

ЛЕКЦИЯ 6. УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель: Объяснить на примерах понятия статической и динамической устойчивости .

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. Определения трех видов устойчивости.
2. Понятие о статической устойчивости электроэнергетической системы.
3. Понятие о динамической устойчивости электроэнергетической системы.

ОСУЩЕСТВИМОСТЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Режим, который должен установиться после возмущения и последующего переходного процесса, требует для своего осуществления баланса вырабатываемой и потребляемой мощностей.

Любой режим должен быть устойчивым.

Различают три вида устойчивости:

1. Статическая устойчивость – способность системы восстанавливать исходный режим или режим близкий к исходному при малых возмущениях и малых изменениях скорости вращения ротора генератора;
2. Динамическая устойчивость – способность системы восстанавливать исходный режим или режим близкий к исходному при больших возмущениях и малых изменениях скорости;
3. Результирующая устойчивость – способность системы восстанавливать исходный режим или режим близкий к исходному при больших возмущениях и больших изменениях скорости;

ПОНЯТИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

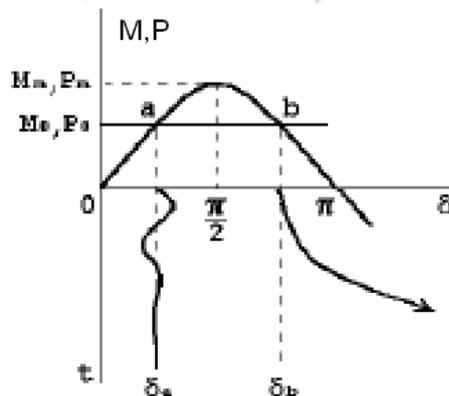


Рис.

Как отмечалось, нормальный (устойчивый) режим работы генератора в системе возможен при балансе механического и электромагнитного моментов M_t и M турбины и генератора, или, что тоже самое, при балансе развиваемых турбиной и генератором мощностей P_t и P . Формально такой режим может существовать при значениях углов δ_a и δ_b , соответствующих точкам a и b пересечения характеристик момента (мощности) турбины и генератора (рис.5.1).

При малом возмущении режима, соответствующего точке a , появившееся отклонение угла δ от значения δ_a будет с течением времени затухать через колебательный переходный процесс (рис.5.1), так как на валу генератора и турбины при $\delta \gg \delta_a$ появляется результирующий момент, стремящийся приблизить угол δ к значению δ_a . Так в случае $\delta > \delta_a$ результирующий момент носит тормозящий характер ($M_t < M$) и приводит к уменьшению угла δ , а при $\delta < \delta_a$ - ускоряющий ($M_t > M$) и приводит к увеличению угла δ . В результате генератор возвращается в нормальный режим работы, характеризуемый углом $\delta = \delta_a$, что и доказывает обладание генератором статической устойчивостью.

При малом же возмущении режима, соответствующего точке b , появившееся отклонение угла δ от значения δ_b в конечном счете с течением времени будет прогрессирующе возрастать (рис.5.1), так как на валу генератора и турбины при $\delta > \delta_b$ появляется момент ускоряющего характера ($M_T > M$), стремящийся еще больше увеличить это отклонение, а следовательно увеличить и угол δ . В результате генератор не возвращается в нормальный режим работы, характеризуемый углом $\delta = \delta_b$, и потому такой режим не может быть признан статически устойчивым.

Из проведенных рассуждений вытекает формальный прямой критерий статической устойчивости генератора и системы в целом, заключающийся в необходимости выполнения условия

$$dP / d\delta > 0. \quad (5.1)$$

Это условие выполняется при $P_0 < P_m$, имеющим место при углах $\delta < \pi/2$.

Степень статической устойчивости генератора характеризуется коэффициентом запаса статической устойчивости, который рассчитывается по выражению

$$K_z = (P_m - P_0) * 100 / P_0, \% \quad (5.2)$$

Рассчитать статическую устойчивость - это значит определить условия при которых она обеспечивается, в частности, для генератора Γ - определить предел мощности P_m и допустимое значение коэффициента запаса K_z .

Действующие нормы устанавливают необходимый коэффициент запаса K_z для нормальных режимов равным 20%, для послеаварийных режимов 8%.

Для обеспечения устойчивости система должна работать с некоторым запасом, характеризуемым коэффициентом запаса K_z , т.е. при таких параметрах режима, которые отличаются в $K_z > 1$ раз от критических – тех, при которых может произойти нарушение устойчивости.

При исследовании устойчивости электрических систем часто применяют упрощенные практические критерии устойчивости, которые устанавливают только наличие устойчивости или неустойчивости данного режима.

Исследование характера колебаний, требующее учета инерционных постоянных элементов системы, обычно проводится без определения изменений параметров режима во времени и имеет своей целью только ответ на вопрос: не получит ли система нарастающих колебаний после малых толчков? Метод исследования основывается на известной из курса механики теории малых колебаний (согласно этой теории, нелинейная исследуемая система линеаризуется), в аппарат которой вносят ряд специфических дополнений.

Природа неустойчивости всегда обусловлена энергетическими свойствами системы. В установившемся режиме энергия W_{Γ} , поступающая в систему извне расходуется в нагрузку W_n и идет на покрытие потерь ΔW . При каком-либо возмущении, проявляющемся в изменении на ΔP

определяющего режим параметра Π , этот баланс нарушается. Если свойства системы таковы, что расход энергии $W = W_H + \Delta W$ после возмущения будет происходить более интенсивно, чем увеличение энергии, которую может дать внешний источник ΔW_G , то новый режим не может быть обеспечен энергией и в системе должен восстанавливаться прежний установившийся режим. Такая система будет оценена как устойчивая. Математически условие сохранения устойчивости будет

$$\frac{\Delta W}{\Delta \Pi} > \frac{\Delta W_G}{\Delta \Pi}$$

или в дифференциальной форме

$$\frac{\partial(W_G - W)}{\partial \Pi} < 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial \Delta W_G}{\partial \Pi} < 0$$

Режим устойчив, если производная от избыточной энергии по определяющему параметру Π отрицательна.

Критерий устойчивости простейшей электрической системы, режим которой зависит только от изменений угла, имеет вид $\frac{\partial P_\Sigma}{\partial \delta} < 0$

или при мощности турбины $P_G = P_T = \text{const}$ (пост.) $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$. Это и есть практический критерий статической устойчивости.

Литература: [5], § 5.1 – 5.3;

Для простейшей модели электроэнергетической системы состоящая из генератора, канала передачи электроэнергии в виде продольного сопротивления и шин системы постоянного напряжения, справедлива формула для активной мощности протекаемой от генератора к шинам постоянного напряжения.

$$P = U \frac{E \sin \delta}{x}$$

По этой формуле мощность передаваемая от генератора в систему может изменяться по синусоидальному закону от угла δ . Канал передачи электроэнергии заданный сопротивлением x , определяет максимальную мощность от генератора и $P_{\max} = \frac{U_e}{x}$.

Реальная мощность протекающая по каналам электроэнергии определяется мощностью турбины, которая вырабатывает электроэнергию. В первом приближении мощность турбины не зависит от угла δ . Угол входит в выражение для ЭДС генератора, которую в комплексной форме можно записать

$$E = |E| \cdot e^{i(\omega t + \delta)}$$

При этом угол δ является углом сдвига по фазе напряжения генератора относительно напряжения на шинах постоянного напряжения, которую можно представить в следующем виде:

$$U = |U| e^{-i\omega t} \frac{d\delta}{d\delta}$$

$$\delta_2 2\pi$$

$$M_0^I = M_p$$

$$M^{II} \neq M_T$$

$$\Delta M = M_T - M^{II} = T_j \frac{d\Delta\omega}{dt} \varphi(t)$$

$$\Delta\omega = f(t)$$

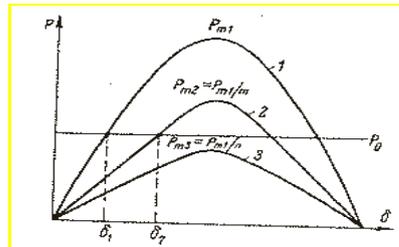
$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega$$

$$U = |U| e^{i\omega t}$$

Метод комплексных амплитуд позволяет при решении задач о расчете параметров режима опускать множитель $e^{-i\omega t}$ в выражения для U и I в системе.

Угол δ в выражении для ЭДС генератора обусловлен явлением опережающего движения якоря генератора относительно синусоидального напряжения на шинах постоянного напряжения.

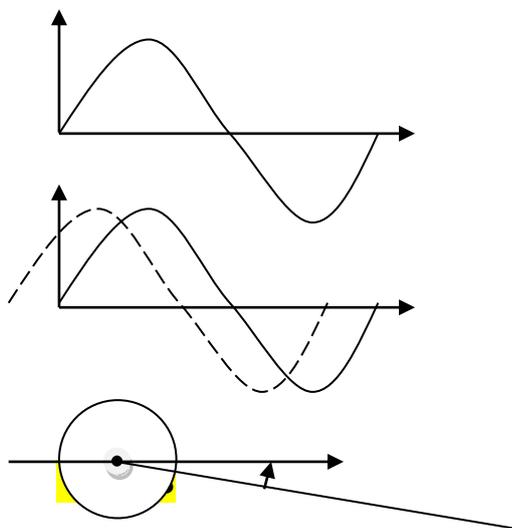
Установившаяся величина угла δ определяется балансом электрической мощности вырабатываемой турбиной независимо от угла δ , а мощность потребляемой системы зависит от угла δ , следовательно обе эти мощности изображаются прямой линией и синусоидальной линией в координатах P и δ



Так как выполняется баланс потребляемой и произведенной электроэнергии угол δ может принимать два значения: δ_1 и δ_2 .

δ_1 является точкой статической устойчивости установившегося режима, δ_2 - точка статической не устойчивости установившегося режима. Это вызвано следующей аргументацией: при расположении системы в точке δ_1 любое малое изменение потребляемой мощности в сторону увеличения сопровождается увеличением угла δ , что вызывает увеличение тормозящих сил со стороны статора обмотки трансформатора по которому протекает ток большей величины с магнитным полем ротора что приводит к возврату ротора в исходное положение угла δ . Если вследствие случайных причин мощность нагрузки уменьшается, то это приводит к уменьшению угла δ_1 , но вследствие электромагнитного взаимодействия между полями

взаимодействия ротора и статора, появляется нескомпенсированный механический момент. Превышение этих моментов приводит к ускорению ротора, и увеличению угла δ_1 и возврату его в начальное положение. Угол δ_2 - является точкой статической неустойчивости.



Понятия об устойчивости режима формулируют исходя из практических соображений, в соответствии с чем формируется практический критерий устойчивости, который для простейшей электрической системы имеет вид

$$\frac{dp}{d\delta} > 0$$

ПОНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Статическая устойчивость является необходимым условием существования нормального режима электрической системы, но не предопределяет ее способность продолжить работу при резких нарушениях режима. Эта сторона проблемы, как отмечалось выше, затрагивает круг вопросов, относящихся к динамической устойчивости.

Расширим представления о последней с учетом проведенных рассуждений. В качестве причины, приводящей к резкому нарушению режима электрической системы (рис.2.1), рассмотрим отключение одной цепи линии Л. Схема замещения электрической системы для этого случая приведена на рис.6.1.



Рис.6.1

Отключение одной цепи линии Л означает увеличение результирующего сопротивления X в схеме замещения (рис.2.3). Это уменьшает возможные значения тока I_c , определяемой им индукции B_c магнитного поля и

зависящий от последнего электромагнитный момент генератора. Такое снижение возможностей генератора по созданию электромагнитного момента отражается характеристикой момента МП, располагающейся ниже характеристики момента МI исходного режима (рис.6.2).

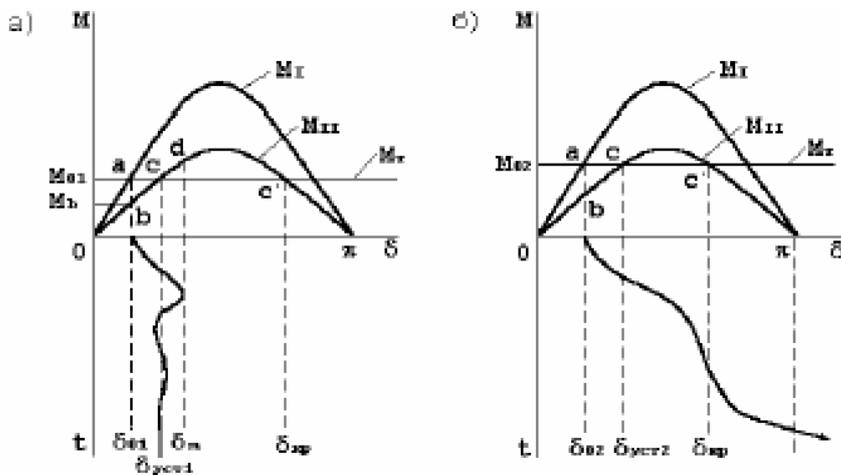


Рис.6.2

Предположим, что в исходном режиме (точка а) турбина создает момент M_{01} (рис.6.2а). При отключении цепи линии Л угол δ из-за инерционности ротора генератора сразу не изменится, а вот электромагнитный момент мгновенно снизится до значения M_b , которое определяется точкой b на характеристике момента МП и меньше неизменного и вращающего момента турбины $M_T = M_{01}$. Это вызовет ускорение ротора генератора, увеличение его скорости, и как следствие прогрессирующий рост угла δ (рис.6.2а). Процесс увеличения скорости ротора закончится в момент достижения углом δ значения $\delta_{уст}$, при котором восстанавливается баланс вращающего момента турбины и тормозящего электромагнитного момента генератора (точка с). Но увеличение угла δ после достижения им значения $\delta_{уст}$ будет продолжаться, так как скорость ротора генератора ω_f больше синхронной ω_s , но происходит оно будет менее интенсивно вследствие превышения тормозящего электромагнитного момента генератора МП над вращающим моментом турбины M_T (рис.6.2). Если скорость ω_f ротора генератора снизится до синхронной ω_s , то угол δ , достигнув значения δ_m (точка d), начнет уменьшаться, и дальнейшее его изменение будет происходить, как правило, в форме затухающих колебаний вокруг значения $\delta_{уст}$ (рис.6.2а). Колебательность процесса объясняется как механической инерцией ротора генератора, так и возникновением при неравенстве $\delta \neq \delta_{уст}$ результирующего момента на валу генератора, стремящегося приблизить угол δ к значению $\delta_{уст}$. В результате установится новый нормальный режим работы генератора и системы в целом. В этом случае можно говорить об обладании генератором и системой динамической устойчивости при отключении цепи линии Л. Если же скорость ω_f ротора генератора при торможении не успеет сравняться с синхронной ω_s , то есть угол δ достигнет критического значения $\delta_{кр}$, соответствующего точке c' пересечения характеристик момента тур-

бины и генератора (рис.6.2), то с этого момента режим уменьшения скорости генератора сменится режимом ее увеличения из-за преобладания при $\delta > \delta_{кр}$ вращающего момента турбины M_T над тормозящим электромагнитным моментом M_{II} генератора. Это вызовет прогрессирующий рост угла δ (рис.6.2б) и последующее его непрерывное увеличение, то есть проворачивание ротора генератора Γ относительно ротора генератора Γ с приемной системы, означающее нарушение устойчивости. Такое развитие процесса возможно, например, если в момент отключения линии L генератор развивал большую активную мощность, то есть его турбина создавала момент $M_{02} > M_{01}$, и на этапе торможения ротора генератора (между точками c и c' пересечения характеристик моментов) действующий на него результирующий момент был недостаточен для снижения его скорости до синхронной. В этом случае можно говорить об отсутствии динамической устойчивости у генератора и системы в целом при отключении цепи линии L .

Рассчитать динамическую устойчивость - это значит определить условия, при которых она обеспечивается, в частности, в рассмотренном случае для генератора Γ , это значит определить, например, ту предельную мощность, развивая которую генератор сохранит устойчивость при отключении одной цепи линии L .