 73 33 e-mail: info@bresler.ru
(8352) 23 77 55 www.bresler.ru

НОУ ДПО «ИПК РЗА»
428018, г. Чебоксары,
ул. Ядринское шоссе , д.4В,
тел. (8352) 23-77-55, 22-02-01,

web: www.ipk-rza.ru
e-mail : info@ipk-rza.ru,
ipk@bresler.ru

Булычев Александр Витальевич
Ларионова Елена Геннадиевна

Электромеханические процессы в электрических системах: примеры и задачи с решениями

Учебное пособие

Редактор И.Б. Булычева
Компьютерная верстка Е.Г. Ларионова

Подписано к печати 05.03.2019.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Физ. печ. л. 8,75. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Новое время».
428034, г. Чебоксары, ул. Мичмана Павлова, 50/1.
Тел.: (8352) 323-353, 412-789. E-mail: newtime1@mail.ru