

Лекция 7." Предельный угол отключения короткого замыкания"

Цель: Объяснить на качественных и численных примерах расчет предельного угла отключения короткого замыкания.

Список литературы обязательный:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высш. школа, 1985.- 482с.
2. Гамазин С.И., Семичевский П.И. Переходные процессы с электродвигательной нагрузкой. – М.: МЭИ, 1985.- 270с.

Список литературы дополнительный:

3. Электрические системы. Управление переходными режимами электрических систем./ Под ред. В.А.Веникова. – М.: Высш. школа, 1982. - 247с.
4. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях./ Под ред. В.А.Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 480с.

План лекции:

1. Понятие о балансе вырабатываемой и потребляемой электроэнергии.
2. Оценка потенциальной и кинетической энергии накапливаемой ротором генератора.
3. Критическая величина угла системы.

Определение размаха колебаний и проверка устойчивости при внезапном изменении электрической нагрузки генератора.

Изменение режима генератора (отраженное в изменении взаимной проводимости y_{12} - связи генератора и шин нагрузки, или изменении напряжения на шинах нагрузки, или изменении его э. д. с. E) приводит к перемещению точки, определяющей режим системы, с характеристики I на характеристику II при $b = b_0$. Возникающий небаланс ΔP_0 между электрической и механической мощностями (моментами) приводит к

появлению ускорения $a = \frac{\Delta P}{T_J}$ и относительному перемещению ротора (рис.

7.8, а) со скоростью $\Delta \omega$, где $\Delta \omega = \sqrt{\frac{2}{T_J} \int_{\delta} \Delta P d\delta}$.

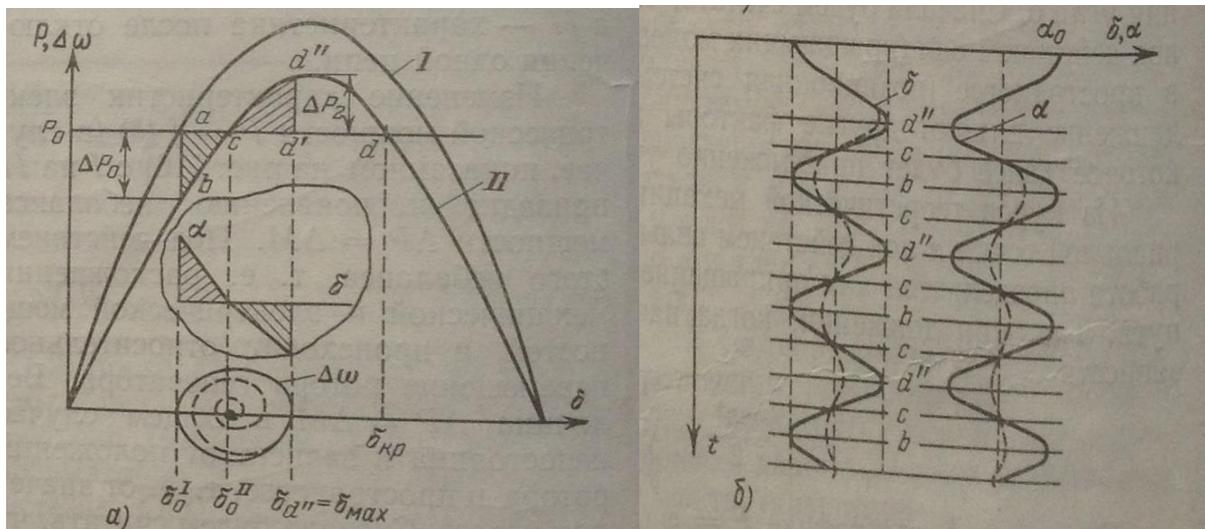


Рис. 7.8. Изменение режима при толчке: а-угловые характеристики системы; $\Delta \omega = \varphi(\delta)$; $\alpha = f(\delta)$; б-изменения угла и ускорения во времени в процессе качаний; ————— консервативная система; — — — — — реальная система, имеющая рассеяние энергии (диссипативная система).

При значении $\delta = \delta_0^{II}$ электрическая и механическая мощности оказываются равными. Однако наличие кинетической энергии $A_{\text{уск}}$, запасенной ротором в процессе его ускорения, пропорциональной площади абса, приводит к тому, что ротор движется далее, проходя точку с и увеличивая угол δ . При движении от точки "с" к точке "d" ротор испытывает торможение под действием *электрической мощности, которая при этом становится больше механической*. Кинетическая энергия, запасенная при ускорении, $A_{\text{уск}}$, «расходуется» (переходит в потенциальную) во время движения ротора от точки с к точке d". В точке d" вся кинетическая энергия, полученная при ускорении, оказывается «израсходованной», при этом скорость $\Delta \omega$ становится равной нулю. Однако движение не может прекратиться, так как потенциальная энергия достигла максимума и на ротор действует избыточный электрический момент (мощность), пропорциональный ΔP_0 . Под действием этого момента ротор снова подходит к точке с, обладая кинетической энергией $A_{\text{торм}}$ (полученной при торможении на участке d"с). Величина этой энергии пропорциональна площади cd"d'с. В

точке скорость ω и кинетическая энергия равны нулю и процесс начинается сначала (под действием ΔP_0).

Представление процесса на фазовой плоскости.

Изображение скорости $\Delta\omega$ в зависимости от угла δ оказывается весьма полезно для качественного, а иногда и количественного анализа. В рассматриваемом случае характеристика скорости $\Delta\omega = f(\delta)$ имеет вид замкнутой кривой (рис. 7.8, а). Характер процесса во времени выглядит так, как это показано на рис. 7.8, б. Характеристики (рис. 7.8) построены без учета рассеяния энергии. Наличие рассеяния энергии (потери, зависящих от скорости) приводит к тому, что качания с каждым циклом становятся все меньше по амплитуде, и характеристика скорости $\Delta\omega = f(\delta)$ представляется в виде спирали, показанной (рис. 7.8, а) пунктиром; колебания угла $\delta = f(t)$ также постепенно затухают, и угол стремится к установившемуся значению δ_0^{II} . Следует обратить внимание на то обстоятельство, что учет активных сопротивлений ($P_{11} \neq 0$) не меняет характера движения $\delta = f(t)$: оно остается незатухающим. Затухание вызывают только потери, зависящие от скорости.

Энергия, запасенная ротором в процессе ускорения, математически выражается как интеграл $\int_{\delta_0^I}^{\delta_0^{II}} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде площади $abca$. Энергия торможения математически выражается, как интеграл $\int_{\delta_0^{II}}^{\delta_0^I} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде площадки $cd'd'c$. Эти площадки, соответствующие энергии, запасенной при торможении и ускорении, в дальнейшем будем называть соответственно *площадками ускорения и торможения*.

Правило площадей в общем виде формулируется так:

$$A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}} \text{ или } \int \Delta P d\delta = 0 \quad (7.7)$$

При всех относительных перемещениях ротора сумма кинетической A и потенциальной Π энергии остается неизменной:

$$A + \Pi = \text{const} \quad (7.8)$$

Способ площадей, следовательно, основан на предположении, что рассеяние энергии не происходит, т. е. что *рассматриваемая* система консервативна*.

Для *качественного анализа* метод площадей может применяться и в тех случаях, когда система не консервативна, т. е. когда при относительном движении системы происходят изменения ее полной энергии. В рассмотренном выше случае, когда в точке d' кинетическая энергия $A=0$ и скорость $\Delta\omega = 0$, на ротор действовал некоторый тормозящий момент ΔP_2 .

Можно себе представить случай, когда энергия, израсходованная при торможении, точно уравнивается энергией, полученной при ускорении, в точке d. Эту точку можно назвать критической, так как при малейшем увеличении угла δ сверх $\delta_d = \delta_{кр}$ на ротор будут действовать ускоряющие силы. На рис. 7.9 представлен такой случай: площадки ускорения и торможения уравнились как раз тогда, когда ротор дошел до точки d. В точке d кинетическая энергия и скорость $\Delta\omega$ стали равны нулю; силы действующие на ротор (ускорение α), также равны нулю. Теоретически – это положение равновесия. Однако это положение неустойчиво, так как малейшее отклонение ротора приводит к появлению тормозящего или ускоряющего момента. Начинается либо торможение ротора с последующим возвращением его к устойчивой точке равновесия c, либо прогрессирующее нарастание угла и выпадение из синхронизма. Выпадение из синхронизма при достижении критической точки d характеризуется постепенным нарастанием угла. Такой вид нарушения устойчивости иногда называют *апериодическим нарушением устойчивости*, в отличие от колебательного нарушения устойчивости, или самораскачивания будут рассмотрены далее. Как указывалось выше, случай, когда система находится на границе устойчивости при переходе от режима I к режиму II, так и ее нарушение.

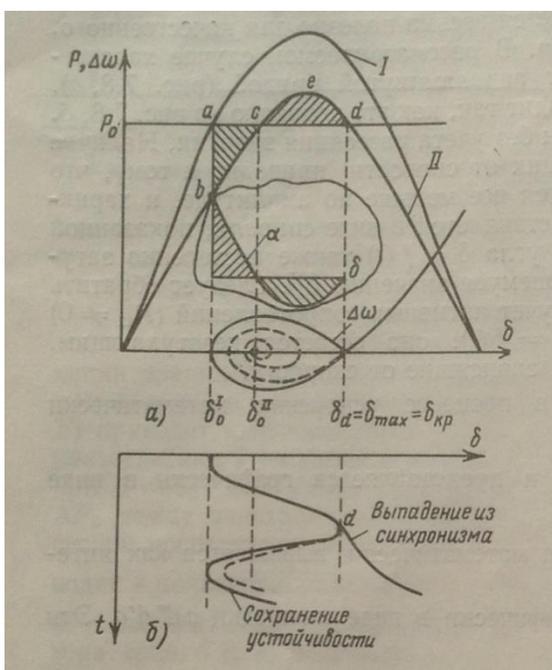


Рис. 7.9. Предельный случай при нарушении режима системы: а- угловые характеристики $P = f(\delta)$; характеристики $\Delta\omega = \varphi(\delta)$ и $\alpha = f(\delta)$; б-возможное изменение угла δ во времени.

Уверенность в устойчивости перехода будет, очевидно, в случаях, когда при колебаниях ротор не достигнет критического положения (точка d), в котором может начаться прогрессирующее увеличение угла. Такой заведомо устойчивый переход был показан на рис. 7.8. вся энергия, полученная при ускорении ротора (площадка $A_{\text{уск}} = abca$), уравновешивалась энергией торможения (площадка $A_{\text{торм}} = cd'd'c$) до подхода к критической точке. Площадка возможного торможения $A_{\text{возм.торм}}$ здесь больше, чем площадь ускорения, на $\Delta A = A_{\text{возм.торм}} - A_{\text{уск}}$. По знаку ΔA можно определить, устойчив или нет данный переход.

Величина ΔA служит количественным показателем запаса устойчивости:

$$K = \frac{A_{\text{возм.торм}}}{A_{\text{уск}}} = \frac{A_{\text{уск}} + \Delta A}{A_{\text{уск}}} = 1 + \frac{\Delta A}{A_{\text{уск}}}. \quad (7.9)$$

Таким образом, при $K > 1$ переход устойчив; при $K = 1$ имеет место критический случай; при $K < 1$ переход неустойчив.

Установленные соотношения нетрудно выразить математически. Согласно рис. 7.8 имеем

$$\Delta A = A_{\text{возм.торм}} - A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0^I}^{\delta_{\text{кр}}} P_m^{II} \sin \delta \, d\delta. \quad (7.10)$$

Здесь

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \delta_0^{II} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_m^{II}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_m^I \sin \delta_0^I}{P_m^{II}}. \quad (7.11)$$

Очевидно, что

$$\frac{P_m^{II}}{P_m^I} = \frac{P_0 - \Delta P_0}{P_0} = 1 - \beta_0,$$

где $\beta_0 = \frac{\Delta P_0}{P_0}$ показывает величину изменения мощности в долях нагрузки, имевшейся в исходном режиме.

С учетом этого соотношения (7.11) запишется так

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin \frac{\sin \delta_0^I}{1 - \beta_0}.$$

На рис. 7.10 представлено изменение электрических характеристик системы, приводящее к выпадению из синхронизма, т. е. к нарушению динамической устойчивости. Площадка торможения $sedc$ слишком мала, и, хотя рост скорости на участке $c-d$ приостанавливается, угол продолжает увеличиваться. Если бы амплитуда характеристики Π была меньше, чем P_0 (кривая Π'), то рост скорости происходил бы непрерывно, как это показано на рис. 4.10, а пунктирной линией. Изменение угла в этом случае показано на рис. 7.10,6 также пунктирной линией.

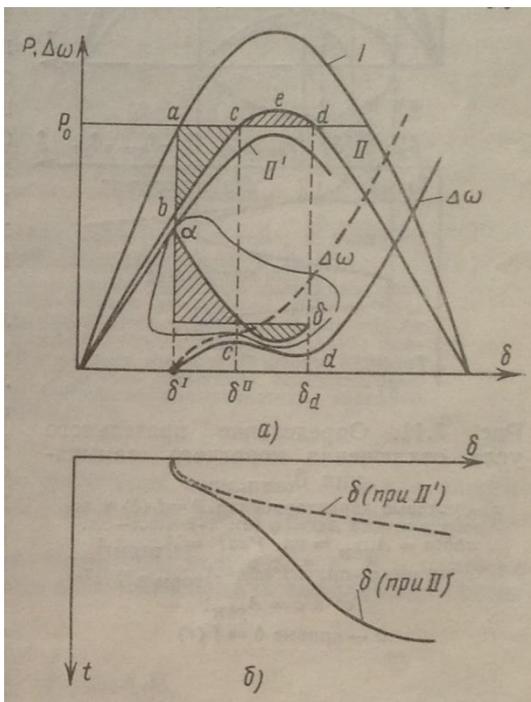


Рис. 7.10. Характеристики системы при изменении режима, приводящем к устойчивости:

а- угловые характеристики $P = f(\delta)$;
характеристики $\Delta\omega = \varphi(\delta)$ и $\alpha = f(\delta)$;
(пунктиром показан характер изменения $\Delta\omega$ при $P_m^{II'} < P_0$;

б- изменение угла во времени (пунктиром показан характер изменения угла в случае характеристики Π')

Определение предельного угла отключения короткого замыкания.

Для этого случая на рис. 7.11а представлены три характеристики режимов: нормального I, аварийного III, в котором сопротивление связи x

изменено с учетом условий аварии, послеаварийного II, т. е. режима, в котором участок системы, потерпевший аварию, отключен.

Приравниваем площадку ускорения площадке возможного торможения. Тогда, выражая угол в радианах, а мощность в относительных единицах, можем записать

$$\int_{\delta_0^I}^{\delta_{откл.пр}} (P_0 - P_m^{III} \sin \delta) d\delta = - \int_{\delta_{откл.пр}}^{\delta_{пр}} (P_0 - P_m^{III} \sin \delta) d\delta.$$

Полученное выражение после преобразования

$$P_0(\delta_{откл.пр} - \delta_0^I) + P_m^{III}(\cos \delta_{откл.пр} - \cos \delta_0^I) + P_0(\delta_{кр} - \delta_{откл.пр}) + P_m^{II}(\cos \delta_{кр} - \cos \delta_{откл.пр}) = 0$$

Откуда

$$\cos \delta_{откл.пр} = \frac{P_0(\delta_{кр} - \delta_0^I) + P_m^{II} \cos \delta_{кр} - P_m^{III} \cos \delta_0^I}{P_m^{II} - P_m^{III}}. \quad (7.12)$$

При трехфазном коротком замыкании или полном разрыве передачи характеристики примут вид, показанный на рис. 7.11, в. В формуле (7.12) при определении предельного угла в этих случаях следует принять $P_m^{III} = 0$.

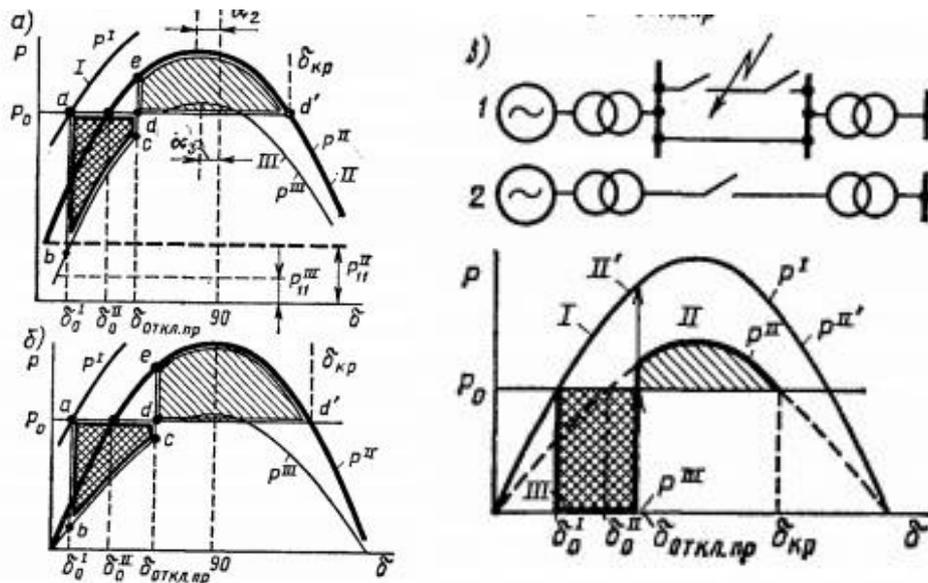


Рис.7.11. Характеристики системы при изменении режима, приводящем к неустойчивости.

a — угловые характеристики мощности $P=f(\delta)$ для системы, имеющей активное сопротивление; $abcd$ — площадка ускорения ($A_{уск}$); $ded'd$ — площадка торможения $A_{торм}$; o — то же, при отсутствии активного сопротивления. В случаях a и b значения $A_{уск} = A_{торм}$; o — характеристики $P=f(\delta)$ при трехфазном к. з. в начале передачи (схема 1) и при полном разрыве передачи (схема 2); III — трехфазное к. з. у шин станции для схемы или разрыв одноцепной передачи; II — послеаварийный режим (для схемы a) после к. з. при отключенной цепи; II' — послеаварийный режим (для схемы b) после обратного включения (послеаварийный режим совпадает с исходным), площадка торможения в этом случае не показана; I — нормальный режим