А.Д. Эрнст

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Курс лекций

Нижневартовск 2013

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Нижневартовского государственного университета

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. ОмГАУ *В.К.Федоров*; канд. техн. наук, доцент *Б.Н.Коврижин*

Эрнст А.Д.

Э81 Электромеханические переходные процессы в электрических системах: Курс лекций. — Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2013. — 130 с.

Изложены основные положения расчетов устойчивости электрических систем и узлов нагрузки систем электроснабжения. Рассмотрены критерии и методы расчета статической и динамической устойчивости в плане дисциплины «Электромеханические переходные процессы». Предназначено для подготовки бакалавров дистанционной, очной и заочной форм обучения направления 140400.62 — «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электроснабжение».

> УДК 621.313 ББК 31.261.6

© Эрнст А.Д., 2013 © Издательство НВГУ, 2013

БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН

- 1. Коэффициенты:
 - *k*₃ коэффициент запаса статической устойчивости;
 - *k*_{*cm*} коэффициент статизма;
 - *k*_∂ коэффициент запаса динамической устойчивости;
 - соѕ φ коэффициент мощности;
 - *T_j* постоянная инерции (механическая постоянная).
- 2. Электродвижущие силы (ЭДС):
 - Е, е ЭДС действующее и мгновенное значения;
 - Е' переходная ЭДС;
 - *E*_q синхронная ЭДС по поперечной оси;
 - *E*_d синхронная ЭДС по продольной оси;
 - E'_q переходная ЭДС по поперечной оси;
 - E_x расчетная ЭДС синхронной машины за сопротивлением Δx .

3. Напряжения:

- *U*, *и* напряжение, действующее и мгновенное значения;
- *U*_{ном} номинальное напряжение;
- *U*_{*C*} напряжение системы;

*U*_Г — напряжение генератора;

*U*₁, *U*₂, *U*₀ — напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей. 4. *Токи*:

- *I* ток, действующее значение;
- *і* —ток, мгновенное значение;
- *I*_{*m*} ток, амплитудное значение;
- *I*_{ном} номинальный ток;
- I_{Σ} ток суммарный;

*I*₁, *I*₂, *I*₀ — ток прямой, обратной и нулевой последовательностей.

5. Мощности:

- *P* мощность активная;
- *Q* мощность реактивная;
- *S* мощность полная;
- *P_m* максимальная активная мощность;
- *P*_d демпферная мощность (коэффициент трения);
- *Р*_Э электромагнитная активная мощность;
- *P*_{мех}, *P*₀ механическая активная мощность.

- 6. Сопротивления, проводимости:
 - R, r активное сопротивление;
 - X, x реактивное сопротивление;
 - Z, z полное сопротивление;
 - у проводимость электрическая полная;
 - x_d синхронное реактивное сопротивление по продольной оси;
 - x'_d переходное реактивное сопротивление по продольной оси;
 - *x_q* реактивное сопротивление по поперечной оси;
 - x_{T} сквозное реактивное сопротивление трансформатора;
 - x_{c} реактивное сопротивление системы;
 - *x_{ad}* сопротивление реакции статора по продольной оси;
 - *x_{aq}* сопротивление реакции статора по поперечной оси;
 - $x_{d\Sigma}$ суммарное реактивное сопротивление в синхронном режиме;
 - $x'_{d\Sigma}$ суммарное реактивное сопротивление в переходном режиме;
 - *x*₁, *x*₂, *x*₀ индуктивные сопротивления соответственно прямой,

обратной и нулевой последовательностей.

7. Углы:

- δ угол рассогласования между E_q и $U_c;$
- $\delta_{\scriptscriptstyle 0}$ угол рассогласования между E_q и U_c в исходном режиме;
- $\delta_{\kappa p}$ критический угол рассогласования между E_q и U_c ;
- δ' угол рассогласования между E' и U_c ;
- ϕ угол нагрузки между U_c и *I*.
- 8. Скорости, частота:
 - *w* угловая скорость вращения (частота);
 - *w*₀ синхронная угловая скорость вращения;
 - f_0 промышленная циклическая частота (50 Гц);
 - *s* скольжение;
- *s_{кр}* скольжение критическое.

9. Моменты:

- *М*_э электромагнитный момент;
- *М*₀ —механический момент;
- *М_т* максимальный момент.

введение

Изучение процессов в электрической системе требует рассмотрения не только электромагнитных, но и механических процессов в ее элементах: в первичных двигателях (турбинах), их автоматических регуляторах, генераторах, двигателях нагрузки, где электрическая энергия вновь преобразуется в механическую. Именно изменение механического состояния элементов системы приводит к самым тяжелым последствиям — потере устойчивости, приводящей к нарушениям электроснабжения, как отдельных потребителей, так и целых регионов и даже стран. Таким образом, необходимо рассматривать и электрическое и механическое состояние системы ее *режимы* и *электромеханические процессы*.

Исследование вопросов устойчивости электрических систем началось сразу после создания систем переменного тока и активно ведется и в настоящее время для современных электрических систем кибернетического типа [1, 2].

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Устойчивость систем и узлов нагрузки. Предмет изучения

Предмет изучения — это установившиеся и переходные режимы (процессы) появляющиеся в электрической системе и узле нагрузки при изменении условий их работы (возмущении).

Электрическая система — условно выделенная часть электроэнергетической системы, в которой генерируется, преобразуется, передается и потребляется электрическая энергия.

Узел нагрузки — группа разнородных потребителей электрической энергии, подключенная к шинам электрической станции или подстанции.

Электромеханические процессы в системе могут иметь свойства, не выявляющиеся у отдельных элементов. Это требует исследования вопросов взаимодействия силовых элементов (турбин, генераторов, трансформаторов, линий передачи, нагрузок) и элементов управления (регуляторов, выключателей и т.п.).

Точность и быстрота расчета устанавливаются в зависимости от поставленной задачи. Выбираемый метод, прежде всего связан с выбором математической модели, описывающей переходные процессы в электрической системе, и зависит от длительности исследуемого процесса и точности задания исходной информации. Ниже приведена степень описания модели в зависимости от класса точности, которой будем далее пользоваться при изучении переходных процессов.

1-й к л а с с. Процессы в генераторах описываются полными уравнениями Парка-Горева, либо уравнениями в естественных координатах A, B, C. Учитывается влияние демпферных обмоток. Учитываются системы регулирования мощности турбины и других систем и возбуждения генератора.

2-й к л а с с. Процессы в генераторах описываются упрощенными уравнениями Парка-Горева. Учитывается влияние демпферных обмоток. Учитываются системы регулирования мощности турбины и возбуждения генератора.

3-й к л а с с. Процессы в генераторах описываются упрощенными уравнениями Парка-Горева, как правило только с учетом переходных процессов в обмотках возбуждения. Влияние демпферных обмоток и систем регулирования мощности и возбуждения также учитываются упрощенно.

4-й к л а с с. Допускается постоянство ЭДС (E' = const) в течение всего переходного процесса. Влияние демпферных контуров и системы регулирования не учитывается.

В настоящем курсе рассматриваются модели третьего и четвертого классов.

После изучения дисциплины студенты должны знать основные вопросы теории электромеханических переходных процессов в электрических машинах и электрических системах, практические критерии и методы расчета статической и динамической устойчивости электрических систем и узлов нагрузки, способы улучшения устойчивости электрических систем и узлов нагрузки.

1.2. Задачи расчета. Понятия статической, динамической и результирующей устойчивости

Режим системы — совокупность процессов существующих в системе и определяющих ее состояние в любой момент времени или на некотором интервале времени. Вопросы исследования устойчивости ориентированы на анализ устойчивости режимов.

Статическая устойчивость — это способность системы сохранять исходный режим при воздействии малых возмущений или режим, близкий к исходному, если возмущение не снято. Статическая устойчивость — это абсолютное требование и она должна обеспечиваться всегда в нормальном и послеаварийном режиме. Иллюстрация статической устойчивости для механической системы приведена на рисунке 1.1. При этом: вид возмущения, величина возмущения, длительность возмущения, место возмущения не имеют значения.



Рис. 1.1. Определение устойчивости

При исследовании статической устойчивости возмущения считаются бесконечно малыми, и исследуется поведение системы в стационарном режиме.

Динамическая устойчивость — это свойство системы сохранять режим исходный или близкий к исходному при конечных возмущениях.

При анализе динамической устойчивости интересует:

— вид возмущения;

— величина возмущения;

— длительность возмущения;

— место возмущения.

Динамическая устойчивость относительное требование и она должна обеспечиваться при определенных условиях.

Анализ динамической устойчивости — это анализ режимов конечных возмущений.

Результирующая устойчивость — это способность системы сохранить режим близкий к исходному после кратковременного асинхронного режима. Результирующую устойчивость считают разновидностью динамической устойчивости, разделяя синхронную динамическую устойчивость и результирующую динамическую устойчивость.

Вследствие обратимости электрических машин, основные теоретические положения устойчивости синхронных генераторов будут относиться и к синхронным двигателям.

В настоящем курсе вопросы устойчивости будут рассматриваться по единому алгоритму:

1. Характеристики электромагнитных и механических моментов элементов системы и их взаимодействие.

2. Практические (прямые) критерии устойчивости, дающие ответ «да» или «нет» на вопрос о сохранении устойчивости.

3. Дифференциальное уравнение движения, описывающее процессы во времени.

4. Методы решения дифференциальных уравнений.

5. Примеры решений, оценка допущений.

1.3. Основные характеристики режимов электрической системы и задачи их анализа

Установившиеся и переходные режимы подразделяются на классы:

— *нормальные установившиеся режимы* (стационарный режим, наиболее экономичный или проектный);

— *нормальные переходные процессы* (включение, отключение нагрузок, линий не приводящие к потере устойчивости);

— аварийные, как переходные, так и установившиеся режимы (короткое замыкание, самозапуск двигателя, т.е. большие возмущения в системе);

— *послеаварийные режимы* (режим с худшими технико-экономическими характеристиками, чем нормальный).

Параметры режима — численные характеристики режима (I, U, S).

Связь между параметрами режима определяется коэффициентами — параметрами системы.

<u>Пример</u>. $I = \frac{U}{\sqrt{3}z}$.

Параметры элементов системы — это количественные характеристики элементов системы $x, r, z, M, k_{mp}, T_a, T_j$.

Зависимость $r(T_0)$, $x_{M}(i_{M})$ — или нелинейность параметров системы, как правило, не учитываются.

 $P = \frac{U^2}{r}$ — нелинейность параметров режима. Необходимо учитывать.

При малых возмущениях производится линеаризация параметров режима или замена нелинейных характеристик в точке исследуемого режима линейными зависимостями (см. рис. 1.2.)



Рис. 1.2. Линеаризация статической характеристики $P = P_H + k \Delta U$, $k = tg \alpha$

Условия существования стационарного режима (установившегося): — баланс мощностей;

 $P_0 = P_H + \Delta P$, $Q_0 = Q + \Delta Q$. При одном и том же напряжении U. Это говорит о пересечении характеристик генератора и нагрузки. <u>Пример</u>. При постоянной активной мощности турбины $P_0 = \text{const}$.

$$P_H = \frac{U^2}{r}, \ Q_H = \frac{U^2}{x}.$$



Рис. 1.3. Расчетная схема



Рис. 1.4. а) баланс активной мощности; б) баланс реактивной мощности

При уменьшении r необходимо уменьшить возбуждение генератора, тогда при U_1 обеспечивается режим.

— статическая устойчивость;

— удовлетворительное качество переходного процесса (см. рис. 1.5).



Рис. 1.5. Характер переходных процессов

— экономичность мероприятий по обеспечению предыдущих требований.

1.4. Классификация электромеханических переходных процессов

Переходные процессы различаются по ряду признаков:

— По скорости протекания процессов в системе:

Все процессы, которые происходят или могут происходить в электрической системе, можно разделить по скорости их протекания на четыре большие группы: волновые и коммутационные перенапряжения (техника высоких напряжений); электромагнитные переходные процессы (расчеты токов короткого замыкания); электромеханические переходные процессы (расчеты устойчивости); электрические системы и сети (расчеты режимов и их оптимизации).

— По величине возмущений и видам возмущающих воздействий:

Под возмущением понимаются отклонения параметров режима, происходящие в начале переходного процесса, изменяющих (возмущающих) режим. Эти факторы, являющиеся причиной переходных процессов и называемые возмущающими воздействиями, могут быть большими, малыми, синусоидальными, толчкообразными и т.д. Поэтому возможны анализ статической устойчивости (малые возмущения) и анализ динамической устойчивости (конечные возмущения).

Введенные выше понятия «малых» и «больших» возмущений условны. Малое возмущение — это возмущение, влияние которого на характер поведения системы проявляется независимо от места появления возмущающего воздействия и его значения. Система в диапазоне режимов, близких к исходному, может рассматриваться как *линейная*. Большое возмущение — это возмущение, влияние которого на характер поведения системы существенно зависит от величины, времени существования, значения и места появления возмущающего воздействия, в связи с чем система во всем диапазоне исследования должна рассматриваться как *нелинейная*.

— По математическим допущениям при анализе:

Это наиболее широкая классификация и она зависит как от класса решаемой задачи, так и от величины и характера возмущений.

При малых возмущениях производится *линеаризация* — упрощение реальной нелинейной системы, при котором нелинейности при исследовании переходных процессов не учитываются. Нелинейные параметры режима принимаются постоянными или представляются линейными зависимостями.

Линеаризацию можно использовать только при малых возмущениях. При исследовании динамической устойчивости линеаризация неприемлема.

<u>Пример</u>. Рассмотрим переходные процессы в линейной и нелинейной системах.



Рис. 1.6. Переходный процесс а) в линейной системе; б) в нелинейной (реальной) системе

В линейной системе как при малых, так и больших возмущениях процессы протекают подобно (рис. 1.6 a), а в нелинейных различаются (рис 1.6 δ). Поэтому в нелинейных системах линеаризация и расчетные методы, основанные на принципе наложения, неприемлемы.

— По структуре исследуемой системы:

а) Позиционная система — такая система, в которой параметры режима зависят от текущего состояния, взаимного положения, например, роторов генераторов и двигателей независимо от того, как было достигнуто это состояние. Для описания позиционной системы достаточно статических характеристик.

Статические характеристики — это связи параметров режима системы, представленные аналитически или графически и не зависящие от времени, P(U),Q(U),P(f),Q(f). Эти связи выявляются в основном в установившемся режиме системы.

б) Динамическая система — такая система, которая изменяется во времени и описывается динамическими характеристиками.

Динамические характеристики — это связи параметров, полученных при условии, что они зависят от времени, $P(U, t, \frac{dU}{dt}, ...)$.

При исследовании динамической устойчивости часто используются статические характеристики вследствие разных скоростей протекания механических и электрических процессов.

2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

2.1. Вывод формулы угловой характеристики мощности простейшей нерегулируемой системы

Синхронная машина при сохранении устойчивости должна остаться в синхронном режиме. Для вывода угловой характеристики мощности простейшей нерегулируемой системы рассмотрим схему электропередачи (рис. 2.1). В схеме генератор работает через трансформатор и линию электропередачи на шины приемной системы, мощность которой настолько велика по сравнению с мощностью рассматриваемой электропередачи, что напряжение приемника U можно считать неизменным по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи (источник бесконечной мощности). В качестве допущений считаем:

- 1. Машина неявнополюсная (турбогенератор) $x_d = x_q$.
- 2. Не учитываются r, C, g, b, i_{μ} .
- 3. Машина без АРВ т.е. генератор нерегулируемый.
- 4. Приемная система бесконечной мощности $S \rightarrow \infty$, U = const.
- 5. Скорость вращения постоянна и равна синхронной $\omega = \omega_0$.



Рис. 2.1. Расчетная схема

Схема замещения и ее преобразования (рис. 2.2—2.4):



Рис. 2.2. Схема замещения



Рис. 2.3. Преобразование схемы замещения



Рис. 2.4. Результирующая схема замещения

Для вывода угловой характеристики мощности рассмотрим векторную диаграмму генератора (рис. 2.5).

При постоянстве ЭДС E и напряжения U изменение передаваемой мощности P может быть обусловлено лишь соответствующим изменением угла δ . Как известно, изменение мощности, отдаваемой генератором, на станции осуществляется воздействием на регулирующие органы турбины. В исходном режиме мощность турбины уравновешивается мощностью генератора, который вращается с неизменной частотой вращения. По мере открытия регулирующих клапанов (или направляющего аппарата у гидравлических турбин) мощность турбины возрастает, и равновесие вращающего и тормозящего моментов турбины и генератора нарушается, что вызывает ускорение его вращения.



Рис. 2.5. Векторная диаграмма генератора

На полученной векторной диаграмме треугольники Δcde и Δabc подобны, а значит угол $\angle cde$ равен углу $\angle cab$. Запишем выражения для нахождения стороны *ab* через треугольники Δadc и Δabc .

$$Ix_{d\Sigma}\cos\varphi = E_a\sin\delta;$$

Разделим полученное выражение на $\left| \frac{U_C}{x_{d\Sigma}} \right|$.

При этом $P = IU_c \cdot \cos \varphi$ — активная мощность:

$$P_{Eq} = \frac{E_q U_C}{x_{d\Sigma}} \sin \delta = P_{mEq} \sin \delta$$
(2.1)

— угловая характеристика мощности при постоянстве синхронной ЭДС.

Характер угловой характеристики мощности приведен на рисунке 2.6.



Рис. 2.6. Угловая характеристика мощности P₀ — мощность, развиваемая турбиной, P_H — мощность нагрузки

Как вытекает из выражения 2.1, зависимость мощности от угла δ имеет синусоидальный характер.

При данном значении ЭДС генератора E_q и напряжения приемника U_c существует определенный максимум передаваемой мощности, который может быть назван идеальным пределом мощности рассматриваемой простейшей электрической системы —

$$P_m = \frac{E_q U_C}{x_{d\Sigma}}.$$
(2.2)

Обычно угловая характеристика мощности как генератора, так и синхронного двигателя графически представляется в первом квадранте (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Угловая характеристика мощности генератора

Для количественной оценки статической устойчивости вводится и нормируется коэффициент запаса статической устойчивости:

$$k_{3} = \frac{P_{m} - P_{0}}{P_{0}} 100\%.$$
(2.3)

 $k_{_{3}} \ge 20\%$ — нормальный режим. $k_{_{3}} \ge 8\%$ — послеаварийный режим работы.

2.2. Практический (прямой) критерий устойчивости простейшей электрической системы

Рассмотрим реакцию ротора синхронного генератора при воздействии кратковременных малых возмущений.



Рис. 2.8. Анализ статической устойчивости

Зададим кратковременное возмущение при работе в точке *a* : → Ускорение:

 $\Delta \delta = (\delta_0 + \Delta \delta) - \delta_0(+); \ \Delta P = P_{\mathcal{I}} - P_0 \qquad (+).$

Генератор вернется в точку *а* из-за торможения $P_{\mathfrak{I}} > P_0$.

←Торможение:

$$\Delta \delta \Longrightarrow (-), \Delta P \Longrightarrow (-).$$

Генератор ускорится и вернется в точку a, так как $P_{\ni} < P_0 =>$.

Таким образом точка а является точкой устойчивого режима.

Рассмотрим теперь точку b.

 \rightarrow Ускорение:

 $\Delta \delta \Longrightarrow (+), \ \Delta P \Longrightarrow (-)$

— машина разгоняется и теряет устойчивость, так как $P_0 > P_{\mathcal{P}}$.

← Торможение: $\Delta \delta \Longrightarrow (-), \Delta P \Longrightarrow (+)$

— машина будет тормозиться, так как $P_{\mathcal{P}} > P_0$ и потеряет устойчивость (переход к точке *a*).

Режим работы в точке b не устойчив, а значит, невозможен.

$$\lim_{\Delta\delta\to 0} \frac{\Delta P}{\Delta\delta} = \frac{dP_{u_{3\delta}}}{d\delta} = \frac{d(P_{\mathcal{I}} - P_{0})}{d\delta};$$
$$\frac{dP_{u_{3\delta}}}{d\delta} > 0; \qquad (2.4)$$

— практический или прямой критерий устойчивости.

Критерий устойчивости (2.4): если производная избыточной мощности в точке исходного режима больше нуля, то электромеханическая система устойчива.

<u>Пример</u>: $P_0 = \text{const}$ (рис. 2.9);

$$\frac{d(P_m \sin \delta_0 - P_0)}{d\delta} = \frac{d(P_m \sin \delta_0)}{d\delta} = P_m \cos \delta_0 > 0$$
— система устойчива,
где $c_1 = \frac{dP_{u_{3\delta}}}{d\delta} = \text{tg}\varsigma$ — синхронизирующая мощность.

Дифференциальный критерий устойчивости для этого частного случая переходит в интегральный $90^0 > \delta_0 > 90^0$ — зона устойчивости при $P_0 = \text{const}$.



Рис. 2.9. Зона устойчивости 90⁰ > δ₀ > 90⁰ — зона устойчивости при P₀ = const

<u>Пример</u>: Рассмотрим обобщающий случай при различных характеристиках механической мощности (рис. 2.10):



Рис. 2.10. Пример использования практического критерия устойчивости 1 — устойчива, 2 — неустойчива, 3 — устойчива, 4 — неустойчива

2.3. Упрощенные угловые характеристики мощности регулируемых систем

Угловые характеристики регулируемых систем (упрощенные) и динамическая угловая характеристика мощности могут быть получены аналогично (2.1) на основе векторной диаграммы (рис. 2.11).

АРВ сильного действия.

При $U_{\Gamma} = \text{const}, x_{\Gamma} = 0$:

$$P_{U_{\Gamma}} = \frac{U_{\Gamma}U_{C}}{x_{C}}\sin\delta_{u}; \qquad (2.5)$$

— упрощенная угловая характеристика при АРВ сильного действия.

АРВ пропорционального действия.

При $E'_q = \text{const}, x_{\Gamma} = x'_d$:

$$P_{E'_{q}} = \frac{E'_{q} \cdot U_{C}}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin\delta$$
(2.6)

— упрощенная угловая характеристика при APB пропорционального действия, где: $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_C$.

Динамическая угловая характеристика мощности (используется при упрощенном анализе динамической устойчивости).

При $E' = \text{const}, x_{\Gamma} = x'_d$:

$$P_{E'} = \frac{E' \cdot U_{\rm C}}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin\delta'$$
(2.7)

— динамическая характеристика (без учета электромагнитных переходных процессов).



Рис. 2.11. Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины

<u>Пример</u>. Произведем оценку предела передаваемой мощности при передаче электрической энергии в Омскую энергосистему от Казахстана, Новосибирска и Урала.



Рис. 2.12. Схема энергосистемы

Казахстан — Омск $U_{\Gamma} = U_{C} = 500 \text{ кB} = \text{const};$ $l = 400 \text{ км}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ом/км}.$

$$P_m = \frac{U_{\Gamma}U_C}{x_{\Pi}} = \frac{500 \times 500}{80} = 3 \ \Gamma \text{BT}; \ x_{\Pi} = x_{y\partial} l \frac{1}{2} = 0,4 \times 400 \times \frac{1}{2} = 80 \ \text{Ом.}$$
Потребности > 2 ГВт; Возможности Омск > 1 ГВт.

19

Новосибирск — Омск: одна ЛЭП — 500 КВ, l = 600 км, $P_m = 0,75$ ГВт. *Урал — Омск*: одна ЛЭП, l = 800 км, $P_m = 0,75$ ГВт.

Действительные пределы передаваемой мощности меньше из-за необходимости иметь запас по статической устойчивости.

2.4. Уравнение движения ротора и формы его записи

Дифференциальное уравнение движения справедливо для всех типов машин. Все величины даны в относительных единицах (о.е.)

$$T_{j}\frac{d^{2}\delta}{dt^{2}} + P_{d}\frac{d\delta}{dt} + \frac{P_{\vartheta}}{1 + \frac{1}{\omega_{0}}\frac{d\delta}{dt}} = M_{O}; \qquad (2.8)$$

или

$$M_{u} + M_{d} + M_{\mathcal{P}} = M_{O}, \qquad (2.9)$$

где: M_u — инерционный момент; M_d — демпферный момент обусловленный механическим и электромагнитным трением; М_э—электромагнитный момент; M_o — механический момент. В стационарном режиме: $M_o = M_o$; *T_i* — постоянная инерции

$$T_{j}(c) = \frac{2,74 \cdot n^{2} [\text{об/мин}]}{1000 \cdot Sh[\text{кBA}]} (\text{для СГ } T_{j} \text{ до десятков секунд});$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \text{угловая скорость абсолютная, либо относительная;}$$

$$\frac{d^{2}\delta}{dt^{2}} = \frac{d\omega}{dt} = a - \text{ускорение;}$$

 dt^2

 P_d — демпферная мощность или коэффициент трения механического и электромагнитного действия;

*P*₂ — электромагнитная мощность. В простейшем случае для синхронной

машины:
$$P_{\mathcal{P}} = P_m \sin \delta$$
, для асинхронной: $P_{\mathcal{P}} = \frac{2P_m}{\frac{s}{s_{\kappa p}} + \frac{s_{\kappa p}}{s}}$

Рассмотрим связь величин в системах относительных и именованных единиц.

1. Угол.

Угол может быть электрическим и геометрическим, зависящим от числа полюсов электрической машины — р

$$\frac{\delta_{3\pi}}{\delta_{200M}} = \frac{180 \cdot p}{360};$$

в дальнейшем всегда будем иметь дело с электрическим углом, что для двухполюсной машины совпадает с геометрическим.

Соотношение между углом в радианах и градусах

$$\frac{\delta[\text{pag}]}{\delta[\text{rpag}]} = \frac{2\pi \cdot f}{360f}, \qquad 1 \text{ pag} = 57.3^{\circ}.$$

2. Время.

Соотношение между временем в секундах и относительных единицах

$$t_{\delta}\omega_0 = 1$$
 [рад]; $t_* = \frac{t[c]}{t_{\delta}[c]} = \omega_0 t_c = 314t_c$; $t_{\delta} = \frac{1}{\omega_0}$;

1 секунда соответствует 314 относительных единиц времени.

3. Скорость.

$$\omega = \frac{d\delta}{dt}$$
 от неподвижной оси (абсолютная скорость).
 $\Delta \omega = \omega - \omega_0 = \frac{d\delta}{dt}$ — относительная скорость по отношению

 $\Delta \omega = \omega - \omega_0 = \frac{d\omega}{dt}$ — относительная скорость по отношению к синхронно

вращающейся оси.

В дальнейшем будем работать с относительной скоростью.

Скорость может быть представлена в относительных и именованных единицах.

$$\begin{split} \Delta \varpi_* &= \frac{\varpi}{\varpi_{\delta}} - \frac{\varpi_0}{\varpi_{\delta}} = \frac{1}{\varpi_{\delta}} \cdot \frac{d\delta}{dt} \text{ при } \varpi_{\delta} = \varpi_0, \ \Delta \varpi_* = \varpi_* - 1 = \frac{1}{314} \cdot \frac{d\delta}{dt}; \\ \varpi_* &= 1 + \Delta \varpi_* = 1 + \frac{1}{314} \cdot \frac{d\delta}{dt}. \end{split}$$

4. *Мощность, момент.* $P = \omega M$.

При выражении угла в градусах:

$$\varpi_{*} = 1 + \Delta \varpi_{*} = 1 + \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{\varpi_{0}} = 1 + \frac{2\pi f}{300f} \frac{d\delta[\text{град}]}{dt} \frac{1}{2\pi f} = 1 + \frac{1}{18000} \frac{d\delta}{dt} \approx 1;$$

$$P_{*} = \varpi_{*}M_{*}; \text{ или}$$

$$P_{*} = M_{*}.$$
(2.10)

Т.е. мощность и момент в относительных единицах равны и уравнение (2.8) принимает удобный вид:

$$T_{j}\frac{d^{2}\delta}{dt^{2}} + P_{d}\frac{d\delta}{dt} + P_{\mathfrak{I}} = P_{0}, \qquad (2.11)$$

и справедливо для СМ и АМ при малых изменениях скорости (все в о.е).

Для синхронных генератора и электродвигателя при анализе статической устойчивости:

$$T_{j}\frac{d^{2}\delta}{dt^{2}} + P_{d}\frac{d\delta}{dt} + P_{H}\sin\delta = P_{0}; \qquad (2.12)$$

Для анализа динамической устойчивости при малых изменениях скорости без учета демпферного момента:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} + P_m \sin \delta = P_0.$$
(2.13)

При необходимости расчета в иных системах единиц уравнения могут быть модифицированы [2].

Пример:
$$\delta \rightarrow$$
град; $t \rightarrow c$;

$$\frac{\delta[pad]}{\delta[zpad]} = \frac{2\pi f}{360f}; t^* = \omega_0 t_c; T_{j*} = \omega_0 T_{jc};$$

$$\frac{T_j(c)}{360f_0} \cdot \frac{d^2 \delta[zpad]}{dt^2[c]} + P_m \sin \delta = P_0. \qquad (2.14)$$

Для синхронного компенсатора без учета механического момента:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_d - M_m \sin \delta \,. \tag{2.15}$$

Для асинхронных машин:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = M_{\mathcal{F}} - M_m; \qquad (2.16)$$

или при малых изменениях скорости

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = P_{\mathcal{F}} - P_m.$$
 (2.17)

При записи дифференциальных уравнений через скольжение:

$$\omega_* = 1 - s_*;$$

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_m - M_{\mathcal{B}}; \ T_j \frac{ds}{dt} = P_m - P_{\mathcal{B}}.$$
 (2.18)

2.5. Исследование статической устойчивости простейшей системы методом малых колебаний

Метод анализа статической устойчивости основанный на решении линеаризованной системы дифференциальных уравнений получил название *метод малых колебаний* (отклонений). Процедура решения этим методом представлена в таблице 2.1. Дан общий подход (слева) и простейший пример (справа) решения уравнения движения.

Таблица 2.1



Исследование устойчивости методом малых колебаний

$$T_{j} \frac{d^{2}\Delta\delta}{dt^{2}} + P_{d} \frac{d\Delta\delta}{dt} + C_{1}\Delta\delta = 0;$$

$$T_{j}p^{2} + P_{d}p + C_{1} \Delta\delta = 0;$$

$$p_{1,2} = -\frac{Pd}{2T_{j}} \pm \sqrt{\left(\frac{Pd}{2T_{j}}\right)^{2} - \frac{C_{1}}{T_{j}}} =$$

$$= -\frac{Pd}{2T_{j}} \pm j\sqrt{\frac{C_{1}}{T_{j}} - \left(\frac{Pd}{2T_{j}}\right)^{2}} =$$

$$= -\alpha \pm j\gamma$$

Ниже на рисунках 2.15, 2.16 даны примеры характера поведения системы при отсутствии демпферной мощности.



Ляпунов [1] доказал, что характер процесса при линеаризации подобен процессам в реальной нелинейной системе при малых возмущениях.

Теорема Ляпунова 1. Если все корни характеристического уравнения имеют отрицательную вещественную часть, (α) то возмущенное движение реальной системы устойчиво.

Теорема Ляпунова 2. Если имеется хотя бы одна положительная вещественная часть, то система статически не устойчива.

Сформулируем кратко порядок операций, необходимых для исследования статической устойчивости.

1. Составить математическое описание переходных процессов в изучаемой системе в виде нелинейных дифференциальных уравнении.

2. Провести линеаризацию уравнений по первому приближению и получить систему линеаризованных уравнений.

3. Составить характеристический определитель.

4. Вычислить частные производные для исследуемого режима.

5. Определить устойчивость с помощью методов, выявляющих знак действительных корней и действительных частей комплексных корней характеристического уравнения.

При высокой степени характеристического уравнения отыскание его корней является трудоемкой операцией, поэтому ее обычно заменяют операцией отыскания закономерностей, связывающих корни с коэффициентами характеристического уравнения или с некоторыми функциями от коэффициентов. Такие закономерности называют критериями устойчивости. Математически критерии устойчивости означают отсутствие корней в правой полуплоскости.

Критерии устойчивости, описанные в [2], классифицируются как прямые, требующие нахождения корней характеристического уравнения, и как косвенные, не требующие вычисления корней. Это критерии алгебраические (методы Рауса и Гурвица) и частотные (методы D-разбиения, Михайлова, Найквиста). Критерии устойчивости формулируют необходимые и достаточные условия устойчивости, основанные на анализе корней характеристического уравнения, но не требующие их вычисления.

Для анализа статической устойчивости электрических систем наиболее часто применяются критерий Гурвица (см. ниже) и метод D-разбиения. В обоих случаях предварительно составляется характеристическое уравнение, и определяются выражения его коэффициентов.

2.6. Характер протекания переходных процессов в зависимости от вида корней характеристического уравнения

Если имеется возможность исследовать корни характеристического определителя, то по их значениям можно судить о характере изменений движения ротора электрической машины и сделать вывод о возможности устойчивой работы (см. табл. 2.2).

Таблица 2.2

| Мо | Корни | | Расположение корней | Вид переходного процесса | |
|-----|-------|------------|---------------------|--------------------------|---|
| JNO | a jw | Dx = f(t). | | описание | |
| 1. | + | 0 | | | Возрастающая экспонента с постоянной $T = \frac{1}{\alpha}$ |
| 2. | + | + | α | | Экспоненциально- нарастающее гармо- ническое колебание |
| 3. | | 0 | | | Затухающая экспонента с посто- янной $T = \frac{1}{\alpha}$ |
| 4. | | + | • • • | | Затухающие гармо- нические колебания |
| 5. | 0 | 0 | α α | | Сохранение постоян- ного отклонения Dx0 |
| 6. | 0 | 0 | α | Å× ↓ ↓ ↓ ↓ | Гармонические коле- бания с постоянной амплитудой Dx0 и час- тотой ү |

Характер переходного процесса

2.7. Метод Гурвица при исследовании статической устойчивости

Для регулируемых систем описываемых линеаризованной системой уравнений:

$$\begin{cases} T_{j} \frac{d^{2} \Delta \delta}{dt^{2}} + P d \frac{d \Delta \delta}{dt} + c_{1} \Delta \delta + b_{1} \Delta E + d_{1} \Delta U = 0; \\ b_{1} = \frac{dP}{dE}; d_{1} = \frac{dP}{dU}; \\ \Delta E = ...; \\ \Delta U = \end{cases}$$
(2.19)

Как было сказано ранее, существуют алгебраические и частотные методы, способствующие оценке устойчивости.

Метод Гурвица — алгебраический и устанавливает соотношения между коэффициентами характеристического уравнения в виде неравенств (положительность всех определителей Гурвица), что является необходимым и достаточным условием статической устойчивости [2]. Для характеристического уравнения вида:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0$$

порядок составления определителей Гурвица приведен ниже.

$$\Delta \Gamma_{1} = |a_{1}| > 0; \ \Delta \Gamma_{2} = \begin{vmatrix} a_{1} & a_{3} \\ a_{0} & a_{2} \end{vmatrix} > 0; \ \Delta \Gamma_{3} = \begin{vmatrix} a_{1} & a_{3} & a_{5} \\ a_{0} & a_{2} & a_{4} \\ 0 & a_{1} & a_{3} \end{vmatrix} > 0;$$
$$\Delta \Gamma_{n} = \begin{vmatrix} a_{1} & a_{3} & a_{5} & 0 \\ a_{0} & a_{2} & a_{4} & 0 \\ 0 & a_{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{n} \end{vmatrix} > 0.$$

Пример. Для простейшей системы

$$\begin{split} T_{j}p^{2} + P_{d}p + c_{1} &= 0; \\ \Delta\Gamma_{1} &= P_{d} > 0; \ \Delta\Gamma_{2} &= \begin{vmatrix} P_{d} & 0 \\ T_{j} & c_{1} \end{vmatrix} = P_{d}c_{1} > 0; \\ c_{1} &> 0; \ \text{или} \ \frac{dP}{d\delta} &= c_{1} > 0 \end{split}$$

Что подтверждает полученный ранее прямой критерий устойчивости.

2.8. Учет электромагнитных переходных процессов в обмотке возбуждения

К уравнению движения ротора в этом случае нужно прибавить нелинейное дифференциальное уравнение изменения ЭДС

$$\int T_{j} \frac{d^{2} \delta}{dt^{2}} + P_{d} \frac{d \delta}{dt} + P = P_{0}$$

$$T_{d0} \frac{dE'_{q}}{dt} + E_{q} = E_{qe}$$
(2.20)

где T_{d_0} — постоянная времени обмотки возбуждения; E_{ae} — ЭДС установившегося режима;

$$P = \frac{E_{q0}U}{x_{d\Sigma}}\sin\delta_0 + \frac{\partial P}{\partial\delta}\Delta\delta + \frac{\partial P}{\partial E_q}\Delta E_q;$$

$$\frac{E_{q0}U}{x_{d\Sigma}}\sin\delta_0 = P_0; \ \frac{\partial P}{\partial\delta} = c_1; \ \frac{\partial P}{\partial E_q} = b_1; \ \Delta P = P - P_0$$

Линеаризованное уравнение движения имеет следующий вид:

$$T_{j}\frac{d^{2}\Delta\delta}{dt^{2}} + P_{d}\frac{d\Delta\delta}{dt^{2}} + c_{1}\Delta\delta + b_{1}\Delta E_{q} = 0.$$

Во втором уравнении E'_q — нелинейная функция переменных δ и E_q , и зависит от t.

$$E'_q = E_q \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} + U \frac{x_d x'_d}{x_{d\Sigma}} \cos \delta.$$

Характер изменения ЭДС при возмущении представлен на рисунке 2.17.



Рис. 2.17. Характер изменения ЭДС при возмущении

Преобразованное уравнение

$$T_{d0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \right) \Delta \delta + T_{d0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E'_q}{\partial E_q} \right) \Delta E_q + \Delta E_q = E_{qe0} - E_{q0}$$

 $E_{qe0} - E_{q0}$ — в установившемся режиме равны.

Рассматривая свободные колебания системы, имеем в операторной форме выражения:

$$\begin{cases} \left(T_{j}P^{2}+P_{d}p+c_{1}\right)\Delta\delta+b_{1}\Delta E_{q}=0\\ T_{d0}P\frac{\partial E_{q}'}{\partial\delta}\Delta\delta+\left(1+T_{d0}P\frac{\partial E_{q}'}{\partial E_{q}}\right)\Delta E_{q}=0 \end{cases}$$

т.к. $T_{d0} = T'_d \frac{x_d \Sigma}{x'_{d\Sigma}}; \ T_{d0} \frac{\partial E'_q}{\partial E_q} = T'_d.$

Характеристический определитель системы можно записать в виде:

$$D(P) = \begin{vmatrix} T_j P^2 + P_d p + c_1 & b_1 \\ T'_d \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}} P \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} & 1 + T_{d0}P \end{vmatrix} = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3, \quad a_3 = c_1$$

Коэффициенты уравнения зависят от частных производных, являющихся функциями исходного режима.

Характер корней исследуется с помощью критерия Гурвица, согласно которому для отсутствия корней с положительной вещественной частью требуется, чтобы все коэффициенты и предпоследний определитель Гурвица были положительными

$$\Delta_{\Gamma yp} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}.$$

Окончательный вывод зависит от величины коэффициентов и параметров. Так при $c_1 < 0$ $a_3 < 0$, и это подтверждает практический критерий устойчивости и при этом $\frac{\partial P}{\partial S} < 0$, что говорит о неустойчивости системы.

В иных случаях возможны особые режимы:

1. При $\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$ — сползание или текучесть режима. 2. При $T'_d < 0$ $x_q < x_c < x_d$ — синхронное самовозбуждение; $x'_d < x_c < x_d$ — асинхронное самовозбуждение, $T'_d = \frac{x'_d + x_c}{x_d + x_c} T_{d0}.$

3. При $\Delta_{\Gamma vp} < 0$ возможно явление самораскачивания.

Особые режимы могут проявляться и в двигателях [2].

2.9. Три вида неустойчивости простейшей нерегулируемой системы

Как показано в разделе 2.8 даже в простой нерегулируемой системе возможны особые режимы, которые могут вызвать нарушение статической устойчивости. К ним относятся:

1. Самовозбуждение.

2. Самораскачивание.

3. Текучесть или сползание режима.

Анализ особых режимов возможен только на основе совместного решения уравнения движения и уравнений электромагнитного состояния системы уравнений Парка-Горева. Явления самовозбуждения и самораскачивания имеют общую природу и обусловлены разностью реакций ротора по продольной и поперечной осям или реакционной мощностью

$$P_p = \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta . \qquad (2.21)$$

1. Самовозбуждение.

Это явление подобно резонансу и возможно только при наличии емкости в системе (например, продольной или поперечной компенсации). Преобладающая емкостная реактивная нагрузка в отличие от индуктивной, не размагничивает электрическую машину, а подмагничивает, что приводит к росту ее ЭДС.



 $x_3 = x_L - x_C$ - емкостный характер $x_L < x_C$

Рис. 2.18. Схема замещения

Для схемы замещения рисунка 2.18 результирующая реактивность должна иметь емкостный характер при условии существования режима, что соблюдается в зоне параметров

$$x_q < x_c < x_d$$
.

Синхронное самовозбуждения протекает при постоянной скорости вращения машины и рост ЭДС ограничивается насыщением (рис. 2.19). Вместе с тем эта ЭДС и напряжение на шинах может достигать неприемлемых значений и не регулируется системами регулирования возбуждения, Не допускать самовозбуждение необходимо при проектировании и эксплуатации систем.



Рис. 2.19. Характер процесса при синхронном самовозбуждении

При $x'_q < x_c < x'_d$ возможно асинхронное самовозбуждение протекающее при колебаниях скорости (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Характер процесса при асинхронном самовозбуждении

При большом активном сопротивлении самовозбуждение не наблюдается. На рисунке приведены зоны самовозбуждения в области параметров $\{x_c, R\}$.



Рис. 2.21. Зоны самовозбуждения

1. Зона синхронного самовозбуждения.

2. Зона асинхронного самовозбуждения.

3. Зона асинхронного самовозбуждения для машины с демпферными обмотками.

2. Самораскачивание.

Самораскачивание развивается в результате появления отрицательного демпферного момента M_d (мощности P_d), возникающего при работе машин через сеть, имеющую относительно большое активное сопротивление в режиме малых нагрузок, и проявляющееся в форме колебаний роторов. Эти колебания могут или длительно существовать во время синхронной работы машин, или увеличиваясь приводить к нарушению синхронизма. В регулируемых системах самораскачивание может наблюдаться при неправильной настройке регуляторов или их больших коэффициентах усиления. Характер процесса при самораскачивании показан на рисунке 2.22.



Рис. 2.22. Характер процесса при самораскачивании

3. Текучесть или сползание режима.

Текучесть или сползание режима проявляется при работе системы на пределе передаваемой мощности (рис. 2.23) и проявляется в прогрессивном увеличении угла δ с последующим выпадением машины из синхронизма (рис. 2.24).



Рис. 2.23. Сползание режима

Рис. 2.24. Характер процесса при сползании режима

2.10. Влияние реактивного сопротивления системы и насыщения генератора на статическую устойчивость

Предел передаваемой мощности в основном зависит от реактивных сопротивлений генератора и электропередачи. Примерная доля отдельных элементов представлена на рисунке 2.25. Влияние реактивного сопротивления генератора можно косвенно исключить применением автоматического регулирования (APB). Сопротивления трансформаторов нормируется. Следовательно, предел передаваемой мощности в основном определяется реактивным сопротивлением ЛЭП, зависящим от напряжения (например в о.е.

 $x_{\pi} = \frac{S_{\delta}}{U_{\mu}^2}$) и ограничен сопротивлением генератора и трансформаторов

$$P_{m} = \frac{EU}{x_{\Gamma T} + x_{\pi}} = \frac{EU}{x_{\Gamma T}} = P_{m\Gamma T} :; k_{3} = \frac{P_{m} - P_{0}}{P_{0}} \cdot 100\%$$



Рис. 2.25. Исходная схема

Зависимость предела передаваемой мощности от величины номинального напряжения ЛЭП представлена на рисунке 2.26.



Рис. 2.26. Предел передаваемой мощности

Синхронное сопротивление генератора определяется характеристиками холостого хода и короткого замыкания (рис. 2.27). Так как $x_d = \frac{Eq \uparrow}{I_k \uparrow \uparrow}$ и при насыщении падает, это приводит к увеличению $P_m \uparrow$. В справочной литературе приводится значение ненасыщенного сопротивления, что обеспечивает гарантированный расчет.



Рис. 2.27. Характеристики режимов ХХ и КЗ

В дальнейшем насыщение учитываться не будет.

2.11. Угловая характеристика мощности явнополюсной синхронной машины

У явнополюсных генераторов синхронные индуктивные сопротивления в продольной и поперечной осях ротора машины x_d и x_q различны, что не позволяет построить схему замещения для полного тока и усложняет характеристику мощности генератора, однако зависимость мощности от угла для явнополюсного генератора можно получить непосредственно из его векторной диаграммы (рис. 2.28).

При режиме холостого хода генератора ток возбуждения создает магнитный поток, основная часть которого Φ_d пронизывает воздушный зазор, пересекает обмотку статора машины и наводит в ней при вращении ротора ЭДС х.х. E_q . У нагруженного генератора ток обмотки статора I, как известно, может быть разложен на продольную и поперечную составляющие I_d и *I_a* которые создают магнитные потоки, называемые потоками продольной и поперечной реакции якоря Φ_{ad} и Φ_{aa} , вращающиеся в трехфазной машине синхронно с ротором, но сдвинутые пространственно относительно друг друга на четверть полюсного деления. Наводимые потоками реакции якоря ЭДС $E_{ad} - jI_q x_{aq}$ и $E_{aq} - jI_d x_{ad}$, складываясь геометрически с ЭДС х.х. E_q дают внутреннюю ЭДС генератора Е, соответствующую результирующему магнитному потоку в воздушном зазоре Φ_i . Помимо потока Φ_i и потоков реакции Φ_{ad} и Φ_{aq} , пронизывающих воздушный зазор и сцепленных как с обмоткой статора, так и с обмоткой возбуждения, существуют еще магнитные потоки рассеяния, сцепленные каждый только с соответствующей обмоткой статора или ротора. В установившихся режимах учитывается только поток рассеяния статора. Наводимая им ЭДС представлена на рис. 2.28 как вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния статора Ix_{δ} .

$$x_d = x_{ad} + x_{\delta}; \quad x_q = x_{aq} + x_{\delta}.$$



Рис. 2.28. Векторная диаграмма явнополюсного генератора

Активная мощность, отдаваемая в приемную систему равна:

$$P = U_c I \cos \varphi = U_c I \cos \psi - \delta = U_c I \cos \psi \cos \delta + U_c I \sin \psi \sin \delta.$$

Принимая во внимание соотношения, вытекающие из векторной диа-граммы

$$E_q = U_q + jI_d x_d; \quad 0 = U_d + jI_q x_q,$$

где $U_q = U_c \cos \delta; U_d = U_c \sin \delta; I_q = I \cos \psi; I_d = I \sin \psi.$
 $E_c + U_c = U_c U_c \sin \phi; I_d = I \sin \psi.$

Составляющие токов $I_d = \frac{E_q + U_q}{x_d}; \quad I_q = \frac{U_d}{x_q}$ и мощность можно предста-

вить следующим образом:

$$P = I_q U_q + I_d U_d = U_c \cos \delta \frac{U_d}{U_q} + U_c \sin \delta \frac{E_q - U_q}{x_d} =$$

$$= \frac{U_c \cos \delta U_c \sin \delta}{x_q} + \frac{E_q U_c}{x_d} \sin \delta - \frac{U_c U_c \cos \delta \sin \delta}{x_d}.$$

$$P^{\mathcal{A}} = \frac{E_q U_c}{x_d} \sin \delta + \frac{U_c^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta.$$
(2.22)

— угловая характеристика мощности явнополюсной синхронной машины.
При работе на систему через x_c сопротивления $x_{d\Sigma} = x_d + x_c$; $x_{q\Sigma} = x_q + x_c$, и угловая характеристика будет выглядеть следующим образом:

$$P^{\mathcal{A}} = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{1}{2} \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta = P_{m1} \sin \delta + P_{m2} \sin 2\delta, \quad (2.23)$$

где $P_{m2} \sin 2\delta = P_p$ — реакционная мощность (обусловленная разностью реакций по продольным и поперечным осям).

Характеристика мощности явнополюсного генератора, построенная при постоянстве ЭДС E_q , помимо основной синусоидальной составляющей $E_q U_c \sin \delta / x_d$ имеет также вторую составляющую в виде синусоиды двойной частоты, амплитуда которой пропорциональна разности индуктивных сопротивлений в продольной и поперечной осях машины и не зависит от ЭДС машины E_q (рис. 2.29). Эта вторая гармоника несколько смещает максимум характеристики мощности явнополюсной машины, и предельный угол δ_{np} , при котором достигается максимум мощности, получается меньшим 90⁰.



Рис. 2.29. Угловая характеристика мощности явнополюсной синхронной машины

Амплитуда второй гармоники невелика $P_{m2} < 15\%$ от P_{m1} ; и с учетом $P_m^{(\mathcal{A})} > P_m^{(H\mathcal{A})}$; $(\frac{dP^{(\mathcal{A})}}{d\delta} = 0 \Rightarrow \delta_{np})$ явнополюсность при расчетах статической устойчивости не учитывается. Неучет явнополюсности дает гарантированное решение, поэтому в практических расчетах явнополюсность не учитывается, однако реакционная мощность может поддерживать явление синхронного самовозбуждения и самораскачивания.

При исследовании динамической устойчивости динамическая угловая характеристика принимает вид

$$P_{\partial u \mu}{}^{\mathcal{A}} = \frac{E'U_c}{x'_{d\Sigma}}\sin\delta' + \frac{1}{2}\frac{x_q - x'_d}{x'_{d\Sigma}x_{q\Sigma}}\sin 2\delta'.$$
(2.24)

В расчетах динамической устойчивости явнополюсность также не учитывается, однако реакционная мощность может поддерживать явление асинхронного самовозбуждения.

2.12. Угловая характеристика мощности при сложной связи с системой

Сложная связь с системой — это наличие емкостных, индуктивных сопротивлений и поперечных ветвей (рис. 2.30).



Рис. 2.30. Схема замещения при сложной связи

Заменим нашу схему Т-образным 4^x полюсником. Для Т-образной схемы замещения передачи (рис. 2.31), в начале которой приложена ЭДС генератора \dot{E}_{Γ} и в конце — напряжение шин бесконечной мощности \dot{U}_{c} , режим работы электропередачи может быть представлен как результат наложения друг на друга двух независимых частичных режимов. В одном из них (рис. 2.32) токи создаются ЭДС генератора \dot{E}_{Γ} при $\dot{U}_{c} = 0$, в другом (рис. 2.33) напряжением шин приемника \dot{U}_{c} при $\dot{E}_{\Gamma} = 0$.



Рис. 2.31. Т-образная схема замещения

$$\dot{S}_{\Gamma} = \dot{E}_{\Gamma} I_{1}; \ \dot{S}_{H} = \dot{U}_{C} I_{2};$$

$$\dot{P} = \operatorname{Re} S; \ Q = \operatorname{Im} S;$$

Применим принцип наложения, справедливый для линейных схем.





Рис. 2.32. Частичный режим 1

Рис. 2.33. Частичный режим 2

Собственное сопротивление:
$$z_{11} = z_1 + z_2 / / z_3;$$

 $z_{22} = z_2 + z_1 / / z_3;$

Взаимное сопротивление: $z_{ab} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3} = z_{cd}$.

Отдельные составляющие токов генератора и приемной системы пропорциональны соответствующим ЭДС и напряжению.

$$\mathbf{\dot{I}}_{11} = \frac{\mathbf{\dot{E}}_{\Gamma}}{z_{11}}; \ \mathbf{\dot{I}}_{12} = \frac{\mathbf{\dot{E}}_{\Gamma}}{z_{12}}; \ \mathbf{\dot{I}}_{21} = \frac{\mathbf{\dot{U}}_{C}}{z_{21}}; \ \mathbf{\dot{I}}_{22} = \frac{\mathbf{\dot{U}}_{C}}{z_{22}}.$$

Реальное значение токов:

$$I_1 = I_{\Gamma} = I_{11} - I_{12};$$

 $I_2 = I_C = I_{21} - I_{22}.$

Отметим, что $\dot{S}_{\Gamma} = \dot{E}_{\Gamma} I_{1}^{*}$ представляет собой мощность в точке приложения ЭДС \dot{E}_{Γ} , т.е. внутреннюю мощность генератора за его сопротивлением в схеме замещения. Взаимное расположение векторов на комплексной плоскости дано на рисунке 2.34. Принимая направление вектора \dot{U}_{C} за ось отчета векторов получаем фазный угол вектора \dot{U}_{C} равным нулю и фазный угол вектора \dot{E}_{Γ} равным относительному углу сдвига векторов δ .

При этом $U_{C} = U$; $E_{\Gamma} = Ee^{j\delta}$; $\alpha = 0...$



Рис. 2.34. Взаимное расположение векторов

— угловая характеристика мощности при сложной связи с системой. Реактивная мощность

$$Q_{\Gamma} = \frac{E_{\Gamma}^{2}}{z_{11}} \cos \alpha_{11} - \frac{E_{\Gamma}U}{z_{12}} \cos(\delta - \alpha_{12}). \qquad (2.26)$$

Угловая характеристика для нагрузки при $\overset{\bullet}{S}_{H} = U_{C} \overset{*}{I_{2}}$

$$P_{H} = -\frac{U_{C}^{2}}{z_{12}}\sin\alpha_{22} + \frac{E_{\Gamma}U_{C}}{z_{21}}\sin(\delta + \alpha_{12}); \qquad (2.27)$$

$$Q_{H} = -\frac{U_{C}^{2}}{z_{22}} \cos \alpha_{22} + \frac{E_{\Gamma}U_{C}}{z_{21}} \cos(\delta + \alpha_{12}). \qquad (2.28)$$

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 .

Анализ устойчивости осуществляется по характеристике генератора. При отсутствии активных сопротивлений (потерь активной мощности)

$$P_{\Gamma} = 0 + \frac{E_{\Gamma}U_{C}}{z_{12}}\sin\delta = P_{H};$$

Для систем, состоящих из большого числа генераторов (рис. 2.35):



Рис. 2.35. Расчетная схема

$$P_{1} = \frac{E_{1}}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_{1}E_{2}}{z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_{1}E_{3}}{z_{13}} \sin(\delta_{13} - \alpha_{13}) + \dots + \frac{E_{1}E_{n}}{z_{1n}} \sin(\delta_{1n} - \alpha_{1n});$$

Для любого генератора, общий случай:

$$P_{i} = \frac{E_{i}^{2}}{z_{ii}} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{i=1\\j=1\\i\neq j}}^{m} \frac{E_{i}E_{j}}{z_{ij}} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}).$$
(2.29)

2.13. Влияние параметров системы на угловые характеристики мощности

Как вытекает из выражения 2.25, зависимость активной мощности от угла сдвига вектора ЭДС δ имеет E = const синусоидальный характер, однако синусоиды смещены как относительно оси абсцисс, так и относительно оси

ординат. Смещение характеристики мощности обусловливается потерями активной мощности в элементах системы. Если активные сопротивления в схеме отсутствуют, то вещественные составляющие собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей ветвей *у* равны нулю, углы φ получаются равными 90° и, следовательно, $\alpha = 90^{0} - \varphi = 0$. При этом мощности генератора и нагрузки равны.

$$P_{\Gamma} = P_{H} = \frac{EU}{x_{12}} \sin \delta . \qquad (2.30)$$

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. 2.36) взаимное сопротивление $x_{12} = x_1 + x_2 + x_1 x_2/x_3$ и характеристика мощности имеет амплитуду

$$P_{\Gamma} = P_{H} = \frac{EU}{x_{1} + x_{2} + x_{1}x_{2}/x_{3}}$$
(2.31)

Если бы шунтирующее индуктивное сопротивление *x*₃ в схеме отсутствовало, то амплитуда характеристики мощности была бы равной:

$$P_m = \frac{EU}{x_1 + x_2}.$$
 (2.32)

Поскольку знаменатель в выражении (2.31) больше, чем в (2.32), амплитуда мощности в первом случае меньше, чем во втором, 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 только при условии, что ЭДС генератора 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 для того, чтобы восстановить напряжение в точке подключения сопротивления, приходится увеличивать ЭДС генератора E с тем, чтобы компенсировать потерю напряжения от реактивного тока, потребляемого индуктивным сопротивлением шунта. Это увеличение ЭДС приводит к прямо противоположным результатам, обусловливающим повышение характеристики мощности (рис. 2.37).



Рис. 2.36. Схема замещения



Рис. 2.37. Влияние индуктивного шунта

При емкостном реактивном сопротивлении шунта (рис. 2.38 — поперечная компенсация) результат противоположен (рис. 2.39). Это свидетельствует о недопустимости поперечной компенсации вблизи шин электростанции.



Рис. 2.38. Схема замещения

Без шунта: $x_{12} = x_1 + x_2$, с шунтом: $x_{12}^{iu} = jx_1 + jx_2 + \frac{jx_1jx_2}{-jx_c} < x_{12}$.



Рис. 2.39. Влияние емкостного шунта

При наличии в схеме электропередачи активных сопротивлений мощности генератора и приемника, различны, и разница между ними определяется значением потерь мощности между генератором и приемной системой. Первые члены в (2.25, 2.27) 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: $P_{11} = E^2 y_{11} \sin \alpha_{11}$, а приемной системы — отрицательна: $P_{22} = -U^2 y_{22} \sin \alpha_{22}$.

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 + jxвсе собственные и взаимные сопротивления и проводимости ветвей и их углы одинаковы:

$$y_{11} = y_{22} = y_{12} = y; \quad \alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{12} = \alpha:$$

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

Угол α_{12} здесь положителен и характеристики мощности имеют вид, представленный на рисунке 2.40.



Рис. 2.40. Характеристики мощности при учете последовательного активного сопротивления

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

Если приемная система имеет бесконечную мощность, то характеристика мощности P_H не представляет интереса 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. В этих условиях устойчивость системы передачи связывается исключительно с характеристикой мощности генератора, и нарушение устойчивости происходит при неизменной ЭДС *E* при достижении максимума этой характеристики, равного:

$$P_m = E^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + EU y_{12}$$

при угле $\delta_{\kappa p} = 90^{\circ} + \alpha_{12}$, несколько большем 90° . Рассмотрим параллельное включение активного сопротивления (рис. 2.41).



Рис. 2.41. Характеристика мощности при наличии параллельного активного сопротивления

В этом случае взаимное сопротивление:

$$Z_{12} = jx_1 + jx_2 + \frac{jx_1jx_2}{r} = -\frac{x_1x_2}{r} + j(x_1 + x_2).$$

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 ЭДС в другой. 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.

Синусоидальная характеристика мощности генератора на рисунке 2.41 сдвинута вверх и влево, а приемной системы вниз и вправо. Неустойчивость системы при E = const возникает при достижении максимума характеристики мощности генератора при угле $\delta_{\kappa p}$ несколько меньшем 90°.

2.14. Учет нагрузки и действительный предел мощности

Если мощность приемной системы соизмерима с мощностью электропередачи, то напряжение нагрузки не остается постоянным при изменениях режима работы электропередачи и уменьшается во всех промежуточных точках схемы электропередачи.

Если приемная система представлена некоторой нагрузкой и местной электростанцией (рис. 2.42), то при оценке статической устойчивости системы передачи следует исходить из постоянства ЭДС обеих станций E_1 и E_2 . Увеличение угла δ_{12} между векторами ЭДС, а следовательно, и угла δ между • и U сопровождается уменьшением промежуточных напряжений на шинах нагрузки. Следовательно, напряжение следует считать переменным $U_{H(\delta)}$ и характеристика передаваемой мощности определяется зависимостью

$$P_{\Gamma} = \frac{E_{\Gamma} U_{H(\delta)}}{x_{12}} \sin \delta , \qquad (2.33)$$

где x_{12} представляет собой индуктивное сопротивление электропередачи между ЭДС E_1 и напряжением нагрузки U_H , то напряжение следует считать переменным. Построив семейство синусоид для различных значений напряжения U_H (рис. 2.43), действительную характеристику мощности, учитывающую снижение напряжения нагрузки, можно получить, переходя при увеличении δ с одной синусоиды на другую в соответствии с уменьшением напряжения U_H . Действительная характеристика мощности имеет максимум — так называемый *действительный предел мощности*, который достигается при угле, меньшем 90°. Значение действительного предела мощности получается меньше идеального предела мощности, т.е. амплитуды синусоиды, построенной при постоянстве напряжения исходного режима U = 100%.



Рис. 2.42. Схема электропередачи. Векторная диаграмма

Таким образом, снижение напряжения нагрузки является фактором, ухудшающим статическую устойчивость системы передачи. Обращая внимание на значение этого фактора, в практических расчетах устойчивости характеристику передаваемой мощности часто строят в зависимости от напряжения нагрузки U_H , а не от угла δ .



Рис. 2.43. Действительная характеристика мощности

Влияние нагрузки на действительный предел мощности довольно значительно, и с ним приходится считаться в практических расчетах устойчивости. Строгое решение задачи приводит к представлению нагрузок их статическими характеристиками, дающими зависимость активной и реактивной мощности нагрузки от напряжения.

При постоянном сопротивлении нагрузки $z_{\mu} = \text{const.}$

$$P_{\Gamma} = \frac{E^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{EU_c}{z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}). \qquad (2.34)$$

2.15. Статическая устойчивость при регулировании возбуждения

Регулирование возбуждения в семе (рис. 2.44) с целью поддержания постоянного напряжения на шинах генератора U_{Γ} приводит к росту амплитуды угловых характеристик мощности (*внутренних характеристик*) при увеличении нагрузки (рис. 2.45), что отражено на векторной диаграмме (рис. 2.46).



Рис. 2.44. Схема замещения



Рис. 2.45. Угловая характеристика мощности



Рис. 2.46. Векторная диаграмма при учете регулирования возбуждения

Угловая характеристика мощности при переменной ЭДС $E_{\Gamma(\delta)}$ может быть построена по выражению

$$P_{m} = \frac{E_{\Gamma(\delta)}U_{c}}{x_{12}}.$$
 (2.35)

Каждому новому углу δ соответствует новая угловая характеристика. Результирующая характеристика *abc* представленная на рисунке 2.45 носит название *внешней характеристики генератора*. Критерий статической устойчивости $\frac{dP}{d\delta} > 0$ на ней выполняется вплоть до точки *c*. Вместе с тем удержать машину в устойчивом состоянии удается только при специальных типах регуляторов сильного действия из-за наличия *зоны нечувствительности* регуляторов. Точка *b* внешней характеристики носит название *внутреннего предела передаваемой мощности* P_{me} , который обеспечивается при регуляторах пропорционального действия. Запас устойчивости оценивается для каждой точки внешней характеристики по внутренним характеристикам.

$$k_{3i} = \frac{P_{m_{\theta}i} - P_{0i}}{P_{0i}} 100\%.$$
(2.36)

Участок *bc* внешней характеристики носит название зоны искусственной устойчивости.

2.16. Особенности работы различных систем АРВ

Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) синхронных генераторов является наиболее эффективным средством обеспечения требуемого качества электрической энергии и повышения запаса статической устойчивости. Обобщенно все типы регулирования можно разбить на три группы:

1. Отсутствие автоматического регулирования (ручное регулирование без АРВ).

2. Регулятор пропорционального действия, изменяющий ток возбуждения только в зависимости от изменения напряжения, тока либо угла (АРВ ПД).

3. Регулятор сильного действия, изменяющий ток возбуждения не только в зависимости от изменения напряжения, тока либо угла, а также от скорости и ускорения их изменения (АРВ СД).

Системы АРВ отличаются значением коэффициентов усиления и видом стабилизации. Допустимое снижение напряжения определяется коэффициен-

том статизма —
$$k_{cm} = \frac{\Delta U}{U_0} 100$$
.

Для регуляторов пропорционального действия $k_y = 20 - 50; k_{cm} \approx 5\%$.

Структурные схемы двух видов регуляторов ПД приведены на Рис. 2.47, 2.48.

При больших коэффициентах усиления система не работоспособна, так как наступает самораскачивание системы. Для регуляторов сильного действия $k_v = 100 - 200$; $k_{cm} \approx 2...3\%$.



Рис. 2.47. Регулятор пропорционального действия (корректор напряжения)



Рис. 2.48. Токовое компаундирование

Закон изменения вынужденной составляющей ЭДС носит название закона регулирования и выражается формулой

$$\Delta E_{qe} = \frac{1}{1+pT_e} \cdot \frac{1}{1+pT_p} \sum_i W_{IIj}(p) \Delta \Pi_j, \qquad (2.37)$$

где — ΔE_{qe} вынужденная составляющая ЭДС; T_e , T_p — постоянные времени силового и измерительного элементов АРВ; $\Delta \Pi_j$ — параметр регулирования; $\Delta W_{\Pi j}$ — передаточная функция АРВ по параметру $\Delta \Pi_j$. При АРВ пропорционального действия $\Delta \Pi j = \Delta U$; $W_{\Pi j} = k_{o\Pi}$ — коэффициент усиления по от-клонению.

При регуляторах сильного действия передаточная функция

$$W_{\Pi j} = k_{o\Pi} + \frac{k_{1\Pi} p}{1 + pT_{1\Pi}} + k_{2\Pi} \frac{p^2}{1 + pT_{2\Pi}}, \qquad (2.38)$$

где $k_{1\Pi}$, $k_{2\Pi}$, $T_{1\Pi}$, $T_{2\Pi}$ — коэффициенты усиления по производным и постоянные времени дифференцирующих элементов.

Характер изменения ЭДС при различных типах регулирования приведен на Рис. 2.49 *а*, 2.49 *б*, 2.49 *в*.



Рис. 2.49. Угловые характеристики — а) без АРВ, б) с АРВ ПД, в) с АРВ СД

Если регулирование возбуждения осуществляется под действием регулятора, который изменяет ток возбуждения только в зависимости от изменения напряжения (регулятор пропорционального действия), то при наличии запаздывания генератор сможет работать при углах δ , в той или иной степени

превышающих 90°, но не достигающих значения, при котором характеристика мощности имеет максимальное значение.

Неизбежное запаздывание в изменении тока возбуждения возбудителя, особенно генератора, а также запаздывание в изменении токов в цепях самого регулятора усложняют условия сохранения устойчивости. Зона устойчивой работы при этом может быть расширена вплоть до значения мощности, равного амплитуде внешней характеристики, только при специальном выборе закона регулирования, который может быть реализован так называемыми регуляторами сильного действия.

При приближенных расчетах принимается синусоидальный характер угловой характеристики мощности, максимум которой при различных типах регуляторов

$$P_x = \frac{E_x U_C}{x_C + \Delta x} \sin \delta$$
 (2.39)

— универсальная угловая характеристика мощности.

Значения ЭДС и дополнительных сопротивлений для различных типов регуляторов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

| | Δx | E_x |
|---------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Без АРВ | x_d | E_q |
| АРВ ПД | <i>x</i> ' _{<i>d</i>} | E'_q |
| АРВ СД | 0 | ${U}_{{\scriptscriptstyle \Gamma}}$ |

Характеристики АРВ

2.17. Статическая устойчивость при регулировании возбуждения с зоной нечувствительности

У всех регуляторов типа существует зона нечувствительности. Такие регуляторы начинают работать только после того, как отклонение напряжения в ту или иную сторону достигнет определенного значения, необходимого для того, чтобы преодолеть сопротивление подвижных частей регулятора, либо уровень шумов усилителя. При меньших отклонениях, лежащих в пределах зоны нечувствительности, регулятор не работает. В подобных условиях для генератора можно построить две внешние характеристики мощности, соответствующие границам зоны нечувствительности (рис. 2.50). Если исходному режиму работы генератора при $\delta > 90^{\circ}$ соответствует точка 1, то вследствие

существования у регулятора зоны нечувствительности этот режим длительно существовать не может. Вследствие того что внутренняя характеристика мощности падает, угол δ начинает нарастать (или уменьшаться). После того как будут пройдены границы зоны нечувствительности, регулятор начиная работать и, изменяя ЭДС генератора, может затормозить его и ограничить нарастание угла. Однако если в результате затухания колебаний процесс и возвратился бы к исходным параметрам, характеризуемым точкой 1, то в силу внутренней неустойчивости режима в этой точке колебания немедленно возникли бы снова.

Таким образом, характерной особенностью работы генератора в области значений угла $\delta > 90^{\circ}$ при регуляторах, имеющих зону нечувствительности, являются непрерывные незатухающие конечные колебания угла δ , а, следовательно, мощности, напряжения и тока генератора. Эти колебания затрудняют контроль за работой генератора и заставляют отрицательно характеризовать возможность работы генераторов в области $\delta > 90^{\circ}$. Характер возникающих процессов рассмотрен ниже.



Рис. 2.50. Регулирование возбуждения с зоной нечувствительности

Поскольку регуляторы обладают зоной нечувствительности работа в т.1 происходит по внутренней характеристике и критерий устойчивости не выполняется. Начинается ускорение сначала до т.2. при $U < U_0$, $P_0 > P_3$ затем ротор движется с подъемом напряжения до т.3.

В точке т.3. $P_{_{9}} = P_{_{0}}$, однако $U < U_{_{0}}$ и в процессе движения произошла работа идущая на увеличение энергии $A_{_{VCK}}$, пропорциональная площади 1231

 $A_{yc\kappa} = \int_{\delta_1}^{\delta_3} \Delta P d\delta$ — площадка ускорения; которая компенсируется тормо-

жением при движении до т.4;

$$A_{mopm} = \int_{\delta_3}^{\delta_4} \Delta P d\delta = A_{yc\kappa}$$
 — площадка торможения.

В точке т.4. $P_{9} > P_{0}$ — начнется торможение при $U < U_{0}$ и напряжение возрастает при движении до точки т. 5.

В точке т.5. $U = U_0$, однако $P_3 > P_0$ и торможение продолжается до точки т.6.

В точке т.б. $U > U_0$ — торможение идет при снижении возбуждения.

В точке т.7. $P_{3} = P_{0}$, но в процессе торможения израсходована энергия $A_{mopm} = \int_{\delta_{1}}^{\delta_{7}} \Delta P d\delta$ и начинается ее восполнение движением до точки т.8.

В точке т.8 $\omega = \omega_0$, но $P_0 > P_3$ при $U \neq U_0$ и вновь начинается движение. Процесс повторяется с увеличением амплитуды колебаний вплоть до выпадения генератора из синхронизма (рис. 2.51).



Рис. 2.51. Колебательный процесс

Этот процесс нельзя ликвидировать. Колебания будут всегда, но их амплитуду можно уменьшить до приемлемых значений вводя стабилизацию в регуляторы сильного действия. Характер процесса в этом случае показан на рисунке 2.51 пунктиром.

3. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

3.1. Динамическая устойчивость. Основные допущения и критерии

Динамическая устойчивость — это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или состояние, практически близкое к исходному (допустимому по условиям эксплуатации системы).

О динамической устойчивости судят по характеру изменения параметров режима при конечных возмущениях, причем в отличие от условий, в которых оценивается статическая устойчивость, возмущения, рассматривают не только конечными, но и вызванными вполне определенными возмущающими факторами, например, К.З. в той или иной точке системы. Изменение режима при этом характеризуется нелинейными уравнениями, отражающими воздействие соответствующего возмущающего фактора.

В динамической устойчивости важны конкретные знания исходных условий (время, место, вид, длительность).

При упрощенном анализе принимаются следующие допущения:

1. Механическая мощность или момент постоянен в течение всего переходного процесса;

2. Электрическая мощность P_{\Im} изменяется мгновенно при изменении режима, что допустимо при значительном различии постоянных времени затухания процесса:

$$T_{\mathfrak{Z}} \ll T_{mex}$$

3. Не учитывается демпферная мощность ($P_d = 0$) и демпферные моменты, так как их неучет обеспечивает гарантированное решение. При этом уравнение движения при малых изменениях скорости принимает вид:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta \,. \tag{3.1}$$

4. При исследовании несимметричных режимов полная электромагнитная мощность принимается равной полной мощности прямой последовательности:

$$P_{\mathfrak{Z}} = P_{\mathfrak{Z}}$$

При этом самое легкое короткое замыкание — однофазное, самое тяжелое — трехфазное.

6. Вне зависимости от системы регулирования генератор вводится своими (переходными) параметрами $E' = \text{const}, x'_d$ и угловая характеристика мощности передачи определяется выражением

$$P_{\mathfrak{I}} = P_{\mathfrak{I}} = \frac{E'U_c}{x_c + x'_d} \sin\delta.$$
(3.2)

Критерием динамической устойчивости синхронных машин является правило (способ) площадей, а асинхронных двигателей — преобладание электромагнитного вращающего момента над механическим моментом со-противления.

3.2. Способ площадей на примере отключения одной цепи двухцепной линии

Устойчивость сохраняется в случае, если энергия возможного торможения больше энергии ускорения. Геометрическим аналогом энергии являются соответствующие площадки, построенные на основе угловых характеристик мощности:

$$S_{y} \leq S_{m}.$$
(3.3)

Рассмотрим способ площадей на примере отключения одной цепи двухцепной линии передачи (рис. 3.1):



Рис. 3.1. Расчетная схема



Рис. 3.2. Схема замещения

 $\begin{aligned} x_{12}^{2u} &= x'_d + x_{T1} + \frac{x_{\pi}}{2} + x_{T2} \text{ ; } x_{12}^{1u} = x'_d + x_{T1} + x_{\pi} + x_{T2} > x_{12}^{2y} \text{ .} \\ \\ \Pi \text{ри этом } P_m^{2u} &> P_m^{1y} \text{ .} \end{aligned}$

При отключении линии амплитуда угловой характеристики мощности уменьшается и вследствие небаланса мощностей $P_0 > P_3$ начинается ускорение ротора генератора (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Правило площадей

Работа ускорения:

$$A_{yc\kappa} = \int_{\delta_0}^{\delta_{cm}} (P_0 - P_m^{1y} \sin \delta) d\delta \equiv S_{yc\kappa}.$$
 (3.4)

Работа торможения:

$$A_{mop_{\mathcal{M}}} = \int_{\delta cm}^{\delta \max} (P_0 - P_m^{1\mu} \sin \delta) d\delta \equiv S_{mop_{\mathcal{M}}}(-).$$

$$S_{\mathcal{Y}} = |S_m|.$$
(3.5)

Введем понятие: площадь возможного торможения

$$A_{\boldsymbol{\theta}.\boldsymbol{m}} = \int_{\delta \boldsymbol{c}\boldsymbol{m}}^{\delta \boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{p}} (P_0 - P_{\boldsymbol{m}}^{1\boldsymbol{\mu}} \sin \delta) d\delta = S_{\boldsymbol{\theta}.\boldsymbol{m}}(-) \,. \tag{3.6}$$

При $|S_{_{e.m}}| \ge S_{_{Y}}$ — динамическая устойчивость будет обеспечена.

Практическим критерием динамической устойчивости синхронных машин является соотношение

$$\left|S_{_{\theta,m}}\right| \ge S_{_{Y}}.\tag{3.7}$$

Коэффициент запаса динамической устойчивости

$$k_{o} = \frac{|S_{e.m}|}{S_{v}} > 1.$$
(3.8)

Пример.

Найти предельную мощность электропередачи Казахстан-Омск (рис. 3.4), которая обеспечивает сохранение динамической устойчивости при отключении одной цепи двухцепной линии.



Рис. 3.4. Схема электропередачи

Расчетные параметры:

$$\begin{split} x_{y\partial} &= 0,4 \text{ Ом/км}; \ \ x_{\pi} = x_{y\partial} l = 400 * 0,4 = 160 \text{ Ом}; \\ P_m^{1\mu} &= \frac{500 * 500}{160} \approx 1,5 \text{ ГВт}; \qquad P_m^{2\mu} = \frac{500 * 500}{80} \approx 3 \text{ ГВт}; \\ S_y + S_{e.m.} &= 0; \ k_{\partial} = 1. \end{split}$$

Условие равенства площадей при $S_y + S_{e.m.} = 0$; и $k_{\partial} = 1$ — предельный случай иллюстрирован рисунком 3.5.



Рис. 3.5. Условие равенства площадей

Алгоритм решения: $S_{y} = |S_{T}| = |S_{e.m}|; \ \delta_{\max} = \delta_{\kappa p};$

$$\begin{cases} \int_{\delta o}^{\delta cm} (P_{0np} - P_m^{1u} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta cm}^{\delta kp} (P_{0np} - P_m^{1u} \sin \delta) d\delta = 0; \\ \int_{\delta o}^{\delta kp} (P_{0np} - P_m^{1u} \sin \delta) d\delta = P_{0np} \delta \Big|_{\delta o}^{\delta kp} - P_m^{1u} \cos \delta \Big|_{\delta o}^{\delta kp} = 0; \\ P_{0np} (\delta \kappa p - \delta o) \ pad \ - P_m^{1u} (\cos \delta \kappa p - \cos \delta o) = 0; \\ \delta o = \arcsin \frac{P_{0np}}{P_m^{2u}}; \ \delta \kappa p = \pi - \arcsin \frac{P_{0np}}{P_m^{1u}}. \end{cases}$$

Решение системы может быть произведено итерационным методом.

$$P_{0} = F(P_{0}); \quad \left[P_{0(i+1)} = F(P_{0i})\right]; \quad P_{0(i+1)} = \frac{P_{m}^{iu}(\cos \delta_{\kappa p} - \cos \delta_{0})}{\delta_{\kappa p} - \delta_{0}}$$

В итоге получаем: $P_0 = 1275 \text{ MBt}(k_0 = 1)$.

При этом коэффициент запаса статической устойчивости

$$k_{3} = \frac{1500 - 1275}{1275} \cdot 100\% = 18\%.$$

3.3. Использование комплексных схем замещения при анализе динамической устойчивости

При возникновении КЗ в точке $K^{(n)}$ расчетной схемы (рис. 3.6) возникают токи прямой, обратной и нулевой последовательностей I_1, I_2, I_0 .



Рис. 3.6. Расчетная схема

 $I_1 \Rightarrow P_1$ (электромагнитная мощность прямой последовательности на валу генератора).

Характер изменения электромагнитной мощности обратной последовательности на валу генератора дан на рисунке 3.7, причем ее среднее значение за период $I_2 \Longrightarrow P_{2cp} = 0$.



Рис. 3.7. Мощность (момент) обратной последовательности

Токи нулевой последовательности в генераторе отсутствуют так как нейтраль генераторов не заземляется и $I_0 \Longrightarrow P_0 = 0$.

Таким образом, полная электромагнитная мощность: $P_{\Sigma} = P_1 = \frac{E \cdot U}{x_{12}^{(n)}}$.

Для нахождения взаимного сопротивления при КЗ составляется комплексная схема замещения, которая сводится к схеме прямой последовательности при включении в место КЗ дополнительного сопротивления $\Delta x^{(n)} = x_{uu}^{(n)}$ (сопротивления шунта), зависящего от вида короткого замыкания (табл. 3.1). Преобразования схемы замещения для нахождения взаимного сопротивления при КЗ $x_{12}^{(n)}$ даны на рисунках 3.8, 3.9, 3.10, 3.11.



Рис. 3.8. Схема замещения при несимметричном коротком замыкании



Рис. 3.9. Схема замещения



Рис. 3.10. Результирующая схема замещения

Сопротивления x_E и x_u можно исключить из расчета, так как по ним протекает активная мощность.



Рис. 3.11. Расчетная схема

$$\begin{split} x_{12}^{(n)} &= x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_u^{(n)}} > x_{12}^{\mu p}; \\ P_m^{(n)} &< P_m^{\mu p}. \end{split}$$

При этом $P_m^{(3)} < P_m^{(1,1)} < P_m^{(2)} < P_m^{(1)}$.

Таблица 3.1

Параметры шунта различных видов коротких замыканий

| K ⁽ⁿ⁾ | K ⁽³⁾ | K ⁽²⁾ | K ⁽¹⁾ | К ^(1,1) |
|-------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\chi^{(n)}_{uu}$ | 0 | $x_{2\Sigma}$ | $x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$ | $x_{2\Sigma} / x_{0\Sigma}$ |

<u>Пример</u>. Для принципиальной схемы рисунка 3.6 схема замещения обратной последовательности:



Рис. 3.12. Схема замещения обратной последовательности

Результирующее сопротивление обратной последовательности:

$$x_{2\Sigma} = x_3 / / x_4.$$

Схема замещения нулевой последовательности при заземленной нейтрали T2:



Рис. 3.13. Схема замещения нулевой последовательности

Результирующее сопротивление нулевой последовательности $x_{0\Sigma} = x_{0T1} / / x_5$.

При изолированной нейтрали T2 (рис. 3.14) $x_{0\Sigma} = x_{0T1}$.



Рис. 3.14 Схема замещения нулевой последовательности

Для каскадной схемы развития аварии К⁽¹⁾, К⁽³⁾ на рисунке 3.15 дана иллюстрация процесса на основе правила площадей.



Рис. 3.15. Анализ динамической устойчивости при коротких замыканиях

Из рисунка видно, что динамическая устойчивость сохраняется, так как

$$S_{y_1} + S_{y_2} = |S_T|, \ S_{BT} = S_T + S'_{BT}, \ k_{\partial} = \frac{|S_{BT}|}{S_V} > 1.$$

3.4. Динамическая устойчивость при коротких замыканиях. Качественный анализ

Наиболее распространенным видом возмущений, приводящим к необходимости анализа динамической устойчивости, является короткое замыкание. Проведем качественный анализ для следующих случаев:

— несимметричное КЗ без АПВ и при влиянии АПВ;

— двухфазное КЗ с последующим трехфазным при влиянии АПВ.

Из рисунков 3.16, 3.17 видно, что без АПВ при условии $S_y = |S_m|$ устойчивость сохраняется с малым запасом динамической устойчивости и с большим запасом с АПВ при условии $S_y = |S_{m1} + S_{m2}|$.

Таким образом, видно, что при влиянии АПВ устойчивость выше, так как увеличивается площадка возможного торможения.

<u>Пример</u>. КЗ без влияния АПВ (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Динамическая устойчивость без влияния АПВ

Пример. КЗ при наличии АПВ (рис. 3.17)



Рис. 3.17. Динамическая устойчивость при наличии АПВ

<u>Пример</u>. Двухфазное КЗ с последующим трехфазным при влиянии АПВ (рис. 3.18).



Рис. 3.18. Динамическая устойчивость при двух видах КЗ

3.5. Определение предельного угла отключения КЗ

Рассмотрим общий случай несимметричного КЗ в начале линии L2 (точка К-1 на рис. 3.19) при коэффициенте запаса динамической устойчивости $k_d = 1$.



Рис. 3.19. Принципиальная схема простейшей системы

В момент КЗ из-за изменения параметров схемы происходит переход с одной характеристики мощности на другую (рис. 3.20). Т.к. ротор обладает определенной инерцией, то угол δ мгновенно измениться не может и отдаваемая генератором мощность уменьшается до значения $P_{(0)}$. Мощность турбины при этом не изменяется в виду запаздывания ее регуляторов. На валу турбина-генератор возникает некоторый избыточный момент, определяемый избытком мощности ($\Delta P = P_0 - P_{(0)}$). Под влиянием этого момента ротор генератора начинает ускоряться, угол δ увеличивается. Поскольку линия L2 имеет защиту, через определенное время она отключится выключателями B1 и B2.



Рис. 3.20. Определение предельного угла отключения КЗ

Времени t_{omkn} соответствует угол отключения КЗ δ_{omkn} . Отключение КЗ вызывает переход с характеристики мощности аварийного режима АР на характеристику послеаварийного режима ПАР. При этом избыточный момент меняет знак, превращаясь из ускоряющего в тормозящий. Ротор, тормозясь, продолжает движение в сторону увеличения угла из-за накопленной в процессе ускорения кинетической энергии. Это движение будет продолжаться до тех пор, пока площадь торможения S_T не станет равной площади ускорения

Приравнивая к нулю сумму этих площадей при $S_{yck} = S_{mopm} = S_{s.m}$; получаем аналитическое выражение для предельного угла отключения КЗ:

$$\begin{split} \delta_{m} &= \delta_{\kappa p} = \pi - \arcsin \frac{P_{o}}{P_{m}^{nap}}; \\ S_{y} + S_{e.m} &= 0; \\ & \stackrel{\delta_{np.omkn.}}{\int} P_{o} - P_{m}^{ap} \sin \delta \ d\delta + \int_{\delta_{npomkn.}}^{\delta_{\kappa p}} P_{o} - P_{m}^{nap} \ d\delta &= 0; \\ P_{o} \delta_{np.omkn.} - P_{o} \delta_{o} + P_{m}^{ap} \cos \delta_{np.omkn.} - P_{m}^{ap} \cos \delta_{o} + P_{o} \delta_{\kappa p} - P_{o} \delta_{np.omkn.} + \\ &+ P_{m}^{nap} \cos \delta_{\kappa p.} - P_{m}^{nap} \cos \delta_{np.omkn.} = 0. \\ P_{o} \delta_{np.} - \delta_{o} - P_{m}^{np} \cos \delta_{o} + P_{m}^{ap} \cos \delta_{\kappa p} - P_{m}^{ap} \cos \delta_{\kappa$$

$$\delta_{np.om\kappan.} = \arccos \frac{P_o \ \delta_{np} - \delta_o \ -P_m^{np} \cos \delta_o + P_m^{ap} \cos \delta_{\kappa p}}{P_m^{nap} - P_m^{ap}}.$$
(3.9)

Для практических целей знания угла $\delta_{np.omкл.}$ недостаточно. При выборе выключателей и расчете релейной защиты необходимо знать не угол, а период времени, в течение которого ротор успевает достигнуть этого угла, т.е. предельно допустимое время отключения КЗ — $t_{np.omkn.}$. Это время может

быть получено на основе решения дифференциального уравнения движения. В общем случае такое решение может быть получено только численными методами. Связь между $\delta_{np.omkn}$ и $t_{np.omkn}$ показана на рисунке 3.21.



Рис. 3.21. Определение предельного времени отключения КЗ

3.6. Определение предельного угла и времени отключения трехфазного короткого замыкания

При трехфазном коротком замыкании на сквозной передаче электромагнитная мощность падает до нуля (рис. 3.22).



Рис. 3.22. Угловая характеристика мощности при трехфазном КЗ

Предельный угол отключения КЗ на основании формулы (3.9)

$$\delta_{np.om\kappan.} = \arccos \frac{P_o \ \delta_{np} - \delta_o \ + P_m^{nap} \cos \delta_{\kappa p}}{P_m^{nap}}.$$
(3.10)

Ротор генератора начинает свое относительное движение под действием избыточного момента, равного механическому моменту турбины при $P_m^{ap} = 0$. Дифференциальное уравнение движения ротора при этом принимает вид:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_o - P_m^{ap} \sin \delta = P_o.$$

Перепишем это уравнение в следующем виде

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_o}{T_j} = a \,.$$

Разбиваем их на систему двух дифференциальных уравнений первого порядка $\frac{d\delta}{dt} = \omega$ (1) и $\frac{d\omega}{dt} = a$ (2) и взяв интеграл от левой и правой частей второго уравнения, $\int d\omega = \int a dt$; получим закон изменения угловой скорости $\omega = at + C_1$.

При t = 0 относительная скорость ротора $\omega = 0$ и, следовательно, $C_1 = 0$. Проинтегрировав первое уравнение системы $\int d\delta = \int \omega dt = \int at dt$; имеем закон изменения угла во времени $\delta = \frac{at^2}{2} + C_2$. Постоянная интегрирования C_2 определяется из условий $\delta = \delta_0, c_2 = \delta_0$ при t = 0. Окончательно зависимость угла от времени будет иметь вид

$$\delta = \frac{at^2}{2} + \delta_0 \tag{3.11}$$

Возрастание угла происходит по квадратичной параболе, а время, отвечающее предельному значению угла $\delta = \delta_{np.om\kappa_{n.}}$ или $t_{np.om\kappa_{n.}}$, находиться из уравнения 3.11

$$t_{np.om\kappa\pi.} = \sqrt{\frac{2T_j \ \delta_{np.om\kappa\pi.} - \delta_o}{P_o}} \tag{3.12}$$

(все величины в относительных единицах).

3.7. Динамическая устойчивость для случая двух электростанций

При анализе динамической устойчивости двух электростанций конечной мощности схема замещения нормального и аварийных режимов строится как обычно, но вместо источника с $U_c = \text{const}$ вводится генератор конечной мощности со своими переходными ЭДС и сопротивлениями x'_d



Рис. 3.23. Расчетная схема системы двух электростанций

Сопротивление нагрузки будем считать не зависящим от режима и представим постоянным комплексным сопротивлением *z*_{*H*}. Сопротивление нагрузки для обратной последовательности будет отличаться от прямой.

При внезапном изменении режима роторы генераторов начинают перемещаться относительно друг друга с взаимным ускорением

$$a_{12} = a_1 - a_2 = \left(\frac{\Delta P_1}{T_{j1}} - \frac{\Delta P_2}{T_{j2}}\right),$$

где $\Delta P_1 = P_{01} - P_1$, $\Delta P_2 = P_{02} - P_2$.

Под P_{01} и P_{02} понимаются мощности электростанций отдаваемые в нормальном режиме (мощности турбин), а под P_1 и P_2 электромагнитные мощности первой и второй станции, соответственно, выражаемые угловыми характеристиками (раздел 2.12)

$$P_{1} = \frac{E_{1}^{2}}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_{1}E_{2}}{z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12})$$

$$P_{2} = \frac{E_{2}^{2}}{z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E_{1}E_{2}}{z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}).$$
(3.13)

Собственные и взаимные проводимости, а также дополнительные углы вычисляются для всех исследуемых режимов. Генераторы в схему вводятся как x'_{d} , ЭДС — E', $\delta_{12_0} = \delta_{10} - \delta_{20}$, для нахождения δ_{10} и δ_{20} для исходного режима следует использовать формулу $\delta_0 = \alpha_{12} + \arcsin \frac{P_0 - P_{11}}{P_m}$, либо графическим построением. При определении δ_{20} следует использовать значение мощностей второго генератора. При этом знак выражения меняется.

С помощью выражений задаваясь различными значениями δ_{12} можно построить кривые абсолютных ускорений каждой станции и их взаимное ускорение (рис. 3.24). Эти зависимости позволяют применить для качественного

анализа устойчивости несложных аварий правило площадей и определить максимальный угол расхождения ЭДС.



Рис. 3.24. Применение правила площадей

Однако использовать правило площадей не удается для сложных случаев перехода одной аварии в другую или срабатывании системы автоматического повторного включения (АПВ). В таких ситуациях для определения правильного угла расхождения ЭДС и оценки динамической устойчивости необходимо применять численное интегрирование дифференциальных уравнений, в частности, метод последовательных интегралов для случая двух станций конечной мощности.

3.8. Применение форсировки возбуждения

В целях повышения динамической устойчивости при КЗ применяется форсировка возбуждения или подъем возбуждения до потолочного за минимальное время. Системы АРВ не успевают это сделать за приемлемое время. При наличии у генератора форсировки возбуждения следует, для конкретности, принять, что изменение вынужденной ЭДС E_{qe} происходит до установившегося значения по экспоненциальному закону с постоянной времени возбудителя T_e . Максимальное значение вынужденной ЭДС обычно составляет $E_{qe,np} = 3 \div 5$, в номинальном же режиме $E_q = 1.8 \div 2.5$. Говоря о кратности форсировки возбуждения, подразумевают кратность тока возбуждения либо кратность ЭДС, что одно и то же. Форсировка возбуждения оценивается коэффициентом $K_{\phi} = \frac{E_{qe,np}}{E_{q,nom}} = \frac{I_{np}}{I_{nom}}$, максимальное значение этого коэффициента $K_{\phi} = 2,5$. Для анализа переходного процесса с учетом действия форсировки

возбуждения к дифференциальному уравнению движения добавляется дифференциальное уравнение для переходной ЭДС:

$$\begin{cases} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E_q \quad \frac{1}{T_{d0}}; \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{360f_0}{T_j} (m_0 - m); \\ \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega. \end{cases}$$
(3.14)

Закон регулирования возбуждения:

$$E_{qe} = E_{qe0} + (E_{qe.np} - E_{qe0})(1 - e^{-\frac{t}{Te}}), \qquad (3.15)$$

где T_{d0} — постоянная времени обмотки возбуждения, с.

Синхронная ЭДС E_q при этом меняется во времени и для неявнополюсного генератора при простейшей передаче определяется по выражению:

$$E_{q}(t) = \frac{E'_{q}(t) - \frac{U_{c}}{x_{12}^{(n)}}(x_{d} - x'_{d})\cos\delta_{0}(t)}{1 - \frac{x_{d} - x'_{d}}{x_{11}^{(n)}}},$$
(3.16)

где *x*₁₁ — собственное сопротивление схемы относительно точки приложения ЭДС генератора;

*x*₁₂ — взаимное сопротивление между точкой приложения ЭДС и шинами бесконечной мощности.

Для нахождения x_{11} и x_{12} обратимся к схеме замещения, представленной на рисунке 3.25.

Строго x_{11} и x_{12} находятся по следующим формулам:

$$x_{11} = x_d + x_n / x_c;$$
 $x_{12} = x_d + x_c + \frac{x_d x_c}{x_H}.$

При отсутствии сопротивления *x*_{*H*} формулы примут вид:

$$x_{11} = x_d + x_c; \quad x_{12} = x_d + x_c.$$

Для явнополюсной машины явнополюсность не учитывается.


Рис. 3.25. Схема замещения

Численное интегрирование дифференциальных уравнений следует производить одним из численных методов на ЭВМ, либо ручным расчетом с применением метода последовательных интервалов.

Можно оценить действие форсировки упрощенным образом. Зная постоянную времени возбудителя, значение которой, как правило, находится в пределах $T_e = 0,2 \div 0,3$ секунд, можно сказать, что ЭДС под действием форсировки возбуждения достигнет своего максимального значения за время, равное $3 \div 4$ T_e . Максимальный момент m_m пропорционален изменению ЭДС E_q :

$$m_m = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}},\tag{3.17}$$

Действие форсировки, таким образом, можно учесть увеличением максимального момента $m'_m = K_\phi \cdot m_m$, подставляя при определении предельного угла и времени отключения КЗ m'_m вместо m_m в формуле (3.17), соответственно изменится и $t_{omkn.np.}$, определяемое по формуле (3.12).

3.9. Численные методы решения дифференциальных уравнений относительного движения ротора

Задачи численного решения дифференциальных уравнений сводятся к замене дифференциалов, или бесконечно малых приращений величин конечными приращениями. Решение обычно производится для дифференциальных уравнений первого порядка, так как к ним всегда можно свести уравнения

более высоких порядков. Решение системы сводится к последовательному циклическому решению на последовательности временных интервалов Δt . Алгоритм решения приведен ниже

$$\sum \frac{dX_i}{dt} = f(X_i);$$

$$\frac{dX}{dt} = f(X); \quad \int_{t_0}^{t_1} dX = \int f(X) dt;$$

$$X(t_1) - X(t_o) = \int_{t_0}^{t_1} f(X) dt = \Delta X;$$

$$X(t_1) = X(t_0) + \Delta X.$$
(3.18)

Существует несколько способов нахождения приращения ΔX .

При $X(t_1) = X(t_0) + f(X_0)\Delta t = X(t_0) + \Delta X$ метод носит название — метод Эйлера.

Расчет динамической устойчивости может производиться любым методом численного интегрирования. При расчетах на ЭВМ обычно используется для этих целей явный метод типа Рунге-Кутта четвертой степени [9], имеющийся в математическом обеспечении практически всех ЭВМ. Для решения уравнений второго порядка, особенно при ручных расчетах, удобен специализированный метод последовательных интервалов.

3.10. Метод последовательных интервалов в расчетах динамической устойчивости

При ручных расчетах для численного интегрирования дифференциального уравнения в форме

$$\frac{Tj(c)}{360f_0} \cdot \frac{d^2\delta[zpa\partial]}{dt^2[c]} + P_m \sin\delta = P_0$$
(3.19)

без применения ЭВМ используется *метод последовательных интервалов*. Для расчета зависимостей $\delta = f(t)$ и a = f(t) переходный процесс разбивается на малые ($\Delta t = 0,025 \ c$) отрезки времени, на протяжении которых ускорение *a* считается неизменным. При решении уравнения (3.19) порядок расчета следующий:

1. По разности мощностей первичного двигателя (турбины) и генератора $-\Delta P_{(0)} = P_0 - P_m^{(n)} \sin \delta_{(0)}$ для начала процесса определяется изменение угла $\Delta \delta_{(1)}$ за первый расчетный интервал

$$\Delta \delta_{(1)} = 0.5 a_{(0)} \Delta t^2, \qquad (3.20)$$

где $a_{(0)} = \frac{360 f_0}{T_j} \Delta P_{(0)} = k \Delta P_{(0)}; \quad k = \frac{360 f_0}{T_j}$

и находится значение угла в конце первого интервала

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)},$$
 где $\delta_{(0)} = \delta'_0.$ (3.21)

2. По новому значению угла $\delta_{(1)}$ определяется разность мощностей в начале второго интервала $\Delta P_{(1)} = P_0 - P_m^{(n)} \sin \delta_{(1)}$ и находится приращение угла за второй интервал

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + a_{(1)} \Delta t^2, \qquad (3.22)$$

где $a_{(1)} = k \Delta P_{(1)}$, а затем новое значение угла $\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)}$.

3. Для приращений угла во всех последующих интервалах используется формула

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + a_{(n-1)} \Delta t^2.$$
(3.23)

При скачкообразных изменениях режима в течение переходного процесса (изменения вида КЗ, отключение КЗ успешное АПВ — автоматическое повторное включение), когда избыток мощности внезапно изменяется от $\Delta P_{(k)}$ до $\Delta P'_{(k)}$, приращение угла k+1 интервала находится из выражения

$$\Delta \delta_{(k+1)} = \Delta \delta_{(k)} + 0.5(a_{(k)} + a'_{(k)})\Delta t^2.$$
(3.24)

Расчет производится либо до начала уменьшения угла δ , что свидетельствует о сохранении устойчивости, либо до предельного по условиям устойчивости угла $\delta_{\kappa p}$. Расчеты удобно вести в табличной форме. По результатам расчета строятся зависимости $\delta_{(t)}$ и $a_{(t)}$ с обозначением характерных углов и значений времени. В случае отсутствия динамической устойчивости определяется предельный угол и время отключения КЗ.

При учете форсировки возбуждения совместно с уравнением движения методом Эйлера [8] решаются дифференциальные уравнения (3.14) с учетом соотношения (3.15). Расчет производится в следующем порядке [2, 3]:

1. В исходном режиме определяются значения начального угла δ_0 , ЭДС E'_{q0} , $E_{q0} = E_{qe0}$ и среднее значение $E_{qe.cp.}$ за расчетный интервал времени.

2. Определяются взаимные реактивности $x_{12}^{(n)}$ для всех расчетных ситуаций, при этом генератор вводится в схему замещения сопротивлением x_d .

3. По выражению (3.15), определяется ЭДС холостого хода для первого момента нарушения режима — $E_{q(0)}$.

4. Находится изменение переходной ЭДС в течение первого расчетного интервала

$$\Delta E'_{q1} = \frac{E_{qe.cp.} - E_{q(0)}}{Td_0} \Delta t, \qquad (3.25)$$

и значение переходной ЭДС в конце первого интервала

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)}.$$
(3.26)

5. Определяется активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)}U_{H}}{x_{a\delta}^{(n)}}\sin\delta_{0}$$
(3.27)

и небаланс мощности $\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)}$.

6. По выражениям метода последовательных интервалов (3.20), (3.21) находятся приращения угла $\Delta \delta_{(1)}$ и угол $\delta_{(1)}$ в начале следующего интервала.

7. В результате этого расчета определены значения $E'_{q(1)}$ и $\delta_{(1)}$ в начале второго интервала, по которым находится величина ЭДС E_q и повторяется расчет для нового интервала.

По результатам расчетов строится зависимость во времени угла δ , ЭДС E'_q , E_q , E_{qe} и делаются выводы о характере их изменения.

3.11. Асинхронные режимы в электрических системах. Установившийся асинхронный режим

Асинхронными называют такие режимы работы генератора или двигателя, при которых скорость вращения роторов значительно отклоняется от синхронной.

К асинхронным режимам относятся:

— работа синхронной машины на шины, где синхронная скорость ω_0 отлична от скорости ω этой машины;

асинхронный пуск двигателей или синхронных компенсаторов;

— самозапуск двигателей;

ресинхронизация после нарушения устойчивости;

— самосинхронизация генераторов;

— автоматическое повторное включение с самосинхронизацией (АПВС) или без контроля синхронизма (АПВбС);

— асинхронный пуск двигателей и компенсаторов.

В асинхронном режиме вектор ЭДС синхронной машины, выпавшей из синхронизма, вращается относительно вектора ЭДС машин, работающих синхронно.

На рис. 3.26 *а* показано, как меняется положение вектора э.д.с. *Е* одной из станций системы при больших качаниях, когда вектор перемещается из положения 1 в положение 2, и при асинхронном ходе этой станции, когда из положения 1 вектор перемещается в положение 3, «обогнав» вектор напряжения *U*. На рис. 3.26 *б*, *в* показано, что мощность синхронной машины, обусловленная ее возбуждением (синхронная мощность), меняется в зависимости от угла δ и времени примерно по синусоидальному закону. Для больших качаний (в отличие от асинхронного хода) характерен провал в зависимости P = f(t)., появляющийся при переходе угла δ за 90°. Для асинхронного хода характерно именно по рименное знака синхронной мощности.



Рис. 3.26. Качания и асинхронный режим синхронной машины

Существует три причины перехода генератора в асинхронный режим:

Потеря возбуждения.



Рис. 3.27. Потеря возбуждения синхронной машины

При потере возбуждения падение синхронной мощности вызывает небаланс моментов, и ускорение машины так как $P_m = \frac{EU}{x}$; $E \equiv I_f$. Одновременно возникает электромагнитная асинхронная мощность, которая после исчезновения синхронной мощности уравновешивает момент турбины и наступает *установившийся асинхронный режим* при $\omega > \omega_0$.

Характер процесса при потере возбуждения представлен на рисунке 3.28.



Рис. 3.28. Характер процесса при потере возбуждения

В таком режиме некоторые машины могут работать до 0,5 ч и нести до 70% нагрузки.

Потеря статической устойчивости.



Рис. 3.29. Переход на асинхронный режим в результате потери статической устойчивости при $P_0 = P_{\max}$

Потеря динамической устойчивости.

Выход из синхронизма при потере динамической устойчивости показан на рисунке 3.30. При наличии синхронного и асинхронного момента скорость машины меняется синусоидально вокруг среднего значения ω_a (рис. 3.31).



Рис. 3.30. Характер процесса при потере динамической устойчивости



Рис. 3.31. Колебания скорости синхронной машины

Такой режим работы неприемлем для потребителей. Необходимо гасить поле. Точно такой же характер процесса имеет место при потере статистической устойчивости.

В асинхронном режиме предельная активная мощность, которую может отдавать турбогенератор, обычно ограничивается 50-70% от номинальной мощности из-за возрастания тока статора, а мощность, которую может отдавать современный крупный гидрогенератор 30—50%. Кратковременно ее можно повысить, допустив перегрузку по току статора. Возможность асинхронного хода и его длительность зависят от типа генератора и условий работы системы. Турбогенератору при потере возбуждения разрешается работать в асинхронном режиме до 15-30 мин, без потери возбуждения несколько меньше. Если за это время восстановить синхронную работу не удается, то турбогенератор должен быть отключен от сети. Немедленное отключение от сети турбогенератора, выпавшего из синхронизма, должно производиться только в случаях появления опасности повреждения машины. Длительность работы гидрогенераторов в асинхронном режиме более кратковременна (3...4 мин). Асинхронный ход (установившийся асинхронный режим), недопустим в тех случаях, когда при его появлении потери в роторе оказываются больше номинальных, а ток статора больше $1, 1I_{HOM}$.

3.12. Роль электрического центра системы и приближенный учет качаний при расчетах токов короткого замыкания

Ранее в курсе «Электромагнитные переходные процессы» [6, 7] расчет режимов короткого замыкания рассматривался без учета сдвига векторов *E* и *U* и результирующий ток K3 определялся как алгебраическая сумма токов отдельных источников $I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} I_i$. В действительности между источниками

имеет место сдвиг фаз и при качаниях это вызывает изменение токов и напряжений в системе. Рассмотрим расчетную схему (рис. 3.32).



Рис. 3.32. Расчетная схема

Векторная диаграмма и законы изменения тока и напряжения в промежуточной точке М передачи приведены на рисунках 3.33, 3.34 при качаниях и асинхронном ходе (для случая $x_{IM} = x_{CM}$).



Рис. 3.33. Векторная диаграмма при качаниях



Рис. 3.34. Ток и напряжение в точке М при качаниях

Видно, что при увеличении угла напряжение в промежуточной точке М падает, а ток в передаче увеличивается. Эта ситуация, даже при отсутствии КЗ может привести к ложному срабатыванию дистанционных защит.

Точка системы, в которой напряжение при качаниях имеет минимальную величину, носит название электрического центра системы.

Расчетная схема и схема замещения при коротком замыкании на отходящей от точки М линии приведена на рис. 3.35, 3.36.



Рис. 3.35. Расчетная схема



Рис. 3.36 Схема замещения

Токи КЗ без учета сдвига ЭДС и с их учетом могут быть определены:

$$I_{\Gamma K} = \frac{E_{\Gamma}}{x_{\Gamma K}}$$

$$I_{CK} = \frac{U_{C}}{x_{CK}}$$

$$I_{\Sigma} = I_{\Gamma K} + I_{CK}$$

$$(3.28)$$

Без учета сдвига векторов Е и U;

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{IK}^2 + I_{CK}^2 + 2I_{IK}I_{CK}\cos\delta}$$
(3.29)

с учетом сдвига векторов Е и U.

Очевидно, что с учетом сдвига ток может быть значительно меньше и даже отсутствовать. Это обстоятельство может привести к неотключению КЗ.

При отношении
$$\frac{I_{\Sigma}}{I_{\Sigma}} = \frac{I\sqrt{2(1+\cos\delta)}}{2I} \ge 0,95 \ u \ I_{\Gamma K} = I_{CK} = I.$$
 погрешность от

неучета сдвига не превышает 5%. Это соответствует углу $\delta < 37^{\circ}$.

Характер изменения угла δ во времени может быть найден, либо решением дифференциального уравнения движения, либо по типовым кривым изменения угла [7]. После нахождения токов отдельных источников результирующий ток на время отключения КЗ может быть найден как

$$I_{\kappa.om\kappa.} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos\delta_{om\kappa.}} \,. \tag{3.30}$$

3.13. Способы и средства повышения устойчивости электрических систем

Повысить уровень устойчивости электрической системы можно изменением параметров ее элементов, параметров ее режима или введением дополнительных устройств. При этом необходимо учитывать следующие условия и ограничения:

— изменение параметров основных элементов не должно приводить к ухудшению нормального режима работы системы и его экономичности;

— применение устройства для улучшения устойчивости должно сопровождаться сопоставлением его стоимости и ущерба от нарушения того вида устойчивости, для которого оно предназначено. При выборе мероприятия по повышению устойчивости необходимо технико-экономическая оценка предлагаемого варианта.

Все мероприятия, влияющие на тот или иной вид устойчивости подразделяются на три группы:

1. Основные мероприятия — воздействия на основные элементы. К основным элементам относятся: генераторы, трансформаторы, ЛЭП с выключателями, и двигатели нагрузки.

2. Дополнительные мероприятия — установка и элементов, не является необходимых для нормальной эксплуатации.

3. Мероприятия режимного порядка.

Основные мероприятия

Генераторы. Параметры генераторов оказывают существенное влияние как на статическую, так и на динамическую устойчивость, так как

$$P_m = \frac{E \cdot U}{x}.$$

— Уменьшение реактивных сопротивлений. При использовании на генераторах APB с зоной нечувствительности на статическую устойчивость влияет синхронное индуктивное сопротивление x_d , на динамическую переходное сопротивление x'_d и постоянная инерция T_j .

Существует реальная возможность изменения индуктивных сопротивлений только у гидрогенераторов, которые выполнены по индивидуальным проектам. Обычно турбогенераторы и двигатели изготавливаются едиными сериями с заданными параметрами, изменение которых трудноосуществимо.

— Увеличение механической постоянной инерции.

Постоянная инерции существенно влияет на динамическую устойчивость машины. Чем больше T_j («тяжелее» машина), тем медленнее изменяется скорость ее ротора под действием избыточного момента. Это увеличивает

предельно допустимое время существования аварийного режима, повышая устойчивость системы.

Регулирование возбуждения синхронной машины может рассматриваться как средство «улучшения» ее параметров.

— Применение быстродействующей системы возбуждения (уменьшение постоянной времени возбудителя, увеличение потолка);

— Использование регуляторов возбуждения (сильного действия, цифровых и т.п.).

Потолочное напряжение возбудителя заметно влияет на предел передаваемой мощности генератора. Увеличение этого значения с 2 до 5 дает тот же эффект, что и уменьшение реактивности x_d в 1,5 раза.

Скорость подъема возбуждения значительно влияет на запас динамической устойчивости. Для улучшения статической устойчивости необходимы отсутствие зоны нечувствительности, непрерывное действие регуляторов возбуждения, регулирование не только по отклонению, но и по первой и второй производным регулируемой величины.

— Выполнение генераторов как синхронно-асинхронных (с двумя обмотками, поворачивающих поле).



Рис. 3.37. Продольно-поперечное регулирование возбуждения

— *Фазировка (Фазовое управление)* или циклическая перестановка фаз. Влияет на площади ускорения и торможения.



Рис. 3.38. Фазовое регулирование

— Применение криогенных и сверхпроводящих обмоток на генераторах и трансформаторах.

Трансформаторы. Параметры трансформаторов (сопротивления, намагничивающий ток и т.д.) не оказывают существенного влияния на устойчивость электрических систем. Сопротивление трансформаторов нормируется.

13% — повышающие трансформаторы.

10,5% — понижающие трансформаторы.

Выключатели. Быстрое отключение КЗ имеет решающее значение для улучшения динамической устойчивости. Современные воздушные выключатели имеют собственное время (с момента подачи импульса от защиты на катушку соленоида до расхождения контактов и погасания дуги) в пределах 0.06...0.08 с. Быстродействующая релейная защита срабатывает за 0.02...0.04 с.. Следовательно, время отключения КЗ должно приниматься равным 0.1...0.12 с. При использовании вакуумных выключателей это время сократится до 0.05...0.08 с.

Линии электропередачи. Параметры линий и их номинальное напряжение оказывают существенное влияние на устойчивость системы.

— Повышение напряжения электропередач.

Рост номинального напряжения линии повышает *P*_{*np*} и это повышение тем больше, чем длиннее линия.

— Расщепление проводов в каждой фазе на несколько параллельно идущих Индуктивное сопротивление линии может быть снижено расщеплением проводов, применяемое с целью уменьшения потерь на корону. Расщепление фазы на три провода (ВЛ 500 кВ) уменьшает реактивное сопротивление линии на 25...30%.

Уменьшить индуктивное сопротивлении линии можно, применяя *продольную (емкостную) компенсацию* реактивного сопротивления ВЛ. Для повышения пропускной способности дальних электропередач применяются промежуточные синхронные компенсаторы и управляемые конденсаторы, что можно отнести и к дополнительным мероприятиям.

— *Создание электропередач нового типа* (управляемых, полуразомкнутых, самокомпенсирующихся, компактных, кабельных и т.п.)

Дополнительные мероприятия.

— Сооружение переключательных пунктов на электропередачах.

— Установка преобразовательных устройств связи систем (тиристорных или электромеханических).

— Использование управляемых источников реактивной мощности (ИРМ).

— Использование автоматической аварийной разгрузки генераторов.

— Заземление нейтралей трансформаторов через активное или реактивное сопротивление.

Если сеть с глухозаземленной нейтралью заземлить через небольшое сопротивление, не повышающее допустимое напряжения на нейтрали, то условия работы изоляции не изменятся, а динамическая устойчивость системы при несимметричных КЗ улучшится.

— Электрическое торможение генераторов используется для повышения устойчивости при симметричных КЗ. Генератор, ротор которого ускоряется из-за какого-либо возмущения, тормозится активными сопротивлениями, включаемыми последовательно или параллельно. Наиболее эффективно параллельное включение сопротивления.

Регулирование турбин. Небаланс мощности, возникающий при возмущении генератора, может быть уменьшен или полностью скомпенсирован снижением мощности турбины. Если бы регуляторы турбины были безынерционны, т.е. могли мгновенно реагировать на изменение электрической мощности, соответственно меняя механическую мощность, то возможность нарушения динамической устойчивости была бы исключена. Однако обычные регуляторы турбин являются инерционными системами со значительной зоной нечувствительности. При качаниях генераторов они не реагируют на изменения скорости.

Большими возможностями регулирования обладают газовые турбины, у которых удается быстро изменять механическую мощность при синхронных качаниях генераторов.

Мероприятия режимного порядка.

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

необходимых резервов мощности могут существенно увеличить запасы устойчивости.

— Иерархическое управление системой с применением автоматики и ЦВМ и применение вычислительной техники для управления переходными процессами.

Современные электрические станции и энергосистеме имеют до нескольких десятков устройств системной и противоаварийной (ПА) автоматики. Устройства ПА автоматики могут быть выполнены либо по принципу «после», либо по принципу «до». В первом случае после возникновения аварийного возмущения в энергосистеме оценивается тяжесть этого возмущения, рассчитываются и реализуются управляющие воздействия, предотвращающие развитие аварийных процессов. Такое выполнение устройств автоматики требует очень большого быстродействия технических средств сбора, передачи и обработки информации, так как оценка состояния энергосистемы и расчет управляющих воздействий должны быть выполнены за сотые доли секунды.

— Отключение части генераторов в послеаварийном режиме.

— Трехфазное и пофазное АПВ.

— Непрерывный контроль состояния системы (диагностический контроль).

— Изменение схемы коммутации системы.

— Распределение нагрузки между станциями с учетом требований улучшения устойчивости и качества переходных процессов.

— Резервы активной и реактивной мощности на электрических станциях улучшают как статическую, так и динамическую устойчивость. Существуют несколько видов резервов: аварийный, нагрузочный, ремонтный. Улучшению переходных процессов может способствовать только вращающийся аварийный резерв, вводимый при выпадении из синхронизма генераторов или отключении мощных электропередач.

Автоматическая частотная разгрузка (АЧР). Снижение частоты в системе происходит из-за нарушения баланса по активной мощности, т.е. когда активная мощность нагрузки становится больше активной мощность, 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. 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. — Выбор схемы электрической системы с учетом требований улучшения устойчивости и качества переходных процессов.

Схемы соединения электрической системы, выбор ее исходного режима существенно влияют на устойчивость. Одним из критериев, применяемых при оценке схемы системы, является понятие «жесткости» схемы. Жесткость в каком-либо узле схемы характеризуется изменением нагрузки, при которой величина и фаза напряжения будут изменяться на некоторое определенное значение, принимаемое за единицу. Жесткость зависит от относительных сопротивлений, связывающих узловые точки системы. Чем сильнее зафиксированы значения напряжений узлов по величине и фазе, чем теснее эти узлы связаны между собой, тем больше жесткость системы. Повышение жесткости схемы улучшает статическую устойчивость, а также послеаварийные режимы системы. Но в жесткой схеме повышаются уровни токов КЗ, возникают проблемы в работе релейной защиты.

— Деление системы на несинхронно работающие части и расинхронизация.

Разделение электрических систем на несинхронно работающие части может предотвратить нарушение динамической устойчивости. В каждой электрической системе заранее устанавливаются точки или сечения, в которых разделение может быть произведено безболезненно. Деление системы приводит к ее ослаблению, поэтому может быть рекомендовано только тогда, когда оно является единственным способом сохранения динамической устойчивости.

4. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ

4.1. Устойчивость узлов нагрузки. Основные понятия и определения

Узел нагрузки — группа разнородных потребителей подключенных к шинам электростанций или подстанций.

Задачи анализа электромеханических переходных процессов в узлах нагрузки рассматриваются с трех позиций.

1. Как процесс в системе влияет на нагрузку;

2. Как процесс нагрузки влияет на систему;

3. Как одна нагрузка влияет на другую.

Рассмотрим состав нагрузки различных отраслей (табл. 4.1).

Таблица 4.1

| Вид нагрузки | Крупные АД 6—10 кв % | Мелкие АД % | Крупные СД 6—10 кв % | Освещение, печи, быт % |
|--------------|-------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|
| Типовая | 15 | 35 | 9 | 41 |
| Нефтехимич. | 20 | 48,5 | 27 | 4,5 |

Состав нагрузки

Поведение узлов определяет двигательная нагрузка в основном — асинхронная нагрузка.

4.2. Статические и динамические характеристики узлов нагрузки

Статические характеристики — любые зависимости снятые при бесконечно медленном изменении напряжения.

P(U), Q(U);

P(f), Q(f).

Динамические характеристики — зависимости во времени, а в ряде случаев от скорости изменения напряжения.

$$P(U,t,\frac{dU}{dt}...).$$

Регулирующий эффект нагрузки — степень изменения активной или реактивной мощности при изменении напряжения, либо частоты.

| dP | dQ |
|-------------------|-------------------|
| \overline{dU} , | \overline{dU} . |
| dP | dQ |
| \overline{df} , | \overline{df} . |

<u>Пример</u>. Рассмотрим термическую нагрузку $P = \frac{U^2}{r}$.



Рис. 4.1. Характеристика термической нагрузки

$$\frac{dP}{dU} = tg\alpha; \quad \frac{dP}{dU} = \frac{2 \cdot U}{r} \frac{U}{U} = \frac{2 \cdot P}{U}$$

При $P_H = 1, U_1 = 1,$

$$\frac{dP}{dU} = \frac{2 \cdot P_H}{U_H} = 2.$$

При снижении напряжения потребляемая мощность снижается пропорционально квадрату напряжения.

Пределы изменения регулирующих эффектов нагрузки:

$$\frac{dP}{dU} = 0.3 \div 0.75;$$

 $\frac{dP}{df} = 1.5 \div 3.5$ — понятие дефицит активной мощности связано с умень-

шением частоты.

$$\frac{dQ}{df} = 1 \div 6;$$

 $\frac{dQ}{dU} = 1.5 \div 3.5$ — понятие дефицит реактивной мощности связано со

снижением напряжения.

Осветительная нагрузка. Зависимость мощности от напряжения для осветительной нагрузки $P = kU^{1,6}$.



Рис. 4.2. Характеристика осветительной нагрузки

Рис. 4.3. Характеристика люминесцентной лампы

Осветительная нагрузка не ухудшает устойчивость узла нагрузки.

4.3. Статическая устойчивость асинхронной нагрузки. Практический критерий устойчивости.

Статической устойчивостью асинхронной нагрузки называется способность асинхронного двигателя вернуться в исходный или близкий к нему режим после малых возмущений.

$$U = const$$

Рис. 4.4. Простейшая схема замещения асинхронного двигателя

На рисунке 4.4 приведена простейшая схема замещения асинхронного двигателя, при построении которой не учитывались потери активной мощности в стали, а также в меди статора.

Индуктивное сопротивление x_s , в схеме представляет собой сумму индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора $x_s = x_1 + x_2$. Активная мощность P в этой схеме представляет мощность, получаемую двигателем из сети. Эта мощность, передаваемая со статора на ротор двигателя, определяется, как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения магнитного потока двигателя $P = \omega M$. Последняя при неизменной частоте сети остается постоянной при любом скольжении двигателя, и, следовательно, вращающий момент двигателя пропорционален мощности P, а в относительных единицах может быть принят численно ей равным (M = P).

Значение мощности *P* в схеме на рисунке 4.4 легко определяется в зависимости от скольжения двигателя:

$$P = I_s^2 r_2 = I_s^2 \frac{R_2}{s} = \frac{U^2 \frac{R_2}{s}}{\left(\sqrt{x_s^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}\right)^2} = \frac{U^2 R_2}{s \left(x_s^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2\right)} = \frac{U^2 R_2 s}{(sx_s)^2 + R_2^2};$$

в результате:

$$P = \frac{U^2 R_2 s}{(sx_s)^2 + R_2^2}$$
(4.1))

Максимум мощности двигателя или так называемый опрокидывающий момент достигается при критическом скольжении:

$$s_{\kappa p} = \frac{R_2}{x_s} \tag{4.2}$$

и получается равным:

$$P_m = \frac{U^2}{2x_s}; \tag{4.3}$$

Характеристика моментов проиллюстрирована рисунком 4.5.



Рис. 4.5. Характеристика моментов

Подставляя (4.2, 4.3) в (4.1) получим формулу для определения электромагнитной мощности (формула Клосса):

$$P = \frac{2P_m}{\frac{s}{s_{\kappa p}} + \frac{s_{\kappa p}}{s}}$$
(4.4)

Практический критерии устойчивости.

Рассмотрим поведения системы двигатель — нагрузка в точках *a* и *b*, где по условиям существования режима имеет место баланс электромагнитной и механической мощности и возможно существование установившегося режима (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Механическая характеристика АД

Рассмотрим режим в точке а:

при увеличении скольжения *s* (торможение): $\Delta P = P_{\mathcal{DI}.(S1)} - P_0$ (+) — вращающий момент больше механического (тормозного) момента, происходит ускорение и возврат в точку *a*, или устойчивая работа;

при уменьшении *s* (ускорение): $\Delta P = P_{\Im \pi.(S2)} - P_0$ (-) — вращающий момент меньше механического (тормозного) момента, происходит торможение и возврат в точку *a*, то есть устойчивая работа.

Рассмотрим режим в точке b:

увеличение $s: \Delta P = P_{\Im I.(S4)} - P_0$ (-) — вращающийся момент меньше механического (тормозного) момента, происходит дальнейшее торможение и уход от точки *b*, то есть, неустойчивая работа;

уменьшение *s*: $\Delta P = P_{\Im I.(S3)} - P_0$ (+) — вращающийся момент больше механического (тормозного) момента, происходит разгон и переход в точку *a*;

— неустойчивая работа:

$$\lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta s} = \frac{dP}{ds} = \frac{d(P_{\mathcal{Y}} - P_0)}{ds} = \frac{dP_{u_{3\delta}}}{ds}.$$

Прямой или практический критерий:

$$\frac{dP_{u_{3\delta}}}{dS} > 0. \tag{4.5}$$

Для сохранения статической устойчивости асинхронной машины производная избыточной мощности по углу в точке баланса мощностей должна быть положительной.

4.4. Вторичные критерии устойчивости. Лавина напряжения

Определение параметров эквивалентного двигателя часто затруднительно, что заставляет искать другие решения, позволяющие подойти к оценке устойчивости асинхронных двигателей в электрических системах, не выделяя их из состава комплексной нагрузки. Это можно сделать по так называемым вторичным критериям устойчивости нагрузки.



Рис. 4.7. Схема замещения асинхронного двигателя (АД)

Для узла нагрузки можно снять зависимость: P(u) и Q(u).

Потребляемая двигателем реактивная мощность в соответствии со схемой замещения (рис. 4.7) состоит из двух слагаемых:

$$Q = Q_S + Q_\mu \tag{4.6}$$

где

$$Q_{\mu} = \frac{U_d^2}{x_{\mu}} \tag{4.7}$$

мощность, потребляемая ветвью намагничивания;

$$Q_{s} = (I_{2}^{\prime})^{2} x_{s} = \frac{U_{d}^{2} x_{s} s^{2}}{r_{s}^{2} + (x_{s} s)^{2}}$$
(4.8)

мощность, потребляемая ветвью рассеяния;

 I'_{2} — приведенный ток цепи рассеяния.

Значения электромагнитной мощности двигателя в соответствии со схемой (рис. 4.7) определяются по формуле:

$$P_d = (I_2')^2 \frac{r_s}{s} = \frac{U_d^2 r_s s}{r_s^2 + (x_s s)^2}.$$
(4.9)

При постоянном механическом моменте (мощности) P_0 из (4.8, 4.9) следует что $Q_s \equiv s$.

При изменении напряжения на двигателе в соответствии с рисунком 4.8 находятся значения скольжения, и строится зависимость $Q_s = f(U)$ (рис. 4.9).



Рис. 4.8. Снижение напряжения на асинхронном двигателе

Как следует из рисунка 4.9 зависимость Q = f(U) с уменьшением U сначала тоже уменьшается, а затем растет. Следовательно, при $\frac{dQ}{dU} < 0$ сниже-

ние U приводит к росту потребляемой реактивной мощности, а значит, и к росту тока. При питании от источника соизмеримой мощности это может привести к дальнейшему снижению напряжения на двигателе U. Прогрессирующее снижение напряжения получило название лавины напряжения. При $U_{\kappa p}$,

когда
$$\frac{dQ}{dU} = -\infty$$
, происходит опрокидывание двигателя.

В диапазоне 1... U_1 — невозможна лавина напряжения, $\begin{bmatrix} U_1 ... U_{\kappa p} \end{bmatrix}$ — возможна лавина напряжения.

Следовательно, выражение

$$\frac{dQ}{dU} \to -\infty \tag{4.10}$$

может быть принято в качестве вторичного критерия статической устойчивости асинхронной нагрузки. Данный критерий не выявляет лавину напряжения.



Рис. 4.9. Вторичный критерий устойчивости

Другим вторичным критерием является критерий Жданова, требующий знания статических характеристик узла нагрузки P(U), Q(U).



Рис. 4.10. Расчетная схема

Для расчетной схемы рисунка 4.10 можно построить зависимость E(U) (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Критерий Жданова

При $E = E_0$ равновесие установившегося режима возможно в точках *а* и *b*. В точке *a* производная dE/dU > 0, что на характеристике мощности АД соответствует устойчивому режиму.

С утяжелением режима по переменной U каждой точке кривой E(U) соответствует увеличивающееся скольжение. При критическом значении скольжения имеет место критическое напряжение $U_{\kappa p}$. Точка b, где производная dE/dU < 0, соответствует по характеристике мощности неустойчивому равновесию.

Следовательно, знак производной *dE/dU* позволяет судить об устойчивости системы. Критерий устойчивости:

$$\frac{dE}{dU_d} > 0 \tag{4.11}$$

впервые был предложен проф. П.С.Ждановым [1] и называется критерием устойчивости Жданова.

Следует отметить, что критическое напряжение $U_{\kappa p}(E)$, определенное по критерию Жданова, получается немного выше, чем критическое напряжение $U_{\kappa p}(s)$, полученное по критерию dP/ds = 0, т.е. при выполнении условия (4.11) скольжение двигателя еще не достигает $s_{\kappa p}$. По критерию Жданова определяется напряжение, которое предшествует образованию лавины напряжения.

4.5. Устойчивость нагрузки при соизмеримой мощности системы

Рассмотрим цепь, состоящую из группы асинхронных двигателей, замененных эквивалентным двигателем, и эквивалентного генератора соизмеримой мощности. На рисунке 4.12 приведена схема замещения исследуемой цепи, в которой эквивалентный двигатель представлен упрощенной Г-образной схемой замещения.



Рис. 4.12. Схема замещения эквивалентного АД, подключенного к источнику ограниченной мощности

В данной схеме сопротивления x_c и z_d соизмеримы и напряжение на выводах двигателя значительно ниже, чем ЭДС *E*, из-за падения напряжения на сопротивлении x_c и уменьшается с увеличением скольжения *s*. Без учета сопротивления ветви намагничивания можно представить схему рисунка 4.12 в виде эквивалентного АД а сопротивлением $x_s + x_c$.

Максимальная электромагнитная мощность P'_m и величина критического скольжения $S'_{\kappa p}$ эквивалентного двигателя при этом меньше, чем критическое скольжение двигателя, подключенного к шинам бесконечной мощности (табл. 4.2), что иллюстрируется рисунком 4.13.

Таблица 4.2

| Эквивалентный АД | АД | | |
|--|----------------------------------|--|--|
| $P_m' = \frac{E_c^2}{2(x_s + x_c)}$ | $P_m = \frac{u^2}{2x_s}$ | | |
| $P'_m < P_m$ | | | |
| $\dot{s_{\kappa p}} = \frac{R_2}{x_S + x_C}$ | $s_{\kappa p} = \frac{R_2}{x_s}$ | | |
| $s_{\kappa p}^{'} < s_{\kappa p}^{'}$ | | | |

Сравнение параметров АД при различных способах питания

Соответственно уменьшится коэффициент запаса устойчивости, который определяется по формуле: $k_{_3} = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100\%$.



Рис. 4.13. Устойчивость эквивалентного АД при питании от системы ограниченной мощности

Для обеспечения устойчивости АД необходимо выполнение прямого критерия устойчивости: $\frac{dP}{ds} > 0$.

Для определения критической ЭДС рассмотрим критический режим, в котором максимум мощности, отдаваемой системой, равен мощности развиваемой турбиной $P_0 = P'_m$

$$P'_{m} = P_{0} = \frac{E_{\kappa p}^{2}}{2(x_{s} + x_{c})}.$$

Критическая ЭДС при этом

$$E_{\kappa p} = \sqrt{2P_0(x_s + x_c)} \ . \tag{4.12}$$

Таким образом условие устойчивости можно записать в виде:

$$E > E_{\kappa p}; \quad s_{\kappa p} > s_0.$$
 (4.13)

В критическом режиме

$$P_{0} = Q_{0} = I^{2}(x_{s} + x_{c}) = \frac{U_{c}^{2} \cdot (x_{s} + x_{c})}{(x_{s} + x_{c}) + \left(\frac{R_{2}}{s_{\kappa p}}\right)^{2}} = \frac{U_{c}^{2}}{2(x_{s} + x_{c})},$$
(4.14)

где $s_{\kappa p} = \frac{R_2}{(x_s + x_c)}.$



Рис. 4.14. Расчетная схема замещения

По известной величине критической ЭДС $E_{c\kappa p}$ может быть найдено соответствующее ей критическое напряжение $U_{\kappa p}$ (рис. 4.14) в критическом режиме:

$$U_{\kappa p} = \sqrt{\left(E_{c\kappa p} - \frac{Q_0 x_c}{E_{c\kappa p}}\right)^2 + \left(P \cdot \frac{x_c}{E_{c\kappa p}}\right)^2} . \tag{4.15}$$

Запас устойчивости нагрузки по напряжению k_U определяется выражением

$$k_U = \frac{U_0 - U_{\kappa p}}{U_0} 100\%$$
 при $U_0 = 1$.

Коэффициент запаса устойчивости по напряжению при сохранении устойчивости должен быть положительным. Для нормальной работы нагрузки запас устойчивости должен быть не меньше 20%.

4.6. Компенсация реактивной мощности и статическая устойчивость

Рассмотрим схему рисунка 4.15 при включении на шины электродвигателя батареи статических конденсаторов (БСК) при $x_C = x_{\mu}$.



Рис. 4.15. Влияние компенсации реактивной мощности

Реактивные мощности БСК и ветви намагничивания при этом

$$Q_{c} = -\frac{U^{2}}{x_{c}}, \quad Q_{m} = \frac{U^{2}}{x_{\mu}}.$$
 (4.16)

Из рисунка 4.9 видно, что результирующая характеристика определяется ветвью Q_s и имеет возрастающий характер во всем диапазоне изменения напряжения, что при питании от системы конечной мощности расширяет диапазон возможного возникновения лавины напряжения в диапазоне $\begin{bmatrix} U_H ... U_{\kappa p} \end{bmatrix}$ (справедливо только для удаленных источников).

Следовательно, применение БСК при питании от системы малой мощности, либо удаленных потребителях снижает устойчивость нагрузки.

4.7. Статическая устойчивость асинхронной нагрузки при изменении напряжения и частоты

В определённых условиях нагрузка может оказаться неустойчивой. Известно, что у асинхронных двигателей при значительном снижении напряжения на их выводах происходит опрокидывание, и они останавливаются. На рисунке 4.16 приведена упрощенная схема замещения асинхронного двигателя. Активная мощность P_0 в этой схеме представляет мощность, получаемую двигателем из сети.



Рис. 4.16. Схема замещения асинхронного двигателя

Запас устойчивости АД $k_3 = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100\%$ определяется максимальной мощностью $P_m = \frac{U^2}{2x_s}$ значение которой квадратично зависит от напряжения (рис. 4.17).



Рис. 4.17. Максимальная активная мощность асинхронного двигателя при изменении напряжения

При нормальном напряжении на выводах двигателя значение максимальной мощности или опрокидывающего момента примерно вдвое превышает номинальную мощность двигателя, что обеспечивает более чем достаточный запас устойчивости. С уменьшением напряжения на выводах двигателя значение опрокидывающего момента быстро падает.

<u>Пример.</u> $U = 0,7U_H, P'_m$ квадратично падает при снижении напряжения; $P'_m = 0,5P_m.$

Характер изменения реактивной мощности при изменении напряжения был дан ранее (раздел 4.4).

При снижении частоты максимальная мощность и критическое скольжение растут

$$\uparrow P_{m} = \frac{U^{2}}{2x_{s_{0}}\frac{f\downarrow}{f_{0}}}, \uparrow s_{\kappa p} = \frac{R_{2}}{x_{s_{0}}\frac{f\downarrow}{f_{0}}},$$

где x_{s0} — сопротивление при частоте равной 50 Гц.

Следовательно, снижение частоты не ухудшает запас статической устойчивости, но уменьшает скорость вращения и производительность механизмов.



Рис. 4.18. Влияние изменения частоты на статическую устойчивость

Характер изменения реактивной мощности приведен на рисунке 4.19 при $Q = Q_{\mu} + Q_s$,

где $Q_{\mu(f)} = \frac{U^2}{x_{\mu o} \frac{f}{f_0}}$ — мощность, потребляемая ветвью намагничивания; $Q_{s(f)} \equiv s_0 \frac{f}{f_0}$ — мощность, потребляемая ветвью рассеяния.



Рис. 4.19. Реактивная мощность при изменении частоты

Видно, что снижение частоты — дефицит активной мощности, может привести к дефициту реактивной мощности и спровоцировать лавину напряжения.

4.8. Статическая устойчивость синхронной нагрузки при изменении напряжения и частоты

Влияние изменения напряжения и частоты на статическую устойчивость синхронного двигателя определяется амплитудой угловой характеристики мощности, влияющей на запас статической устойчивости



Рис. 4.20. Максимальная мощность синхронного двигателя при изменении напряжения

Пример.

 $U = 0,7U_{H}, P_{m}$ линейно падает при снижении напряжения; $P_{m}^{'}=0,7P_{m}.$

Из рисунка 4.20 видно преимущество СД перед АД.

Зависимость реактивной мощности от напряжения рассмотрим для расчетной схемы рисунка 4.21 при наличии только реактивного тока.



Рис. 4.21. Расчетная схема

Так как $Q = UI_p$, $E_q = U + I_p x_d$, следовательно $I_p = \frac{E_q - U}{x_c}$,

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} - \frac{U^2}{x_d}.$$
 (4.17)

При этом возможны два режима работы СД.

1. Перевозбуждение. E > U.

При снижении напряжения увеличивается генерация реактивной мощности и происходит стабилизация напряжения в узле нагрузки.

2. Недовозбуждение. E < U.

При уменьшении напряжения СД сначала снижает потребление, затем переходит в режим генерации.

Следовательно, применение СД улучшает устойчивость узла нагрузки.

Снижение частоты не ухудшает запас устойчивости СД.

$$\uparrow P_m = \frac{EU_{\partial s}}{x_{d0} \frac{f \downarrow}{f_0}}, \quad \uparrow Q = \frac{1}{x_d \frac{f \downarrow}{f_0}} (E_q U - U^2).$$

При равных условиях применение СД против АД предпочтительно, однако они требуют регулярного обслуживания.

5. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ

5.1. Динамическая устойчивость асинхронной нагрузки. Уравнение движения

Динамическая устойчивость асинхронного электродвигателя оценивается при больших изменениях скорости, что требует не мощностных, а моментных характеристик.

Электромагнитный момент:

$$M_{\mathcal{P}} = \frac{2M_{\max}U_*^2}{\frac{s}{s_{\kappa p}} + \frac{s_{\kappa p}}{s}};$$
(5.1)

Механический момент:

$$M_{o} = M_{TP} - M_{TP} - M_{o} \quad \omega_{*}^{\gamma};$$

$$M_{o} = M_{TP} - M_{TP} - M_{o} \quad 1 - s^{\gamma}.$$
(5.2)



Рис. 5.1. Виды механических характеристик

На рисунке 5.1:

ү = 2,3 — вентиляторная характеристика;

 $\gamma = 0$ — постоянный момент сопротивления;

ү = 1 — линейная характеристика.

Дифференциальное уравнение движения АД:

$$T_{j}\frac{ds}{dt} = M_{o \ s} - M_{\Im \ s} \tag{5.3}$$

Решить это уравнение аналитически можно, только при $M_{\Im(S)} = 0$ — при отключении или работе на трехфазное КЗ.

Численное решение уравнения движения АД возможно двумя подходами. *1. Численное решение дифференциального уравнения методом Эйлера.*

$$T_{j} \frac{ds}{dt} = M_{o(S)} - M_{\ni(S)} = \Delta M_{(S)};$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\Delta M_{(S)}}{T_{j}};$$
или при представлении в конечных разностях $\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta M_{(S)}}{T_{j}}.$

1^и шаг решения:

$$\Delta s_1 = \frac{\Delta M_{(S)o}}{T_j} \Delta t; \quad s_1 = s_o + \Delta s_1.$$

где $\Delta M_{(S)o} = M_{o(S_o)} - M_{\Im(S_o)}$.

Любой п^й шаг решения:

$$\begin{cases} \Delta s_{n+1} = \frac{\Delta M_{(S)n}}{T_j} \Delta t; \\ s_{n+1} = s_n + \Delta s_{n+1}. \end{cases}$$
(5.4)

На рис. 5.2, 5.3 дана иллюстрация процесса разгона асинхронного электродвигателя.



Рис. 5.2. Расчет разгона численным методом

Этот подход позволяет определить время пуска.



Рис. 5.3. Определение времени пуска АД

2. Решение интегрального уравнения.

Дифференциальное уравнение при этом подходе сводится к интегралу, который вычисляется каким либо численным методом механических квадратур (например, методом левых прямоугольников). Такой подход позволяет сразу определить время процесса (например, пуска).

$$\frac{dt}{dS} = \frac{T_j}{\Delta M_{(S)}}; \quad \int_0^t dt = \int_{S_0}^{S_n} \frac{T_j}{\Delta M_{(S)}} dS .$$
$$t = T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_{(S)i}}.$$
(5.5)

Первый подход более универсальный.

5.2. Определение предельного времени АВР асинхронной нагрузки

Предельное время ABP или время выбега при отключении может быть найдено как время за которое электродвигатель от начального скольжения s_0 доходит под воздействием либо только механического момента (рис. 5.4), либо разности механического и остаточного электромагнитного до скольжения s_{np} (рис. 5.5). Эта задача может быть решена обоими численными подходами




Puc. 5.5

Для наиболее тяжелого случая — постоянства механического момента и отсутствия остаточного электромагнитного (рис. 5.4) задача определения предельного времени АВР АД может быть решена аналитически

$$t_{npABP} = \int_{0}^{t_{np}} dt = T_{j} \int_{S=S_{0}}^{S=S_{np}} \frac{dS}{m_{o}(s)} = \frac{T_{j}}{m_{o}} (s_{np} - s_{0}).$$
(5.6)

При линейно падающем механическом моменте и отсутствии электромагнитного момента

$$t_{npABP} = T_j \int_{S_o}^{S_{np}} \frac{ds}{(1-s)m_o} = \frac{T_j}{m_o} (-\ln(1-s)) |_{S_o}^{S_{np}} = -\frac{T_j}{m_o} \ln \frac{1-s_{np}}{1-s_0}.$$
 (5.7)

5.3. Определение предельного времени АВР синхронной нагрузки

Предельный угол и время отключения синхронной нагрузки можно найти по формулам раздела 3.6.

При отключении синхронного электродвигателя, как и при трехфазном коротком замыкании на сквозной передаче электромагнитная мощность падает до нуля (рис. 5.6).



Рис. 5.6 Угловая характеристика мощности

Предельный угол отключения КЗ на основании формулы 3.10

$$\delta_{np.ABP} = \arccos \frac{P_o \ \delta_{np} - \delta_o \ + P_m^{nap} \cos \delta_{\kappa p}}{P_m^{nap}}; \qquad (5.8)$$

зависимость угла от времени будет иметь вид

$$\delta = \frac{at^2}{2} + C_2.$$

Возрастание угла происходит по квадратичной параболе, а время, отвечающее предельному значению угла $\delta = \delta_{np.om\kappa n.}$, находится как

$$t_{np.ABP} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{np.omkn.}} - \delta_o)}{P_o}}$$
(5.9)

(все величины в относительных единицах).

5.4. Пуск двигателей. Схемы пуска. Порядок расчета

Пуск двигателей в ход, или пусковой режим электропривода, входящего в состав комплексной нагрузки, — это процесс перехода двигателей и соответственно рабочих механизмов из неподвижного состояния ($\omega = 0$) в состояние вращения с нормальной скоростью ($\omega = \omega_0$). Пуск двигателей, являющийся существенной частью режима работы двигателя, относится к числу нормальных переходных процессов.

Пуск синхронных двигателей производится, так же как и асинхронных. Для синхронных двигателей, однако, в пуске участвуют и демпферные обмотки и обмотка возбуждения.

Условия пуска обычно разделяют на:

— легкие;

— нормальные;

— тяжелые.

Схемы пуска.

1. *Прямой пуск* — когда электрический двигатель подключается напрямую к шинам через коммутационный аппарат (например, выключатель).



Рис. 5.7. Прямой пуск

2. *Реакторный пуск* — требуется два коммутационных аппарата. При пуске В2 разомкнут и пусковой ток уменьшается.



Рис. 5.8. Реакторный пуск

Уменьшение пускового тока приводит к уменьшению снижения напряжения на шинах.

3. Плавный пуск.

УПП — устройство плавного пуска.



Рис. 5.9. Плавный пуск

4. *Частотный пуск*, в отличие от плавного, имеет частотное регулирование (f-var).

5. Автотрансформаторный пуск;

6. Разгонный пуск (в настоящее время не применяется).

Тип пуска определяется механическими характеристиками приводного механизма. При расчетах в системе относительных единиц характер механического момента $m_{0(S)}$ представлен на рисунке 5.10.





Момент трения (сопротивления) при пуске: $m_{mp} < 0.5$ — средние условия пуска; $m_{mp} > 0.5$ — тяжелые условия пуска; $m_{mp} < 0.3$ — легкие условия пуска.

$$m_{mex} = m_{mp} - (m_{mp} - m_O)(1 - s)^{\gamma}.$$
(5.10)

Условием возможности пуска является неравенство

$$m_{\Im(S)} > 1,1 m_{0(S)}$$
 (5.11)

— в этом случае пуск возможен.

Расчет пуска производится численным решением дифференциального уравнения движения. Все синхронные электродвигатели также разгоняются асинхронным пуском, однако имеют особенности [4,5].

На расчет пуска СД оказывают влияние:

1. Способ возбуждения: схемы с шунтированием возбудителя, схемы с глухим подключением возбудителя и т.д.

2. Типы возбудителей: ионный, тиристорный.

3. Разгон производится до подсинхронной скорости при $s \approx 0.05$.

Входной момент $m_{ax} = m_{ac}$ при (s = 0,05). По входному моменту определяется возможность вхождения в синхронизм по критериям (но этого условия не достаточно).

Если в процессе разгона не учитывается изменение сопротивления двигателя, то это дает гарантированный расчет.

Если сопротивление двигателя меняется, то это может учесть:

$$r_2 = \frac{R_2}{s} \tag{5.12}$$

 $x^{"}$ = const — гарантированный расчет.

Учет изменения сопротивления облегчает разгон.

$$x_{S} = \frac{x_{0}}{1 + \frac{x_{0} - x^{"}}{x^{"}}s^{-\frac{1}{\ln s_{\kappa p}}}}$$
(для АД). (5.13)

 $x^{"}$ – скольжение при s = 1

 x_0 – скольжение при $s = 0 \rightarrow s_0$

$$x_2 = x_{20} + (x_{2\Pi} - x_{20})\sqrt{s} \quad (для CД), \tag{5.14}$$

где x_{20} , $x_{2\pi}$ — сопротивления роторной цепи в синхронном (s = 0) и пусковом (s = 1) режимах.



Рис. 5.11. Изменение сопротивления асинхронного двигателя при разгоне

Для мощных двигателей иногда нужно учитывать электромагнитные переходные процессы.

После определения времени разгона производится расчет дополнительного нагрева ΔT :

$$\Delta T = \frac{t_{nyc\kappa} \cdot j^2 \ k_n^2 - 1}{150}, \ [^0 \text{C}]$$
(5.15)

j — плотность тока — рабочая. $j = 2 \div 5 \text{ A/мм}^2$.

Температура к концу пуска $T = 20^{\circ} + \Delta T$, где 20° температура окружающей среды, сравнивается с допустимой температурой для конкретного вида изоляции. Так для простой эмали $T_{don} = 105^{\circ}$ С.

$$k_n = \frac{I_n}{I_u} = 3 \div 8$$
; кратность тока при пуске (среднее $k_n = 5$).

При пуске также оценивается остаточное напряжение, которое обычно не должно быть меньше $U_{\partial} > 0,7U_{H}$ на секции шин. В процессе разгона напряжение меняется $U \rightarrow \text{var}$, что должно учитываться при решении дифференциальных уравнений.

5.5. Самозапуск электродвигателей. Основные положения

Самозапуском называется процесс восстановления нормального режима работы ЭД после перерыва питания либо глубокого снижения напряжения. Во всех случаях осуществление самозапуска должно быть обоснованным. Его следует применять только для тех механизмов, для которых он действительно необходим. Обычно это потребители первой категории по надежности электроснабжения. Весь процесс самозапуска можно разделить на четыре этапа.

Первый этап — выбег электродвигателей. Расчет выбега без учета электромагнитных переходных процессов связан с решением дифференциального уравнения движения. Конечной целью расчета выбега является нахождение угловой скорости ω_{C3} или скольжения s_{C3} двигателя к моменту восстановления питания.

Выбег электродвигателей бывает *индивидуальным* и *групповым*. Если отключается один электродвигатель, то происходит *индивидуальный выбег* агрегата без воздействия на него других электродвигателей. При перерыве питания ряда электродвигателей происходит *групповой выбег*. Особенностью группового выбега является то, что некоторое время все агрегаты выбегают во взаимной связи друг с другом, а затем каждый в соответствии со своей характеристикой, определяемой моментом инерции агрегата и его загрузкой.

Второй этап — оценка возможности самозапуска. На основании схемы замещения, определяются величины тока включения I_{gkn} , остаточного

напряжения U_{ocm} , момента электродвигателя $m_{_{9.C.3.}}$ и момента сопротивления $m_{_{c.c.3.}}$ при самозапуске. И если условие $m_{_{9.C.3.}} > m_{_{c.c.3.}}$ выполняется, то самоза-пуск обеспечен.

Третий этап — разгон. Процесс разгона после восстановления питания анализируется с помощью уравнений движения. Время самозапуска $t_{pase.}$ может быть определено численным интегрированием уравнений движения.

Четвертый этап — расчет нагрева электродвигателя, который производится совместно с третьим этапам и сводится к вычислению теплового импульса ΔT без учета передачи тепла в окружающую среду.

При реализации всех этапов расчета, возможно использовать два основных подхода. Первый основан на расчетах без учета электромагнитных переходных процессов. В этом случае предполагается, что электромагнитные моменты изменяются мгновенно, а анализ выбега на короткое замыкание и разгона двигателей производится с помощью характеристик электромагнитного момента, соответствующих установившимся режимам, то есть *статическим* характеристикам. Второй подход связан с учетом как механических, так и электромагнитных процессов [10]. Уравнения электромагнитных процессов являются упрощенной системой уравнений, построенной на основе уравнений Парка-Горева [7]. Реализация такого подхода значительно сложнее, чем первого.

Особенности самозапуска СД не отличаются от пуска, однако для СД перед первым этапом производят оценку выпадения электродвигателя из синхронизма за время выбега. Если условие $t_{omkn,np} > t_{K3} + t_{ABP}$ выполняется, то нет необходимости в дальнейших расчетах самозапуска. Если двигатель выпадает из синхронизма и к моменту восстановления напряжения работает как асинхронный со скольжением s_i , то процесс самозапуска надо рассматривать как пуск асинхронного двигателя, но осуществляемый от $\omega_{c3}(s_{c3})$.

5.6. Самозапуск электродвигателей. Последовательность расчета

1. Расчет выбега:

1.1. Расчет характеристик электродвигателей

$$m_{\mathfrak{S}(C3)} = \frac{2m_{\mathrm{m}}}{\frac{s}{s_{\kappa p}} + \frac{s_{\kappa p}}{s}}$$

1.2. Расчет сопротивлений электродвигателей

$$x_{(s)} = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s^{-\frac{1}{\ln s_{sp}}}} ; r_{(s)} = \frac{s_0 \cos \phi_{H}}{s}$$

Индивидуальный выбег.

1. Угловая скорость электродвигателя:

$$\omega_{\mu} = \frac{2\pi n_{\mu}}{60} \,. \tag{5.16}$$

2. Приведенный момент инерции:

$$J_{np} = J_{\partial \theta} + J_{Mex} \tag{5.17}$$

3. Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{j.H.} = J_{np} \frac{\omega_0}{M_{_H}} = J_{np} \frac{\omega_0 \omega_{_H}}{P_{_H}} \approx J_{np} \frac{\omega_0^{^2}}{P_{_H}}, \qquad (5.18)$$

где ω_0 и ω_{μ} — синхронная и номинальная угловые скорости (с⁻¹);

 M_{H} — номинальный вращающий момент двигателя ($H \cdot M$);

P_н — номинальная активная мощность двигателя (Вт).

1. Расчет индивидуального выбега электродвигателей без учета электромагнитных переходных процессов производится на основе решения дифференциального уравнения

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_0 + m_\kappa \tag{5.19}$$

методом Эйлера.

Для синхронных двигателей имеет смысл учитывать генераторный момент (m_{κ}) обусловленный током возбуждения и зависящий от системы возбуждения и способа гашения поля [10]. Например $m_{\kappa} = (0,1 \div 0,2)K_{\phi}^2$ — с учетом форсировки.

В асинхронном двигателе ЭДС затухает быстро (в АД с короткозамкнутым ротором возбуждения нет по определению), следовательно быстро затухает и тормозной момент (m_{κ}), который практически не вызывает дополнительного торможения и в расчетах, как правило не учитывается.

Групповой выбег.

При *групповом выбеге* расчет зависимости частоты вращения от времени без учета электромагнитных переходных процессов может быть получен эквивалентированием двигательной нагрузки, основанной на двух допущениях: — алгебраическая сумма мощностей, перераспределяемых между отдельными двигателями при их групповом выбеге равна нулю;

— скорость изменения частоты вращения всех двигателей одинакова.

С учетом этих допущений синхронная частота вращения на секции в процессе выбега определяется как средневзвешенная скорость [11]:

$$\omega_{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{ji} P_{\mu i} \omega_{(t)}}{\sum_{i=1}^{n} T_{ji} P_{\mu i}},$$
(5.20)

где $\omega_{i(t)}$ — частота вращения i-го двигателя в момент времени *t* при индивидуальном выбеге; *n* — число двигателей, участвующих в групповом выбеге.

Использование формулы (5.20) предполагает расчет индивидуального выбега по изложенным ранее алгоритмам и последующее эквивалентирование двигателей для заданного времени перерыва электроснабжения или работы на удаленное КЗ. Рассмотрение группового выбега при работе на КЗ имеет смысл только при достаточно большом внешнем сопротивлении. При КЗ на питающей секции шин точка КЗ разделяет двигатели, и выбег становится индивидуальным. Погрешность расчета по выражению (5.20) возрастает с увеличением разброса постоянных инерции T_i .

В том случае, когда выбегают электродвигатели с одинаковым характером механических характеристик, можно свести задачу к решению одного уравнения движения с эквивалентной постоянной инерции:

$$T_{j\mathcal{P}} = \frac{\sum_{i=0}^{n} J_n \,\omega_{0i}^2}{\sum_{i=1}^{n} P_{_{Hi}}}.$$
(5.21)

Решение уравнения движения проводится при этом для характерного двигателя группы.

Следует отметить приближенность рассмотренных, алгоритмов группового выбега. Более точно можно решить эту задачу лишь с учетом электромагнитных переходных процессов, где вопросы обмета энергией решаются автоматически.

1. Оценка возможности самозапуска.

Оценка производится на основе расчета остаточных напряжений на электродвигателях в момент самозапуска и оценки электромагнитного и

механического моментов. Например для расчетной схемы рисунка 5.12 ниже приведен алгоритм расчета.



5.12. Расчетная схема сети

Определение параметров схемы замещения.



Рис. 5.13. Схема замещения

Определяется сопротивление нагрузки и эквивалентное сопротивление двигателей, участвующих в самозапуске при $s = s_{c_3}$:

$$x_{\mu} = \frac{S_{\tilde{o}}}{S_{\mu} \sin \varphi_{\mu}}; \quad \frac{1}{z_{\partial 9}} = \frac{1}{z_{\partial 1}} + \frac{1}{z_{\partial 2}}.$$
Эквивалентная ЭДС: $E_{9} = \frac{E_{c} \cdot z_{\partial 9}}{x_{c9} + z_{c9}}.$

Остаточное напряжение: $U_{ocm} = \frac{E_3}{1 + \frac{X_c}{Z_{c3}}}$.

Ток включения двигателя: $I_{g \kappa \pi^*} = \frac{E_9}{x_c + x_{\partial 9}}$.

Электромагнитный момент при самозапуске:

$$m_{\mathfrak{g}(c3)} = \frac{2m_m U_{ocm}^2}{\frac{s_{c3}}{s_{\kappa p}} + \frac{s_{\kappa p}}{s_{c3}}}.$$
(5.22)

Для синхронного двигателя m_m можно выразить в виде трех составляющих [10, 12] m'_d , m''_d , m''_q .

Момент сопротивления механизма

$$m_{0(c_3)} = m_{mp} + (k_3 - m_{mp})(1 - s_{c_3})^{\gamma}$$
(5.23)

Условие самозапуска:

$$m_{\mathfrak{g}(c3)} \ge 1, 1m_{0(c3)}.$$
 (5.24)

Если мощность системы электроснабжения достаточна, в одновременном самозапуске могут участвовать все электродвигатели, для которых он необходим. Если же ограниченная мощность системы электроснабжения этого не допускает, то предусматривается несколько ступеней самозапуска, то есть поочередный или каскадный самозапуск нескольких групп двигателей, либо отказ от участия в самозапуске менее ответственных потребителей.

2. Расчет разгона электродвигателей.

На этом этапе самозапуск отличается от пуска наличием следующих особенностей [11]:

1. В самозапуске участвует *группа* электродвигателей, что увеличивает токи в питающих элементах, приводит к снижению напряжения на зажимах двигателей и уменьшению их вращающего электромагнитного момента.

2. В момент восстановления питания часть двигателей или все двигатели вращаются с *остаточной скоростью*. Так как в момент появления напряжения двигатель имеет остаточную ЭДС происходит его несинхронное включение. Максимальное значение периодической составляющей тока включения будет иметь место, если напряжение питающей сети и ЭДС двигателя находятся в противофазе. В некоторых случаях токи самозапуска могут превышать значения пусковых токов.

$$I_{c.3.} = \frac{U_{\partial} + E_{c.3.}}{x}$$
, допускается $I_{c.3.} < 1,7I_{nyc\kappa}$.

Если АД условие облегчает самозапуск, если СД — требуется гасить поле.

3. Самозапуск происходит, как правило, *при нагруженных механизмах*, что приводит к увеличению времени разгона и повышению температуры обмоток.

Расчет процесса разгона электродвигателей с момента восстановления питания связан с численным решением системы дифференциальных уравнений (5.25).

$$\sum (T_{ji} \frac{ds_i}{dt} = m_{0i}(s_i) - m_{_{9i}}(s_i)).$$
(5.25)

Быстрее всех запустится двигатель, у которого больше отношение $\frac{\Delta m}{T}$.

Для AД: По достижению одним из двигателей номинального скольжения двигатель вводится в расчет своим $z_{\partial.ном}$. Расчет заканчивается при достижении всеми двигателями установившегося значения скольжения.

Для СД: По достижению одним из двигателей скольжения s_a , то есть равенства асинхронного момента, развиваемого двигателем, и момента сопротивления $\Delta m = m_9 - m_0 = 0$, необходимо синхронизировать двигатель. Возможность синхронизации оценивается по критерию 100%-ной вероятности вхождения в синхронизм. Синхронизированный двигатель вводится в расчет своим сопротивлением $x_{d.nom}$. Расчет заканчивается при достижении всеми двигателями подсинхронной частоты вращения и проверки возможности вхождения в синхронизм.

4. Расчет нагрева.

Нагрев каждого электродвигателя рассчитывается так же как при пуске (раздел 5.4).

 $T_i = 20^0 + \Delta T_i$, где 20⁰ температура окружающей среды.

Более строгие методики расчета нагрева, в том числе и ротора двигателя, даны в [4,5]. Для ответственных двигателей, самозапуск или повторный пуск которых должны быть обеспечены сразу же после остановки, т.е. в горячем состоянии, дополнительное максимальное превышение температуры зависит от класса изоляции обмоток и при учебном проектировании может быть принято равным 135[°] С. Подробные алгоритмы расчета самозапуска асинхронных электродвигателей даны в [11] синхронных в [12].

5.7. Динамическая устойчивость синхронной нагрузки

Синхронные электроприводы могут иметь нагрузки, разделяющиеся на два основных вида:

— медленно меняющиеся (насосные и вентиляторные установки, компрессорные турбомашины и др.);

— пульсирующие (мощные поршневые компрессоры) и резкопеременные (прокатные станы, дробильные машины, резиносмесители).

Анализ переходных процессов и динамической устойчивости узлов нагрузок обычно ведется согласно упрощенному представлению системы в виде двух синхронных машин, одна из которых эквивалентна системе, а другая узлу нагрузки.

Все общие подходы, методы, критерии не отличающиеся от динамической устойчивости СГ за исключением некоторых нюансов. Например, увеличение угла учитывается в отрицательную сторону при сохранении названия площадок ускорения и торможения. В расчетах участвуют обычно не мощности а электромагнитные и механические моменты.

Так для задачи определения предельной длительности отключения двигателя, что аналогично с определением предельного времени ABP и определением предельного времени отключения трехфазного КЗ формулы принимают вид:

$$\delta_{np} = \arccos \frac{Mo(\delta_{\kappa p} - \delta_o) + M \cos \delta_{np}}{M_M};$$

$$\delta_o = \arcsin \frac{M_o}{M_M}; \quad \delta_{\kappa p} = \pi - \delta_o.$$

$$t_{\Pi P} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{np} - \delta_o)}{M_o}}.$$
(5.26)
(5.27)

Все величины выражениях (5.26), (5.27) представлены в относительных единицах.

5.8. Резкие изменения режима в системах электроснабжения

Резкие изменения режима обычно происходят в трех случаях:

1. авария (КЗ) или перегрузка в распределительной или питающей сети и последующее ее устранение. Снижение напряжения, от U_0 до U_1 , с последующим восстановлением до U_0 через время Δt (рис. 5.14 *a*).

2. отключение двигателей (узла нагрузки) от напряжения (перерыв питания) и подключение его через время Δt . В этом случае $U_1 = 0$.

3. изменение момента сопротивления в связи с увеличением нагрузки $(M_1 > M_0)$ или уменьшением ее $(M_1 < M_0)$, с последующим восстановление (через Δt) прежнего момента M_0 (рис. 5.14 б).



Рис. 5.14. Характер наброса нагрузкиа) снижение напряжения наб) увеличение момента (наброс $\Delta U = U_0 - U_1$ нагрузки) на $\Delta M = M_1 - M_0$

Различают кратковременные, длительные и т.д.

Рассмотрим эти случаи для асинхронных и синхронных двигателей.

Асинхронные двигатели

Снижение напряжения: (и соответственно уменьшение электромагнитного момента) иллюстрировано рисунками 5.15.



Рис. 5.15. Допустимое — а) и недопустимое; б) снижение напряжения на АД

При недопустимости решается задача определения предельного времени восстановления напряжения $\Delta t_{np.nad,U}$.



Рис. 5.16. Допустимый — а) и недопустимый; б) наброс нагрузки АД

При недопутимости решается задача определения предельного времени сброса нагрузки $\Delta t_{np.harp}$.

Синхронные двигатели.

Снижение напряжения:



Рис. 5.17. Допустимое — 1) и недопустимое; 2) снижение напряжения на СД

При недопустимости решается задача определения предельного угла и времени восстановления напряжения.

Наброс нагрузки:



Рис. 5.18. Допустимый наброс нагрузки на СД



Рис. 5.19. Недопустимый наброс нагрузки на СД

Недопустимый наброс нагрузки на СД требует решения задачи определения предельного угла и времени сброса нагрузки $\delta_{np.c\delta p}$:

$$\int_{\delta}^{\delta_{np.c\delta p}} (M_1 - M_m \sin \delta) ds + \int_{\delta_{np.c\delta p}}^{\delta_{np.c\delta p}} (M_0 - M_m \sin \delta) ds = 0;$$

$$M_1 \delta_{np.c\delta p} + M_1 \delta_0 + M_m \cos \delta_{np.c\delta p} - M_m \cos \delta_0 + M_0 \delta_{\kappa p} - M_0 \delta_{np.c\delta p} + M_m \cos \delta_{\kappa p} - M_m \cos \delta_{np.c\delta p} = 0;$$

$$\delta_{np.c\delta p} = \frac{M_0 \delta_{np.c\delta p} - M_1 \delta_0 + M_m (\cos \delta_{\kappa p} - \cos \delta_{np.c\delta p})}{M_0 - M_1}.$$
(5.28)

Предельное время сброса нагрузки находится численным решением дифференциального уравнения движения.

<u>Пример</u>: определить предельный угол сброса нагрузки $\delta_{np.c\delta p}$ при $M_0 = 0, M_1 = M_m$ (рис. 5.20).





Рис. 5.20. Применение правила площадей

Если $M_1 = 2M_m$ (рис. 5.21) предельный угол уменьшается вдвое



Рис. 5.21. Применение правила площадей

При повторно-кратковременном режиме нужно произвести решение ДУ по времени до достижения установившегося процесса. ДУ решают способом численного интегрирования, в некоторых случаях используют линеаризацию.

Кроме детерминированной нагрузки бывает и стохастическая нагрузка. При неопределенном характере нагрузки, нужно считать по максимальному моменту (гарантированный расчет).

Набросы, иначе говоря, толчкообразные нагрузки, существенно влияют на функционирование систем электроснабжения, и в основном вызываются резкопеременными нагрузками на валах синхронных и асинхронных двигателей. Толчок приводит к снижению напряжения в узле нагрузки и изменению фазы этого напряжения по отношению к источнику питания. Большие толчки вызывают также колебания частоты.

5.9. Способы повышения устойчивости узлов нагрузки

Статическая устойчивость узла нагрузки в основном определяется поддержанием уровня напряжения в узле.

Способы поддержания уровня напряжения:

1. Встречное регулирование трансформаторов с РПН;

2. Использование СД;

3. Использование БСК (при близком расположении к потребителю);

4. Использование источников реактивной мощности (ИРМ);

5. Резервирование (включение на параллельную работу трансформаторов);

6. Использование АРВ.

Для повышения динамической устойчивости

1. Поддержанием напряжения;

2. Использование тяжелых машин (чем тяжелее машина, тем она медленнее реагирует, поэтому T_j необходимо увеличивать, делать более тяжелый маховик или увеличивать его радиус);

3. Не допускать перегрузки машин;

4. Во избежание перегрузки машин, используется автоматика, в частности установка APB (автоматическое регулирование возбуждением) и AP4M (автоматическое регулирование частоты и мощности);

5. Форсировка возбуждения;

6. Использование АВР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.

2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А.Веников. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.

3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ; М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 283 с.

4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А.Сыромятников. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

5. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М.И.Слодарж. М.: Энергия, 1977. 215 с.

6. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П.Крючков, В.А.Старшинов, Ю.П.Гусев, М.В.Пираторов; под ред. И.П.Крючкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с: ил.

7. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А.Ульянов. М.: Энергия, 1970. 520 с.

8. Эрнст А.Д. Устойчивость узлов нагрузки: Учеб. пособие / А.Д.Эрнст, К.И.Никитин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 48 с.

9. Математическое моделирование электромеханических переходных процессов: Учебное пособие. Омск: Из-во ОмГТУ, 2009. 60 с.

10. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М.Голоднов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.

11. Эрнст А.Д. Самозапуск асинхронных электродвигателей: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 48 с.

12. Эрнст А.Д. Самозапуск синхронных электродвигателей: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. 76 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| Буквенные обозначения величин | 3 |
|---|------|
| Введение | 5 |
| 1. Общие положения | 6 |
| 1.1. Устойчивость систем и узлов нагрузки. Предмет изучения | 6 |
| Задачи расчета. Понятия статической, динамической и результирующей устойчивости | 7 |
| Основные характеристики режимов электрической системы и задачи их анализа | 8 |
| 1.4. Классификация электромеханических переходных процессов | . 11 |
| 2. Статическая устойчивость энергосистем | . 13 |
| 2.1. Вывод формулы угловой характеристики мощности простейшей нерегулируемой системы | . 13 |
| 2.2. Практический (прямой) критерий устойчивости простейшей электрической системы | . 16 |
| 2.3. Упрощенные угловые характеристики мощности регулируемых систем | . 18 |
| 2.4. Уравнение движения ротора и формы его записи | . 20 |
| 2.5. Исследование статической устойчивости простейшей системы методом малых колебаний | . 23 |
| 2.6. Характер протекания переходных процессов в зависимости от вида корней характеристического уравнения | . 25 |
| 2.7. Метод Гурвица при исследовании статической устойчивости | . 27 |
| 2.8. Учет электромагнитных переходных процессов в обмотке возбуждения | . 28 |
| 2.9. Три вида неустойчивости простейшей нерегулируемой системы | . 30 |
| 2.10. Влияние реактивного сопротивления системы и насыщения генератора на статическую устойчивость | . 33 |
| 2.11. Угловая характеристика мощности явнополюсной синхронной машины | . 35 |
| 2.12. Угловая характеристика мощности при сложной связи с системой | . 38 |
| 2.13. Влияние параметров системы на угловые характеристики мощности | . 41 |

| | 2.14. Учет нагрузки и действительный предел мощности | . 47 |
|----|---|------|
| | 2.15. Статическая устойчивость при регулировании возбуждения | . 49 |
| | 2.16. Особенности работы различных систем АРВ | . 50 |
| | 2.17. Статическая устойчивость при регулировании возбуждения с зоной нечувствительности | . 53 |
| 3. | . Динамическая устойчивость энергосистем | . 56 |
| | 3.1. Динамическая устойчивость. Основные допущения и критерии | . 56 |
| | 3.2. Способ площадей на примере отключения одной цепи двухцепной линии | . 57 |
| | 3.3. Использование комплексных схем замещения при анализе динамической устойчивости | . 60 |
| | 3.4. Динамическая устойчивость при коротких замыканиях. Качественный анализ | . 64 |
| | 3.5. Определение предельного угла отключения КЗ | . 66 |
| | 3.6. Определение предельного угла и времени отключения трехфазного короткого замыкания | . 68 |
| | 3.7. Динамическая устойчивость для случая двух электростанций | . 69 |
| | 3.8. Применение форсировки возбуждения | .71 |
| | 3.9. Численные методы решения дифференциальных уравнений относительного движения ротора | .73 |
| | 3.10. Метод последовательных интервалов в расчетах динамической устойчивости | .74 |
| | 3.11. Асинхронные режимы в электрических системах. Установившийся асинхронный режим | .76 |
| | 3.12. Роль электрического центра системы и приближенный учет качаний при расчетах токов короткого замыкания | . 80 |
| | 3.13. Способы и средства повышения устойчивости электрических систем | . 83 |
| 4. | . Статическая устойчивость узлов нагрузки | . 89 |
| | 4.1. Устойчивость узлов нагрузки. Основные понятия и определения | . 89 |
| | 4.2. Статические и динамические характеристики узлов нагрузки | . 89 |
| | 4.3. Статическая устойчивость асинхронной нагрузки. Практический критерий устойчивости. | .91 |
| | 4.4. Вторичные критерии устойчивости. Лавина напряжения | . 94 |

| 4.5. Устойчивость нагрузки при соизмеримой мощности системы |
|---|
| 4.6. Компенсация реактивной мощности и статическая устойчивость 100 |
| 4.7. Статическая устойчивость асинхронной нагрузки при изменении напряжения и частоты 101 |
| 4.8. Статическая устойчивость синхронной нагрузки при изменении напряжения и частоты104 |
| 5. Динамическая устойчивость узлов нагрузки 106 |
| 5.1. Динамическая устойчивость асинхронной нагрузки. Уравнение движения |
| 5.2. Определение предельного времени АВР асинхронной нагрузки 108 |
| 5.3. Определение предельного времени АВР синхронной нагрузки 109 |
| 5.4. Пуск двигателей. Схемы пуска. Порядок расчета 110 |
| 5.5. Самозапуск электродвигателей. Основные положения 114 |
| 5.6. Самозапуск электродвигателей. Последовательность расчета 115 |
| 5.7. Динамическая устойчивость синхронной нагрузки 121 |
| 5.8. Резкие изменения режима в системах электроснабжения 121 |
| 5.9. Способы повышения устойчивости узлов нагрузки 126 |
| Список литературы127 |

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 29.04.2013 Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов Гарнитура Times. Усл. печ. листов 16,5 Тираж 300 экз. Заказ 1429

Отпечатано в Издательстве Нижневартовского государственного университета 628615, Тюменская область, г.Нижневартовск, ул.Дзержинского, 11 Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru