



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу
для студентов специальностей 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
по курсу «Переходные процессы
в электроэнергетических системах»**

Гомель 2009

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73
У79

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 22.12.2008 г.)*

Составители: *В. И. Токочаков, Ю. А. Рудченко, В. В. Кротенок*

Рецензент: доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук
Ю. Н. Колесник

У79 **Устойчивость** электроэнергетических систем : лаборатор. практикум по одному курсу для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» / сост.: В. И. Токочаков, Ю. А. Рудченко, В. В. Кротенок. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 51 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержатся краткие теоретические сведения, порядок выполнения, требования к содержанию отчета для лабораторных работ по курсу «Устойчивость электроэнергетических систем».

Для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73

© Токочаков В. И., Рудченко Ю. А.,
Кротенок В. В., составление, 2009
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

Лабораторная работа № 1

ХАРАКТЕРИСТИКА МОЩНОСТИ И СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕНЕРАТОРА БЕЗ АРВ В ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЕ

Цель: Расчетным путем получить характеристики мощности генератора без АРВ в простейшей системе, изучить основные понятия и критерии статической устойчивости.

Теоретическая часть

В рассматриваемых простейших условиях признаком устойчивости системы является такой характер изменения мощностей и моментов при небольшом отклонении от состояния равновесия, который вынуждает систему вновь возвращаться к исходному состоянию. В режиме работы в точке a (рис. 1), мощности генератора и турбины уравниваются, друг друга. Если допустить, что угол δ_a получает небольшое приращение $\Delta\delta$, то мощность генератора, следуя синусоидальной зависимости от угла, также изменится на некоторую величину ΔP , причем, как вытекает из рис. 1, в точке a положительному приращению угла $\Delta\delta$ соответствует также положительное изменение мощности генератора ΔP . Что же касается мощности турбины, то она не зависит от угла δ и при любых изменениях последнего остается постоянной и равной P_o . В результате изменения мощности генератора равновесие моментов турбины и генератора оказывается нарушенным и на валу машины возникает избыточный момент тормозящего характера, поскольку тормозящий момент генератора в силу положительного изменения мощности ΔP преобладает над вращающим моментом турбины.

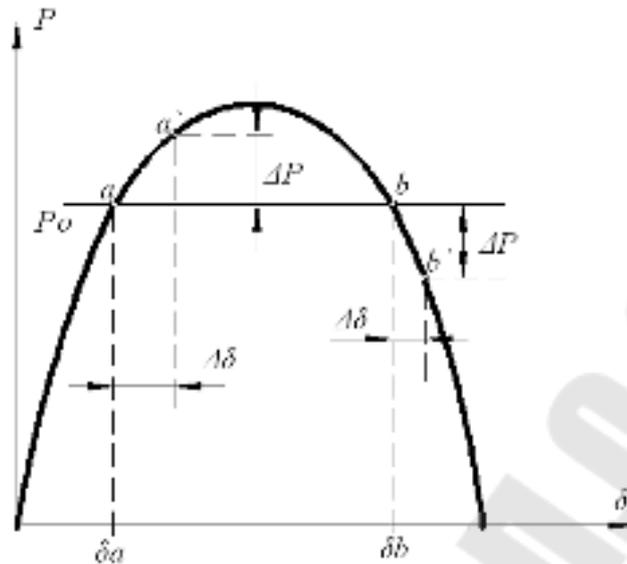


Рис. 1. Изменение мощности при приращении угла

Под влиянием тормозящего момента ротор генератора начинает замедляться, что обуславливает перемещение связанного с ротором вектора э.д.с. генератора E в сторону уменьшения угла δ . В результате уменьшения угла вновь восстанавливается исходный режим работы в точке a и, следовательно, этот режим должен быть признан устойчивым. К тому же выводу можно прийти и при отрицательном приращении угла $\Delta\delta$ в точке a .

Совершенно иной получается картина в точке b . Здесь положительное приращение угла $\Delta\delta$ сопровождается не положительным, а отрицательным изменением мощности генератора ΔP . Изменение мощности генератора вызывает появление избыточного момента ускоряющего характера, под влиянием которого угол δ не уменьшается, а возрастает. С ростом угла мощность генератора продолжает падать, что обуславливает дальнейшее увеличение угла и т. д. Процесс сопровождается непрерывным перемещением вектора э.д.с. E относительно вектора напряжения приемной системы U (рис. 2) и станция выпадает из синхронизма. Таким образом, режим работы в точке b статически неустойчив и практически неосуществим.

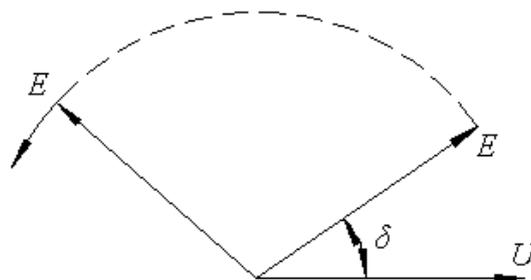


Рис. 2. Выпадение из синхронизма.

Под статической устойчивостью, вообще говоря, понимают способность системы самостоятельно восстановить исходный режим работы при малом возмущении. Статическая устойчивость является необходимым условием существования установившегося режима работы системы, но отнюдь не предопределяет способности системы продолжать работу при резких нарушениях режима, например при коротких замыканиях. Эта сторона проблемы, так называемая динамическая устойчивость системы. Итак, точка a и любая другая точка на возрастающей части синусоидальной характеристики мощности отвечают статически устойчивым режимам и, наоборот, все точки падающей части характеристики - статически неустойчивым. Из приведенных выше соображений, характеризующих условия работы системы, непосредственно вытекает следующий формальный признак статической устойчивости рассмотренной простейшей системы: приращения угла δ и мощности генератора P должны иметь один и тот же знак, т. е. $\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0$ или, переходя к пределу, $\frac{dP}{d\delta} > 0$.

Производная $\frac{dP}{d\delta}$, как известно, носит название синхронизирующей мощности, и, следовательно, критерием статической устойчивости системы в рассмотренных условиях является положительный знак синхронизирующей мощности. Производная мощности по углу согласно $P = \frac{E \cdot U}{x_c} \cdot \sin \delta$ равна, очевидно, $\frac{dP}{d\delta} = \frac{E \cdot U}{x_c} \cdot \cos \delta$, она положительна при $\delta < 90^\circ$. В этой области и возможны устойчивые установившиеся режимы работы системы. Критическим с точки зрения устойчивости в рассматриваемых условиях (при чисто индуктивной связи генератора с шинами приемной системы) является значение угла $\delta=90^\circ$, когда достигается максимум характеристики мощности.

Практическая часть

В практической части лабораторной необходимо провести расчет статической устойчивости простейшей системы электропередачи, схема которой представлена ниже, и построить угловую характеристику мощности генератора без АРВ. Для расчета следует воспользоваться файлом-шаблоном Lr1.mcd. Исходные данные для расчета приведены в приложении 1.

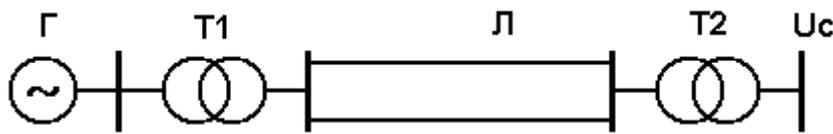


Рис. 3. Схема электропередачи

В ходе выполнения работы необходимо разобраться с основными расчетными формулами, приведенными в Lg1.mcd, дать качественную и количественную оценку статической устойчивости системы электропередачи, а также проанализировать влияние отдельных параметров электропередачи на устойчивость системы.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема электропередачи и исходные данные.
4. Схема замещения электропередачи.
5. Угловая характеристика мощности.
6. Основные результаты расчетов.
7. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под статической устойчивостью электрической системы?
2. От каких параметров зависит мощность, выдаваемая генератором в сеть?
3. Привести характеристику мощности генератора в простейшей системе.
4. Что понимается под пределом передаваемой мощности, какие параметры влияют на его величину?
5. Критерий статической устойчивости генератора в простейшей системе без АРВ?
6. Какой параметр (параметры), рассчитанный в данной лабораторной работе, дает количественную оценку статической устойчивости электрической системы?
7. Показать на характеристике мощности генератора область существования устойчивых режимов работы.

8. Показать на характеристике мощности точку (точки) характеризующую положение равновесия генератора.
9. Каковы причины выпадения генератора из синхронизма при отклонении его от положения неустойчивого равновесия?
10. Какие факторы способствуют возвращению системы в исходный режим при малых отклонениях от устойчивого положения равновесия?

Лабораторная работа № 2

ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ И СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель: Изучение физической сущности влияния автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов на параметры и статическую устойчивость системы, провести анализ (количественный и качественный) этого влияния.

Теоретическая часть

На режимы работы и характеристики генератора непосредственно влияют три основные системы регулирования: система регулирования работы котла, регулятор вращения турбины и регулятор возбуждения генератора. Схематически, упрощенно это показано на рис. 4.

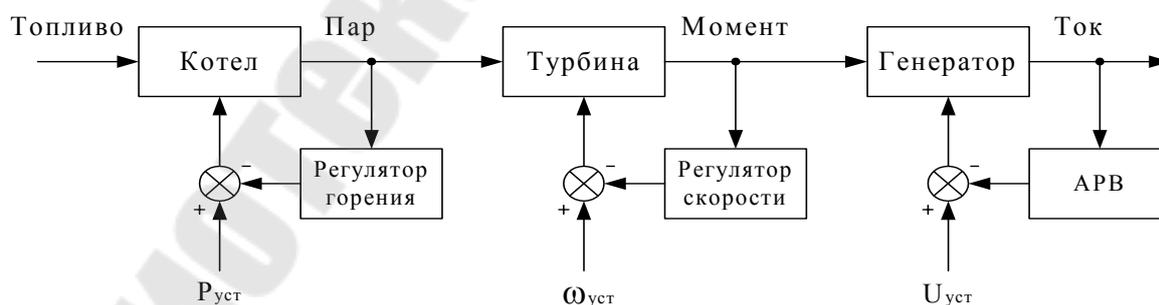


Рис. 4. Основные системы регулирования турбогенератора.

Если принять допущения об отсутствии потерь в генераторе, турбине и котле, то вся энергия сжигаемого топлива, поступающего в

котел, должна полностью превращаться в электрическую энергию на выводах генератора и всю систему, приведенную на рис. 1, можно рассматривать как устройство, в котором энергия сжигаемого топлива превращается в электрическую энергию.

Количество топлива, которое подается в котел, регулируется регулятором горения, количество пара, поступающего в турбину – регулятором скорости вращения турбины, система автоматического регулирования возбуждения (АРВ) регулирует значение э.д.с. генератора и, следовательно, напряжение на выводах генератора. В данной лабораторной работе будут рассматриваться только системы регулирования возбуждения.

Под системами регулирования возбуждения понимают машины аппараты для создания тока возбуждения и управления им с помощью регулирующих устройств. В соответствии с этим система регулирования возбуждения, как правило, состоит из возбудителя и регулятора (АРВ) как это показано на рис. 5.

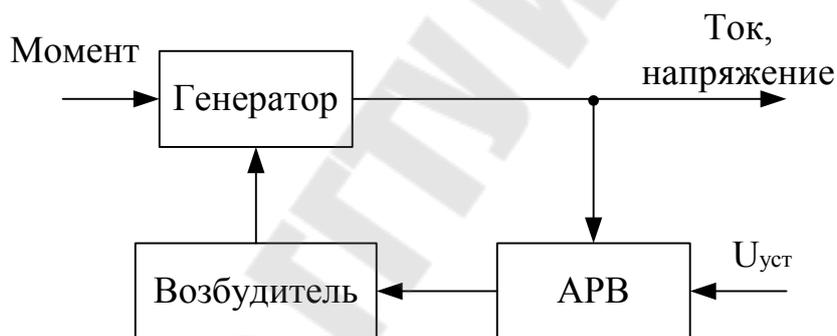


Рис. 5. Структурная схема системы регулирования возбуждения.

АРВ, применяемые для регулирования тока возбуждения, разделяются на регуляторы, осуществляющие прерывистое и непрерывное (без зоны нечувствительности) регулирование.

На крупных генераторах, работающих в энергосистемах, в настоящее время применяются регуляторы непрерывного действия. Эти регуляторы, в свою очередь, могут быть выполнены как:

1. *Регуляторы пропорционального действия*, изменяющие ток возбуждения пропорционально отклонению какого либо параметра, например, напряжению генератора

$$\Delta I_B \equiv k \cdot \Delta U_G$$

и изменяют э.д.с. генератора пропорционально входному сигналу

$$E = E_0 + k \cdot \Delta U_G$$

где E_0 и E – э.д.с. генератора до и после изменения нагрузки, ΔU – изменение напряжения генератора вызванное изменением нагрузки, κ – коэффициент пропорциональности (коэффициент усиления регулятора).

С помощью регуляторов пропорционального действия практически можно поддерживать постоянной переходную э.д.с. за переходным сопротивлением.

2. *Регуляторы сильного действия*, реагируют не только на отклонение параметров режима, но так же и на скорость и ускорение (первую и вторую производные) их изменения

$$\Delta I_B \equiv \kappa_1 \cdot \Delta U_\Gamma + \kappa_2 \cdot \frac{d\Delta U_\Gamma}{dt} + \kappa_3 \cdot \frac{d^2\Delta U_\Gamma}{dt^2}$$

Таким образом, регуляторы сильного действия изменяют э.д.с. генератора по следующему закону регулирования

$$E \equiv E_0 + \kappa_1 \cdot \Delta U_\Gamma + \kappa_2 \cdot \frac{d\Delta U_\Gamma}{dt} + \kappa_3 \cdot \frac{d^2\Delta U_\Gamma}{dt^2}$$

С помощью регулятора сильного действия, за счет соответствующего подбора коэффициентов усиления κ_1 , κ_2 и κ_3 можно поддерживать постоянным напряжение на зажимах генератора или даже в начале линии – за повышающим трансформатором.

Практическая часть

В практической части лабораторной необходимо провести расчет статической устойчивости простейшей системы электропередачи, схема которой представлена на рис. 3, и построить угловые характеристики мощности генератора для трех случаев:

1. генератор работает без АРВ
2. генератор работает с АРВ пропорционального действия;
3. генератор работает с АРВ сильного действия.

Для расчета следует воспользоваться файлом-шаблоном Lr2.mcd. Исходные данные для расчета приведены в прил. 1.

В ходе выполнения работы необходимо разобраться с основными расчетными формулами, приведенными в Lr2.mcd, проанализировать влияние различных типов АРВ генераторов на устойчивость системы электропередачи.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема электропередачи и исходные данные.
4. Схема замещения электропередачи для тех случаев.
5. Угловые характеристики мощности.
6. Основные результаты расчетов.
7. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Назначение и принцип действия АРВ.
2. Какие вы знаете типы АРВ?
3. Сравнительная эффективность регуляторов пропорционального и сильного действия.
4. Запишите закон регулирования (передаточную функцию) для различных типов АРВ.
5. Как влияет применение АРВ генераторов на устойчивость системы электропередачи?
6. Как представляются генераторы с различными типами АРВ на схемах замещения систем электропередачи?
7. Каковы причины увеличения предела передаваемой мощности генератора снабженного АРВ?

Лабораторная работа № 3

ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель: Изучить понятие внешняя характеристика мощности и ознакомиться с методикой построения внешней характеристики мощности генератора при наличии регуляторов возбуждения контролирующего напряжение генератора.

До сих пор предполагалось, что э.д.с. генераторов при изменении их мощности остается постоянной. Как можно будет видеть из дальнейшего, связанное с ростом передаваемой мощности увеличение угла δ обуславливает снижение напряжения генератора. Если возрастание нагрузки происходит достаточно медленно, то э.д.с. генераторов путем регулирования тока возбуждения может быть изменена для

поддержания постоянства напряжения на шинах генераторного напряжения. Предел передаваемой мощности при этом резко возрастает.

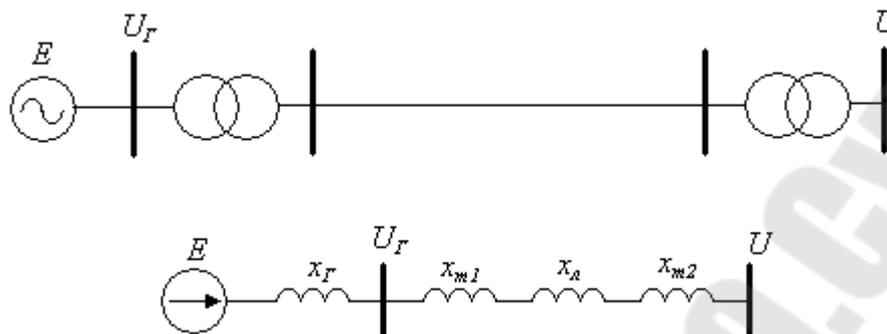


Рис. 6. Принципиальная схема и схема замещения электропередачи

Мы обратимся снова к схеме электропередачи (рис. 6) с индуктивным сопротивлением системы $x_c = x_2 + x_{m1} + x_L + x_{m2}$. Значение напряжения на шинах генераторов \underline{U}_G в этой схеме нетрудно получить на векторной диаграмме (рис. 2), прибавляя к вектору напряжения приемника \underline{U} падение напряжения в суммарном индуктивном сопротивлении трансформаторов и линии, равном: $x_{mл} = x_{m1} + x_L + x_{m2}$. Прибавляя далее к вектору \underline{U}_G падение напряжения в синхронном индуктивном сопротивлении генератора x_2 , находим э.д.с. генератора в данном режиме \underline{E} . Вектор напряжения на шинах генератора \underline{U}_G делит вектор полного падения напряжения $\underline{I}x_c$ на два отрезка: $\underline{I}x_{mл}$ и $\underline{I}x_2$ - в отношении значений индуктивных сопротивлений $x_{mл}$ и x_2 . При увеличении угла δ на $\Delta\delta$ вектор э.д.с. генератора \underline{E} займет новое положение, показанное на диаграмме рис. 2 штриховой линией. Положение вектора напряжения генератора \underline{U}_G в новом режиме можно найти, разделив в том же отношении значений индуктивных сопротивлений $x_{mл}$ и x_2 вектор полного падения напряжения, соединяющий концы векторов \underline{E} и \underline{U} .

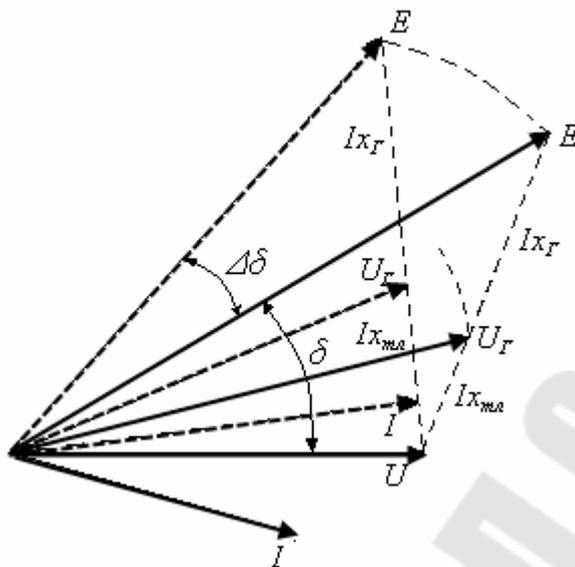


Рис.7. Изменение напряжения при увеличении угла

Как вытекает из диаграммы, вектор напряжения \underline{U}_G при увеличении угла δ поворачивается, следуя за вектором \underline{E} , и, что особенно важно, \underline{U}_G при этом уменьшается. Этот вывод, очевидно, справедлив для напряжения любой другой промежуточной точки схемы электропередачи; на шинах подстанции, на линии и т. д.

При наличии у генераторов автоматических регуляторов возбуждения контролирующих напряжение U_G , регуляторы, реагируя на понижение напряжения при возрастании угла δ , будут увеличивать ток возбуждения генераторов, а с ними э.д.с. E до тех пор, пока не восстановят прежнего значения напряжения.

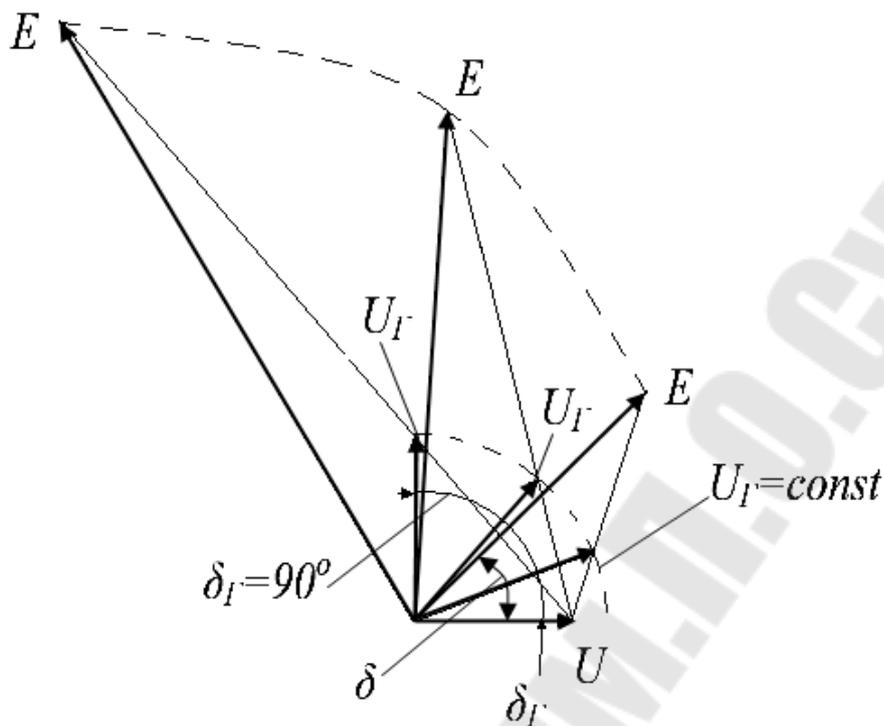


Рис. 8. Изменение э.д.с. с увеличением угла

Таким образом, исследуя установившиеся режимы работы генераторов, имеющих автоматические регуляторы напряжения, при различных значениях угла δ следует исходить из постоянства напряжения на шинах генераторного напряжения U_G . Значение же э.д.с. генераторов E в этих условиях будет изменяться, возрастая с увеличением угла δ (рис. 8). Если при неизменной э.д.с. характеристика мощности генераторов в зависимости от угла δ представляет собой синусоиду

$$P = \frac{EU}{x_c} \sin \delta,$$

то при наличии регуляторов напряжения эта характеристика будет иметь более сложный характер, отражая непрерывное изменение э.д.с. генераторов в зависимости от угла δ . Построив для различных значений э.д.с. E семейство синусоид, амплитуды которых пропорциональны E (рис. 4), характеристику мощности с учетом изменения э.д.с. (которую мы назовем внешней характеристикой) можно получить, переходя с одной синусоиды на другую в соответствии с ростом э.д.с., вытекающим из векторной диаграммы, приведенной на рис. 3. Если увеличение мощности и угла происходит достаточно медленно, то такая же характеристика может быть получена и при ручном регулировании напряжения. Внешняя характеристика имеет возрастающий характер даже в области углов $\delta > 90^\circ$, что нетрудно объяснить

увеличением э.д.с. E , которое преобладает над уменьшением $\sin\delta$ в выражении мощности при углах, несколько больших 90° .

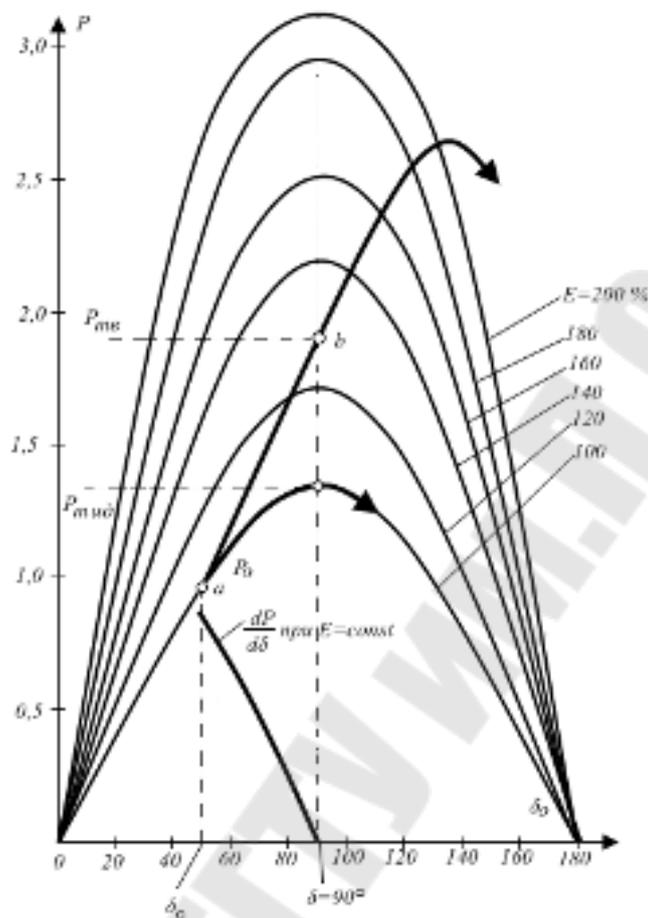


Рис. 9. Определение внутреннего предела мощности

Максимум внешней характеристики достигается не при $\delta=90^\circ$, а при $\delta_T=90^\circ$, где δ_T - угол вектора напряжения на шинах генераторов \underline{U}_T . Угол δ при этом уже значительно превышает 90° . Однако неустойчивость системы возникает ранее, и при регуляторах напряжения с зоной нечувствительности, а тем более при ручном регулировании, критическим с точки зрения устойчивости следует признать режим не при $\delta_T=90^\circ$, а при $\delta=90^\circ$. В области углов $\delta < 90^\circ$ несовершенство регулирования не приводит непосредственно к неустойчивости системы, так как даже синусоидальные характеристики при постоянстве э.д.с. имеют в этой области значений углов возрастающий характер. При углах же $\delta > 90^\circ$ режим переходит на падающие ветви синусоидальных характеристик мощности; система становится внутренне неустойчивой и удержать машины в синхронизме здесь можно лишь при исключительно точном регулировании. Таким образом, при ручном ре-

гулировании возможность устойчивой работы в этой области практически совершенно исключена. Затруднена она и при автоматическом регулировании (в случаях, когда регуляторы имеют зону нечувствительности). При изменении напряжения в пределах этой зоны регуляторы не работают и э.д.с. генераторов остается постоянной. Критерием статической устойчивости является знак синхронизирующей мощности $dP/d\delta$, т. е. предела отношения приращения мощности к приращению угла при бесконечно малом отклонении от исходного установившегося режима работы системы.

Таким образом, рассматривая внешнюю характеристику мощности как совокупность возможных установившихся режимов работы при ручном регулировании и при автоматическом регулировании напряжения с зоной нечувствительности, устойчивость этих режимов в каждой точке внешней характеристики следует проверять по знаку синхронизирующей мощности при постоянстве э. д. с. генераторов, определяемой по касательной не к внешней характеристике, а к соответствующей внутренней характеристике мощности, как это показано на рис. 4. Предельное значение мощности в этих условиях, так называемый внутренний предел мощности $P_{тв}$ достигается в точке b на внешней характеристике при $\delta_{кр} = 90^\circ$ (или $\delta_{кр} = 90^\circ + \alpha_{12}$ при наличии в системе активных сопротивлений).

Как было отмечено раньше, система не может работать на пределе устойчивости. На случай непредвиденных изменений режима необходим определенный запас устойчивости. Несовершенство регулирования напряжения вручную заставляет при определении запаса устойчивости при таком регулировании ориентироваться на постоянство э.д.с. генераторов.

Для каждой точки внешней характеристики мощности существует свой запас устойчивости, определяемый по внутренней характеристике, проходящей через данную точку (рис. 10). По мере увеличения P_o запас уменьшается и становится равным нулю при достижении внутреннего предела мощности. Ввиду того, что необходимо иметь определенное значение запаса устойчивости наибольшее допустимое значение передаваемой мощности P_o при ручном регулировании напряжения далеко не достигает внутреннего предела.

При автоматических регуляторах напряжения (имеющих зону нечувствительности) могут быть допущены меньшие запасы по внутренней характеристике, а следовательно, и большие значения передаваемой мощности P_o , поскольку при более или менее значительных

изменениях режима можно не считаться с зоной нечувствительности регуляторов. Регуляторы обеспечивают дополнительный запас устойчивости вплоть до внутреннего предела мощности. Это обстоятельство позволяет рассматривать автоматические регуляторы напряжения как одно из наиболее эффективных средств увеличения статической устойчивости.

Регуляторы без зоны нечувствительности принципиально позволяют работать и за внутренним пределом мощности, еще более расширяя область устойчивой работы генераторов.

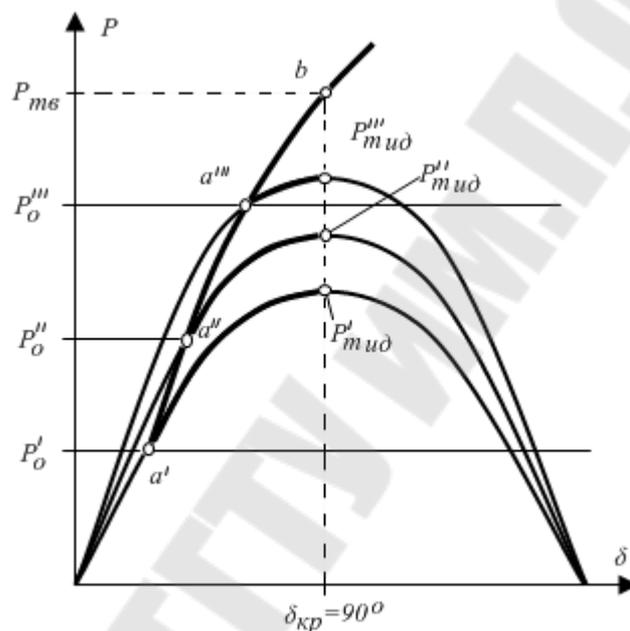


Рис. 10. Изменение запаса устойчивости, определяемого по внутренней характеристике

Практическая часть

В практической части лабораторной необходимо построить внешнюю характеристику мощности генератора при наличии регуляторов возбуждения контролирующих напряжение генератора. Схема электропередачи представлена на рис. 3. Для расчета следует воспользоваться файлом-шаблоном Lr3.mcd.

В ходе выполнения работы необходимо разобраться с основными расчетными формулами, приведенными в Lr3.mcd, научиться проводить качественную и количественную оценку статической устойчивости для различных точек внешней характеристики.

Исходные данные (в относительных единицах) взять из лабораторной работы №1.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема электропередачи.
4. Схема замещения и ее параметры.
5. График внешней характеристики мощности генератора.
6. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под внешней характеристикой мощности?
2. Чем объясняется возрастающий характер внешней характеристики в области углов $\delta > 90^\circ$?
3. Чему равно значение критического угла с точки зрения устойчивости системы для различных способов регулирования возбуждения (ручное, автоматическое)?
4. Как определить устойчивость системы в конкретной точке внешней характеристики мощности генератора при ручном регулировании и при автоматическом регулировании напряжения с зоной нечувствительности?
5. Чему равно значение внутреннего предела передаваемой мощности?
6. Как определить запас устойчивости системы в конкретной точке внешней характеристики мощности генератора при ручном регулировании напряжения?
7. Начертите векторную диаграмму изменения ЭДС с увеличением угла δ для генератора с АРВ сильного действия и поясните с ее помощью построение внешней характеристики.
8. Начертите векторную диаграмму изменения ЭДС с увеличением угла δ для генератора с АРВ пропорционального действия и поясните с ее помощью построение внешней характеристики.

Лабораторная работа № 4

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА И ПРИЕМНИКА В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ

Цель: Расчетным путем получить характеристики мощности генератора без АРВ и приемника в сложной системе, изучить влияние на них параметров схемы замещения системы электропередачи.

Теоретическая часть

Рассматривая неявнополюсный генератор, отметим, что синусоидальная зависимость активной мощности от угла $P = \frac{E \cdot U}{x_c} \cdot \sin \delta$ справедлива для простейшей схемы электропередачи в виде чисто индуктивного сопротивления x_c , которое включает и индуктивное сопротивление генератора. Теперь установим эту зависимость, не накладывая никаких других ограничений на характер связи между генератором и приемником, кроме требования постоянства активных и индуктивных сопротивлений схемы.

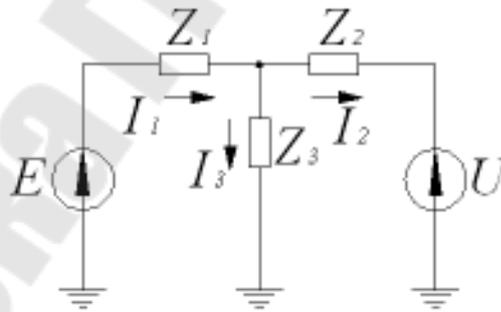


Рис. 11. Схема замещения сложной системы электропередачи

При соблюдении этого условия можно воспользоваться принципом наложения режимов, создаваемых каждой э.д.с. или напряжением, действующим в цепи. Так, например, для T-образной схемы замещения сложной системы передачи (рис. 11), в начале которой приложена э.д.с. генератора \underline{E} и в конце - напряжение шин бесконечной мощности \underline{U} , режим работы электропередачи может быть представлен как результат наложения друг на друга двух независимых режимов. В одном из них (рис. 12, а) токи создаются э.д.с. генератора \underline{E} при на-

пряжении шин приемника $\underline{U}=0$, в другом (рис. 12, б) - напряжением шин приемника \underline{U} (шин бесконечной мощности) при э.д.с. генератора \underline{E} , равной нулю.

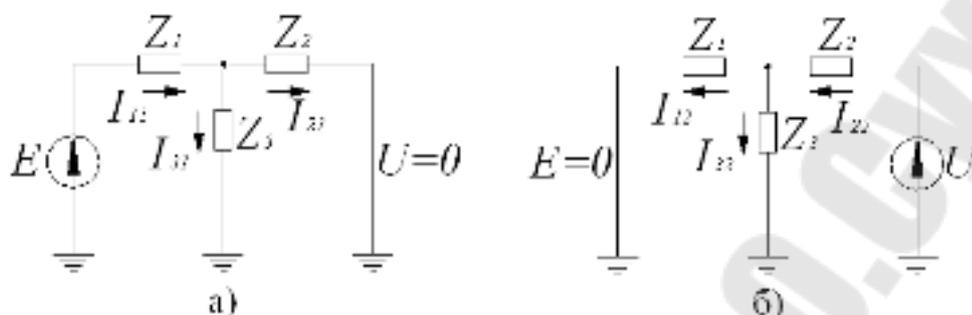


Рис. 12. Режимы, создаваемые отдельными источниками напряжения

Налагая токи и напряжения этих двух режимов друг на друга, получаем токи и напряжения действительного режима работы электропередачи (рис. 11). При этом действительный ток генератора $\underline{I}_1 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{12}$ и ток приемной системы $\underline{I}_2 = -\underline{I}_{22} + \underline{I}_{21}$.

Для генератора здесь считаются положительными ток и мощность, отдаваемые в сеть, и для приемной системы – получаемые из сети.

Отдельные составляющие токов генератора и приемной системы пропорциональны соответствующим э.д.с. и напряжению. Так, например, составляющие \underline{I}_{11} и \underline{I}_{22} имеют следующие значения:

$$\underline{I}_{11} = \underline{E} / \underline{Z}_{11} = \underline{E} \cdot \underline{Y}_{11} \text{ и } \underline{I}_{22} = \underline{U} / \underline{Z}_{22} = \underline{U} \cdot \underline{Y}_{22},$$

где \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{22} и \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{22} - соответственно собственные сопротивления и проводимости ветвей генератора и приемной системы, которые в настоящем случае равны:

$$\underline{Z}_{11} = 1 / \underline{Y}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) \text{ и } \underline{Z}_{22} = 1 / \underline{Y}_{22} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3).$$

Точно так же

$$\underline{I}_{21} = \underline{E} / \underline{Z}_{21} = \underline{E} \cdot \underline{Y}_{21} \text{ и } \underline{I}_{12} = \underline{U} / \underline{Z}_{12} = \underline{U} \cdot \underline{Y}_{12},$$

где \underline{Z}_{21} , \underline{Z}_{12} и \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{12} - соответственно взаимные сопротивления и проводимости ветвей, равные для T-образной схемы:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = 1 / \underline{Y}_{12} = 1 / \underline{Y}_{21} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 / \underline{Z}_3.$$

Собственные сопротивления \underline{Z}_{11} и \underline{Z}_{22} ветвей и собственные проводимости их \underline{Y}_{11} и \underline{Y}_{22} определяют абсолютное значение и фазу тока данного источника (генератора или шин) при отсутствии э.д.с. других источников, тогда как взаимные сопротивления ветвей \underline{Z}_{21} и \underline{Z}_{12} и взаимные проводимости ветвей \underline{Y}_{21} и \underline{Y}_{12} определяют абсолютное значе-

ние и фазу тока в цепи данного источника, обусловленного э.д.с. другого источника.

Собственные и взаимные сопротивления и проводимости ветвей определяются исключительно конфигурацией схемы и значением сопротивлений отдельных ветвей ее. Они могут быть вычислены для любой конфигурации схемы и позволяют получить наиболее общее выражение мощности генератора и приемной системы. Отметим, что

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} \text{ и } \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}.$$

Согласно соотношениям (1) и (2) токи генератора и приемника выражаются следующим образом через собственные и взаимные проводимости ветвей:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{12} = \underline{E} \cdot \underline{Y}_{11} - \underline{U} \cdot \underline{Y}_{12};$$

$$\underline{I}_2 = -\underline{I}_{22} + \underline{I}_{21} = -\underline{U} \cdot \underline{Y}_{22} + \underline{E} \cdot \underline{Y}_{21}.$$

Произведение сопряженного вектора тока на вектор напряжения или э.д.с. дает комплексное выражение мощности, действительная часть которого представляет собой значение активной мощности и мнимая - реактивной. Мощности генератора \underline{S}_G и приемника \underline{S}_H равны соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_G &= P_G + jQ_G = \underline{E} \cdot \hat{I}_1 = \underline{E} (\hat{E} \cdot \hat{Y}_{11} - \hat{U} \cdot \hat{Y}_{12}) = \underline{E} \cdot \hat{E} \cdot \hat{Y}_{11} - \underline{E} \cdot \hat{U} \cdot \hat{Y}_{12}; \\ \underline{S}_H &= P_H + jQ_H = \underline{U} (-\hat{U} \cdot \hat{Y}_{22} + \hat{E} \cdot \hat{Y}_{21}) = -\underline{U} \cdot \hat{U} \cdot \hat{Y}_{22} + \underline{U} \cdot \hat{E} \cdot \hat{Y}_{21}. \end{aligned} \right\}$$

Отметим, что \underline{S}_G представляют собой мощность в точке приложения э.д.с. \underline{E} , т.е. внутреннюю мощность генератора за его сопротивлением в схеме замещения. Принимая направление вектора \underline{U} за ось отсчета векторов, получаем фазный угол вектора \underline{U} равным нулю и фазный угол вектора \underline{E} равным относительному углу сдвига векторов δ (рис. 13):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= U e^{j \cdot 0}; \\ \underline{E} &= E e^{j \cdot \delta}. \end{aligned} \right\}$$

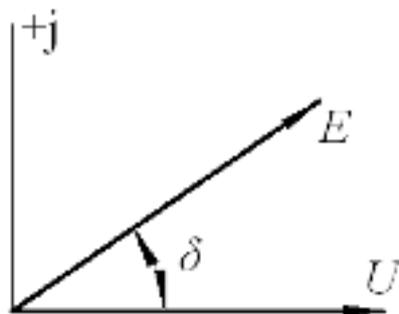


Рис. 13. Взаимное расположение векторов э.д.с. и напряжения.

В качестве фазных углов собственных и взаимных сопротивлений ветвей входят углы $\psi_{11}, \psi_{22}, \psi_{12}$, причем

$$\underline{Z}_{11} = Z_{11}e^{j\psi_{11}}; \quad \underline{Z}_{22} = Z_{22}e^{j\psi_{22}}; \quad \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{12} = Z_{12}e^{j\psi_{12}}.$$

Углы определяются следующим образом:

$$\psi_{11} = \arctg \frac{x_{11}}{r_{11}}; \quad \psi_{22} = \arctg \frac{x_{22}}{r_{22}}; \quad \psi_{12} = \arctg \frac{x_{12}}{r_{12}};$$

поэтому для собственных и взаимных проводимостей ветвей имеем:

$$\underline{Y}_{11} = Y_{11}e^{-j\psi_{11}}; \quad \underline{Y}_{22} = Y_{22}e^{-j\psi_{22}}; \quad \underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{12} = Y_{12}e^{-j\psi_{12}}.$$

Принимая во внимание, что фазные углы сопряженных векторов должны быть взяты со знаком минус, получаем для мощностей генератора и приемника:

$$\begin{aligned} P_G + jQ_G &= Ee^{j\delta} \cdot Ee^{-j\delta} \cdot Y_{11}e^{j\psi_{11}} - Ee^{j\delta} \cdot Ue^{j\cdot 0} \cdot Y_{12}e^{j\psi_{12}} = \\ &= E^2 \cdot Y_{11}e^{j\psi_{11}} - E \cdot U \cdot Y_{12}e^{j(\delta + \psi_{12})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_H + jQ_H &= Ue^{j\cdot 0} \cdot Ue^{-j\cdot 0} \cdot Y_{22}e^{j\psi_{22}} + Ee^{-j\delta} \cdot Ue^{j\cdot 0} \cdot Y_{12}e^{j\psi_{12}} = \\ &= -U^2 \cdot Y_{22}e^{j\psi_{22}} + E \cdot U \cdot Y_{12}e^{j(-\delta + \psi_{12})} \end{aligned}$$

или

$$\left. \begin{aligned} P_G + jQ_G &= E^2 \cdot Y_{11} (\cos \psi_{11} + j \sin \psi_{11}) - \\ &- E \cdot U \cdot Y_{12} (\cos(\delta + \psi_{12}) + j \sin(\delta + \psi_{12})); \\ P_H + jQ_H &= -U^2 \cdot Y_{22} (\cos \psi_{22} + j \sin \psi_{22}) + \\ &+ E \cdot U \cdot Y_{12} (\cos(-\delta + \psi_{12}) + j \sin(-\delta + \psi_{12})), \end{aligned} \right\}$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} P_G &= E^2 \cdot Y_{11} \cos \psi_{11} - E \cdot U \cdot Y_{12} \cos(\delta + \psi_{12}); \\ P_H &= -U^2 \cdot Y_{22} \cos \psi_{22} + E \cdot U \cdot Y_{12} \cos(-\delta + \psi_{12}); \\ Q_G &= E^2 \cdot Y_{11} \sin \psi_{11} - E \cdot U \cdot Y_{12} \sin(\delta + \psi_{12}); \\ Q_H &= -U^2 \cdot Y_{22} \sin \psi_{22} + E \cdot U \cdot Y_{12} \sin(-\delta + \psi_{12}). \end{aligned} \right\}$$

Если вместо углов ψ ввести дополняющие их до 90° углы $\alpha = 90^\circ - \psi$, то выражения запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_G &= E^2 \cdot Y_{11} \sin \alpha_{11} + E \cdot U \cdot Y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}); \\ P_H &= -U^2 \cdot Y_{22} \sin \alpha_{22} + E \cdot U \cdot Y_{12} \sin(\delta + \alpha_{12}); \end{aligned} \right\}$$

точно так же

$$\left. \begin{aligned} Q_G &= E^2 \cdot Y_{11} \cos \alpha_{11} + E \cdot U \cdot Y_{12} \cos(\delta - \alpha_{12}); \\ Q_H &= -U^2 \cdot Y_{22} \cos \alpha_{22} + E \cdot U \cdot Y_{12} \cos(\delta + \alpha_{12}); \end{aligned} \right\}$$

Структура выражений остается одной и той же при любой схеме связи генератора и приемника. Вариации схемы влияют только на значение собственных и взаимных проводимостей ветвей и углов α .

Как вытекает из выражений, зависимости активной мощности от угла сдвига вектора э.д.с. δ имеют и в самых общих условиях при $E = \text{const}$ синусоидальный характер, однако синусоиды смещены как относительно оси абсцисс, так и относительно оси ординат. Смещение характеристики мощности обуславливается потерями активной мощности в элементах схемы. Оно возникает при значениях углов α , отличных от нуля, что имеет место только при наличии в схеме активных сопротивлений. Если активные сопротивления в схеме отсутствуют, то вещественные составляющие собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей ветвей равны нулю, углы ψ получаются равными 90° и, следовательно, $\alpha = 90^\circ - \psi = 0$. При этом мощности генератора и приемника

$$P_G = P_H = \frac{E \cdot U}{x_{12}} \sin \delta.$$

Характеристика мощности имеет тот же вид, что и при схеме замещения электропередачи с последовательным соединением реактивных сопротивлений, с той только разницей, что вместо суммарного индуктивного сопротивления x_c в знаменатель входит взаимное сопротивление x_{12} . Для Т-образной схемы с индуктивными сопротивлениями ветвей x_1 , x_2 и x_3 (рис. 4) взаимное сопротивление $x_{12} = x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_3$ и характеристика мощности имеет амплитуду

$$P_m = \frac{EU}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_3}.$$

Если бы шунтирующее индуктивное сопротивление x_3 в схеме отсутствовало, то амплитуда характеристики мощности была бы равной:

$$P_m = \frac{EU}{x_1 + x_2}.$$

Поскольку знаменатель в выражении (9) больше, чем в (10), очевидно, амплитуда мощности в первом случае меньше (кривая 3 на рис. 14), чем во втором (кривая 2 там же), и разница между ними тем больше, чем меньше шунтирующее индуктивное сопротивление x_3 .

Таким образом, можно констатировать, что шунтирующие индуктивные сопротивления в схеме электропередачи снижают амплитуду характеристики мощности. Это обстоятельство имеет очень большое значение для динамической устойчивости при коротких замыканиях.

Такой характер изменения амплитуды мощности справедлив, однако, только при условии, что э.д.с. генератора E сохраняет одно и то же значение как при наличии шунтирующего индуктивного сопротивления, так и без него. В установившемся режиме работы системы при подключении индуктивного шунтирующего сопротивления (например, сопротивления x_3 в схеме на рис. 14) для того, чтобы восстановить напряжение в точке подключения сопротивления, приходится увеличивать э.д.с. генератора E с тем, чтобы компенсировать потерю напряжения от реактивного тока, потребляемого индуктивным сопротивлением x_3 . Это увеличение э.д.с. приводит к прямо противоположным результатам, обуславливающим повышение характеристики мощности (кривая 1 на рис. 14).

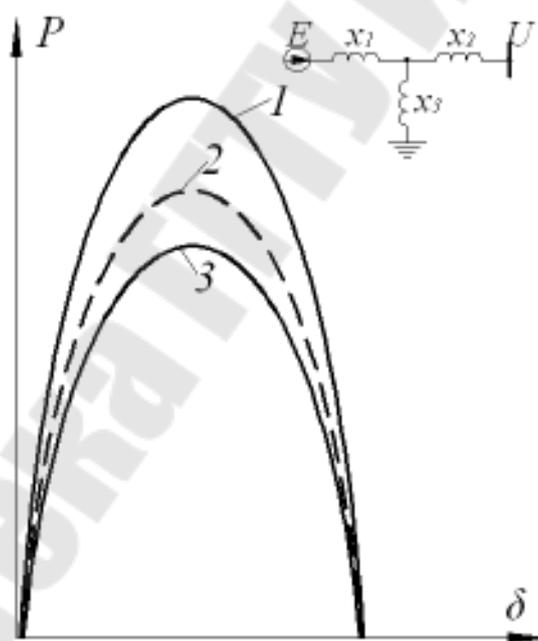


Рис. 4. Влияние шунтирующего индуктивного сопротивления на амплитуду характеристики мощности

- 1- характеристика мощности при увеличении э.д.с.;
- 2- при отсутствии x_3 ;
- 3- при неизменной э.д.с.

При наличии в схеме электропередачи активных сопротивлений мощности генератора и приемника, вообще говоря, различны, и раз-

ница между ними определяется значением потерь мощности между генератором и приемной системой. Первые члены в (7) имеют постоянные значения независимо от значения угла δ и называются собственными мощностями генератора и приемной системы. Поскольку углы α_{11} и α_{22} всегда положительны, собственная мощность генератора положительна:

$$P_{11} = E^2 \cdot Y_{11} \sin \alpha_{11},$$

а приемной системы – отрицательна:

$$P_{22} = -U^2 \cdot Y_{22} \sin \alpha_{22}.$$

Что же касается дополнительного угла α_{12} взаимного сопротивления, то он может быть в зависимости от характера схемы электропередачи или положительным или отрицательным.

Для схемы в виде последовательного полного сопротивления $Z = r + jx$ все собственные и взаимные сопротивления и проводимости ветвей и их углы одинаковы:

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_{12} = Y; \alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{12} = \alpha,$$

где $\alpha = 90^\circ - \arctg \frac{x}{r} > 0$.

Угол α_{12} здесь положителен и характеристики мощности имеют вид, представленный на рис. 15, причем

$$P_G = E^2 \cdot Y \sin \alpha + E \cdot U \cdot Y \sin(\delta - \alpha);$$

$$P_H = -U^2 \cdot Y \sin \alpha + E \cdot U \cdot Y \sin(\delta + \alpha).$$

Характеристика мощности генератора смещена вверх на величину $P_{11} = E^2 \cdot Y \sin \alpha$ и вправо на угол α , синусоидальная характеристика мощности P_H сдвинута, наоборот, вниз на $U^2 \cdot Y \sin \alpha$ и влево на угол α .

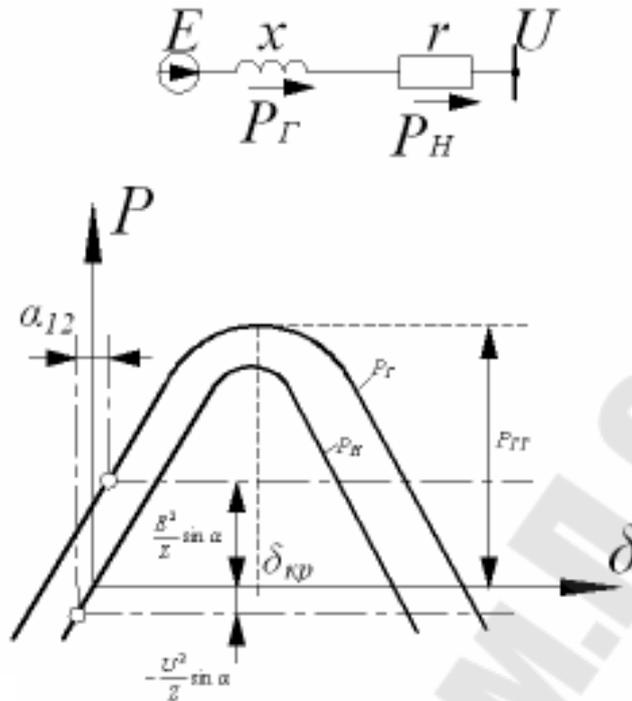


Рис. 15. Характеристики мощности при учете последовательного активного сопротивления

Если приемная система имеет бесконечную мощность, то характеристика мощности P_H не представляет интереса с точки зрения устойчивости. Работа на падающей ветви этой характеристики не приводит к неустойчивости, поскольку вектор напряжения бесконечно мощной системы вращается с неизменной синхронной скоростью при любых значениях передаваемой приемнику мощности и, следовательно, возможность нарастающего изменения угла δ за счет перемещений вектора U исключена. В этих условиях устойчивость системы передачи связывается исключительно с характеристикой мощности генератора и нарушение устойчивости происходит при неизменной э.д.с. E при достижении максимума этой характеристики, равно:

$$P_m = E^2 \cdot Y_{11} \sin \alpha_{11} + E \cdot U \cdot Y_{12},$$

при угле $\delta_{kp} = 90^\circ + \alpha_{12}$, несколько большем 90° .

Если активное сопротивление в схеме электропередачи включено не последовательно, а параллельно, например в виде промежуточной нагрузки на рис. 6, то взаимное сопротивление

$$Z_{12} = jx_1 + jx_2 + \frac{jx_1 jx_2}{r} = -\frac{x_1 x_2}{r} + j(x_1 + x_2).$$

Вещественная составляющая здесь отрицательна $r_{12} = -\frac{x_1 x_2}{r}$, а следовательно, отрицателен и угол α_{12} .

Активное сопротивление r_{12} может получиться отрицательным потому, что сопротивление Z_{12} не является, по существу, реально существующим сопротивлением, а представляет собой лишь некоторый комплексный коэффициент пропорциональности между током в одной ветви схемы и э.д.с. в другой ветви. Собственные сопротивления Z_{11} и Z_{22} определяются как отношение напряжения к току в одной и той же ветви схемы замещения. Поэтому их активные составляющие не могут быть отрицательны. Таким образом, дополнительные углы α_{11} и α_{22} фазных углов комплексных собственных сопротивлений всегда положительны.

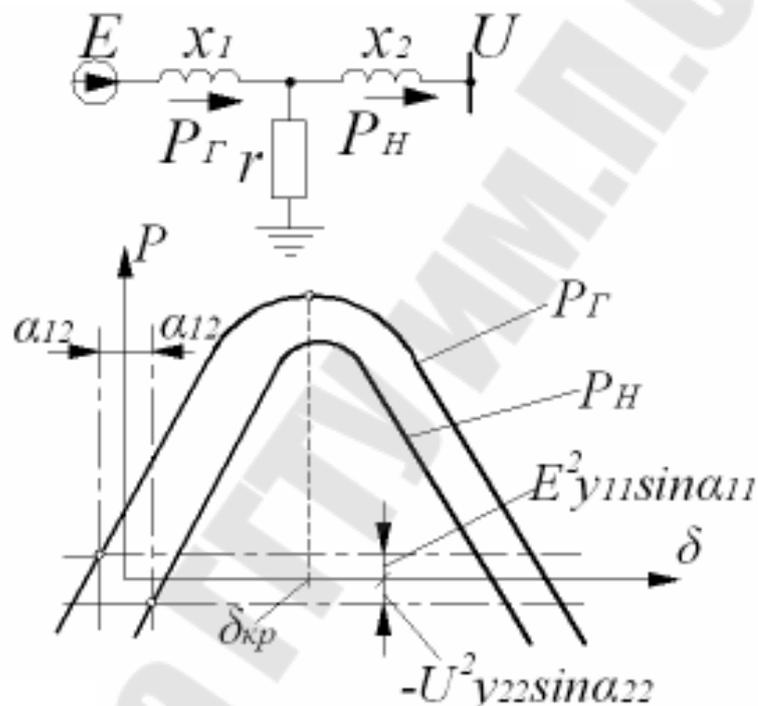


Рис. 16. Характеристика мощности при наличии активного сопротивления

Синусоидальная характеристика мощности генератора на рис. 16 сдвинута вверх и влево, а приемной системы - вниз и вправо. Неустойчивость системы при $E = const$ возникает при достижении максимума характеристики мощности генератора

$$P_G = E^2 \cdot Y_{11} \sin \alpha_{11} + E \cdot U \cdot Y_{12},$$
 при угле $\delta_{кр} = 90^\circ + \alpha_{12}$, меньше 90° .

Таким образом, можно констатировать, что под влиянием активных сопротивлений критический угол $\delta_{кр}$, отклоняется от 90° в ту или иную сторону на дополнительный угол взаимного комплексного сопротивления ветви α_{12} . Идеальный предел мощности генераторов в

этих условиях представляет собой сумму постоянной составляющей и амплитуды синусоидальной составляющей в выражении мощности.

Практическая часть

В практической части лабораторной необходимо построить характеристики мощности генератора без АРВ и приемника в сложной системе электропередачи (рис. 17), схема замещения которой представлена на рис.1, для следующих режимов:

1. При отсутствии в схеме активных сопротивлений и шунтирующего сопротивления Z_3 .

2. При отсутствии в схеме активных сопротивлений и подключенном шунтирующем сопротивлении Z_3 , которое носит индуктивный характер.

3. При отсутствии в схеме активных сопротивлений и подключенном шунтирующем сопротивлении Z_3 , которое носит активный характер.

4. При наличии в схеме активных сопротивлений и отсутствии шунтирующего сопротивления Z_3 .

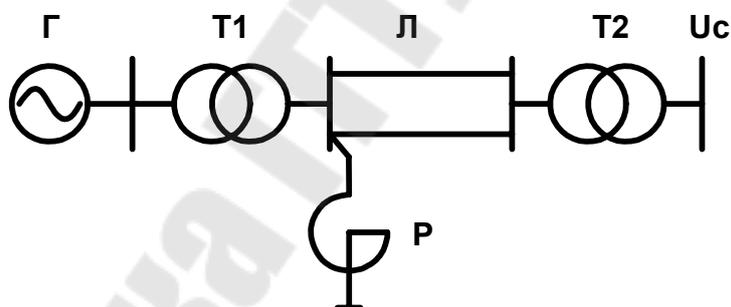


Рис. 17. Схема электропередачи

Для расчета следует воспользоваться файлом-шаблоном Lr4.mcd. Параметры схемы замещения (в относительных единицах) взять из лабораторной работы №1, значение шунтирующего индуктивного сопротивления, которое включено вначале линии, выбрать самостоятельно (примерно на 2 порядка выше суммарного индуктивного сопротивления системы найденного в лабораторной работе №1), активные сопротивления принять на порядок меньше соответствующих индуктивных.

В ходе выполнения работы необходимо разобраться с основными расчетными формулами, приведенными в Lr4.mcd, а также проанализировать

зировать влияние параметров электропередачи на характеристики мощности генератора и приемника.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема электропередачи.
4. Схема замещения и ее параметры по каждому пункту задания.
5. Характеристики мощности по каждому пункту задания.
6. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как влияет на характеристики мощности генератора и приемника подключение в простейшей системе шунтирующего индуктивного сопротивления (сопротивление Z_3 на рис.11)?

2. Как влияет на характеристики мощности генератора и приемника подключение в простейшей системе шунтирующего активного сопротивления (сопротивление Z_3 на рис.11)?

3. Как влияет на характеристики мощности генератора и приемника подключение последовательных активных сопротивлений и отсутствии шунтирующего сопротивления Z_3 ?

4. Записать формулу, по которой определяется предел передаваемой мощности генератора в систему при отсутствии в схеме замещения активных сопротивлений и наличии шунтирующего индуктивного сопротивления Z_3 .

5. Записать формулу, по которой определяется предел передаваемой мощности генератора в систему при наличии в схеме замещения активных сопротивлений.

6. Как изменится критический угол характеристики мощности генератора при включении шунтирующего индуктивного сопротивления Z_3 , если активные сопротивления в схеме отсутствуют?

7. Как изменится предел передаваемой мощности генератора при включении шунтирующего индуктивного сопротивления Z_3 , если активные сопротивления в схеме отсутствуют?

8. Как изменится критический угол характеристики мощности генератора при включении шунтирующего активного сопротивления Z_3 , если активные последовательные сопротивления в схеме отсутствуют?

9. Как изменится предел передаваемой мощности генератора при включении шунтирующего активного сопротивления Z_3 , если активные последовательные сопротивления в схеме отсутствуют?

Лабораторная работа № 5

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Цель: Познакомиться с понятием динамическая устойчивость электропередачи, определить запас статической и динамической устойчивости системы без применения мероприятий по повышению устойчивости и с их применением, а также найти значение предельного угла и времени отключения КЗ.

Теоретическая часть

Всякое внезапное нарушение рабочего режима электрической системы, состоящей из электростанций, линий электропередачи и нагрузок, вызывает качания синхронных машин (генераторов, синхронных двигателей и компенсаторов). При неблагоприятных условиях размах колебаний может получиться настолько большим, что отдельные машины или целые электростанции выпадут из синхронизма. Причина возникновения качаний заключается в следующем. Как правило, аварии в системах передачи сопровождаются внезапным изменением мощности, отдаваемой в сеть электростанциями. Регуляторы первичных двигателей обладают значительной инерцией и могут реагировать на изменение мощности или, вернее, на изменение частоты вращения машины с определенным запаздыванием. В результате равновесие между отдаваемой генераторами мощностью и мощностью, развиваемой первичными двигателями, нарушается и на валу машин возникают избыточные моменты, вызывающие изменение скорости и относительное перемещение роторов. Дальнейший характер возникших колебаний зависит от целого ряда факторов. Значения отдаваемой машинами мощности и избыточных моментов, ускоряющих или замедляющих роторы машин, в каждый момент времени определяются абсолютным значением и фазой э.д.с. всех машин системы, которые с течением времени изменяются, причем изменение фаз связано с относительным перемещением роторов и зависит, таким образом, от инерции вращающихся масс, т.е. от механических свойств системы,

тогда как изменение абсолютных значений э.д.с. определяется преимущественно переходными электромагнитными процессами в машинах и зависит от действий АРВ и ряда других факторов.

Качания синхронных машин могут возникнуть также в следующих случаях: при внезапном скачке нагрузки, при отключении линии или трансформатора, при отключении генератора и при коротком замыкании (КЗ).

Из этих видов аварии наиболее опасным является КЗ, с которым и необходимо считаться в первую очередь. При заземленной нейтрали могут быть следующие виды КЗ: однофазное замыкание на землю; непосредственное замыкание между двумя фазами; двухфазное замыкание на землю; трехфазное КЗ

Наибольшие затруднения в отношении устойчивости возникают при трехфазном КЗ. Вследствие резкого снижения напряжения при трехфазном КЗ связь между генераторными станциями настолько ослабляется, что устойчивость системы часто нарушается.

При однофазном и двухфазном КЗ (особенно в первом случае) снижение напряжения получается меньше и генераторы находятся в более благоприятных условиях, чем в случае трехфазного КЗ

Однако поскольку вероятность однофазного к. з. достаточно велика, опасности выпадения машин из синхронизма в этих условиях необходимо избегать.

В ответственных системах следует добиваться сохранения устойчивости также и при трехфазном КЗ. Другие виды аварий, такие, как отключение линий, трансформаторов и генераторов, с точки зрения динамической устойчивости обычно менее опасны, чем КЗ

Если отвлечься от вопроса о параметрах генераторов, трансформаторов и линий электропередачи при различных условиях их работы, то схема замещения системы передачи при трехфазном к. з. (рис. 18, б) отличается от схемы нормального режима (рис. 18, а) лишь тем, что точка КЗ (в однолинейной схеме замещения) замыкается непосредственно на обратный провод.

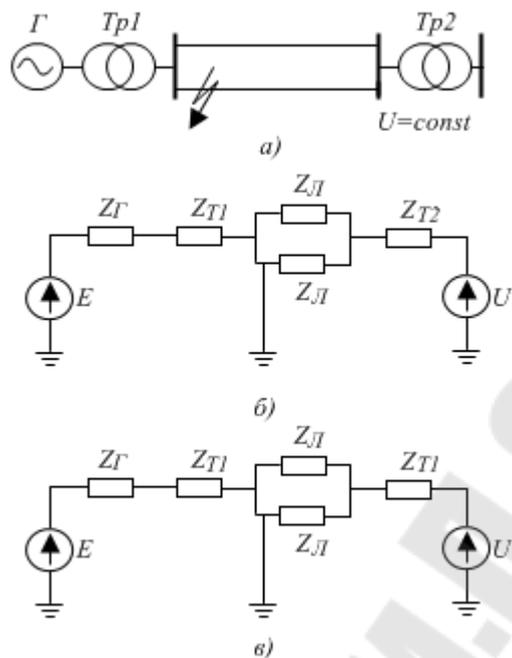


Рис. 18. Принципиальная схема (а) и схемы замещения электропередачи при нормальном режиме (б) и при трехфазном КЗ (в)

Напряжение в точке КЗ при этом падает до нуля и передача мощности приемнику через нее оказывается невозможной. Если КЗ произошло в начале или конце двухцепной линии электропередачи, то генератор сбрасывает активную мощность почти до нуля, покрывая только потери мощности в активных сопротивлениях электропередачи. Избыток мощности, развиваемой турбиной, а следовательно, и избыточный момент на валу агрегата турбина-генератор получаются очень значительными, чем и объясняется большая вероятность нарушения устойчивости при трехфазном КЗ

Несколько иначе обстоит дело при несимметричных КЗ Прежде всего необходимо установить некоторые принципиальные положения, которыми следует руководствоваться при исследованиях устойчивости при несимметричных КЗ Надо помнить, что качания роторов машин вызываются изменениями активной мощности генераторов и в проблеме несимметричных КЗ нас будут интересовать только те стороны вопроса, которые непосредственно влияют на значение активной мощности и моментов на валах машин.

Современная практика при исследовании несимметричных режимов и, в частности, к. з. в электрических системах неизменно обращается к методу симметричных составляющих, который и в данном случае позволяет наметить наиболее простые решения задачи. Разла-

гая токи и напряжения при несимметричном КЗ на составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности, можно сразу же констатировать, что при КЗ в сети высокого напряжения токи нулевой последовательности в цепи генератора вообще не циркулируют, поскольку при обычном соединении обмоток трансформаторов по схеме треугольник-звезда они замыкаются на землю через заземленную нейтраль трансформатора.

Иначе обстоит дело с токами обратной последовательности, которые трансформируются вне зависимости от схемы соединения обмоток трансформаторов, так же как и токи прямой последовательности, и протекают, следовательно, в обмотке генератора при несимметричном КЗ в любой точке сети. Токи обратной последовательности создают в воздушном зазоре машины магнитный поток реакции якоря, вращающийся в направлении, обратном направлению вращения ротора, и имеющий, следовательно, двойную частоту вращения относительно последнего. Возникающий при этом вращающийся момент изменяется периодически с двойной частотой. Механическая инерция ротора машины настолько велика, что ротор не успевает следовать за периодическими колебаниями момента столь высокой частоты (100 Гц). Среднее же значение момента близко к нулю. На основной синхронный поток в воздушном зазоре, а следовательно, и на основную гармонику э.д.с. прямой последовательности токи обратной последовательности влияния почти не оказывают.

Таким образом, при несимметричных КЗ оказывается возможным не считаться с возникновением моментов, связанных с токами обратной и нулевой последовательности, и ограничиться рассмотрением системы токов и напряжений только прямой последовательности. Это очень важный вывод, значительно упрощающий анализ динамической устойчивости при несимметричных КЗ, так как от несимметричного режима работы системы оказывается возможным перейти к симметричному.

Полученные результаты не следует понимать таким образом, что параметры схем обратной и нулевой последовательности вообще не влияют на устойчивость систем при несимметричных КЗ. Схемы прямой, обратной и нулевой последовательности, как известно, связываются между собой и образуют комплексные схемы замещения несимметричных КЗ. Следовательно, токи и напряжения прямой последовательности зависят от сопротивлений и конфигурации схем не только прямой, но также обратной и нулевой последовательности.

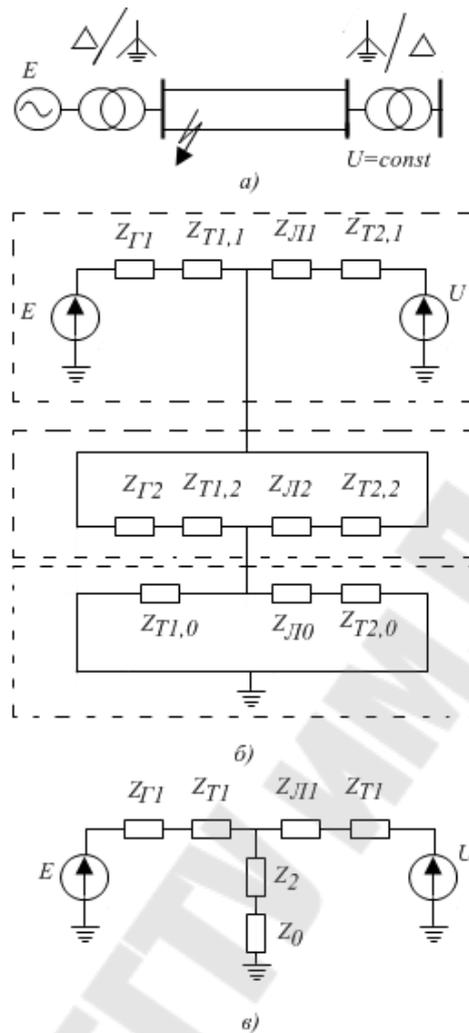


Рис. 19. Принципиальная схема и схема замещения электропередачи при однофазном КЗ.

a – схема системы; *б* – схема замещения для токов прямой последовательности; *в* – преобразованная схема замещения

Пример построения комплексной схемы при однофазном КЗ в простой схеме электропередачи показан на рис. 19, где схемы прямой, обратной и нулевой последовательности, ориентированные относительно точки КЗ, соединены последовательно. Поскольку значение токов, протекающих в отдельных элементах схем обратной и нулевой последовательности, для нашей задачи несущественны, схемы обратной и нулевой последовательности могут быть преобразованы к виду результирующих сопротивлений систем обратной и нулевой последовательности Z_2 и Z_0 , как это показано на рис. 19, в. Эта схема отличается от схемы замещения нормального режима работы системы лишь тем, что в точке КЗ оказывается включенным шунтирующее сопро-

тивление, равное сумме результирующих сопротивлений схем обратной и нулевой последовательности.

Напряжения и токи генератора и приемника в схеме на рис. 19, в, являются составляющими прямой последовательности. Они и определяют изменения мощности при КЗ, приводящие к качаниям машин.

Таким образом, если рассматривать составляющие только прямой последовательности, то однофазное КЗ сводится к включению в точке КЗ трехфазного симметричного шунтирующего сопротивления, составленного из последовательно соединенных сопротивлений обратной и нулевой последовательности.

Используя комплексные схемы замещения, можно установить, что это положение справедливо и для других видов несимметричного КЗ с той только разницей, что шунтирующее сопротивление при двухфазном КЗ (без замыкания на землю) равно результирующему сопротивлению обратной последовательности, а при двухфазном замыкании на землю - сопротивлениям обратной и нулевой последовательности, сложенным параллельно.

Для симметричного трехфазного КЗ шунтирующее сопротивление равно нулю.

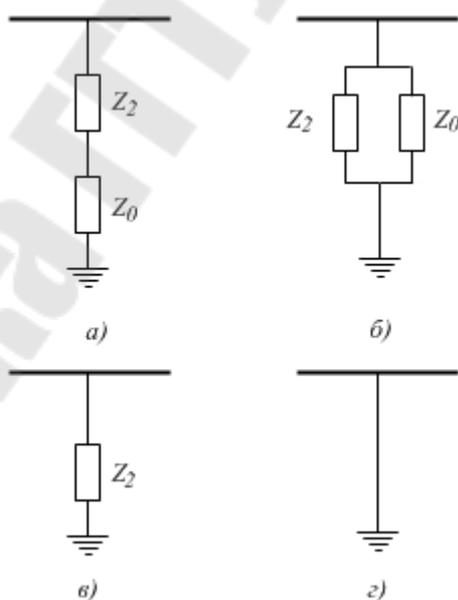


Рис. 20. Шунтирующее сопротивление в месте повреждения *а* – при однофазном КЗ; *б* – при двухфазном КЗ; *в* – при двухфазном КЗ на землю; *г* – при трехфазном КЗ.

Сравнивая различные виды КЗ (рис. 20), можно видеть, что наиболее тяжелым из них является трехфазное КЗ, в этом случае сопро-

тивление эквивалентного шунта, а следовательно, и напряжение в точке КЗ равны нулю. Более благоприятным случаем является двухфазное КЗ на землю. Далее идет двухфазное КЗ без замыкания на землю и, наконец, однофазное КЗ В последнем случае шунтирующее сопротивление получается наибольшим.

Воздействие КЗ зависит не только от его характера, но и от расположения точки КЗ, в зависимости от которого меняются значения сопротивлений обратной и нулевой последовательности, отнесенных к точке КЗ, которые в свою очередь влияют на сопротивление эквивалентного шунтирующего сопротивления.

В системе передачи, изображенной на рис. 21, индуктивное сопротивление нулевой последовательности, отнесенное к точке КЗ, складывается из двух параллельных ветвей. Если КЗ произошло на расстоянии nl километров ($n < 1$) от электростанции, где l - длина линии передачи, то

$$x_0 = \frac{(x_{m10} + nx_{л0})(x_{m20} + (1-n)x_{л0})}{(x_{m10} + nx_{л0}) + (x_{m20} + (1-n)x_{л0})} = \frac{(x_{m10} + nx_{л0})(x_{m20} + (1-n)x_{л0})}{x_{m10} + x_{л0} + x_{m20}}.$$

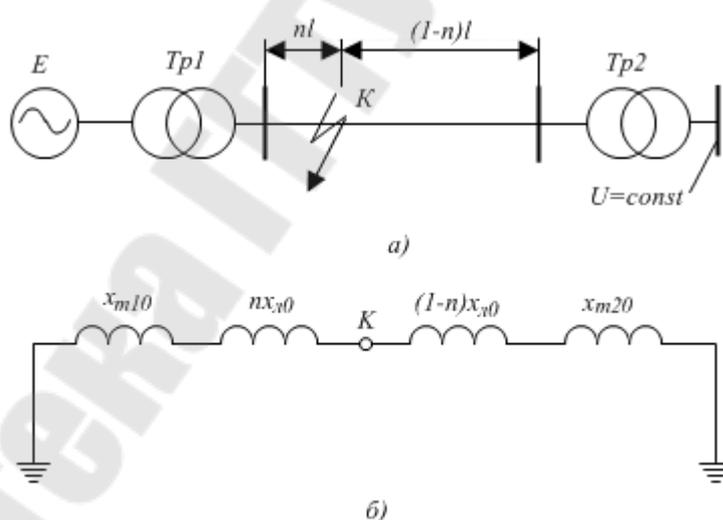


Рис. 21. Принципиальная схема электропередачи (а) и схема нулевой последовательности при КЗ в промежуточной точке электропередачи (б)

Таким образом, x_0 является функцией величины и, определяющей положение точки КЗ, и достигает максимального значения при условии

$$\frac{dx_0}{dn} = \frac{-x_{л0}(x_{m10} + nx_{л0}) + x_{л0}(x_{m20} + (1-n)x_{л0})}{x_{m10} + x_{л0} + x_{m20}} = 0,$$

откуда

$$x_{m10} + nx_{л0} = x_{m20} + (1-n)x_{л0},$$

т.е. в том случае, когда индуктивные сопротивления обеих параллельных ветвей в схеме замещения обратной последовательности равны между собой.

Если индуктивные сопротивления трансформаторов в начале и конце передачи одинаковы, т. е. $x_{m10} = x_{m20}$, то максимальное значение x_0 достигается, когда $nx_{л0} = (1-n)x_{л0}$ или $n = 0,5$, т. е. при КЗ в середине линии.

Если точка КЗ расположена ближе к началу или концу линии электропередачи, то x_0 уменьшается.

Для двухцепной линии электропередачи картина получается более сложной ввиду значительного влияния параллельных цепей друг на друга при протекании токов нулевой последовательности. Однако сделанные выше выводы в основном справедливы и для этого случая.

Изменение индуктивного сопротивления нулевой последовательности в зависимости от расположения точки КЗ показано на рис. 5. Аналогичную зависимость, правда, менее резко выраженную, можно получить во многих случаях и для индуктивного сопротивления обратной последовательности.

Таким образом, индуктивное сопротивление эквивалентного шунтирующего сопротивления при однофазном или двухфазном замыкании на землю получается относительно большим, когда КЗ происходит в середине линий, и уменьшается по мере приближения точки КЗ к началу или к концу линии электропередачи. В связи с этим КЗ в середине линии является обычно более легким случаем, чем к. з. в начале или в конце. Какой из двух последних случаев будет более тяжелым, зависит от характеристик генераторного и приемного конца электропередачи. Обычно наибольшие затруднения возникают при КЗ в начале линии.

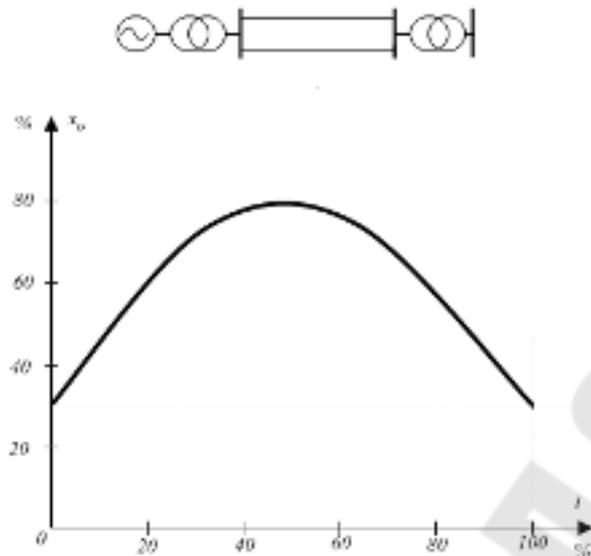


Рис. 22. Влияние расположения точки КЗ на индуктивное сопротивление обратной последовательности

ПРАВИЛО ПЛОЩАДЕЙ ПРИ РАБОТЕ СТАНЦИИ НА ШИНАХ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрим сначала простейший случай работы электростанции через двухцепную линию электропередачи на шины бесконечной мощности (рис. 23). Предпосылка постоянства напряжения на шинах системы по абсолютному значению и фазе исключает возможность качаний приемной системы и значительно упрощает анализ явлений.

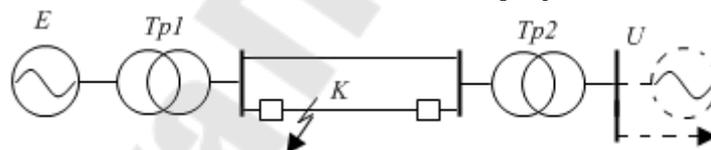


Рис. 23. Принципиальная схема электропередачи

На рис. 24 приведена упрощенная схема замещения рассматриваемой системы при нормальном режиме, представляющая собой последовательное соединение индуктивных сопротивлений отдельных элементов системы, дающее в сумме x_c :

$$x_c = x_2 + x_{m1} + 0,5x_L + x_{m2};$$

здесь под индуктивным сопротивлением генератора следует понимать его переходное индуктивное сопротивление x'_d .

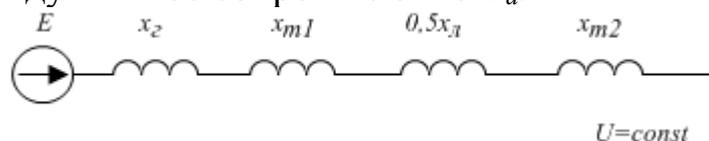


Рис. 24. Схема замещения для нормального режима

Выше было установлено, что при быстром изменении угла в нормальном или аварийном режиме характеристику мощности генератора можно считать синусоидальной, отбросив вторую гармонику мощности и полагая

$$P = \frac{EU}{x_c} \sin \delta,$$

где $E=E'$ - переходная э.д.с. генератора, приложенная в его схеме замещения за переходным индуктивным сопротивлением, одинаковым для продольной и поперечной осей. Эта зависимость для нормального режима представлена на рис. 26 (кривая I). Теперь предположим, что в начале одной из цепей линии электропередачи в точке K (рис. 6) произошло несимметричное КЗ. Схема замещения системы для этого режима принимает вид, изображенный на рис. 25, а, где в точке K включено эквивалентное шунтирующее сопротивление КЗ x_K , состоящее из сопротивлений обратной и нулевой последовательностей.

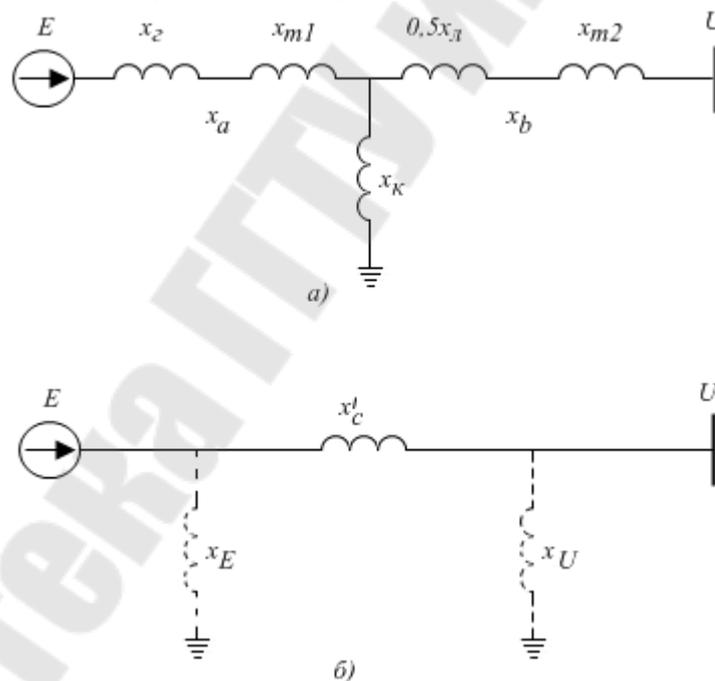


Рис. 25. Схема замещения электропередачи при коротком замыкании (а) и ее преобразование (б).

В связи с изменением конфигурации схемы вследствие КЗ при неизменной э.д.с. генератора (за переходным индуктивным сопротивлением) значение передаваемой системе мощности изменяется. Выражение для передаваемой мощности при КЗ можно найти с помощью следующих простых преобразований схемы замещения системы

для аварийного режима. Эта схема представляет собой звезду с лучами x_k , $x_a = x_2 + x_{m1}$ и $x_b = 0,5x_l + x_{m2}$, причем для однофазного КЗ $x_k = x_2 + x_0$, для двухфазного КЗ $x_k = x_2$, а для двухфазного замыкания на землю

$$x_k = \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0}.$$

Как известно, звезда может быть преобразована в эквивалентный треугольник (рис. 25, б), стороны которого будут представлены следующими индуктивными сопротивлениями:

$$\left. \begin{aligned} x'_c &= x_a + x_b + \frac{x_a x_b}{x_k}; \\ x_E &= x_a + x_k + \frac{x_a x_k}{x_b}; \\ x_U &= x_b + x_k + \frac{x_b x_k}{x_a}. \end{aligned} \right\}$$

Индуктивные сопротивления x_E и x_U , подключенные непосредственно к э.д.с. E и напряжению U , не влияют на значение активной мощности генератора в аварийном режиме и могут быть отброшены.

Весь поток активной мощности генератора направляется через индуктивное сопротивление x'_c , связывающее э.д.с. генератора с напряжением приемника U , которое при этом можно рассматривать как эквивалентное индуктивное сопротивление системы в аварийном режиме. В этих условиях характеристика мощности генератора, очевидно, будет иметь вид:

$$P = \frac{EU}{x'_c} \sin \delta,$$

$$\text{где } x'_c = x_a + x_b + \frac{x_a x_b}{x_k} = x_c + \frac{(x_2 + x_{m1})(0,5x_l + x_{m2})}{x_k}.$$

Зависимость мощности от угла имеет синусоидальный характер, но амплитуда ее меньше, чем при нормальном режиме, так как знаменатель в выражении (2) больше, чем в (1). Обе синусоиды приведены на рис. 26.

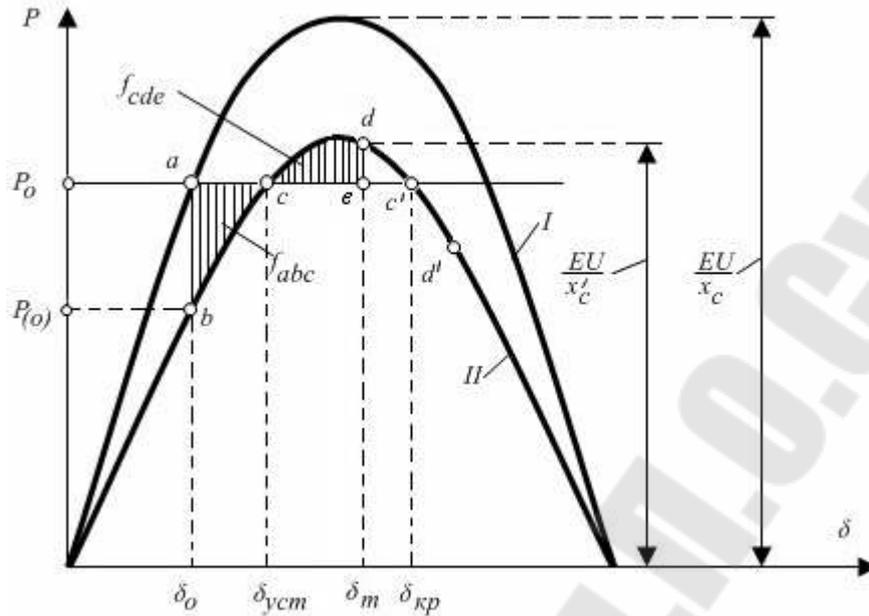


Рис. 26. Анализ колебаний по правилу площадей

Отдаваемая генератором мощность и угол между э.д.с. E и напряжением U при нормальном режиме обозначены соответственно через P_0 и δ_0 . В момент КЗ в связи с изменением параметров схемы происходит переход с одной характеристики мощности на другую, и так как вследствие инерции ротора угол δ мгновенно измениться не может, то отдаваемая генераторами мощность уменьшается до значения $P_{(0)}$, определяемого углом δ_0 на кривой II. Мощность первичных двигателей электростанции вследствие запаздывания регуляторов турбин остается при этом неизменной и равной P_0 .

В результате на валу машины возникает некоторый избыточный момент, обусловленный избытком мощности $\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)}$. Под влиянием этого момента ротор машины начинает ускоряться, увеличивая угол δ . В дальнейшем процесс протекает качественно так же, как и при внезапном отключении нагруженной цепи.

С изменением угла δ отдаваемая генераторами мощность начинает увеличиваться и избыточный ускоряющий момент падает. В точке c (рис. 26) избыток мощности равен нулю, относительная же скорость ротора v достигает здесь максимума, и ротор по инерции проходит дальше. Теперь отдаваемая мощность становится уже больше мощности первичных двигателей, избыточный момент меняет свой знак, и ротор начинает тормозиться.

В период торможения генератор покрывает избыток отдаваемой мощности за счет избыточной кинетической энергии, запасенной им в

период ускорения. В некоторой точке d , отвечающей углу, при котором запас избыточной кинетической энергии ротора иссякнет, относительное перемещение ротора прекратится, и так как в этой точке имеется избыточный тормозящий момент, начинается относительное движение ротора в обратном направлении. Пройдя по инерции точку c и достигнув минимального угла отклонения, ротор останавливается в своем относительном движении и затем снова начинает ускоряться. После нескольких колебаний с постепенно затухающей амплитудой относительное движение ротора прекратится и его положение будет определяться точкой c , являющейся точкой установившегося режима на новой характеристике мощности. Если бы ротор при первом отклонении прошел угол $\delta_{кр}$, соответствующий мощности P_0 на падающей ветви характеристики II , то избыточный момент вновь изменил бы свой знак и сделался бы снова ускоряющим. С дальнейшим увеличением угла ускоряющий момент стал бы нарастать и генератор выпал бы из синхронизма.

Приведенные на рис. 26 характеристики дают возможность определить максимальное отклонение угла ротора и установить, сохраняет ли система устойчивость. Действительно, ординаты заштрихованных площадок (рис. 9) представляют собой избыток мощности $\Delta P = P_0 - P$, создающий избыточный момент того или иного знака. Значение избыточного момента

$$\Delta M = \Delta P / \Omega,$$

где Ω - угловая скорость вращения ротора.

При качании генератора Ω непрерывно изменяется, однако это изменение весьма невелико сравнительно с синхронной угловой скоростью Ω_0 . С достаточной точностью значение Ω можно считать постоянным и равным Ω_0 . Ошибка в значении момента лежит при этом в пределах 1-1,5%. Подставляя вместо Ω синхронную скорость Ω_0 , получаем:

$$\Delta M = \Delta P / \Omega_0 = \Delta P,$$

так как в системе относительных единиц $\Omega_0 = 1$.

Таким образом, избыточный момент в относительных единицах может быть принят численно равным избытку мощности ΔP .

Рассматривая лишь относительное движение ротора и работу, совершаемую в этом относительном движении, можно принять, что при перемещении ротора на бесконечно малый угол $d\delta$ избыточный момент совершает элементарную работу, равную $\Delta M d\delta$. При отсут-

вии потерь вся эта работа идет на изменение кинетической энергии ротора (в его относительном движении).

В рассматриваемом случае избыточный момент сначала ускоряет вращение ротора, и работа, совершаемая в период ускорения при перемещении ротора от δ_0 до $\delta_{уст}$, равна:

$$A_{уск} = \int_{\delta_0}^{\delta_{уст}} \Delta M d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{уст}} \Delta P d\delta = f_{abc},$$

где f_{abc} представляет собой заштрихованную на рис. 26 площадку abc . Таким образом, кинетическая энергия, запасенная ротором в период его ускорения, равна площадке f_{abc} . Эту площадку мы назовем площадью ускорения.

После того как ротор пройдет точку своего установившегося положения на новой характеристике мощности, избыточный момент меняет свой знак и начинает тормозить вращение ротора. Изменение кинетической энергии в период торможения при перемещении ротора от $\delta_{уст}$ до δ_m равно:

$$A_{торм} = \int_{\delta_{уст}}^{\delta_m} \Delta M d\delta = \int_{\delta_{уст}}^{\delta_m} \Delta P d\delta = f_{cde},$$

Площадка f_{cde} может быть названа площадью торможения.

В период торможения ротор возвращает запасенную им ранее избыточную кинетическую энергию. Когда вся запасенная ротором избыточная энергия будет израсходована, т.е. когда работа торможения $A_{торм}$ уравновесит работу ускорения $A_{уск}$, относительная скорость становится равной нулю, поскольку кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости. В этот момент ротор останавливается в своем относительном движении и достигнутый им при этом угол δ_m является максимальным углом отклонения ротора машины. Таким образом, для определения угла δ_m оказывается достаточным равенство $A_{уск} + A_{торм} = 0$ или $f_{abc} + f_{cde} = 0$.

Уравнение показывает, что при максимальном угле отклонения площадь торможения должна быть равна площади ускорения и, следовательно, задача сводится к тому, чтобы найти положение точки d , удовлетворяющее этому условию (рис. 26), что может быть сделано графически.

Максимально возможная площадь торможения на рис. 26 равна площадке f_{cde}' . Если бы эта площадь оказалась меньше площади ускорения f_{abc} , то система выпала бы из синхронизма. Отношение возмож-

ной площади торможения к площади ускорения $K_d = f_{cdc} / f_{abc}$ является мерой запаса динамической устойчивости системы и может быть названо коэффициентом запаса динамической устойчивости.

Когда возможная площадь торможения получается меньше площади ускорения, нередко все же оказывается возможным добиться устойчивой работы, достаточно быстро отключив поврежденную цепь. Мощность, которую можно передать по второй, оставшейся в работе цепи (рис. 6), обычно больше, чем та, которую можно передавать по двум цепям при КЗ. Уравнение мощности при отключении поврежденной цепи получает следующий вид:

$$P = \frac{EU}{x_c''} \sin \delta,$$

где $x_c'' = x_2 + x_{m1} + x_l + x_{m2}$.

Эта зависимость дана на рис. 27 в виде кривой III. Кривые I и II представляют собой характеристики при нормальном режиме и при КЗ.

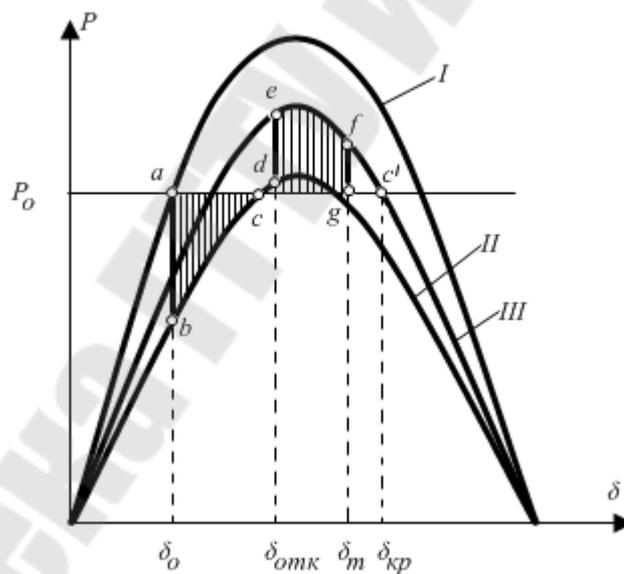


Рис. 27. Определение предельного угла отключения

Как указывалось выше, в момент КЗ передаваемая мощность падает и ротор начинает ускоряться. Пусть в некоторой точке d происходит отключение поврежденной цепи. В момент выключения работа переходит в точку e на кривой III, и в результате отдаваемая генераторами мощность значительно повышается. Благодаря этому максимально возможная площадь торможения (ограниченная кривой $cdefc'$) получается значительно больше, чем при длительном неотключенном КЗ, и это увеличение тем больше, чем раньше происходит отключе-

ние, т.е. чем меньше угол $\delta_{отк}$. Таким образом, быстрая ликвидация аварий может весьма значительно повысить устойчивость системы. Благодаря своей простоте и большому эффекту это средство находит широкое применение и является, по существу, основным мероприятием, служащим для повышения динамической устойчивости.

С помощью рис. 27, пользуясь правилом площадей, можно графически найти предельное значение угла $\delta_{отк}$, при котором нужно произвести отключение поврежденной линии для того, чтобы добиться устойчивой работы. Значение этого угла определяется равенством площади ускорения и возможной площади торможения.

Предельный угол отключения $\delta_{отк}$ легко может быть найден и аналитически. Действительно, приравнивая нулю сумму площади ускорения и максимальной возможной площади торможения, получаем:

$$f_{abcdec} = \int_{\delta_0}^{\delta_{отк}} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{отк}}^{\delta_{кр}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta = 0,$$

где P_{mII} и P_{mIII} — амплитуды характеристик мощности при к. з. и отключении цепи.

Решая интеграл, получаем

$$P_0(\delta_{отк} - \delta_0) + P_{mII}(\cos \delta_{отк} - \cos \delta_0) + P_0(\delta_{кр} - \delta_{отк}) + P_{mIII}(\cos \delta_{кр} - \cos \delta_{отк}) = 0,$$

откуда

$$\cos \delta_{отк} = \frac{P_0(\delta_{кр} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{кр} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}},$$

где все углы выражены в радианах.

Подставляя в δ_0 и $\delta_{кр} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{mIII}}$, нетрудно найти угол $\delta_{отк}$.

Однако для практических целей этого недостаточно. Для того чтобы предъявить к выключателям и к релейной защите те или иные требования в отношении скорости отключения, необходимо знать не угол $\delta_{отк}$, а тот промежуток времени, в течение которого ротор успевает достигнуть этого угла, т.е. так называемое предельно допустимое время отключения КЗ

С помощью правила площадей определить время отключения невозможно, и для этой цели приходится прибегнуть к другому методу анализа динамической устойчивости, а именно к методу последовательных интервалов.

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Метод последовательных интервалов, представляющий собой способ численного решения дифференциальных уравнений, описывающих переходные электромеханические процессы, является наиболее общим методом практического анализа динамической устойчивости. Большим его достоинством является то обстоятельство, что он дает картину протекания процесса во времени и благодаря этому позволяет ввести в расчет такие факторы, влияние которых зависит от времени. Так, например, с помощью метода последовательных интервалов можно установить предельное время отключения КЗ, учесть действие регуляторов возбуждения, изменение реакции якоря во времени и т.д.

Возникающий при КЗ избыток мощности ΔP сообщает ротору некоторое ускорение α . Значение этого ускорения в относительных единицах пропорционально избыточному моменту ΔM и обратно пропорционально постоянной инерции T_J : $\alpha = \Delta M / T_J$ или, с учетом того, что при небольших изменениях скорости избыточный момент численно равен избытку мощности $\alpha = \Delta P / T_J$.

Но ускорение α в этом уравнении представляет собой не что иное, как вторую производную от угла по времени, т. е. $\alpha = d^2 \delta / dt^2$. Что же касается величины ΔP , то она представляет собой разность между мощностью первичного двигателя и мощностью, отдаваемой генератором в сеть,

$$\Delta P = P_0 - P_m \sin \delta,$$

где P_m при нормальном режиме, при КЗ и при отключении поврежденной цепи принимает различные значения.

Таким образом, выражение можно записать еще следующим образом:

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

Решение этого уравнения в форме $\delta = f(t)$ дает картину изменения угла во времени и позволяет установить, остается ли машина в синхронизме.

Однако уравнение нелинейно и не может быть решено в общем виде (за исключением частного случая $P_m = 0$). Задачу приходится решать методами численного интегрирования уравнений. Одним из них является рассматриваемый метод последовательных интервалов, с помощью которого задача решается в конечных приращениях. Для этого весь процесс качания машины разбивается на ряд небольших

интервалов времени Δt и для каждого из этих интервалов последовательно вычисляется приближенное значение приращения $\Delta\delta$.

В момент КЗ отдаваемая генераторами мощность падает и возникает некоторый избыток мощности $\Delta P_{(0)}$. Для достаточно малого интервала времени Δt можно допустить, что избыток мощности в течение этого интервала остается неизменным. Тогда по формулам равномерно ускоренного движения нетрудно вычислить приращение скорости машины $\Delta v_{(1)}$ и угла $\Delta\delta_{(1)}$ в течение первого интервала:

$$\Delta v_{(1)} = \alpha_{(0)} \Delta t; \quad \Delta\delta_{(1)} = \alpha_{(0)} \Delta t^2 / 2.$$

Относительная скорость машины в момент КЗ равна нулю, и поэтому относительная скорость $v_{(1)}$ в конце первого интервала равна приращению скорости в течение этого интервала, т. е. $v_{(1)} = \Delta v_{(1)}$.

Ускорение α_0 может быть вычислено:

$$\alpha_0 = \Delta P_0 / T_J,$$

следовательно,

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{\Delta t^2}{T_J} \frac{\Delta P_{(0)}}{2};$$

угол и время выражены в радианах.

В практических расчетах удобнее пользоваться выражением угла в градусах

$$\Delta\delta_{(град)} = \frac{360 f}{\omega_0} \Delta\delta_{(рад)}$$

и времени в секундах

$$t_{(с)} = t_{(рад)} / \omega_0.$$

Используя, что $T_{J(рад)} / \omega_0 = T_{J(с)}$, получаем:

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{360 f \Delta t^2}{T_J} \frac{\Delta P_{(0)}}{2},$$

где угол выражен в градусах, а время и постоянная инерции в секундах.

Обозначая далее $k = \frac{360 f \Delta t^2}{T_J}$, получаем окончательно:

$$\Delta\delta_{(1)} = k \frac{\Delta P_{(0)}}{2}.$$

Зная приращение угла в первом интервале, можно найти абсолютное значение угла в конце этого интервала времени или, что тоже самое, в начале следующего интервала: $\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}$.

Для нового значения угла $\delta_{(1)}$ можно определить избыток мощности $\Delta P_{(1)}$ во втором интервале времени по формуле

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_m \sin \delta_{(1)}$$

или воспользоваться для этой цели характеристикой мощности в зависимости от угла. Избыток мощности $\Delta P_{(1)}$ создает во втором интервале пропорциональное ему ускорение $\alpha_{(1)}$. При вычислении приращения угла $\Delta \delta_{(2)}$ в течение второго интервала (а также и всех последующих) помимо действующего в этом интервале ускорения $\alpha_{(1)}$ необходимо учесть также уже имеющуюся в начале интервала относительную скорость ротора:

$$\Delta \delta_{(2)} = v_{(1)} \Delta t + \frac{\alpha_{(1)} \Delta t^2}{2} = v_{(1)} \Delta t + k \frac{\Delta P_{(1)}}{2}.$$

Значение скорости $v_{(1)}$, получаемое из формулы $v_{(1)} = \alpha_{(0)} \Delta t$, является несколько неточным, так как в действительности избыток мощности $\Delta P_{(0)}$ и ускорение $\alpha_{(0)}$ не являются постоянными в течение первого интервала времени, а несколько изменяются. Более точные результаты можно получить, если предположить, что ускорение в первом интервале было равно среднему значению

$$\alpha_{(0)} = (\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}) / 2.$$

Тогда относительная скорость

$$v_{(1)} = \alpha_{(0)cp} \Delta t = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2} \Delta t.$$

Подставляя это значение $v_{(1)}$ в уравнение (19), находим:

$$\Delta \delta_{(2)} = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2} \Delta t^2 + \frac{\alpha_{(1)} \Delta t^2}{2} = \frac{\alpha_{(0)} \Delta t^2}{2} + \alpha_{(1)} \Delta t^2$$

или

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + k \Delta P_{(1)}$$

и т.д.

Теперь можно найти угол $\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)}$, вычислить избыток мощности ΔP_2 и приращение угла $\Delta \delta_{(3)}$:

$$\Delta \delta_{(3)} = \Delta \delta_{(2)} + k \Delta P_{(2)}$$

и т.д.

Если в начале некоторого k -го интервала происходит отключение поврежденной цепи, то избыток мощности внезапно изменяется от некоторой величины $\Delta P'_{(k-1)}$ до величины $\Delta P''_{(k-1)}$ (рис. 28). При вычислении приращения угла в первом интервале после момента отключения значение избытка мощности определяется как среднее из $\Delta P'_{(k-1)}$ и $\Delta P''_{(k-1)}$ т.е.

$$\Delta\delta_{(k)} = \Delta\delta_{(k-1)} + k \frac{\Delta P'_{(k-1)} + \Delta P''_{(k-1)}}{2}.$$

В дальнейших интервалах можно снова пользоваться. Значение интервала времени Δt при ручном счете принимается обычно равным 0,05 с. Если можно ожидать, что амплитуда колебаний будет невелика, то эта цифра без большого ущерба для точности может быть повышена до 0,1 с.

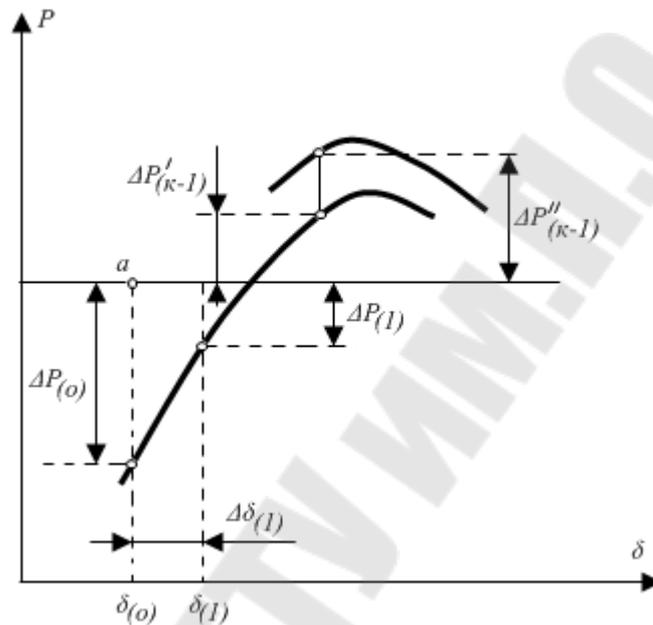


Рис. 28. Зависимости избытков мощности от угла δ при КЗ и его отключении

Расчет методом последовательных интервалов ведется до тех пор, пока угол δ не начнет уменьшаться или пока не будет ясным, что угол беспрестанно возрастает, т.е. что машина выпадает из синхронизма.

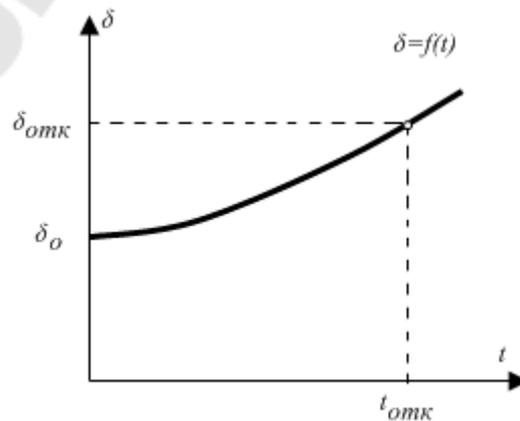


Рис. 29. Определение предельного времени отключения КЗ по $\delta_{отк}$ и зависимость $\delta(t)$.

Метод последовательных интервалов можно применять совместно с правилом площадей. Выше мы указывали, что с помощью этих двух методов можно найти максимально допустимое время отключения КЗ. Для этого, пользуясь правилом площадей, определяют предельный угол $\delta_{отк}$, при котором должно произойти отключение КЗ, и с помощью метода последовательных интервалов вычисляют время, в течение которого ротор достигает угла $\delta_{отк}$. Этот промежуток времени и дает предельное время отключения (рис. 29).

Практическая часть

В практической части лабораторной необходимо рассчитать и найти предельный угол и время отключения КЗ в простейшей системе (рис. 6), проанализировать, как влияет на статическую и динамическую устойчивость электропередачи место КЗ. Начертить схему замещения системы электропередачи для доаварийного, послеаварийного режимов и режима КЗ. Для расчета следует воспользоваться файлом-шаблоном Lr5.mcd. Исходные данные для расчета приведены в приложении 1.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема электропередачи и исходные данные.
4. Схема замещения для различных режимов работы (нормального, послеаварийного и режима КЗ).
5. Основные результаты расчетов.
6. Характеристики мощности и график изменения угла δ во времени.
7. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под динамической устойчивостью?
2. В чем отличие понятий динамическая и статическая устойчивость?
3. Что понимается под качанием синхронной машины?

4. Каковы причины качания синхронных машин?
5. Какой вид КЗ наиболее опасен для устойчивой работы системы электропередачи?
6. Начертите схему электропередачи при различных типах КЗ.
7. В какой точке линии электропередачи КЗ наименее опасно для устойчивой работы электропередачи?
8. Покажите на графике, построенном для своего варианта, площадь ускорения и торможения.
9. Покажите на графике, построенном для своего варианта, максимальный угол отклонения ротора машины.
10. Покажите на графике, построенном для своего варианта, максимально возможную площадь торможения.
11. Как определяется коэффициент запаса динамической устойчивости электропередачи в режиме КЗ?
12. Что понимается под предельным углом отключения, покажите его на графике, построенном для своего варианта.
13. Для чего применяется правило площадей и метод последовательных интервалов при анализе динамической устойчивости?
14. Что понимается под предельным временем отключения?
15. Чему равно предельное время отключения КЗ для вашего варианта?

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. - 4-е изд. - М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. Пособие. – Новосибирск: НГТУ, М.: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 283 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	
Характеристика мощности и статическая устойчивость генератора без АРВ в простейшей системе	3
Лабораторная работа № 2	
Влияние автоматического регулирования возбуждения генераторов на параметры и статическую устойчивость электропередачи	7
Лабораторная работа № 3	
Построение внешней характеристики	10
Лабораторная работа № 4	
Влияние параметров схемы замещения на характеристики мощности генератора и приемника в сложной системе	17
Лабораторная работа № 5	
Динамическая устойчивость	28
ЛИТЕРАТУРА	51

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу
для студентов специальностей 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
по курсу «Переходные процессы
в электроэнергетических системах»**

Составители: **Токочаков** Владимир Иванович
Рудченко Юрий Александрович
Кротенок Владимир Владимирович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного документа
учебно-методических материалов 21.04.09.

Рег. № 35Е.
E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>