

# Раздел

# 8

## Мероприятия по повышению устойчивости энергосистем

2020

Мероприятия можно классифицировать по 4 основным направлениям:

*1. Конструктивное улучшение параметров основных элементов электроэнергетической системы:*

- снижение синхронного и переходного сопротивления синхронных машин и сопротивления рассеяния асинхронных машин;
- увеличение постоянной механической инерции электрических машин;
- использование демпферных обмоток в синхронных машинах;
- применение асинхронизированных и синхронных машин с продольно-поперечным возбуждением;
- повышение напряжения и снижение индуктивного сопротивления линий электропередачи;
- применение управляемых и сверхпроводящих линий электропередачи;
- уменьшение индуктивного сопротивления трансформаторов и заземление их нейтралей через активное и реактивное сопротивления;
- использование быстродействующих выключателей.



### *2. Дополнительные средства повышения устойчивости:*

- ✓ применение емкостной продольной компенсации индуктивного сопротивления электропередач батареями статических конденсаторов;
- ✓ использование вставок постоянного или переменного тока;
- ✓ установка на подстанциях синхронных и асинхронных компенсаторов, управляемых источников реактивной мощности;
- ✓ использование шунтирующих и токоограничивающих управляемых реакторов;
- ✓ применение электрического или механического торможения генераторов.

### *3. Повышение устойчивости средствами автоматики:*

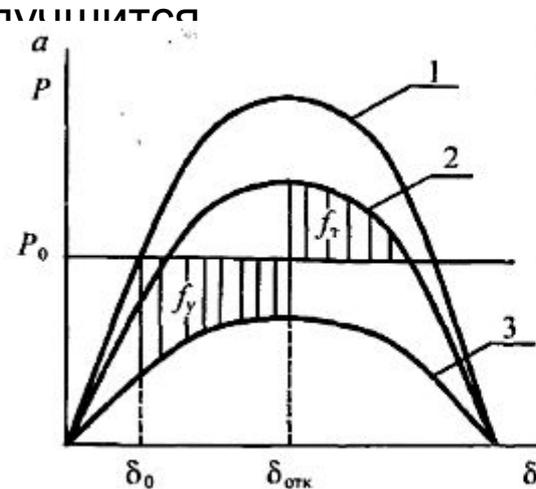
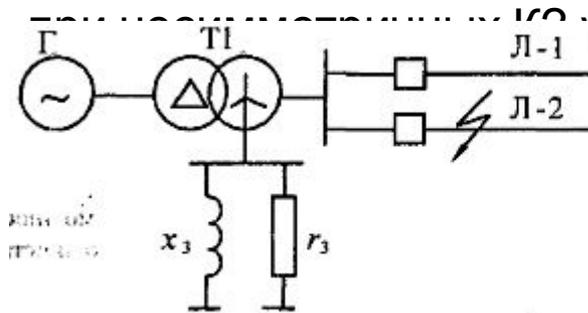
- ✓ применение автоматических регуляторов возбуждения СМ (ПД или СД, комбинированных и т. п.);
- ✓ использование быстродействующих защит и противоаварийной автоматики;
- ✓ применение автоматического регулирования или аварийной разгрузки турбин;
- ✓ использование форсировки возбуждения СМ;
- ✓ использование трехфазного или пофазного автоматического повторного включения оборудования;
- ✓ применение автоматического ввода резерва генерирующей мощности и оборудования;
- ✓ использование устройств ресинхронизации СМ.



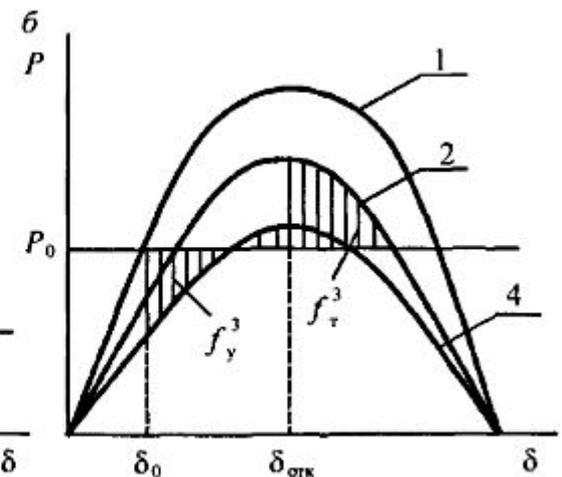
### *4. Мероприятия эксплуатационного характера:*

- ✓ выбор схемы соединения и режима системы с учетом требований устойчивости;
- ✓ обеспечение резервов активной и реактивной мощностей;
- ✓ управление переходными процессами с применением вычислительной техники;
- ✓ непрерывный диагностический контроль состояния оборудования электроэнергетической системы;
- ✓ отключение части синхронных машин в аварийных режимах;
- ✓ регулирование перетоков мощности по линиям электропередачи;
- ✓ отключение части потребителей при возникновении аварийных дефицитов активной и реактивной мощности в системе;
- ✓ разделение системы на несинхронно работающие части и ресинхронизация синхронных машин при возникновении асинхронного хода;
- ✓ использование самозапуска синхронных и асинхронных двигателей;
- ✓ регулирование коэффициента мощности синхронных машин;
- ✓ снижение напряжения у потребителей при возникновении дефицита активной и реактивной мощности;
- ✓ отделение электростанций или части генераторов в аварийных режимах.

**Трансформаторы.** Параметры трансформаторов (сопротивления, намагничивающий ток и т.д.) не оказывают существенного влияния на устойчивость электрических систем. Однако *сопротивления, включенные в нейтраль трансформатора могут повышать динамическую устойчивость ЭЭС.* Например, если сеть с глухозаземленной нейтралью заземлить через небольшое сопротивление, не повышающее напряжения на нейтрали, то условия работы изоляции не изменятся, а динамическая устойчивость системы



глухозаземлен  
ая

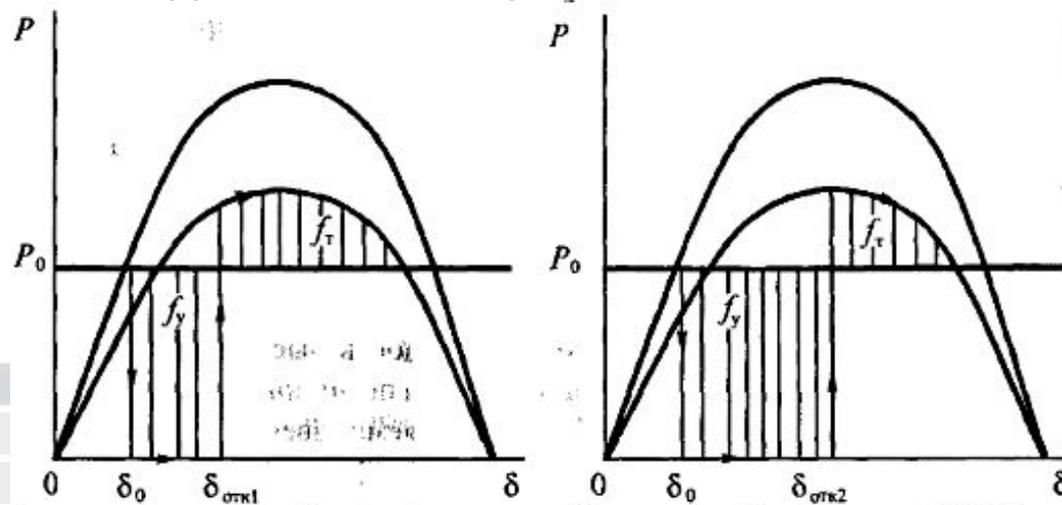


ч/з реактивное  
сопротивление

- 1- исходный режим
- 2- послеаварийный режим
- 3 и 4 - при однофазном КЗ

**Линии электропередачи.** Параметры линий и их номинальное напряжение оказывают существенное влияние на устойчивость системы. Т. к. при увеличении длины ЛЭП возрастает ее реактивное сопротивление, то значение предельной по условиям устойчивости передаваемой мощности уменьшается. Поэтому ограничения по дальности передачи мощности ЛЭП зависят не только от потерь. Мероприятия: расщепление фазных проводов и применение продольной емкостной компенсации (больше для повышения устойчивости двигателей нагрузки)

**Выключатели.** Быстрое отключение КЗ имеет решающее значение для улучшения динамической устойчивости. Уменьшение времени отключения КЗ увеличивает запас динамической устойчивости.



Устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) бывают неуправляемые и управляемые (регулируемые).

УКРМ предназначены для поддержания уровней напряжения в электрических сетях, управления перетоками мощности между энергосистемами, повышения пропускной способности ЛЭП, повышения статической и динамической устойчивости энергосистем. Данные устройства по принципу действия делятся на статические и электромашинные.

К статическим устройствам относятся:

- ✓ батареи статических компенсаторов (БСК),
- ✓ шунтирующие реакторы (ШР),
- ✓ реакторные группы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ), обеспечивающие ступенчатое регулирование реактивной мощности;
- ✓ управляемые шунтирующие реакторы (УШР);
- ✓ статические тиристорные компенсаторы (СТК);
- ✓ статические компенсаторы реактивной мощности, выполненные на базе преобразователей напряжения на современных мощных IGBT транзисторах — СТАТКОМ

К электромашинным устройствам относятся:

- ✓ синхронные компенсаторы (СК),

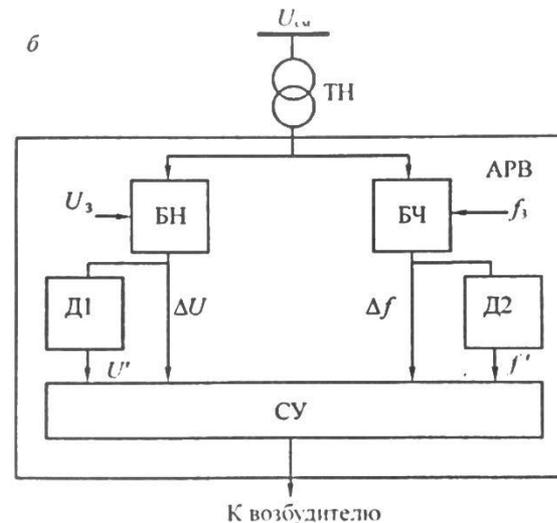
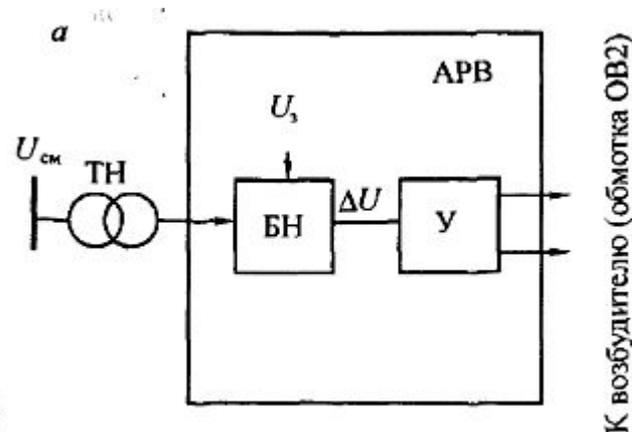


Возбуждение СМ осуществляется посредством автоматических регуляторов возбуждения (АРВ).

Для чего ? :

- обеспечение поддержания требуемого уровня напряжения на зажимах машин или реактивной мощности в установившемся режиме системы;
- повышение статической и динамической устойчивости при возмущениях в электроэнергетической системе;
- увеличение требуемого качества переходных процессов в электроэнергетической системе.

Устройства АРВ подразделяются на 2 типа: пропорционального и сильного действия (АРВ ПД и АРВ СД).





АРВ СД:

Осуществляет регулирование по  $\Delta U$ ,  $U'$ ,  $\Delta f$ ,  $f'$ . Напряжение статора синхронной машины  $U_{CM}$  подводится от ТН к блоку напряжения БН и к блоку частоты БЧ. Блок БН выявляет отклонения частоты, а дифференцирующий элемент (Д1) определяет скорость изменения напряжения  $U'$ . Блок БЧ выявляет отклонения частоты от нормального значения и формирует сигнал  $\Delta f$ . Одновременно дифференцирующий элемент (Д2) определяет скорость изменения частоты  $f'$ . Значения параметров  $\Delta U$ ,  $U'$ ,  $\Delta f$ ,  $f'$  подаются на суммирующий усилитель (СУ).

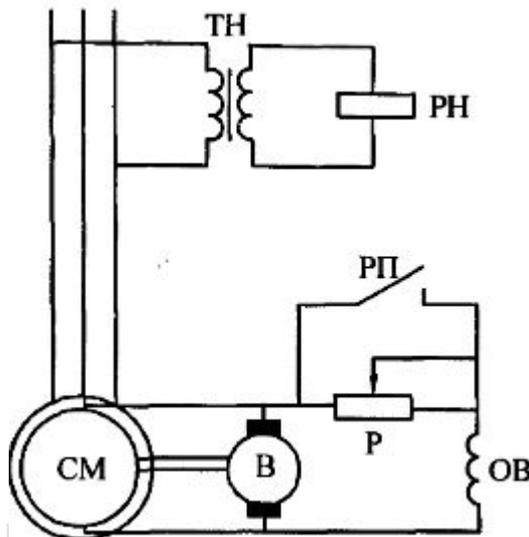
Сигнал с выхода СУ АРВ СД поступает в схему управления тиристорной или бесщеточной систем возбуждения.

**! АРВ СД реагирует на скорость изменения параметров, это позволяет с опережением выявлять характер возникшего переходного процесса и оказывать воздействие на систему возбуждения СМ в самом начале изменения режима. Такая система может поддерживать практически постоянное напряжение на шинах СМ во всех режимах её работы при малых возмущениях. При возникновении больших возмущений в энергосистеме возбуждения, оснащённые АРВ СД, не могут поддерживать постоянного напряжения на шинах СМ. Поэтому в начале переходного процесса**

Применяется для поддержания напряжения в аварийных режимах.

Устройство обеспечивает быстрое повышение напряжения возбуждения до максимально возможного, называемого потолочным значением  $U_f^{\text{п}}$  при значительных снижениях напряжения, вызванных, главным образом, КЗ в электроэнергетической системе. Отношение этого напряжения или тока ротора соответственно к номинальному напряжению или току называют кратностью форсировки

Устройство форсировки возбуждения (УФВ) обычно входит в состав АРВ



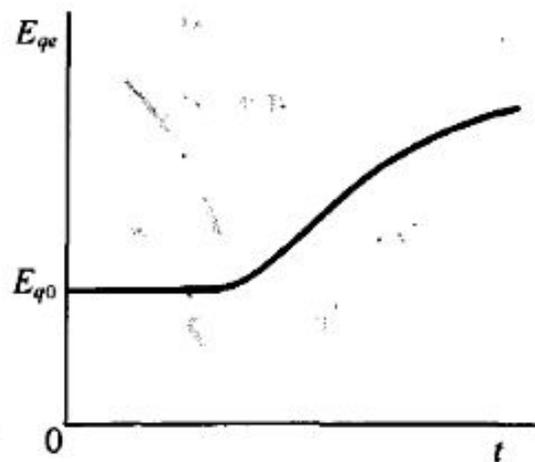
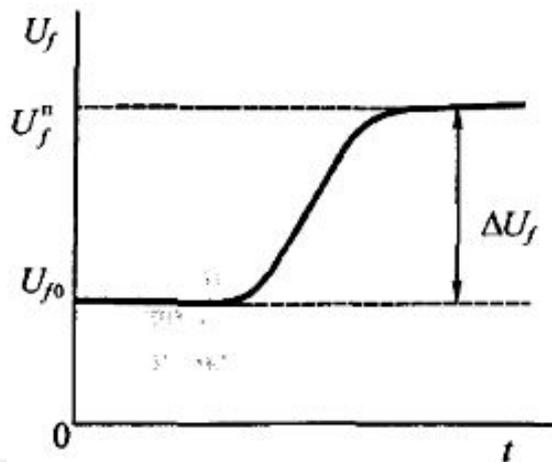
При снижении напряжения до уставки реле РН контактом РП шунтируется реостат Р в цепи обмотки возбуждения возбудителя. При этом ток возбуждения возбудителя увеличивается до максимально возможного значения, а следовательно, и напряжение возбуждения на обмотке ротора синхронной машины нарастает  $U_f^{\text{п}}$  сравнительно быстро до значения по экспоненциальной зависимости

$$U_f = U_f^{\Pi} - \Delta U_f^{-t/T_{св}}$$

$\Delta U_f = U_f^{\Pi} - U_{f0}$  - амплитуда изменения напряжения возбуждения;

$T_{св}$  - постоянная времени системы возбуждения.

Поскольку к обмотке ротора СМ прикладывается максимальное напряжение возбуждения, то ток в ее обмотке, а следовательно, и вынужденная ЭДС синхронной машины, увеличиваются с наибольшей скоростью. Увеличение ЭДС СМ при действии УФВ приводит к соответствующему увеличению амплитуды характеристики мощности в аварийном режиме



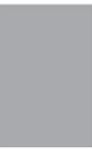
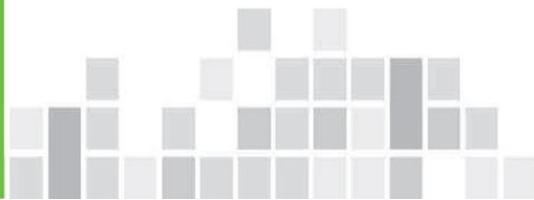
Это позволяет уменьшить площадку ускорения на величину  $\Delta f_y$  увеличить площадку торможения на величину  $\Delta f_T$ , что приводит к повышению динамической устойчивости.



## Форсировка возбуждения синхронных машин

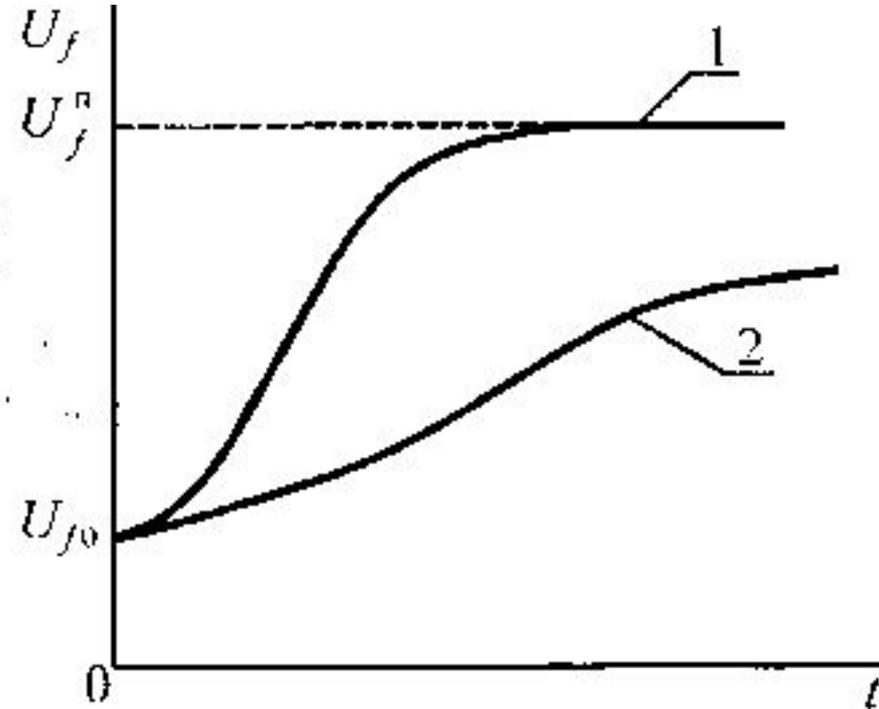
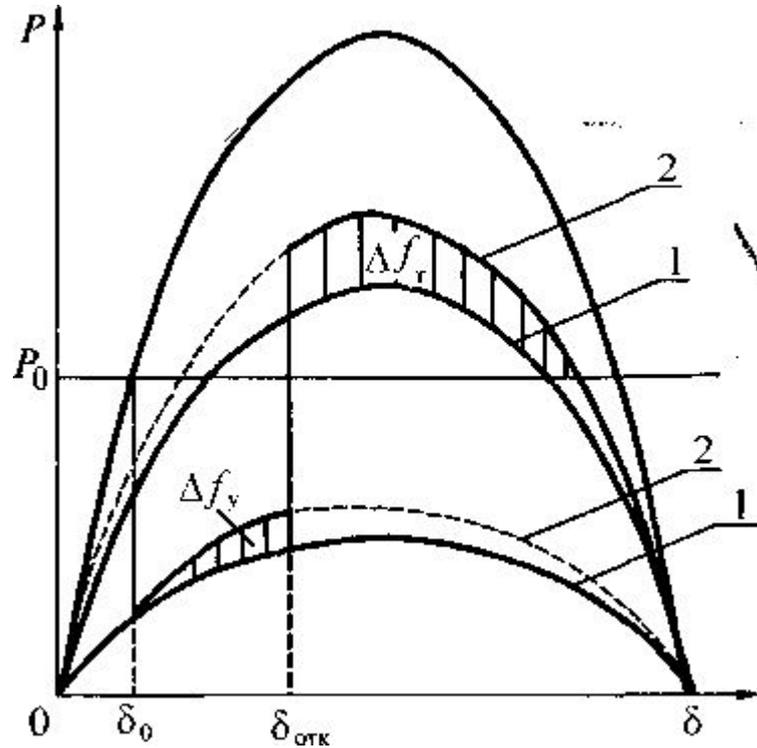
---

- ! степень влияния форсировки возбуждения на динамическую устойчивость зависит от скорости и величины изменения напряжения возбуждения, которые определяются действием систем возбуждения и максимально возможным значением напряжения возбуждения.
- ! для обеспечения высокой скорости увеличения ЭДС все системы возбуждения обязательно должны иметь высокий потолок возбуждения, так как для быстрого увеличения тока в роторе необходима не только высокая скорость изменения напряжения, но и его значение (т.к. ток возбуждения синхронной машины из-за наличия индуктивности обмотки ротора возрастает значительно медленнее  $U_f$ ). Поэтому в аварийных режимах желательно повышение напряжения возбуждения до значения 4-5-кратного от номинального
- ! Таким образом, быстрдействие системы возбуждения и потолочное напряжение возбуждения при действии УФВ определяют значение тока в роторе, а следовательно, и степень изменения синхронной и переходной ЭДС в аварийном режиме.





## Форсировка возбуждения синхронных машин

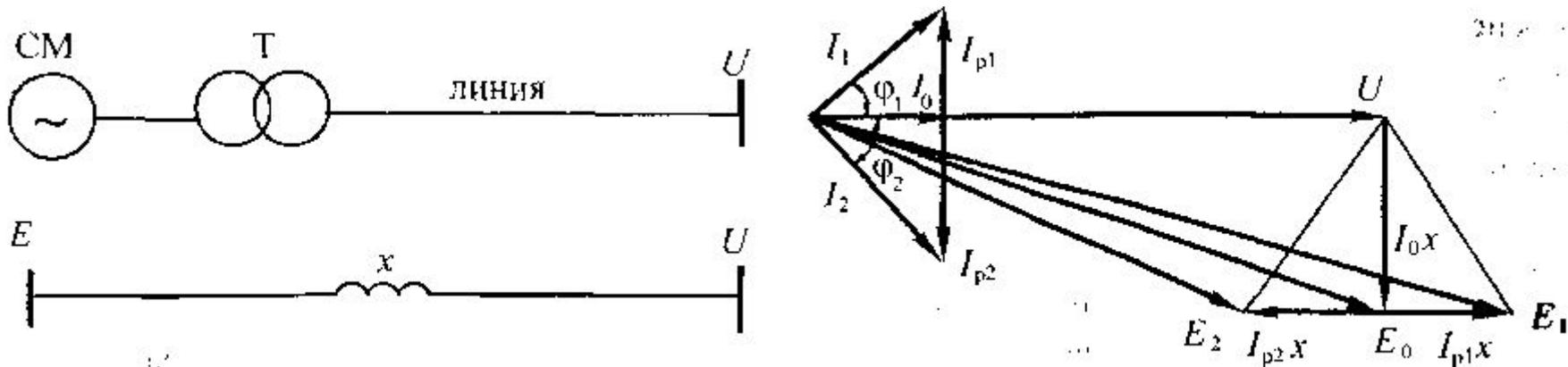




## Регулирование режима реактивной мощности

Выбор величины потребляемой и генерируемой реактивной мощности, а соответственно, и коэффициента мощности синхронной машины в электроэнергетической системе производится, как правило, исходя из требуемого режима напряжения или реактивной мощности на электростанции или в узле нагрузки.

Значение коэффициента мощности является весьма важным с точки зрения обеспечения устойчивости синхронной машины.



Три режима:

- 1 - режим потребления реактивной мощности  $\varphi = \varphi_1, I_n = I_{p1}$
- 2 - режим потребления только активной мощности  $\varphi = 0, I_n = 0$
- 3 - режим выдачи реактивной мощности  $\varphi = \varphi_2, I_n = I_{n2}$



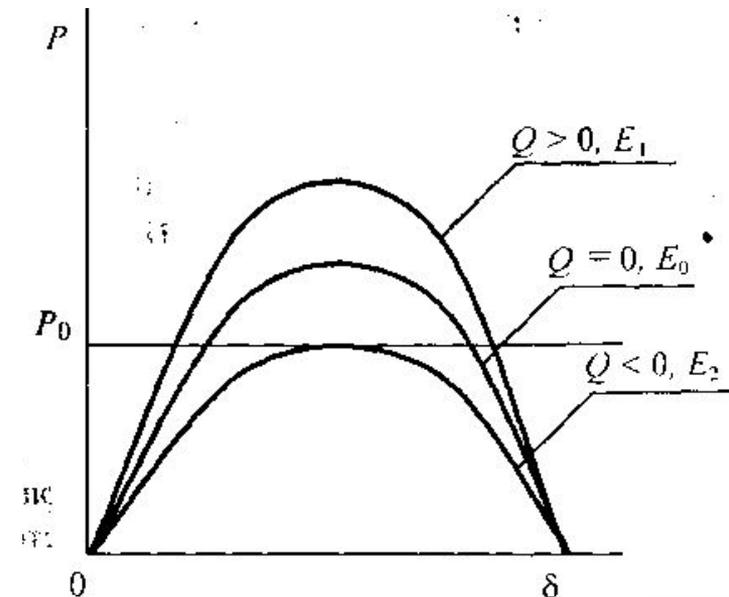
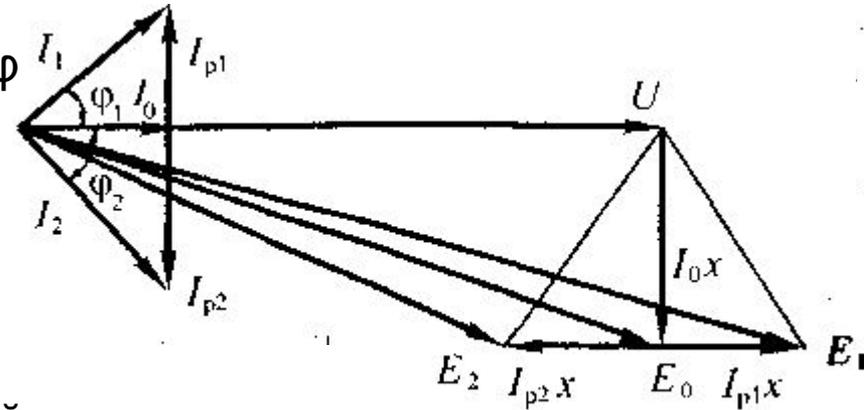
## Регулирование режима реактивной мощности

Из диаграммы видно, что значение ЭДС  $E$  уменьшается при увеличении  $\cos\varphi$  в режиме потребления реактивной мощности. Это приводит к понижению амплитуды характеристики мощности

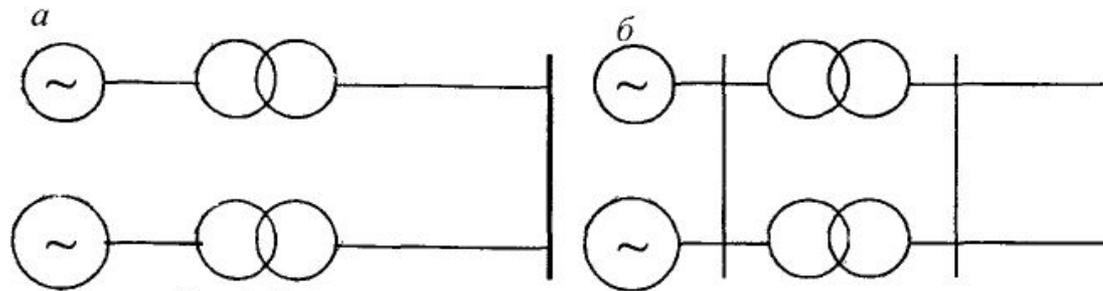
$$P_M = EU/x$$

При увеличении потребления реактивной мощности значение ЭДС  $E$  продолжает уменьшаться и при определенной ее величине достигается предел передаваемой мощности по условиям устойчивости

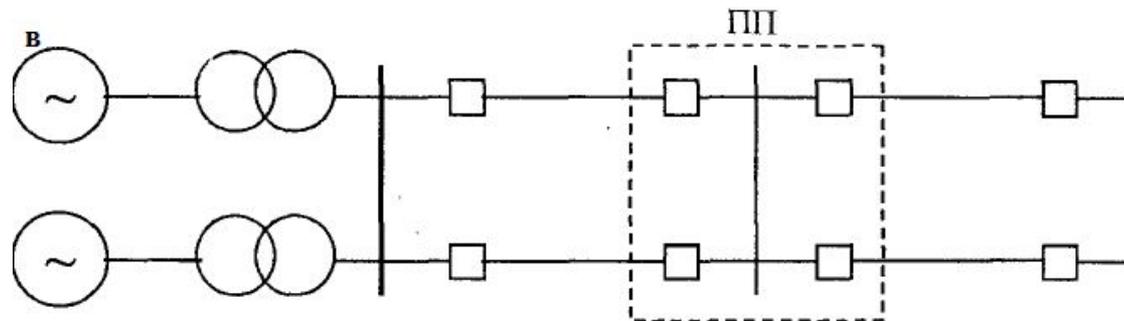
**Режимы потребления реактивной мощности ограничиваются максимально допустимой величиной по условиям статической или динамической устойчивости. Следовательно, для повышения устойчивости СМ следует создавать режимы с максимально возможной величиной генерации реактивной мощности.**



Из многообразия схем электропередач можно выделить две наиболее типовые схемы: блочную (рисунок «а») или связанную (рисунок «б»).



Для повышения пропускной способности связанных электропередач применяются переключательные пункты (ПП)

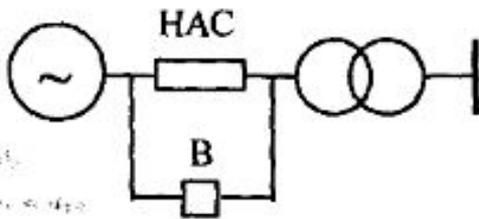


«+» При такой схеме в случае КЗ на линии отключается не вся цепь, а лишь поврежденный участок. Это уменьшает сопротивление электропередачи и увеличивает предельную передаваемую мощность в последовательном режиме.

«-» Схема электропередачи с переключаемыми пунктами (ПП) требует большого количества выключателей, что приводит к значительному увеличению стоимости электропередачи.

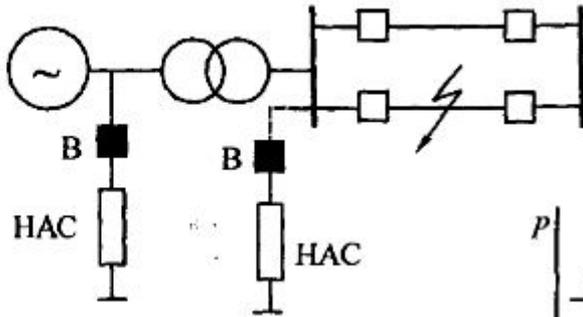
Динамическую устойчивость генераторов при КЗ можно повысить резко увеличив их электрическую мощность в переходном режиме. Это делается путём кратковременного автоматического включения в цепь генераторов специальных нагрузочных активных сопротивлений (НАС), увеличивающих тормозной электромагнитный момент.

Нагрузочные сопротивления можно включать *последовательно и*

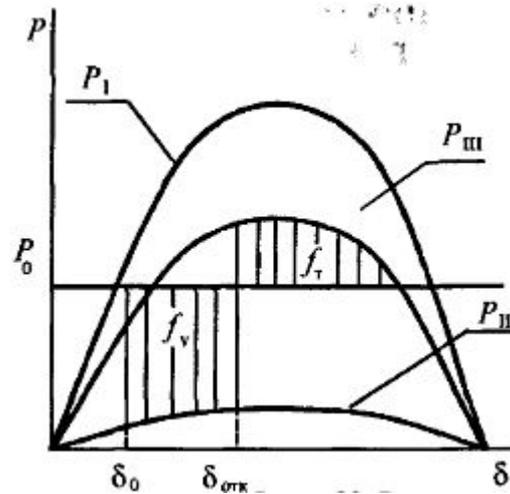


включено последовательно в нейтраль или на входе генераторов, в нормальном режиме они закорачиваются спец. выключателями. При КЗ выключатели отключаются и НАС оказывается включенными в цепь генераторов.

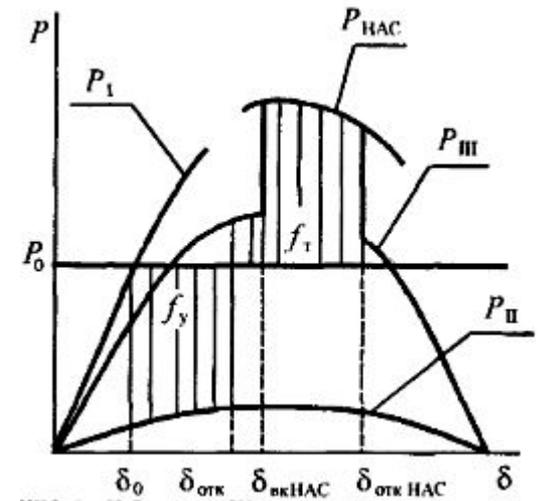
Повышается электрическая мощность генератора за счёт протекания в НАС токов КЗ. После отключения КЗ ток в обмотке статора генератора уменьшается, снижается тормозящее воздействие нагрузочных сопротивлений. Поскольку включать НАС во время КЗ при малых временах его отключения невозможно, то эффективно включение активных сопротивлений параллельно генераторам или повышающим тр-рам электростанций.



Активные сопротивления нагружают генератор после отключения КЗ.



Характеристика мощности без нагрузочного сопротивления



Характеристика мощности при включении нагрузочных сопротивлений

Электрическое торможение так же можно применять для демпфирования качаний в переходных процессах энергосистем. Для этого многократно кратковременно включается нагрузочное сопротивление в соответствующий момент переходного режима.

## Эффективность мероприятий режимного характера: автоматическое отключение части нагрузки при снижении частоты в энергосистеме

Повысить уровни статической и динамической устойчивости можно, не изменяя параметров элементов системы и не вводя дополнительных элементов.

Некоторые мероприятия режимного характера:

- *Резервы активной и реактивной мощностей на ЭСТ*
- *Автоматическая частотная разгрузка (АЧР)*
- *Разделение электрических систем на несинхронно работающие части*
- *Изменение конфигурации схемы ЭЭС*
- *Отключение части СМ (ОГ)*

*И.Т.Д.*  
**АЧР:** Снижение частоты в системе происходит из-за нарушения баланса по активной мощности, т.е. когда активная мощность нагрузки становится больше активной мощности, выдаваемой генераторами. При снижении частоты реактивная мощность, вырабатываемая генераторами, уменьшается, а реактивная мощность, потребляемая нагрузкой, увеличивается. Это понижает напряжение в узлах нагрузки и в некоторых случаях вызывает лавину частоты и напряжения, приводящие к массовому отключению потребителей и нарушению устойчивости параллельной работы. При снижении частоты до опасных пределов автоматически отключается часть нагрузки электрической системы.

АЧР повышает как устойчивость электрической системы, так и устойчивость отдельных узлов ее нагрузки, предотвращая лавину напряжения. В результате обеспечивается нормальная работа основной массы ответственных потребителей. При подключении промышленных предприятий к системе АЧР приходится учитывать необходимость обеспечения бесперебойности технологических процессов при перерывах в питании.

АЧР функционально подразделяются на устройства:

1) АЧР I – категория с одной уставкой по времени и различными уставками по частоте. Предназначена для предотвращения дальнейшего снижения частоты после аварии.

Уставка по времени – 0,5 с.

Уставка по частоте –  $48,5 \div 46,5$  Гц.

АЧР I разбивается на несколько очередей (около 20), которые отличаются друг от друга по частоте на величину  $\Delta f = 0,1$  Гц. Мощность, подключаемая к АЧР I примерно равномерно распределяется между очередями. После того, как отработает некоторое количество очередей АЧР I, частота, как говорят, «зависает» в районе  $47 \div 47,5$  Гц.

2) АЧР II – категория с одной уставкой по частоте и различными уставками по времени.

Предназначена для восстановления частоты до нормального значения если она длительно остается пониженной («зависает»).

Уставка по частоте – 48,6 Гц.

Уставка по времени – 5÷60 с.

АЧР II разбивается на несколько очередей (так же около 20), которые отличаются друг от друга по времени на величину  $\Delta t = 3$  с. После работы АЧР II, частота должна установиться на уровне, не ниже 49 Гц.

### Требования предъявляемые к

#### АЧР:

- Мощность нагрузки, подводимая к АЧР, должна быть достаточной для ликвидации возникшего дефицита;
- Устройство АЧР должно выполняться таким образом, чтобы избежать возникновения «лавины частоты»;
- Отключаемая нагрузка должна соответствовать величине возникшего дефицита;
- После действия АЧР частота должна восстановиться до уровня, не ниже 49 Гц;
- Устройства АЧР не должны работать при кратковременном снижении частоты.



- Мероприятия могут быть направлены на изменение параметров оборудования ЭЭС и могут быть направлены на изменение режимных параметров.
- Основными мероприятиями в ЭЭС по повышению устойчивости являются действия автоматики (АРВ, АЧР и т.д.)
- В основном повышают устойчивость путем воздействия на СМ АРВ или мероприятиями направленными на регулирования РМ (УКРМ) и как следствие регулирования напряжения в ЭЭС.

### Виды АРВ (электромашинные, бесщеточные, тиристорные и т.д.)

Go to **[www.menti.com](http://www.menti.com)** and use the code **93 02 08**

