

**Лекция №9. Мероприятия по повышению устойчивости
электроэнергетической системы**

**Цель: изучить мероприятия, которые повышают устойчивость
электроэнергетической системы.**

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. Улучшение характеристик основных элементов электрических систем**
- 2. Дополнительные устройства для улучшения устойчивости.**
- 3. Контрольные вопросы**

Ряд элементов, предназначенных для повышения надежности, увеличения пропускной способности, улучшения условий эксплуатации и работы основных элементов и всей системы в целом, можно назвать дополнительными устройствами. Аналогичное условное деление можно провести и в отношении мероприятий по улучшению устойчивости и качества переходных процессов. Их можно разделить на *основные*, изменяющие параметры основных элементов, и *дополнительные*, заключающиеся в установке дополнительных устройств.

Дополнительные мероприятия их эффективность должны учитываться при проектировании электропередачи. Только тщательно взвесив технико-экономическую эффективность и проведя сопоставление стоимости, технических и эксплуатационных показателей дополнительных устройств, можно провести рациональное проектирование.

Особой группой являются эксплуатационные операции или режимные мероприятия, которыми может быть улучшена устойчивость, повышена надежность работы или сокращено время ненормального режима. Эти операции могут производиться персоналом вручную или автоматически.

Таблица 1.

Наименование мероприятий	Улучшает устойчивость			
	Статическую		Динамическую	
<i>Основные мероприятия, изменяющие параметры оборудования</i>	Нормальный режим	Послеаварийный режим	Синхронную	результатирующую
А. Генераторы				
Уменьшение реактивных сопротивлений	да	да	да	нет
Увеличение механической постоянной инерции	косвенно	Да	Да	косвенно
Применение быстродействующей системы управления	да	да	да	да
Применение регуляторов возбуждения сильного действия	да	да	да	да
Б. Электропередачи				
Повышение напряжения электропередачи	да	да	да	нет
Расщепление проводов на каждой фазе на несколько параллельно	Да	да	да	нет

идущих				
Применение защиты и выключателей с увеличенной скоростью отключения короткого замыкания	Нет	нет	да	да
Дополнительные мероприятия				
Сооружение переключательных пунктов на электропередачах	нет	да	да	косвенно
Заземление нейтралей трансформаторов через активное и реактивное сопротивление	нет	нет	да	да
Поперечная компенсация с помощью:				
А) Синхронных компенсаторов на промежуточных подстанциях	да	да	Да, но значительно меньше, чем статическую.	
Б) шунтовых компенсаторных батарей	Повышает, но значительно меньше, чем синхронные компенсаторы			
В) Управляемых конденсаторов и подмагничиваемых реакторов	да	да	да	да
Автоматическая аварийная разгрузка	нет	нет	да	да

генераторов				
Автоматическое электрическое торможение	нет	нет	да	да
Мероприятия режимного характера				
Отключение части генераторов послеаварийном режиме	нет	да	да	да
Трехфазное и пофазное АПВ	нет	да	да	да
Давление системы на несинхронно работающие части и ресинхронизация	нет	да	да	да
Распределение нагрузки между станциями с учетом требований улучшения устойчивости и качества переходных процессов	Частично влияет на все виды			
Автоматическое отключение части потребителей, автоматическая разгрузка при снижении частоты и напряжения	нет	да	да	нет
Выбор схемы электрической системы с учетом	Частично влияет на все виды			

требований улучшения устойчивости и качества переходных процессов	
----------------------------------------------------------------------------------	--

При рассмотрении описанных ниже мероприятий не следует упускать обстоятельства, что их влияние на режимы системы в целом и ее отдельные переходные процессы в ряде случаев могут быть противоречивыми. При выборе улучшающих мероприятий весьма ярко проявляется то несомненное, но часто упускаемое из вида обстоятельство, что инженер не должен и не может ориентироваться на готовые формулы и универсальные решения, что здесь совершенно необходим творчески подход к анализу, одновременное рассмотрение комплекса явлений и обязательна технико-экономическая оценка.

Улучшение характеристик основных элементов электрических систем

Реактивное сопротивление генераторов. Этот параметр является важным фактором, влияющим на устойчивость систем и пропускную способность электропередач.

При отсутствии автоматического регулирования возбуждения или при применении регулирования с зоной нечувствительности, на статическую устойчивость влияет синхронное сопротивление X_d , на динамическую переходное сопротивление X_d' и постоянная инерции T_J .

Протекание процессов ресинхронизации и самосинхронизации, а также условия работы в асинхронном режиме определяются наличием и конструкцией демпферных обмоток и эквивалентных им цепей, которые находят отражение в параметрах X_d'' , X_q'' .

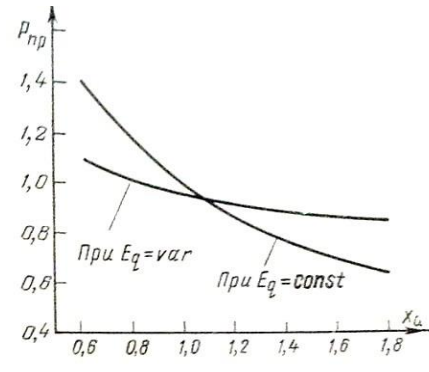


Рис. 13.1. Характер изменения передаваемой мощности от времени реактивного сопротивления.

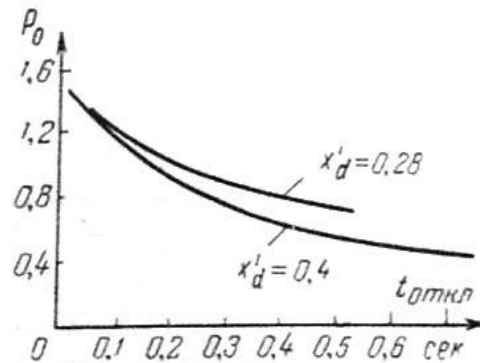


Рис. 13.2. Влияние на предельную передаваемую по условиям динамической устойчивости мощность времени отключения короткого замыкания и переходного сопротивления.

Рассматривая влияние изменения параметров на статическую и динамическую устойчивость электропередачи, необходимо различать два случая: 1) генераторы без регулирования возбуждения или с обычным регулированием; 2) генераторы с сильным регулированием. В последнем случае эффективность улучшения параметров значительно снижается.

В случае работы нерегулируемых генераторов (наличие автоматического регулирования возбуждения) на длинную линию влияние уменьшения сопротивления на статическую устойчивость электропередачи очевидно из простейшего соотношения:

$$P_{up} = \frac{E_q \cdot U}{x_d + x_c} = \frac{E_q \cdot U}{x_d \left(1 + \frac{x_c}{x_d}\right)}$$

где x_c – сопротивление системы;

P_{up} – предельно передаваемая мощность, характер изменения которой при изменении x_d

В случае применения регуляторов возбуждения пропорционального типа, поддерживающих постоянство ЭДС $E_q = E'$, зависимость $P_{up} = f(x_d)$

$$P_{up} = \frac{E_q \cdot U}{x_d \left(1 + \frac{x_c}{x_d}\right)}$$

Влияние изменения сопротивления X_d на динамическую устойчивость электропередачи сводится к повышению амплитуды динамической характеристики. Эффект уменьшения реактивности генератора очень сильно зависит от скорости отключения короткого замыкания: чем медленнее оно отключается, тем больший эффект дает уменьшения реактивностей генератора. Весьма сильно сказываются на характере переходных процессов параметры систем возбуждения: потолочное напряжение и постоянная времени T_e .

Потолочное напряжение возбuditеля. Это напряжение заметно влияет на предел передаваемой мощности. Увеличение потолочного напряжения возбuditеля с 2 до 5 дает примерно такой же эффект, как и уменьшение реактивности генераторов в 1,5 раза.

Весьма существенно и понижение постоянной времени возбuditеля, т.е. переход с $T_e=0,5$ к $T_e=0,1$ при времени отключения короткого замыкания около 0,1 сек позволяет увеличить передаваемую мощность примерно на 10%.

Повышение предельно передаваемой по условиям динамической устойчивости мощности с ростом потолка возбуждения тем заметнее, чем меньше постоянная времени обмотки возбуждения возбuditеля. Для более эффективного улучшения динамической устойчивости система регулирования должна обеспечивать высокую скорость подъема возбуждения.

Высокий потолок и большая скорость подъема напряжения необходимы для обеспечения динамической устойчивости; при этом для улучшения устойчивости в первом цикле колебаний не имеет существенного значения наличие зоны нечувствительности.

Для улучшения статической устойчивости и обеспечения работы при углах $>90^\circ$ необходимы отсутствие зоны нечувствительности и непрерывное действие регулятора возбуждения.

Для обеспечения устойчивой работы до предела по линии необходимо осуществить регулирование не только по отклонению регулируемой величины, но и по ее производным; первой, второй, а иногда и третьей.

Для лучшего успокоения возникающих больших колебаний необходимо иметь возможность не только форсировать возбуждение, но и достаточно быстро уменьшать его. Для облегчения процесса ресинхронизации необходимо, чтобы в системе возбуждения при появлении асинхронного хода уменьшался (снимался) ток возбуждения, т.е. происходило гашение поля. При подходе скорости к синхронной система

возбуждения, напротив, должна обеспечивать включение тока возбуждения и его быстрый подъем, стимулирующий переход в синхронный режим.

Составляя единое целое с генератором, система возбуждения должна удовлетворять всем требованиям, вытекающим из упомянутых выше трех режимов.

Постоянная инерция. Влияние постоянной инерции на динамическую устойчивость необходимо рассмотреть с точки зрения влияния на время отключения при заданном угле отключения и на запас динамической устойчивости.

Синхронные компенсаторы. Параметры синхронных компенсаторов, устанавливаемых в конце дальней электропередачи у потребителя, не оказывают особо существенного влияния на устойчивость системы. Желательно, чтобы реактивность этих синхронных компенсаторов была возможно меньшей, с тем чтобы более высоким был их регулирующий эффект.

Вопрос о создании специальных компенсаторов с улучшенными параметрами в основном касается только синхронных компенсаторов, устанавливаемых на промежуточных подстанциях.

Трансформаторы. Параметры, характеризующие трансформаторы (реактивные сопротивления, намагничивающий ток, активное сопротивление и т.д.) с точки зрения переходных электромеханических процессов и предельно передаваемой мощности не являются существенными.

Выключатели. Быстрое отключение коротких замыканий на линиях высокого напряжения имеет первоочередное, решающее значение для улучшения динамической устойчивости. Уменьшение времени отключения короткого замыкания является благоприятным с точки зрения локализации аварии, уменьшение тех опасных явлений, которые могут вызвать токи короткого замыкания с их тепловыми и механическими эффектами отключения короткого замыкания иллюстрируется.

Линии электропередач

Влияние напряжения электропередачи. Напряжение электропередачи существенным образом влияет на ее пропускную способность, в значительной мере определяя возможности передачи.

Выявим влияние напряжения линии электропередачи на ее предельную мощность. Считая, что в состав электропередачи включены генераторы, представленные реактивным сопротивлением $x_r = x_d$ или $x_r = x_{\sigma}$, трансформаторы и линия.

Выразим реактивные сопротивления генераторов, трансформаторов и линии в относительных единицах:

$$x_G = \frac{x_G \%}{100} \cdot \frac{U_{Г.ном}^2 \cdot S_{\delta}}{S_{Г.ном} \cdot U_{\delta}^2 \cdot \left(\frac{1}{K_T}\right)^2}$$

$$x_T = \frac{e_K \%}{100} \cdot \frac{U_{Т.ном}^2 \cdot S_{\delta}}{S_{Т.ном} \cdot U_{\delta}^2}$$

$$x_L = x_L(ом) \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}$$

Примем для упрощения, что базисное напряжение U_{δ} равно номинальному напряжению линии U_L , ном.

Допустим, что трансформаторы работают со средними коэффициентами трансформации. Тогда записанные выше выражения упрощаются

$$x_G = \frac{x_G \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{Г.ном}}$$

$$x_T = \frac{e_K \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{Т.ном}}$$

$$x_L = x_L(ом) \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{Л.ном}^2}$$

Выражение для предела мощности можно записать следующим образом:

$$P_{пр} = \frac{E_q \cdot U}{(x_{d*} + x_{T1} + x_{T2}) + x_L(ом) \frac{S_{\delta}}{U_{Л.ном}^2}} = \frac{E_q \cdot U}{a + \frac{b}{U_{Л.ном}^2}}$$

Где $a = x_{d*} + x_{T1} + x_{T2}$; $b = x_L(ом) S_{\delta}$.

Рассмотрим, как изменяется зависимость $P_{пр}$ при изменении U от 0 до ∞ :

при $U_{Л.ном} \rightarrow 0$ $P_{пр} \rightarrow 0$

при $U_{Л.ном} \rightarrow \infty$ $P_{пр} \rightarrow \frac{E_q \cdot U}{a}$

Характеристика $P_{пр} = f(U_{л.ном})$ при конечных значениях $U_{л.ном}$ лежит в области, ограниченной этими предельными значениями, и имеет вид.

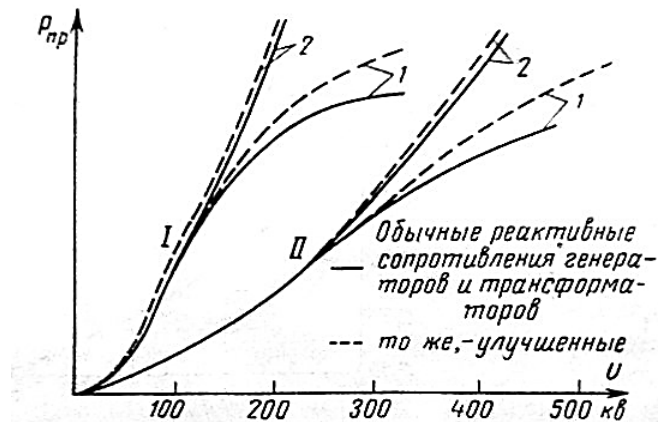


Рис. 13.3. Влияние уменьшения величины номинального напряжения электропередачи при обычных параметрах генераторов и трансформаторов.

I-длина линии 300-400км,

II-длина линии 600-800 км

Улучшение параметров генераторов и трансформаторов и особенно сильное регулирование возбуждения, позволяющее поддерживать напряжение на выводах генераторов или в начале линии неизменным, несколько меняет полученные зависимости, увеличивая эффективность повышения напряжения.

Конструктивные изменения линии электропередачи, снижающие реактивное сопротивление. В настоящее время принят только один путь такого уменьшения-применение расщепленных проводов.

Уменьшение индуктивного сопротивления линии путем расщепления особенно эффективно при дальних электропередачах, где даже при применении весьма высоких напряжений пропускная способность электропередач была бы недостаточной. Такие линии в настоящее время осуществлены.

Переключательные пункты на линиях электропередач. Статическая устойчивость послеаварийного режима, равно как и динамическая устойчивость, существенным образом зависит от выполнения электропередачи (ее схемы) и, в частности от количества переключательных пунктов на ней.

Последовательная (продольная) компенсация реактивного сопротивления линий электропередачи. Значительное уменьшение

реактивного сопротивления электропередачи можно получить, включая последовательно в линию статические конденсаторы.

В простейшем случае, без учета потерь и распределительных параметров линии передачи, имеем эффективность компенсации $x_3 = x_0 l - x_C$,

$$\text{Или } \frac{x_3}{x_0 \cdot l} = 1 - \frac{x_3}{x_0 \cdot l} = 1 - k_{3,к}$$

$$\text{где } k_{3,к} = 1 - \frac{x_3}{x_0 \cdot l}$$

При учете распределенности параметров линии эффективность компенсации зависит от расположения компенсирующих устройств вдоль линии и от величины включенных в линию реакторов, осуществляющих параллельную компенсацию.

Промежуточные синхронные компенсаторы, устанавливаемые на подстанциях, должны обеспечивать поддержание напряжения на линии при изменениях режима электропередачи и тем самым повышать ее устойчивость. Промежуточные синхронные компенсаторы могут быть особенно эффективны при установке на них автоматических регуляторов возбуждения без зоны нечувствительности. В этом отношении продольная компенсация имеет определенные преимущества перед обычными синхронными компенсаторами, даже снабженными регуляторами возбуждения сильного действия, поскольку ее эффективность проявляется мгновенно, влияя на повышение как статической, так и динамической устойчивости.

Дополнительные устройства для улучшения устойчивости.

Сопротивление, заземляющее нейтраль трансформатора, как средство улучшения устойчивости. Если нейтраль трансформаторов заземлить через небольшое сопротивление, не повышающее заметно напряжения на нейтрали, то условия работы изоляции не изменяются, а устойчивость систем при несимметричных коротких замыканиях улучшается.

Увеличение сопротивления аварийного шунта, вводимого в комплексную схему, приводит к уменьшению сброса мощности во время короткого замыкания и к улучшению динамической устойчивости.

Следует иметь в виду, что при замыканиях в конце линии потери мощности в заземляющем сопротивлении ложатся на местные генераторные станции приемной системы, что при небольшой постоянной инерции этих

станций может привести иногда не к улучшению, а к ухудшению устойчивости системы в целом.

Заземление нейтрали через активные сопротивления приводит к повышению устойчивости и при двухфазных замыканиях на землю, хотя и значительно меньшему, чем при однофазных.

Оптимальная величина активных сопротивлений в случае двухфазных замыканий на землю значительно выше, чем при однофазных.

Заземление нейтралей всех трансформаторов через реактивные сопротивления, как правило, менее эффективно, чем заземление через активные сопротивления.

Установка для электрического торможения генераторов во время аварии. Для повышения устойчивости при симметричных КЗ наиболее эффективно включение активных сопротивлений параллельно генераторам или трансформаторам передающей станции.

В этом случае действие нагрузочного сопротивления продолжается и после отключения короткого замыкания, а в ряде случаев может только начинаться после отключения короткого замыкания.

Специальные устройства регулирования турбин. Небаланс мощности ΔP может быть скомпенсирован уменьшением мощности первичного двигателя.

Несмотря на трудности воздействия на первичный двигатель, уже созданы экспериментальные устройства, позволяющие осуществить надлежащее воздействие и привести мощность первичного двигателя в соответствие с изменяющейся электрической мощностью.

Мероприятия режимного характера

Влияние схемы системы. При оценке схемы системы часто оперируют понятием «жесткости» схемы, как одним из важнейших ее свойств. Жесткость в какой-либо узловой точке характеризуется изменением нагрузки, при которой изменение значения и фазы напряжения будет происходить на некоторую определенную величину, принимаемую за единицу.

Жесткость зависит от относительных сопротивлений, связывающих узловые точки системы. Жесткая схема имеет преимущества с точки зрения улучшения статической устойчивости и облегчения работы системы в послеаварийном режиме.

К недостаткам жесткой схемы относится увеличение тока короткого замыкания, в связи с чем, мощность системы может стать больше разрывной мощности выключателей, что недопустимо.

Электрические системы, в которых мощность короткого замыкания начинает превышать разрывную мощность выключателей, приходится секционировать или применять выключатели с большей отключающей способностью.

Таким образом, выбор исходного режима работы системы и схемы ее соединений может существенно влиять на устойчивость.

Схемы работы электрических систем. Схема соединений электрических систем и их отдельных элементов существенным образом влияет на переходные процессы и устойчивость систем.

Схемы дальних электропередач. Эти схемы существенным образом влияют на характер переходных процессов и устойчивость. Их можно разделить на два вида:

1. Транзитные мощные электропередачи, передающие электрическую энергию от какой-либо удаленной станции к потребляющей системе;
2. Межсистемные связи, в которых потоки мощности могут идти как в одном, так и другом направлении, а значения их намного меньше мощности объединяемых систем.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены основные и дополнительные части элементов электрической системы?
2. Перечислите основные мероприятия, изменяющие параметры оборудования.
3. Назовите мероприятия по улучшению устойчивости и качества переходных процессов.
4. Перечислите дополнительные мероприятия, изменяющие параметры оборудования.
5. Запишите формулу соотношения влияния уменьшения сопротивления на статическую устойчивость электропередачи в случае работы нерегулируемых генераторов на длинную линию.
6. Что необходимо для облегчения процесса ресинхронизации электрической системы?

7. Что применяют для полного использования синхронных компенсаторов при работе с отстающим током (при поглощении реактивной мощности)?
8. В каком случае промежуточные синхронные компенсаторы могут быть особенно эффективны?
9. Какие существуют мероприятия режимного характера?
10. Дополнительные устройства для улучшения устойчивости?

