

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
И ПОДСТАНЦИЙ**

Учебно-методическое пособие

Казань 2019

УДК 621.311(072)

ББК 31.2

Р33

Р33 Режимы работы электрооборудования электрических станций и подстанций Учебно-методическое пособие / Сост.: А.Ю. Кубарев, Р.В. Ахметова, Е.В. Михайлова, С.М. Маргулис– Казань: Казань. гос. энерг. ун-т, 2019. – 49 с.

Учебно-методическое пособие содержит рекомендации для самостоятельного решения задач, и их примеры по дисциплине «Режимы работы электрооборудования электрических станций и подстанций». Предназначено для студентов, обучающихся по образовательной программе «Электрические станции» направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311(072)

ББК 31.2

©Казанский государственный энергетический университет, 2019 г.

© Кубарев А.Ю., Ахметова Р.В., Михайлова Е.В., Маргулис С.М.

ВВЕДЕНИЕ

Работа студента над дисциплиной «Режимы работы электрооборудования станций и подстанций» складывается из самостоятельного изучения разделов и тем дисциплины по учебникам и учебным пособиям с последующей самопроверкой, индивидуальных консультаций (очных и письменных), выполнения практических заданий, расчётно-графической работы, посещения лекций, сдачи зачета по расчётно-графической работе, защиты реферата, выступления на семинаре.

Для успешного понимания процессов, происходящих как в отдельных единицах электрооборудования на электрических станциях и подстанциях, так и в электрических системах студент должен:

- **знать** основные законы электротехники и параметры и характеристики основного электрооборудования электрических станций и подстанций; Схемы, конструктивные особенности и эксплуатационные характеристики, правила эксплуатации оборудования, сооружений и устройств, технологических систем цеха (подразделения) ТЭС в нормальных, ремонтных, аварийных и послеаварийных режимах работы - возможности применения различных типов электродвигателей в системе собственных нужд электростанций; Назначение и принцип действия автоматических и регулирующих устройств, технологических защит, блокировок и сигнализации, установленных на оборудовании цеха (подразделения) ТЭС;

- **уметь** производить расчеты электрических цепей и выбирать по справочнику параметры электрооборудования; Определять требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике.

- **владеть** методами анализа и моделирования электрических цепей; Навыками согласования с вышестоящим оперативным и административным руководством режима останова или пуска оборудования в случаях, предусмотренных инструкциями.

Целью учебно-методического пособия является формирование умений и навыков в решении конкретных практических задач в соответствии со структурой курса дисциплины Б1.В.ДВ.02.01.08 «Режимы работы электрооборудования станций и подстанций» и рабочей программой дисциплины (РПД).

Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП (компетенциями выпускников)

ПК-6 способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности;

ПК-7 готовность обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике

В учебно-методическом пособии приводятся теоретические сведения в соответствии с курсом лекций дисциплины, а также примеры решения практических задач.

Все задачи относятся к конкретным разделам лекционного курса и формируют практические навыки расчёта режимов электрооборудования.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современная электрическая система характеризуется значительной сложностью, которая определяется как структурой схемы её электрических соединений, так и сложностью физических процессов, связанных с её работой в нормальных, аварийных и послеаварийных условиях.

Режим работы электрических систем описывается системой алгебраических и дифференциальных уравнений. Число уравнений зависит от количества элементов, связанных в схеме электрической системы процессами производства, передачи и потребления электроэнергии, а также определяется характером исследуемого явления и точностью отражения характеристик её элементов в расчете.

В основу математических операций или математической модели при расчетах режимов работы электрической системы положена её схема замещения, представление каждого её элемента индуктивностями, емкостями или активными сопротивлениями и соединение их в электрическую цепь.

Задача расчетов различных режимов работы электрических систем в настоящее время успешно решается путем применения соответствующих математических методов с реализацией их на цифровых вычислительных машинах ЦВМ. Однако даже при использовании современных вычислительных средств расчеты режимов с учетом всех или большинства явлений, происходящих в элементах электрической системы, представляют весьма трудоемкую задачу. Поэтому в ряд инженерных расчетов вводятся допущения, целью которых становится упрощение вычислений и в то же время выделение у исследуемого явления свойства, которое можно назвать главным при решении поставленной задачи.

Рассматриваются некоторые допущения, принимаемые при расчетах различных режимов, которые могут быть использованы при решении задач и выполнении расчётно-графической работы:

1. Электрическую систему, содержащую большое количество элементов, представляют более простой.

В этом случае интересующая инженера часть электрической системы (подсистема) со всеми ее элементами (генераторы, трансформаторы, линии, нагрузки и т.д.) представляется в реальном виде, а остальная ее часть упрощается с помощью различных методов эквивалентирования и рассматривается в качестве некоторой модели реальной части системы. Поступая таким образом, сложную электрическую систему можно преобразовать в 3-, 2-машинную или простейшую систему «станция – шины неизменного напряжения».

2. В расчетах электродвижущая сила ЭДС генераторов принимаются неизменными, не учитываются переходные электромагнитные процессы в статорных и роторных контурах.

3. Не учитывается действие регуляторов скорости турбин, чьи мощности принимаются неизменными.

4. Нагрузки представляются постоянными сопротивлениями, проводимостями или статистическими характеристиками, не учитываются динамические свойства нагрузок.

5. При несимметрии статорной цепи, обусловленной несимметричными короткими замыканиями, принимается во внимание лишь прямая последовательность токов, а обратная и нулевая последовательности участвуют косвенно, как факторы, влияющие на величину мощностей прямой последовательности. В месте короткого замыкания на землю в схему замещения рассчитываемой системы включается шунт, сопротивление которого зависит от вида короткого замыкания КЗ.

6. Действие автоматических регуляторов возбуждения АРВ учитывается упрощенно, например, постоянством напряжения на зажимах генераторов либо переходной или сверхпереходной ЭДС.

Применение иных допущений при расчетах различных режимов электрических систем позволяет даже при ручном способе вычислений решить разнообразные задачи.

1. РАСЧЕТ ПРЕДЕЛА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Основные характеристики и терминология

Под простейшей системой понимается такая, в которой одиночная электростанция (эквивалентный генератор) связана с шинами (системой) неизменного напряжения трансформаторами Тр-1 и Тр-2 (рис.1.1) и двухцепной линией Л, по которой передается мощность от станции в систему. Принимается, что суммарная мощность электростанций системы во много раз превышает мощность рассматриваемой станции. Это позволяет считать напряжение на шинах системы неизменным ($U_n = \text{const}$) при любых режимах ее работы.

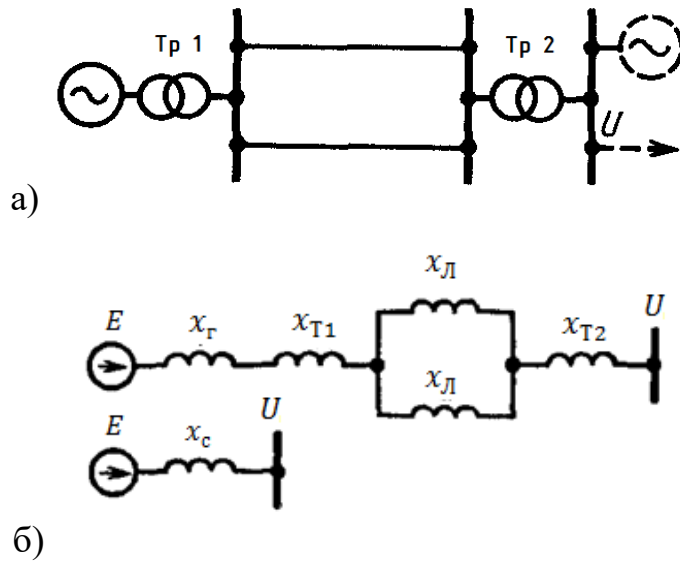


Рис. 1.1 – Схема простейшей энергосистемы (а) и её схема замещения (б)

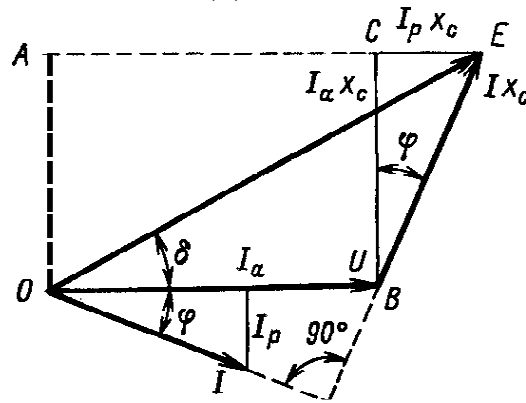


Рис. 1.2 – Векторная диаграмма нормального режима работы электропередачи.

При постоянстве Э.Д.С. 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 уравнивается 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.

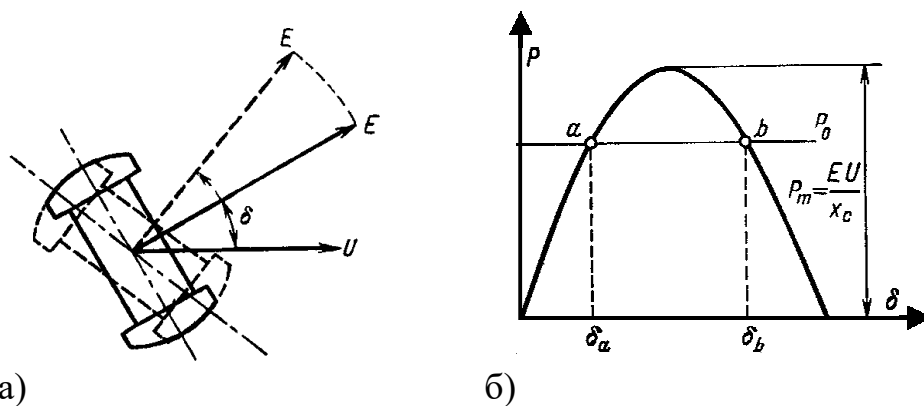


Рис. 1.3 а – Движение вектора Э.Д.С. генератора при ускорении генератора; б – Зависимость активной мощности от угла

При ускорении генератора вектор Э.Д.С. E на (рис. 1.3 а) перемещается относительно вращающегося с неизменной угловой скоростью вектора напряжения приемной системы U . Связанное с этим увеличение угла δ и обуславливает согласно (1.1) соответствующее изменение мощности генератора P , возрастающей до тех пор, пока она вновь не уравновесит увеличивающуюся мощность турбины. Таким образом, величиной, непосредственно определяющей значение активной мощности, отдаваемой генератором энергосистеме, является угол δ .

Как вытекает из уравнения (1.1), зависимость мощности от угла δ имеет синусоидальный характер (рис. 3б) и, следовательно, с увеличением угла δ мощность P сначала возрастает, но затем, достигнув максимального значения, начинает падать.

$$P = \frac{EU}{x_c} \sin \delta \quad (1.1)$$

При данном значении э. д. с. генератора E и напряжения приемника U существует определенный максимум передаваемой мощности:

$$P = \frac{EU}{x_c} \quad (1.2)$$

Он может быть назван идеальным пределом мощности рассматриваемой простейшей электрической системы. Равновесие между мощностью турбины и генератора достигается лишь при значениях мощности, меньших P_m , причем данному значению мощности турбины P_0 соответствуют, вообще говоря, две возможные точки равновесия на характеристике мощности генератора и, следовательно, два значения угла δ_a и δ_b (рис. 3 б). Однако в действительности устойчивый установившийся режим работы электропередачи возможен только при угле δ_a . Режим,

которому на (рис. 3 б) отвечает точка *b* на падающей части характеристики, неустойчив и длительно существовать не может, т.к. даже при малом возмущении генератор выпадет из синхронизма.

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.

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

$$K_3 = \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_0} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

$K_3 \geq 20\%$ — нормальный режим; $K_3 \geq 8\%$ — послеаварийный режим

Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ), процесс изменения по заданным условиям тока возбуждения электрических машин. Осуществляется на синхронных генераторах, мощных синхронных двигателях, синхронных компенсаторах, на генераторах и двигателях постоянного тока и на других специальных электрических машинах изменением напряжения на обмотке возбуждения. При этом изменяется сила тока возбуждения электрической машины и, как следствие, основной магнитный поток и ЭДС в обмотках якоря. АРВ синхронных генераторов осуществляется в основном с целью обеспечения заданного напряжения в электрической сети, а также для повышения устойчивости их параллельной работы на общую сеть. АРВ широко применяется в электроприводе постоянного тока для поддержания постоянства частоты вращения рабочего органа машины путём воздействия на ток возбуждения двигателя или питающего генератора.

Различают **АРВ пропорционального и сильного действия**. АРВ пропорционального действия характеризуется изменением силы тока возбуждения пропорционально отклонению напряжения на зажимах машины от заданного значения (отрицательная обратная связь по напряжению). Регуляторы возбуждения пропорционального действия могут содержать устройства компаундирования (положительная обратная связь по току

машины) и стабилизации (гибкая отрицательная обратная связь по напряжению возбуждения). АРВ пропорционального действия не обеспечивает достаточной точности поддержания напряжения электрических станций, работающих на дальние линии электропередачи и в случаях, когда в системе имеются резкопеременные нагрузки, приводящие к значительным колебаниям напряжения. Тогда применяют АРВ сильного действия, при котором увеличение эффективности достигается введением регулирования возбуждения по отклонению напряжения, по производным от тока, напряжения, частоты и др., выбираемых в определенных соотношениях; характеризуется высоким быстродействием и большой мощностью системы возбуждения.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача № 1 относится к первому разделу лекционного курса **«Режимы работы энергосистем»**, а также содержит материал, рассматриваемый во втором разделе лекционного курса **«Режимы работы синхронных генераторов и синхронных компенсаторов»**.

Задача № 1

Дано: Станция работает через электропередачу на систему, мощность которой значительно больше мощности станции (рис. 1.4). Параметры электропередачи и исходного режима следующие: $x_d = 1,9$; $x_T = 0,1$; $x_L = 0,17$; $U_{10} = 1$; $P_{10} = 0,85$; $Q_{10} = 0,264$; $x'_d = 0,38$. Расчёт производится в относительных единицах

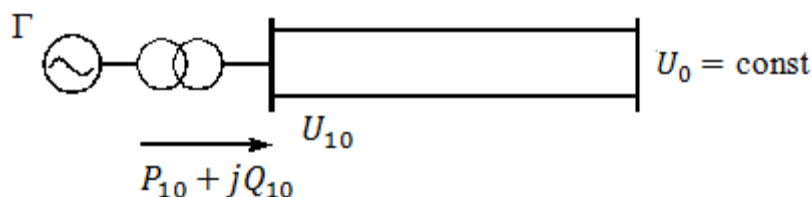


Рис. 1.4 Принципиальная схема простейшей электропередачи

Рассчитайте предел передаваемой мощности и коэффициент запаса устойчивости системы в следующих случаях:

- 1) при отсутствии АРВ;
- 2) при АРВ пропорционального действия;
- 3) при АРВ сильного действия.

Решение:

При отсутствии АРВ схема замещения рассматриваемой системы будет иметь вид, представленный на рис. 1.5.

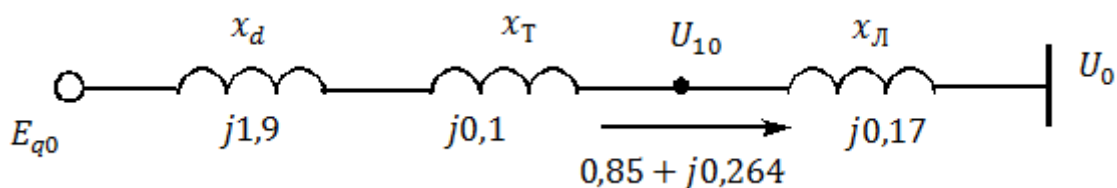


Рис. 1.5 Схема замещения электропередачи при отсутствии АРВ

В этом случае предел передаваемой мощности определяется исходя из условия постоянства синхронной ЭДС $E_{q0} = \text{const}$:

$$\dot{E}_{q0} = \dot{U}_{10} + \frac{Q_{10}(x_d + x_T)}{U_{10}} + j \frac{P_{10}(x_d + x_T)}{U_{10}}, \quad (1.4)$$

$$\dot{E}_{q0} = 1 + \frac{0,264 \cdot 2}{1} + j \frac{0,85 \cdot 2}{1} = 1,528 + j1,7 = 2,286e^{j48,05^\circ}.$$

Напряжение на шинах приемной системы:

$$\dot{U}_0 = U_{10} - \frac{Q_{10} \cdot x_L}{U_{10}} - j \frac{P_{10} \cdot x_L}{U_{10}}, \quad (1.5)$$

$$\dot{U}_0 = 1 - \frac{0,264 \cdot 0,17}{1} - j \frac{0,85 \cdot 0,17}{1} = 0,955 - j0,145 = 0,966e^{-j8,633^\circ}.$$

Полный угол электропередачи:

$$\delta_0 = 48,05^\circ + 8,633^\circ = 56,683^\circ \quad (1.6)$$

Характеристика мощности при наличии в схеме замещения лишь индуктивных сопротивлений имеет вид:

$$P = \frac{E_{q0} U_0}{x_d \Sigma} \sin \delta, \quad (1.7)$$

$$\text{где } x_{d\Sigma} = x_d + x_L + x_T. \quad (1.8)$$

В исходном режиме при $\delta_0 = 56,683^\circ$

$$P_0 = \frac{2,286 \cdot 0,966}{2,0 + 0,17} \sin 56,683^\circ = 0,85. \quad (1.9)$$

Результат вычислений совпадает с заданной активной мощностью генераторной станции, следовательно, параметры исходного режима рассчитаны верно.

Предел передаваемой мощности электропередачи имеет место при полном угле электропередачи $\delta_0 = 90^\circ$:

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_{q0} U_0}{x_d \Sigma}, \quad (1.10)$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{2,286 \cdot 0,966}{2,17} = 1,018.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости равен:

$$K_3 = \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_0} \cdot 100\%, \quad (1.11)$$

$$K_3 = \frac{1,018 - 0,85}{0,85} \cdot 100\% = 19,77\%.$$

При установке на генераторах АРВ пропорционального типа пределы передаваемой мощности и устойчивости определяются исходя из постоянства ЭДС за переходным сопротивлением $E'_0 = \text{const}$ (рис. 1.6)

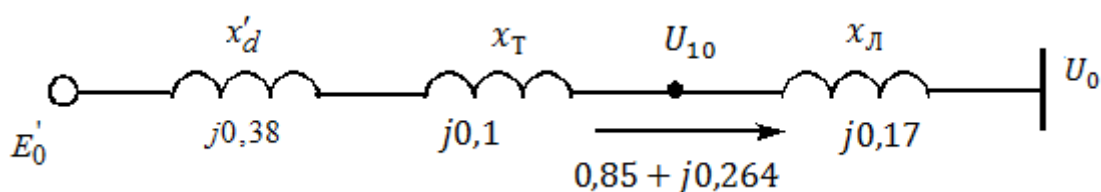


Рис. 1.6 Схема замещения при АРВ пропорционального действия

Рассчитывается ЭДС $\dot{E}'_0$:

$$\dot{E}'_0 = U_{10} + \frac{Q_{10}(x'_d + x_T)}{U_{10}} + j \frac{P_{10}(x'_d + x_T)}{U_{10}}, \quad (1.12)$$

$$\dot{E}'_0 = 1 + \frac{0,264 \cdot 0,48}{1} + j \frac{0,85 \cdot 0,48}{1} = 1,127 + j0,408 = 1,2e^{j19,9^\circ}.$$

Полный угол электропередачи в случае АРВ пропорционального действия равен: $\delta'_0 = 19,9 + 8,633 = 28,533^\circ$.

В исходном режиме:

$$P_0 = \frac{E'_0 \cdot U_0}{x_d \Sigma} \sin \delta'_0, \quad (1.13)$$

где $x'_d \Sigma = x'_d + x_L + x_T$.

$$P_0 = \frac{1,2 \cdot 0,966}{0,38 + 0,1 + 0,17} \sin 28,533^\circ = 0,85.$$

Предел передаваемой мощности:

$$P_{\text{пр}} = \frac{E'_0 U_0}{x'_d \Sigma} \quad (1.14)$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{1,2 \cdot 0,966}{0,65} = 1,783$$

Коэффициент запаса статической устойчивости:

$$K_3 = \frac{1,783 - 0,85}{0,85} \cdot 100\% = 109,76\%.$$

Автоматические регуляторы сильного действия в зависимости от их настройки могут обеспечить постоянство напряжения либо на выводах генераторов, либо в начале линии. Необходимо определить (рис. 1.7) предел устойчивости, принимая $U_{\Gamma 0} = \text{const}$.

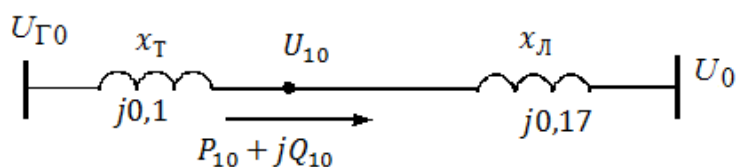


Рис. 1.7 Схема замещения при АРВ сильного действия

Напряжение на выводах генераторов равно:

$$\dot{U}_{\Gamma 0} = U_{10} + \frac{Q_{10} \cdot x_T}{U_{10}} + j \frac{P_{10} \cdot x_T}{U_{10}}, \quad (1.15)$$

$$\dot{U}_{\Gamma 0} = 1 + \frac{0,264 \cdot 0,1}{1} + j \frac{0,85 \cdot 0,1}{1} = 1,026 + j0,085 = 1,03e^{j4,736^\circ}.$$

Полный угол электропередачи в этом случае:

$$\delta_{\Gamma 0} = 4,736^\circ + 8,633^\circ = 13,369^\circ. \quad (1.16)$$

В исходном режиме:

$$P_0 = \frac{U_{Г0} \cdot U_0}{x_0 + x_L} \cdot \sin \delta_{U_{Г0}}, \quad (1.17)$$

$$P_0 = \frac{1,03 \cdot 0,966}{0,1 + 0,17} \cdot \sin 13,369^\circ = 0,85,$$

$$P_{пр} = \frac{1,03 \cdot 0,966}{0,1 + 0,17} = 3,69.$$

$$K_3 = \frac{3,69 - 0,85}{0,85} \cdot 100\% = 334\%.$$

Сопоставляя результаты расчетов, видим, что АРВ пропорционального типа по сравнению со случаем отсутствия регулирования возбуждения увеличивает запас устойчивости на 90 %, а АРВ сильного действия – 314 %. Повышение пределов передаваемой мощности обусловлено тем, что АРВ полностью (сильного действия) или частично (пропорционального типа) исключает влияние собственных сопротивлений генераторов на пределы передаваемой мощности и устойчивости.

Контрольные вопросы

1. Что такое осуществимость режима?
2. Как проверяется возможность существования режима?
3. Что такое коэффициенты запаса устойчивости режима?
4. Назовите четыре условия, которым должны удовлетворять расчеты электрических систем (осуществимость, устойчивость, качество, экономичность).
5. Что такое запас устойчивости?
6. В чем заключается простейший критерий устойчивости синхронного генератора, работающего через сеть на шины неизменного напряжения, при постоянном моменте турбины?
7. Что такое АРВ пропорционального действия?
8. Что такое АРВ сильного действия?

2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И КОМПЕНСАТОРОВ

Нагрузка синхронных генераторов изменяется в соответствии с графиком нагрузки электростанций. При этом реактивную мощность

генераторов изменяют путем изменения тока возбуждения, а активную мощность – изменением количества энергоносителя (пара или воды), пропускаемого через турбину. Скорость увеличения нагрузки турбогенератора ограничена. Она определяется временем, необходимым для постепенного нагрева турбины. Обычно это время составляет несколько часов. Гидравлическая турбина не ограничивает скорость подъема нагрузки, поэтому набор нагрузки гидрогенератора производится в течение нескольких минут.

Номинальный режим работы генератора характеризуется номинальными параметрами: активной нагрузкой $P_{\text{ном}}$, напряжением $U_{\text{ном}}$, коэффициентом мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$, частотой $f_{\text{ном}}$ и температурой охлаждающего газа на входе v_0 . Работа с номинальными параметрами может продолжаться как угодно длительно. При этом температуры обмоток статора и ротора и стали статора не выходят за допускаемые пределы.

Известно, что активная и реактивная мощности машины, соответственно равны:

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta, \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_d + x_q}{x_d x_q}. \quad (2.2)$$

Для неявнополюсных машин:

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta. \quad (2.3)$$

Особенностью синхронных машин в нормальном режиме работы является синхронное вращение ротора с магнитным полем статора, жестко связанным с магнитным полем ротора. Эта особенность определяет требования, необходимые для соблюдения при включении синхронных машин в сеть.

Из теории электрических машин известно, что при пуске из состояния покоя путем непосредственного включения возбужденной машины в сеть ее пусковой момент (если не принять дополнительных мер) равен нулю (правильнее будет сказать: пусковой момент имеет знакопеременное значение, причем направление его действия меняется с частотой 50 Гц и

поэтому ротор не успевает следовать за вращающимся полем статора). Следовательно, ротор машины при таких условиях начать вращаться самостоятельно не может. Его необходимо, каким либо способом, развернуть (раскрутить) и довести до подсинхронной (близкой к синхронной) или лучше до синхронной скорости и после этого включить в сеть. Такая процедура безаварийного включения синхронной машины в сеть называется синхронизацией. В зависимости от последовательности действий различают способ точной синхронизации и способ грубой или самосинхронизации.

При включении электрических машин в сеть возникают пусковые токи, которые при определенных условиях соизмеримы с токами короткого замыкания (КЗ) и могут привести к снижению напряжения сети, а если процесс пуска затянется, то и к недопустимому перегреву машины. Поэтому при выборе способа пуска необходимо учитывать и эту сторону процесса, т.е. после пуска машины ее температура не должна превышать допустимую.

Если пуск машины осуществляется из холодного состояния, то при наборе нагрузки слишком высокая скорость повышения температуры может привести к недопустимым тепловым и механическим напряжениям, деформациям, повреждениям и отказам машины.

Таким образом, в пусковом режиме работы синхронной машины можно выделить три этапа:

- начальный разворот ротора,
- синхронизация,
- набор нагрузки.

Синхронизация синхронных машин

После разгона ротора синхронной машины до подсинхронной скорости ее необходимо включить в сеть. Однако для безаварийного включения необходимо выполнить ряд условий. Процедура выполнения этих условий называется синхронизацией.

Первым основным и обязательным условием для любого способа синхронизации является проверка правильности чередования фаз сети и подключаемой машины. Включение в сеть машины, имеющей обратное чередование фаз, вызовет последствия более тяжелые, чем несинхронное включение. Такое включение машины сопровождается возникновением электромагнитного момента, противоположного моменту, развиваемому разгонным двигателем, а также появлением чрезмерных токов в статоре машины. Результатом может быть не только повреждение синхронизируемой машины, но и поломка вала разгонного двигателя. Проверку правильности чередования фаз необходимо производить при первом включении машины, а

также после ремонтных работ в ее первичных цепях. Эта проверка должна производиться при помощи одного и того же трансформатора напряжения, подключенного к системе шин, на которую поочередно подается напряжение от подключаемой машины и от сети.

Выполнение других условий зависит от используемого способа синхронизации. Различают способ точной синхронизации и способ самосинхронизации.

Способ точной синхронизации

Этот способ используется при включении в сеть синхронных машин. Он состоит в том, что синхронизируемую машину сначала разворачивают разгонным двигателем (кроме асинхронного электродвигателя) до частоты вращения, близкой к синхронной, а затем возбуждают и при определенных условиях включают в сеть. Условиями, необходимыми для включения синхронизируемой машины в сеть (в данном случае её необходимо рассматривать как генератор), являются:

1) равенство напряжений включаемого генератора и работающего генератора или сети (при включении в сеть способом точной синхронизации с включенным АРВ, снабженным устройством автоматической подгонки напряжения, различие напряжений сети и генератора не должно превышать 1 %, при отсутствии устройства автоматической подгонки напряжения, а также при ручном регулировании возбуждения различие напряжений генератора и сети не должно превышать 5 %).

2) совпадение фаз этих напряжений (во всех случаях включения способом точной синхронизации следует стремиться к тому, чтобы угол между напряжением генератора и сети в момент включения не превышал 10°);

3) равенство частот включаемого генератора и работающего генератора или сети (отклонение не более 0,1%, причем предпочтительно, чтобы частота подключаемой машины превышала частоту сети на 0,05...0,1 Гц, что соответствует движению стрелки синхроскопа по часовой стрелке с периодом 1 оборот за 20...10 с).

Первое условие обеспечивается путем регулирования тока возбуждения машины, а для выполнения второго и третьего условий необходимо изменение вращающего момента на ее валу, что достигается изменением, например, количества пара или воды, пропускаемых через турбину.

Выполнение условий точной синхронизации может быть осуществлено вручную или автоматически. При ручной синхронизации все операции по регулированию возбуждения и подгонке частоты выполняет дежурный

персонал, а при автоматической синхронизации – автоматические устройства. При точной ручной синхронизации напряжения и частоты контролируются по установленным на щите управления двум вольтметрам и двум частотомерам, а сдвиг по фазе напряжений – по синхроскопу. Последний позволяет не только уловить момент совпадения фаз напряжений, но также определить, вращается ли генератор быстрее или медленнее, чем работающие. Указанные приборы объединяют в так называемую «колонку синхронизации». Вольтметр и частотомер, относящийся к синхронизируемому генератору, подключают к его трансформатору напряжения, а вольтметр и частотомер, относящиеся к работающим генераторам (или сети), обычно подключают к трансформатору напряжения сборных шин станции. Синхроскоп подключают одновременно к обоим трансформаторам напряжения.

При соблюдении всех вышеуказанных условий разность напряжений генератора и сети равна нулю, поэтому уравнивающего тока между ними не возникает. Включение генератора в сеть при значительном неравенстве напряжений по величине и при большом угле $\delta_{\text{ош}}$ расхождения по фазе вызовет появление уравнивающего тока $I''_{\text{вкл}}$ и связанных с ним последствий. Особенно опасно включение генератора при несовпадении напряжений по фазе, так как именно фазовый сдвиг вызывает толчки тока статора и электромагнитного момента на валу. Влияние фазового сдвига на величину тока включения может быть проиллюстрировано векторной диаграммой (рис. 2.1).

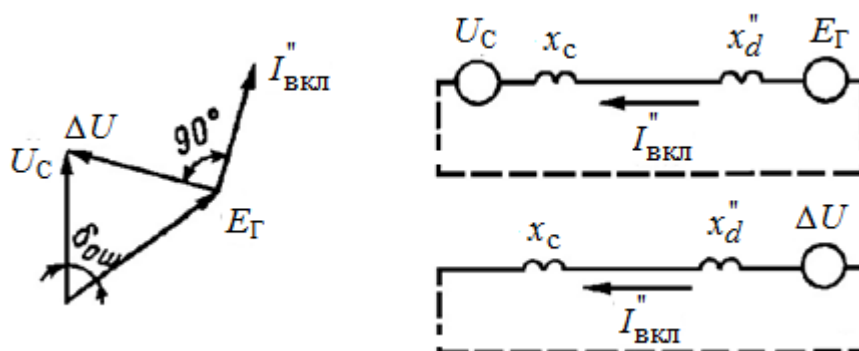


Рис. 2.1 К определению допустимой угловой ошибки при синхронизации

Из векторной диаграммы видно, что при равенстве напряжений системы и генератора $U_C = E_G = U$

$$\Delta U = 2 \cdot U \cdot \sin \frac{\delta_{\text{ош}}}{2} \quad (2.4)$$

$$I''_{\text{вкл}} = \frac{\Delta U}{x''_d + x_c} \quad (2.5)$$

здесь x''_d – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси; x_c – сопротивление системы.

При сдвиге 180° (включение в противофазу) ток $I''_{\text{вкл}}$ значительно превышает ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ на выводах генератора:

$$I''_{\text{вкл}} = \frac{U_c + E_\Gamma}{x''_d + x_c} \gg I_{\text{к.з.}} \quad (2.6)$$

Возникающий при этом момент вращения может в несколько раз превышать момент на валу генератора при коротком замыкании на его выводах. От этого могут разрушиться лобовые части обмотки статора или одна из обмоток трансформатора, через который генератор подключается к сети. Включение в противофазу может случиться при неисправности во вторичных цепях или при неправильном включении синхронизирующего устройства.

При значительной разности частот трудно безошибочно выбрать момент для включения генератора. Кроме того, если даже момент включения будет выбран удачно, то из-за большой начальной разности между синхронной скоростью и скоростью вращения ротора ротор генератора не успеет затормозиться и удержаться в синхронизме, что вызовет появление недопустимо больших колебаний тока статора и вращающего момента ротора. Поэтому при большой скорости вращения, а также при резких качаниях стрелки синхроскопа включать генератор не допустимо.

Точной ручной синхронизации свойственны следующие недостатки:

- 1) сложность процесса включения из-за необходимости подгонки напряжения по модулю и фазе, а также частоты генератора;
- 2) большая длительность включения – от нескольких минут в нормальном режиме до нескольких десятков минут при авариях в системе, сопровождающихся изменением частоты и напряжения, когда особенно важно обеспечить быстрое включение генератора в сеть;
- 3) возможность механических повреждений генератора и первичного двигателя при включении агрегата с большим углом $\delta_{\text{ош}}$.

Во избежание механических повреждений ручная синхронизация выполняется с автоматическим контролем синхронизма, который запрещает включение выключателя синхронизируемой машины при несоблюдении условий синхронизации. Ручная синхронизация при отключенной блокировке от несинхронного включения запрещается

Способ самосинхронизации

При способе самосинхронизации (этот способ используется как дополнительный к основному) синхронизируемая машина с обмоткой возбуждения, замкнутой на гасительное сопротивление при отключенном АГП включается в сеть без возбуждения. Частота машины и частота сети должны при этом расходиться не более чем на 2%. Начальный ток включения (ток самосинхронизации I_{cc}) определяется по формуле:

$$I_{cc} = \frac{U_c}{x''_d + x_c} \quad (2.7)$$

и, следовательно, он меньше, чем при коротком замыкании на выводах машины, так как ток короткого замыкания в этом случае определится как

$$I_k = \frac{E_\Gamma}{x''_d} \quad (2.8)$$

Синхронизируемая машина возбуждается сразу же после включения в сеть и плавно (в течение 1...2 с.) входит в синхронизм.

Как видно, включение машины по способу самосинхронизации в первый момент эквивалентно короткому замыканию за сверхпереходным реактивным сопротивлением генератора. Остаточное напряжение на шинах, к которым подключается машина,

$$U_{вкл} = U_c \cdot \frac{x''_d + x_{доп}}{x''_d + x_{доп} + x_c} \quad (2.9)$$

где $x_{доп}$ – сопротивление блочного трансформатора (в блочной схеме) или реактора (при реактором пуске), приведенное к мощности генератора.

Именно вследствие понижения напряжения на шинах при самосинхронизации, этот способ нежелателен для синхронизации генераторов на электростанциях с общими сборными шинами генераторного напряжения.

Для мощных блочных станций способ самосинхронизации допустим, однако выигрыш во времени по сравнению с пуском теплового блока исчезающе мал. Поэтому в настоящее время в нормальных условиях на всех электростанциях, как правило, применяется способ точной синхронизации, а самосинхронизация может применяться лишь в аварийных условиях,

например после потери генератором возбуждения, при включении резервных гидрогенераторов, при трехфазном АПВ с самосинхронизацией генераторов и т.п.

Проверка допустимости несинхронного включения генератора по возникающему току

Задачи № 2 и № 3 относятся к второму разделу лекционного курса «Режимы работы синхронных генераторов и синхронных компенсаторов».

Задача № 2

Дано: Генератор Г связан с системой С двумя повышающими трансформаторами Т-1 и Т-2. Установите, допустимо ли несинхронное включение генератора по возникающему при этом току, величина которого не должна превышать допустимых значений токов короткого замыкания как для генератора Г, так и для каждого из трансформаторов.

Система С характеризуется эквивалентной реактивностью $x = 7$ Ом, за которой приложено неизменное напряжение $U = 115$ кВ:

Генератор Г $S_H = 117,5$ МВА, $\cos \varphi = 0,85$; $U_H = 10,5$ кВ; $x_d'' = 0,22$.

Трансформатор Т-1 $S_H = 30$ МВА, $U = 118/10,5$; $u_k = 10,5$ %.

Трансформатор Т-2 $S = 90$ МВА, $U = 118/10,5$; $u_k = 10,5$ %.

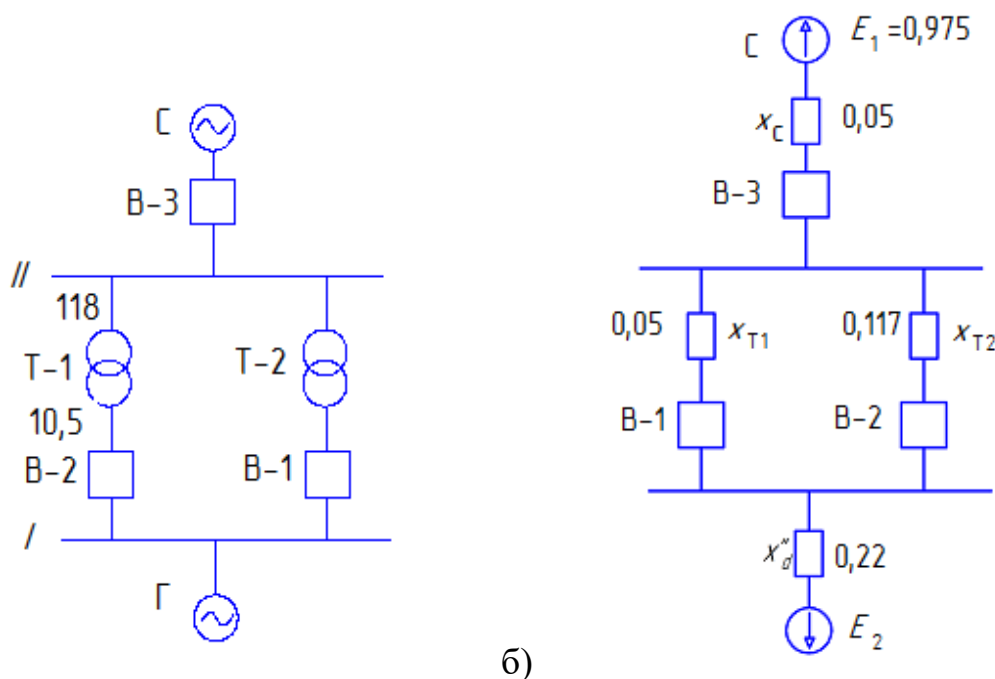


Рис. 2.2 - а) Принципиальная схема электрических связей генератора и системы; б) Схема замещения электрических связей генератора и системы

Решение:

На рис. 2.2, а приведена принципиальная однолинейная электрическая схема подключения синхронного генератора к системе. На рис. 2.2, б приведена схема замещения, параметры элементов которой выражены в относительных единицах.

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями, что вычисляемая работа должна быть по возможности простой, а порядок числовых значений относительных базисных величин достаточно удобен. Для базисной мощности целесообразно принять простое круглое число (1000 МВА, 100 МВА и т.п.), а иногда часто повторяющуюся в заданной схеме номинальную мощность.

Расчет ведется в относительных единицах. Используется точное приведение. Принимается $S_6 = 100$ МВА; $U_{61} = 10,5$ кВ; $U_{62} = 118$ кВ:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{61}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА.} \quad (2.10)$$

Далее для приведённой схемы замещения (рис 5, б) рассчитываются индуктивные сопротивления всех элементов схемы:

$$x_{*C} = x_C \frac{S_6}{U_{62}^2} = 7 \cdot \frac{100}{118^2} = 0,05, \quad (2.11)$$

$$x_{*T1} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{61}} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{30} \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,35, \quad (2.12)$$

$$x_{*T2} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{61}} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{90} \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,117. \quad (2.13)$$

$$x_{*\Gamma} = x_d'' = 0,22.$$

Если генератор включается в сеть мощной электрической системы, то сопротивление этой сети по сравнению с сопротивлением самого генератора можно принять равным нулю, и поэтому ударный ток при включении может в два раза превысить ток при трёхфазном коротком замыкании. Ударные электромагнитные моменты и силы при этом возрастают в четыре раза.

Так как ударные коэффициенты при различных включениях заданных элементов различаются сравнительно мало, то проверку условий

несинхронного включения можно вести путем сопоставления соответствующих величин сверхпереходного тока.

$$I'' = \frac{E''}{x''_{\Sigma}} = \frac{U_0}{x''_{\Sigma}}, \quad (2.14)$$

где U_0 – предшествующее напряжение в месте КЗ;
 x_{Σ} – результирующая реактивность относительно точки КЗ.

Наибольший сверхпереходный ток генератора имеет место при трехфазном коротком замыкании на его выводах, когда генератор предварительно работал с номинальной нагрузкой. При этом его относительная сверхпереходная ЭДС:

$$E'' \approx U_0 + x'' \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 1 + 0,22 \cdot 1 \cdot 0,53 = 1,12. \quad (2.15)$$

В практических расчетах E'' часто определяется приближенно, где U_0 , I_0 , $\sin \varphi_0$ – значения предшествовавшего режима; $\sin \varphi_0 = 0,53$.

Величина сверхпереходного тока для генератора:

$$I''_{\text{доп.Г}} = \frac{E''}{x''_d} = \frac{1,12}{0,22} = 5,1. \quad (2.16)$$

Для трансформатора допустимые значения сверхпереходного тока будут:

Для Т-1

$$I''_{T1} = \frac{U_0}{x_{T2}} = \frac{1}{0,35} = 2,86, \quad (2.17)$$

$$I''_{T2} = \frac{U_0}{x_{T2}} = \frac{1}{0,117} = 8,55. \quad (2.18)$$

Несинхронное включение генератора Г предполагается при его работе на холостом ходу с номинальным напряжением. Поэтому в схеме замещения на рис 2.2, б ЭДС $E_2 = 1$.

Необходимо найти наибольший сверхпереходной ток генератора Г при его несинхронном включении на выключателе В-3, т.е. когда включены оба трансформатора. В этом случае суммарная реактивность цепи будет:

$$x_{\Sigma} = x_c + \left(\frac{x_{T1} \cdot x_{T1}}{x_{T1} + x_{T2}} \right) + x_{\Gamma} = 0,05 + \left(\frac{0,35 \cdot 0,117}{0,35 + 0,117} \right) + 0,22 = 0,358. \quad (2.19)$$

Сверхпереходной ток несинхронного включения генератора

$$I''_{нс.г.} = \frac{E_2 + E_1}{x_{\Sigma}} = \frac{1 + 0,975}{0,358} = 5,5, \quad (2.20)$$

что для генератора недопустимо, так как превышает 5,1.

При несинхронном включении, когда трансформатор Т-2 отключен (отключен выключатель В-2), суммарная реактивность цепи:

$$x_{\Sigma} = x_c + x_{T1} + x_{\Gamma} = 0,05 + 0,35 + 0,22 = 0,62 \quad (2.21)$$

и наибольший сверхпереходной ток несинхронного включения:

$$I''_{нс} = \frac{E_2 + E_1}{x_{\Sigma}} = \frac{1 + 0,975}{0,62} = 3,18, \quad (2.22)$$

что допустимо для генератора, но уже недопустимо для трансформатора Т-1, так как этот ток больше 2,86.

Наконец, если произвести несинхронное включение при отключенном трансформаторе Т-1, то

$$x_{\Sigma} = x_c + x_{T2} + x_d = 0,05 + 0,117 + 0,22 = 0,387 \quad (2.23)$$

и наибольший сверхпереходной ток несинхронного включения

$$I''_{нс} = \frac{E_2 + E_1}{x_{\Sigma}} = \frac{1 + 0,975}{0,387} = 5,1, \quad (2.24)$$

что является уже допустимым как для генератора Г, так и для трансформатора Т-2.

Таким образом, несинхронное включение генератора возможно лишь при условии, что трансформатор Т-1 будет отключен.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ СЕТИ И ГЕНЕРАТОРА

Задача № 3

Дано: Две системы С-1 и С-2 (рис. 2.3, а) связаны между собой линиями Л-1 (150 км, АС-400) и Л-2 (50 км, АС-300) и автотрансформатором АТ $S_H = 180$ МВА, 220/121/11 кВ, $u_{ВН} = 26\%$, $u_{ВС} = 8\%$, $u_{СН} = 18\%$. Каждую из этих систем практически можно рассматривать как источник бесконечной мощности с неизменными напряжениями 230 и 115 кВ, считая, что по фазе они совпадают. К третьей обмотке автотрансформатора АТ может быть приключен генератор Г $S_H = 75$ МВА, $U_H = 10,5$ кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $x_d'' = 0,21$, $T_a = 0,22$ сек.

Определите угол δ между напряжениями сети и генератора, при котором максимальное мгновенное значение тока генератора при его несинхронном включении в сеть не превзойдет его ударный ток при трехфазном коротком замыкании на его выводах. При этом следует считать, что до несинхронного включения генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением, а до короткого замыкания – с номинальной нагрузкой.

Решение:

Проведем расчет в относительных единицах при $S_6 = 180$ МВА, $U_{61} = 220$ кВ, и тогда $U_{62} = 121$ кВ и $U_{63} = 11$ кВ.

$$U_{62} = \frac{U_{61}}{K_{AT}} = 220 \div \frac{220}{121} = 121 \text{ кВ}, \quad (2.25)$$

$$I_{63} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{63}} = \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 11} = 9,46 \text{ кА}. \quad (2.26)$$

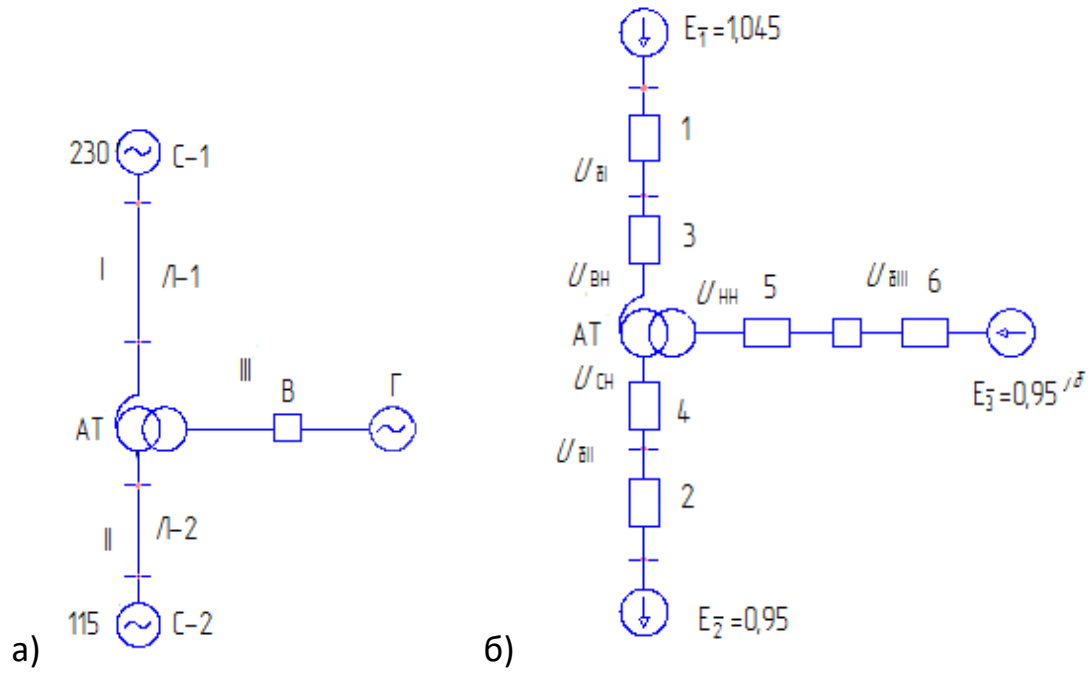


Рис. 2.3 - а) Принципиальная схема электрических связей генератора и систем б) Схема замещения электрических связей генератора и систем

На рис. 2.3, б приведена схема замещения, на которой указаны относительные величины ЭДС источников и порядковые номера ее элементов. Значения сопротивлений этих элементов (после приведения к базисным условиям) составят:

$$x_{л1*} = x_{уд} \cdot l_1 \cdot \frac{S_6}{U_{ср}^2} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{180}{220^2} = 0,222, \quad (2.27)$$

для ВЛ 6-220 кВ $x_{уд} = 0,4$.

Из справочника [6] находим: для АС-400/64 $r_0 = 0,0735$; АС-300/48 $r_0 = 0,0985$

$$r_{л1*} = r_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_6}{U_{ср}^2} = 0,0735 \cdot 150 \cdot \frac{180}{220^2} = 0,0408, \quad (2.28)$$

$$x_{л2*} = x_{уд} \cdot l_2 \cdot \frac{S_6}{U_{ср}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{180}{121^2} = 0,246, \quad (2.29)$$

$$r_{л2*} = r_0 \cdot l_2 \cdot \frac{S_6}{U_{ср}^2} = 0,0985 \cdot 50 \cdot \frac{180}{121^2} = 0,059, \quad (2.30)$$

$$x_B = 0,005(u_{ВН} + u_{ВС} - u_{СН}) = 0,005(26 + 8 - 18) = 0,08, \quad (2.31)$$

$$x_C = 0,005(u_{ВС} + u_{СН} - u_{ВН}) = 0,005(8 + 18 - 26) = 0, \quad (2.32)$$

$$x_H = 0,005(u_{ВН} + u_{СН} - u_{ВС}) = 0,005(26 + 18 - 8) = 0,18, \quad (2.33)$$

$$x_{3*} = x_B \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,08 \cdot \frac{180}{180} = 0,08, \quad (2.34)$$

$$r_{3*} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{HH}^2}{S_H^2} = \frac{430 \cdot 10^{-3} \cdot 13,8^2}{180^2} = 0,0025, \quad (2.35)$$

где U_{HH} – номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения;
 ΔP_{K3} потери КЗ.

$$x_4 = 0, \quad r_4 = 0, \quad (2.36)$$

$$x_{5*} = x_H \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,18 \cdot \frac{180}{180} = 0,18, \quad (2.37)$$

$$r_{5*} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{HH}^2}{S_H^2} = \frac{430 \cdot 10^{-3} \cdot 10,5^2}{180^2} = 0,0015, \quad (2.38)$$

$$x_{6*} = x''_d \cdot \frac{S_6}{S_{HГ}} = 0,21 \cdot \frac{180}{75} = 0,504, \quad (2.39)$$

$$r_{6*} = \frac{x_6}{\omega \cdot T_a} = \frac{0,504}{314 \cdot 0,22} = 0,0073. \quad (2.40)$$

Свернем схему до выключателя:

$$x_7 = x_1 + x_3 = 0,222 + 0,08 = 0,302, \quad (2.41)$$

$$x_8 = x_2 + x_4 = 0,246, \quad (2.42)$$

$$E'_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 \cdot x_8 + E_2 \cdot x_7}{x_7 + x_8} = \frac{1,045 \cdot 0,246 + 0,95 \cdot 0,302}{0,246 + 0,302} = 0,99. \quad (2.43)$$

Найдем эквивалентные сопротивления и ЭДС обеих систем до выключателя В.

$$x_9 = (x_7 // x_8) + x_5 = \frac{0,302 \cdot 0,246}{0,302 + 0,246} + 0,18 = 0,315, \quad (2.44)$$

$$r_9 = \frac{(r_1 + r_3)(r_2 + r_4)}{r_1 + r_3 + r_2 + r_4} + r_5 = \frac{(0,0408 + 0,0025) \cdot (0,059 + 0)}{0,0408 + 0,0025 + 0,059} + 0,0015 = 0,0264. \quad (2.45)$$

При несинхронном включении генератора результирующие сопротивления будут:

$$r_{\Sigma} = r_9 + r_6 = 0,0264 + 0,0073 = 0,0337. \quad (2.46)$$

Эквивалентная постоянная времени затухания:

$$T_a = \frac{x_\Sigma}{w \cdot r_\Sigma} = \frac{0,819}{314 \cdot 0,0337} = 0,077 \text{ с.} \quad (2.47)$$

Значение ударного коэффициента:

$$k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a} = 1 + e^{-0,01/0,077} = 1 + e^{-0,13} = 1,88. \quad (2.38)$$

Максимально возможное мгновенное значение тока при несинхронном включении генератора составит:

$$i_{\max} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I'' \cdot I_{63} = \sqrt{2} \cdot 1,88 \cdot 2,37 \cdot 9,46 = 59,61 \text{ кА}, \quad (2.39)$$

$$I'' = \frac{E_\Sigma}{x_\Sigma} = \frac{E_{эКВ} + E_3}{x_\Sigma} = \frac{0,99 + 0,95}{0,819} = 2,37 \text{ кА}. \quad (2.40)$$

Ударный ток при трехфазном КЗ на выводах генератора составляет:

$$i_{уд \Gamma} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I'' \cdot I_{6\Gamma} = \sqrt{2} \cdot 1,96 \cdot 5,29 \cdot 4,129 = 60,5 \text{ кА}, \quad (2.41)$$

$$I'' = \frac{E''}{x_d''} = \frac{1,11}{0,21} = 5,29 \text{ кА}, \quad (2.42)$$

$$E'' \approx U_0 + I_0 x'' \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,21 \cdot 0,53 = 1,11, \quad (2.43)$$

$$k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a} = 1 + e^{-0,01/0,045} = 1 + e^{-0,22} = 1,96, \quad (2.44)$$

$$I_{6\Gamma} = \frac{S_\Gamma}{\sqrt{3} \cdot U_{ном \Gamma}} = \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,129 \text{ кА}. \quad (2.45)$$

По заданному условию должно быть соблюдено неравенство:

$$i_{\max} \leq i_{уд}, \quad (2.46)$$

$$\sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I'' \cdot I_{63} \leq i_{уд}, \quad (2.47)$$

$$\sqrt{2} \cdot 1,88 \cdot \frac{(0,99 + 0,95e^{j\delta})}{0,819} \cdot 9,46 \leq 60,5, \quad (2.48)$$

откуда искомое значение угла

$$\delta \leq 116^\circ. \quad (2.49)$$

Контрольные вопросы

1. В чём заключается метод точной синхронизации при подключении генератора к электрической системе?
2. В чём особенность метода самосинхронизации?
3. Что такое сверхпереходной ток?

4. При каком условии подключение генератора к электрической системе наиболее опасно?
5. Какие режимы называют нормальными режимами работы генератора?
6. Какие режимы работы синхронных генераторов относят к аномальным?
7. На какие этапы можно разделить пусковые режимы синхронных генераторов?
8. При каких условиях может возникнуть двигательный режим работы синхронного генератора?
9. Дайте определение несинхронному включению синхронного генератора.

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В номинальном рабочем режиме к первичной обмотке трансформатора приложено номинальное напряжение, определяющее появление потока намагничивания, и по обеим обмоткам протекает номинальный ток, формирующий рабочий магнитный поток, замыкающийся в межобмоточном пространстве. Следовательно, в номинальном рабочем режиме сосуществуют два магнитных потока: поток намагничивания в магнитопроводе, охватывающий все витки обеих обмоток, и рабочий магнитный поток, аналогичный потоку в опыте К.З., охватывающему лишь одну обмотку (и то не полностью), связанную с источником электроэнергии (от которой энергия передается другой обмотке, связанной с нагрузкой).

Необходимо подчеркнуть, что соответствие магнитных потоков в опыте короткого замыкания и при номинальном токе нагрузки соблюдается только по величине магнитного потока и по пути его замыкания. В опыте короткого замыкания ток в первичной обмотке практически чисто индуктивный, т.е. отстает по фазе от напряжения на первичной обмотке почти на 90° , также как и поток намагничивания. Соответственно и рабочий магнитный поток практически совпадает по фазе (расхождение в пределах 10°) с потоком намагничивания. В нагрузочном режиме ток через трансформатор никогда не бывает чисто-индуктивным, а может быть активно-индуктивным или активно-емкостным или даже чисто-емкостным в режиме холостого хода линии. Поэтому рабочий магнитный поток никогда не совпадает по фазе с потоком намагничивания, а всегда опережает поток намагничивания. При чисто активном токе нагрузки это опережение составляет около 90° , а при чисто емкостной нагрузки – около 180° .

В зависимости от условий работы трансформатора (повышающий или понижающий) рабочий магнитный поток накладывается на поток намагничивания в стержнях магнитопровода или в ярмах, что требует специального анализа.

Эквивалентная схема трансформатора в рабочем режиме совмещает две эквивалентных схемы: холостого хода и опыта КЗ.

Расчёт токораспределения при параллельной работе трёхобмоточных трансформаторов на двух обмотках при функционировании третьей на выделенную нагрузку

Задачи № 4 и № 5 относятся к третьему разделу лекционного курса «Режимы работы трансформаторов».

Задача № 4

Дано: Суммарная нагрузка работающих параллельно обмоток среднего напряжения $S_2 = 8 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Нагрузка работающих отдельно обмоток низшего напряжения трансформаторов 1 и 2 соответственно $S_3^{(3)} = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Характеристики первого трансформатора:

Мощность $S^{(1)} = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Соотношение мощностей обмоток 100/100/100 %

Напряжение КЗ: $U_{12}^{(1)} = 10,5 \%$, $U_{13}^{(1)} = 17 \%$, $U_{23}^{(1)} = 6 \%$.

Характеристики второго трансформатора:

Мощность $S^{(2)} = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Соотношение мощностей обмоток: 100/67/67 %

Напряжение К.З.: $U_{12}^{(2)} = 10,5 \%$, $U_{12}^{(2)} = 6 \%$, $U_{12}^{(2)} = 17 \%$.

Напряжения обмоток трансформатора одинаковы.

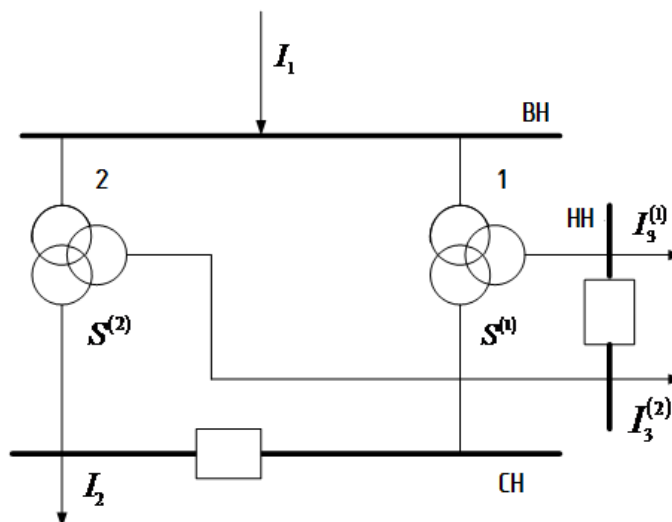


Рис. 3.1 Принципиальная схема электрических связей трансформаторов

Определите нагрузки на стороне среднего и высшего напряжения каждого из трансформаторов и сравнить их с номинальными мощностями обмоток трансформатора.

Активные сопротивления и потери не учитываются.

Решение:

Заданный условиями задачи режим чаще всего встречается на подстанциях при раздельной работе трёхобмоточных трансформаторов на стороне низшего напряжения (в связи с необходимостью ограничения токов КЗ). На стороне среднего напряжения (где не требуется ограничение токов) обмотки трансформаторов работают параллельно в целях повышения надёжности и выравнивания их загрузки.

В схеме замещения каждый трансформатор представляется в виде упрощенной трёхлучевой звезды, в которой вместо относительных величин сопротивления представлены равные им численные значения относительных величин напряжения КЗ (рис. 3.1).

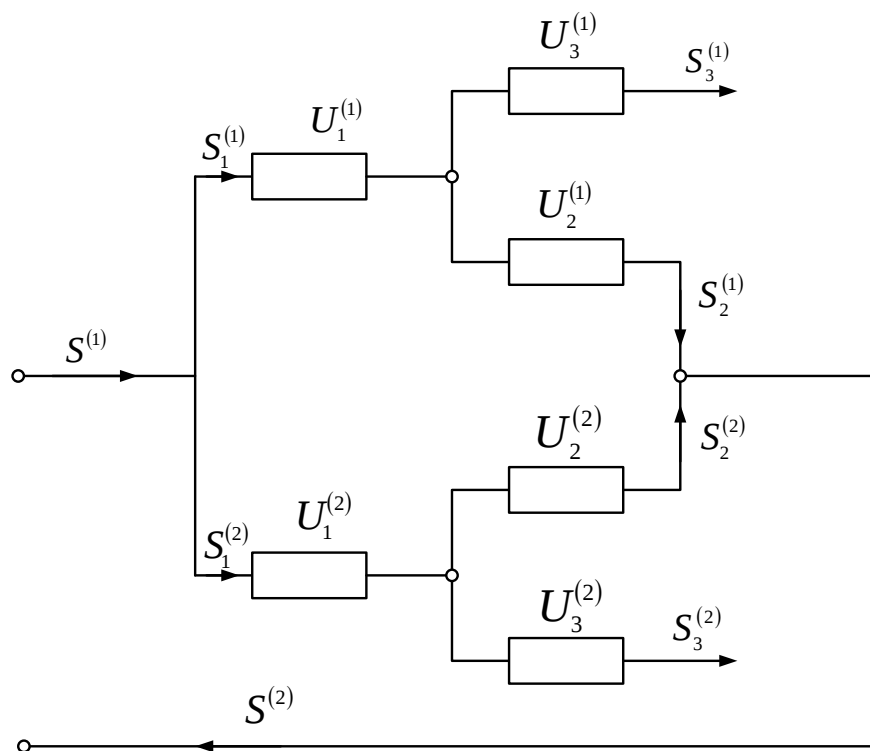


Рис. 3.2 Схема замещения

В качестве базисной мощности принимается мощность обмоток среднего и низшего напряжений второго трансформатора

$$S_{\delta} = S_{\text{СН}}^{(2)} = S_{\text{НН}}^{(2)} = S^{(2)} \cdot 0,67 = 20 \cdot 0,67 = 13,4 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \quad (3.1)$$

Далее определяются приведённые значения напряжений КЗ

$$U_{\text{прив}} = U \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}, \quad (3.2)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность соответствующего трансформатора.

$$U_{12\text{прив}}^{(1)} = U_{12}^{(1)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S^{(1)}} = 10,5 \cdot \frac{13,4}{20} = 9,1 \%, \quad (3.3)$$

$$U_{13\text{прив}}^{(1)} = U_{13}^{(1)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S^{(1)}} = 17 \cdot \frac{13,4}{20} = 11,6 \%, \quad (3.4)$$

$$U_{23\text{прив}}^{(1)} = U_{23}^{(1)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S^{(1)}} = 6 \cdot \frac{13,4}{20} = 4 \%, \quad (3.5)$$

$$U_{12\text{прив}}^{(2)} = U_{12}^{(2)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S^{(2)}} = 10,5 \cdot \frac{13,4}{20} = 9,1 \%, \quad (3.6)$$

$$U_{13\text{прив}}^{(2)} = U_{13}^{(2)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S^{(2)}} = 6 \cdot \frac{13,4}{20} = 4 \%, \quad (3.7)$$

$$U_{23\text{прив}}^{(2)} = U_{23}^{(2)} \cdot \frac{S_6}{S^{(2)}} = 17 \cdot \frac{13,4}{20} = 11,6 \%. \quad (3.8)$$

Далее индексы «прив» опускаются.

Напряжения КЗ отдельных лучей схемы замещения трансформатора определяются по их заданным величинам КЗ между обмотками:

$$U_1 = 0,5 \cdot (U_{12} + U_{13} - U_{23}), \quad (3.9)$$

$$U_2 = 0,5 \cdot (U_{12} + U_{23} - U_{13}), \quad (3.10)$$

$$U_3 = 0,5 \cdot (U_{13} + U_{23} - U_{12}), \quad (3.11)$$

откуда:

$$U_1^{(1)} = 0,5 \cdot (U_{12}^{(1)} + U_{13}^{(1)} - U_{23}^{(1)}) = 0,5 \cdot (9,1 + 11,6 - 4) = 8,4 \%, \quad (3.12)$$

$$U_2^{(1)} = 0,5 \cdot (U_{12}^{(1)} + U_{23}^{(1)} - U_{13}^{(1)}) = 0,5 \cdot (9,1 + 4 - 11,6) = 0,8 \%, \quad (3.13)$$

$$U_3^{(1)} = 0,5 \cdot (U_{13}^{(1)} + U_{23}^{(1)} - U_{12}^{(1)}) = 0,5 \cdot (11,6 + 4 - 9,1) = 3,3 \%, \quad (3.14)$$

$$U_1^{(2)} = 0,5 \cdot (U_{12}^{(2)} + U_{13}^{(2)} - U_{23}^{(2)}) = 0,5 \cdot (9,1 + 4 - 11,6) = 0,8 \%, \quad (3.15)$$

$$U_2^{(2)} = 0,5 \cdot (U_{12}^{(2)} + U_{23}^{(2)} - U_{13}^{(2)}) = 0,5 \cdot (9,1 + 11,6 - 4) = 8,4 \%, \quad (3.16)$$

$$U_3^{(2)} = 0,5 \cdot (U_{13}^{(2)} + U_{23}^{(2)} - U_{12}^{(2)}) = 0,5 \cdot (4 + 11,6 - 9,1) = 3,3 \%. \quad (3.17)$$

Используя законы Кирхгоффа, получим следующую систему уравнений:

$$S_2 = S_2^{(1)} + S_2^{(2)}, \quad (3.18)$$

$$S_1 = S_1^{(1)} + S_1^{(2)}, \quad (3.19)$$

$$S_1^{(1)} = S_2^{(1)} + S_3^{(1)}, \quad (3.20)$$

$$S_1^{(2)} = S_2^{(2)} + S_3^{(2)}, \quad (3.21)$$

$$S_1^{(1)} \cdot U_1^{(1)} + S_2^{(1)} \cdot U_2^{(1)} = S_1^{(2)} \cdot U_1^{(2)} + S_2^{(2)} \cdot U_2^{(2)}. \quad (3.22)$$

Из этой системы уравнений найдем следующие формулы для искомых значений нагрузки, работающих параллельно обмоткам среднего напряжения трансформаторов:

$$\left. \begin{aligned} S_2^{(1)} &= \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(1)} + S_3^{(1)} \cdot U_1^{(2)} - S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}} \\ S_2^{(2)} &= \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(1)} + S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)} - S_3^{(2)} \cdot U_1^{(2)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}} \end{aligned} \right\}, \quad (3.23)$$

определяем нагрузки обмоток среднего напряжения по 3.23:

$$\left. \begin{aligned} S_2^{(1)} &= \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(1)} + S_3^{(1)} \cdot U_1^{(2)} - S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}} = \frac{8 \cdot 9,1 + 8 \cdot 0,8 - 5 \cdot 8,4}{9,1 + 9,1} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{А} \\ S_2^{(2)} &= \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(1)} + S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)} - S_3^{(2)} \cdot U_1^{(2)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}} = \frac{8 \cdot 9,1 + 5 \cdot 8,4 - 8 \cdot 0,8}{9,1 + 9,1} = 6 \text{ МВ} \cdot \text{А} \end{aligned} \right\}$$

Нагрузка обмоток высшего напряжения составляет в соответствии с 3.20 и 3.21:

$$\begin{aligned} S_1^{(1)} &= S_2^{(1)} + S_3^{(1)} = 2 + 5 = 7 \text{ МВ} \cdot \text{А}, \\ S_1^{(2)} &= S_2^{(2)} + S_3^{(2)} = 6 + 8 = 14 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Относительная загрузка обмоток трансформаторов (в долях номинальной мощности соответствующей обмотки) составляет для первого трансформатора:

$$\frac{S_1^{(1)}}{S^{(1)}} = \frac{7}{20} = 0,35, \quad \frac{S_2^{(1)}}{S^{(1)}} = \frac{2}{20} = 0,1, \quad \frac{S_3^{(1)}}{S^{(1)}} = \frac{5}{20} = 0,25,$$

для второго трансформатора

$$\frac{S_1^{(2)}}{S^{(2)}} = \frac{14}{20} = 0,7, \quad \frac{S_1^{(2)}}{S_{\text{CH}}^{(2)}} = \frac{6}{13,4} = 0,45, \quad \frac{S_1^{(2)}}{S_{\text{HH}}^{(2)}} = \frac{8}{13,4} = 0,6.$$

Таким образом, ни одна из обмоток трансформатора не загружается выше номинала.

Определение допустимой величины и длительности систематической перегрузки трансформатора

Задача № 5

Дано: Трансформатор с системой охлаждения Д установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{\text{охл}}, ^\circ\text{C}$.

Нагрузка трансформатора зимой в течение промежутка времени t_1 (ч) составляет 140 %, затем в течение t_2 (ч) держится на уровне 110 %, в течение t_3 (ч) – на уровне 60 %, а остальное время – на уровне 40 % от номинальной.

Определите допустимую по графикам нагрузочной способности (ГОСТ 14209-85) продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравните её с заданной продолжительностью максимума.

Решение:

При использовании графиков нагрузочной способности необходимо предварительно фактический многоступенчатый график нагрузки, заданный условием задачи, преобразовать в эквивалентный по тепловому режиму трансформатора двухступенчатый график, характеризуемый двумя коэффициентами: начальной K_1 и максимальной нагрузки K_2 .

Коэффициентом начальной нагрузки называется отношение эквивалентной начальной нагрузки $I_{\text{Э.Н.}}$ к номинальной $I_{\text{ном}}$.

$$K_1 = \frac{I_{\text{Э.Н.}}}{I_{\text{ном}}} . \quad (3.24)$$

Соответственно, коэффициент максимальной нагрузки – это отношение эквивалентной максимальной нагрузки $I_{\text{Э.М.}}$ к номинальной $I_{\text{ном}}$.

$$K_2 = \frac{I_{\text{Э.М.}}}{I_{\text{ном}}} . \quad (3.25)$$

Эквивалентные нагрузки $I_{\text{Э.Н.}}$ и $I_{\text{Э.М.}}$ определяются из выражения:

$$I_{\text{Э.Н.}} = I_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{\sum_i K_i^2 \cdot t_i}{\sum_i t_i}}, \quad (3.26)$$

где K_i – нагрузка на i -м интервале времени, выраженная в долях номинальной нагрузки трансформатора $I_{\text{НОМ}}$; t_i – длительность i -го интервала.

Используя формулу (3.26) найдем $I_{\text{Э.Н.}}$ и $I_{\text{Э.М.}}$:

$$I_{\text{Э.М.}} = I_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{1,4^2 \cdot 3 + 1,1^2 \cdot 3}{3 + 3}} = I_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{1,96 \cdot 3 + 1,21 \cdot 3}{6}} = 1,26 \cdot I_{\text{НОМ}},$$

$$I_{\text{Э.Н.}} = I_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{0,6^2 \cdot 8 + 0,4^2 \cdot (24 - 3 - 3 - 8)}{24 - 3 - 3 - 8}} = 0,48 \cdot I_{\text{НОМ}}.$$

Полученная величина $I_{\text{Э.М.}}$ должна быть проверена по критерию:

$$I_{\text{Э.М.}} \geq 0,9 \cdot I_{\text{М}} \quad (3.27)$$

где $I_{\text{М}}$ – наибольшая нагрузка по заданному графику работы трансформатора.

Если соотношение (3.27) не соблюдается то в качестве $I_{\text{Э.М.}}$ принимается $I_{\text{Э.М.}} = 0,9 \cdot I_{\text{М}}$.

В нашем случае соотношение (3.27) соблюдается.

Определяем в соответствии с (3.24) и (3.25) K_1 и K_2 :

$$K_1 = \frac{I_{\text{Э.Н.}}}{I_{\text{НОМ}}} = 0,48,$$

$$K_2 = \frac{I_{\text{Э.М.}}}{I_{\text{НОМ}}} = 1,26.$$

Фактическая продолжительность максимума составляет:

$$t_{\text{М}} = t_1 + t_2 = 3 + 3 = 6 \text{ ч.}$$

Воспользовавшись ГОСТ 14209–85, нетрудно установить, что допустимая величина t_M , соответствующая полученным выше значениям K_1 и K_2 составляет около 20 ч, т.е. более чем в три раза превышает фактическую продолжительность максимума. Следовательно, заданный условиями задачи режим допустим.

Контрольные вопросы

1. Что такое нагрузочная способность трансформатора?
2. Что такое допустимая нагрузка трансформатора?
3. Что называют перегрузкой трансформатора?
4. Что называется аварийной перегрузкой трансформатора?
5. Что такое коэффициенты начальной и максимальной нагрузок трансформатора?
6. Что характеризует напряжение КЗ трансформатора?
7. Что такое фактическая продолжительность максимума?
8. Какова предельно допустимая температура обмотки масляного трансформатора?
9. Какова регламентированная длительность аварийной перегрузки масляного трансформатора, если перегруз по току составляет 100 %?

4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Основные положения анализа режимов работы электродвигателей

Асинхронные электродвигатели (АД)

АД при своих достоинствах: относительная дешевизна, высокие энергетические показатели, простота обслуживания и др. являются наиболее распространенными среди всех электрических машин. В количественном отношении они составляют около 90% всего парка электрических машин в народном хозяйстве, а по установленной мощности – около 55 %.

Преобразование электроэнергии в АД происходит при несинхронном (асинхронном) вращении ротора и магнитного поля статора. Разность частоты вращения ротора n и поля статора n_c обычно составляет несколько процентов, поэтому при анализе и характеристике работы АД частоту вращения ротора оценивают в относительных единицах, вводя понятие скольжение (S). Оно оценивается либо в процентах ($S = 1,0 \text{ \%}; 2,5 \text{ \%}$ и т. д.), либо в долях единицы ($S = 0,01; 0,02$ и т. д.). n_c определяет частоту и амплитуду ЭДС, наводимую в проводниках обмотки ротора. В рабочих режимах АД
$$\frac{n_c - n}{n_c} \cdot 100\% = S \%$$

Асинхронные машины используются в основном как двигатели, т. е. они работают в диапазоне скольжения от $S = 1$ (начальный момент пуска – ротор неподвижный) до значений, близких к нулю (в режиме холостого хода $S_{xx} \rightarrow 0$).

Для оценки и сравнения пусковых свойств асинхронных двигателей (АД) моменты, развиваемые АД при пуске и разгоне, принято выражать не в абсолютных, а в относительных единицах, т. е. указывать кратность момента по отношению к номинальному $M^* = M/M_{\text{ном}}$.

Кривая $M^* = f(s)$ имеет несколько характерных точек, соответствующих пусковому M_{n^*} , минимальному M_{min^*} , максимальному M_{max^*} и номинальному моментам $M_{\text{ном}^*} = 1$ (рис. 4.1).

Пусковой момент характеризует начальный момент, развиваемый АД непосредственно после включения в сеть при неподвижном роторе ($S = 1$). В начале разгона АД его момент несколько уменьшается по сравнению с пусковым. Обычно M_{min^*} на 10–15 % меньше M_{n^*} . У большинства АД $M_{n^*} \geq 1$, АД могут быть пущены под нагрузкой только при условии, что момент сопротивления на валу будет меньше, чем M_{min^*} , иначе АД не разгонится и

будет работать с большим скольжением (участок кривой от $M_{\min}^*$ до M_n^*). Такой режим опасен для АД, так как сопровождается большими токами обмоток.

Максимальный момент характеризует наибольший момент АД – его перегрузочную способность. Часто $M_{\max}^*$ называют также **критическим моментом**, а скольжение, при котором момент достигает максимума, – **критическим скольжением** ($S_{\text{кр}}$). В АД общего назначения $S_{\text{кр}}$

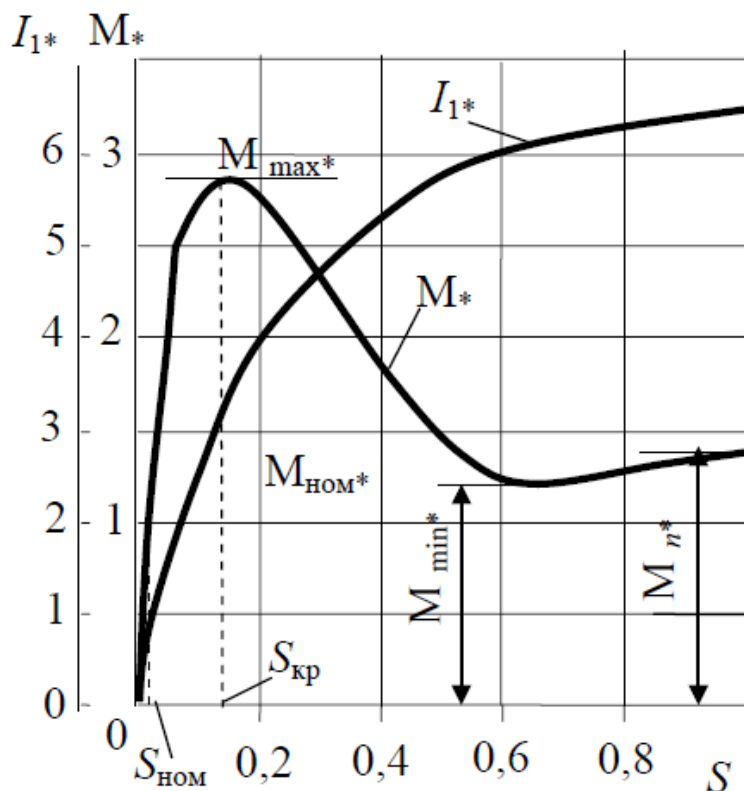


Рис. 4.1 Зависимость тока и момента асинхронного двигателя от скольжения

обычно не выходит за пределы 0,07–0,12. Если момент сопротивления при работе АД превышает $M_{\max}^*$, АД останавливается.

Номинальный момент $M_{\text{ном}}^*$ – это момент на валу АД, работающего при номинальном напряжении с номинальной нагрузкой при номинальном скольжении.

Режим, при котором обмотка статора подключена к сети, а ротор неподвижен (заторможен), называют **коротким замыканием** АД. При $s = 1$ ток АД в несколько раз превышает номинальный (рис. 4.1) поэтому в режиме короткого замыкания АД, не рассчитанный на работу при $s \approx 1$, может находиться лишь в течение нескольких секунд. Режим короткого замыкания возникает при каждом пуске АД из неподвижного состояния, в этих случаях

он кратковременен и обмотка не успевает нагреться выше допустимого уровня. Несколько пусков АД подряд через короткие промежутки времени могут повлечь за собой повышение температуры его обмоток выше допустимой, если АД не рассчитаны на такой режим работы.

Асинхронные машины, предназначенные для работы с большими скольжениями, с $s = 1$ (в трансформаторном режиме) или с $s > 1$ (в тормозном режиме), специально рассчитывают с учетом повышенных токов в обмотках.

Рабочие характеристики АД (рис. 4.2) показывают, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10–15 % меньше номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них, в силу стандартной дискретной шкалы мощностей, работают с некоторой недогрузкой.

При эксплуатации АД с нагрузкой, существенно номинальной, уменьшаются и их КПД, и коэффициент мощности.

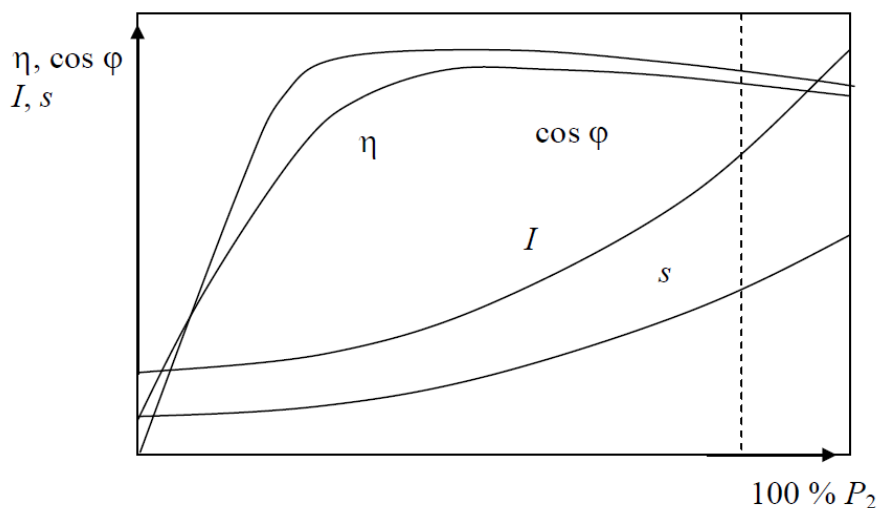


Рис. 4.2 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

По конструкции АД делят на два типа:

АД с фазным ротором и АД с короткозамкнутым ротором. Конструкции статоров, корпусов, подшипниковых щитов и общая компоновка машин обоих типов не имеют существенных различий.

АД с фазным ротором применяются в приводах с тяжелыми условиями пуска, требующими плавного пуска и разгона, и в приводах с регулированием частоты вращения, например в приводах подъемных кранов.

При рассмотрении возможных способов пуска асинхронных двигателей необходимо учитывать следующие основные положения:

- двигатель должен развивать при пуске достаточно большой пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления

на валу, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной скорости вращения;

- величина пускового тока должна быть ограничена таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети;

- схема пуска должна быть по возможности простой, а количество и стоимость пусковых устройств – малыми.

Практически используют следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск), понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске; подключение к обмотке ротора пускового реостата.

Особенности самозапуска двигателей в сравнении с обычным пуском

Самозапуском называется восстановление нормальной работы двигателей ответственных механизмов без участия персонала после кратковременного нарушения электроснабжения – исчезновения или глубокого снижения напряжения. При исчезновении или глубоком снижении напряжения выключатели самозапускаемых ЭД остаются включенными, а двигатели неответственных механизмов до восстановления напряжения отключаются с помощью реле напряжения.

Отличительные особенности самозапуска:

- в момент восстановления электроснабжения и начала самозапуска часть или все ЭД вращаются с некоторой скоростью;
- самозапуск ЭД происходит, как правило, под нагрузкой.

Самозапуск может быть одновременным для всех ЭД ответственных механизмов или двухступенчатым, если по условиям сети или по другим причинам одновременный самозапуск недопустим.

При двухступенчатом пуске менее ответственные ЭД сначала отключаются, а после разгона первой группы ЭД автоматически включаются оставшиеся. Успешность самозапуска зависит от того, насколько правильно выбран способ пуска ЭД, для которых должен быть обеспечен самозапуск.

Если пуск электродвигателей производится из состояния покоя поочередно, часто при незагруженном механизме, то самозапуск происходит одновременно для группы ЭД большой мощности и при загруженных механизмах.

Выбег электродвигателей

При снижении напряжения сети ($U_{\text{сети}}$) или полном прекращении питания самозапускаемые двигатели начинают выбег до промежуточного положения, зависящего от длительности нарушения питания и от характеристики механизма. После восстановления электроснабжения начинается разгон ЭД до нормальной частоты вращения при повышенных токах в сети, вызывающих значительное снижение U

Вопросы самозапуска должны рассматриваться комплексно с учетом как характеристик ЭД и приводного механизма, так и характеристик электросети предприятия и энергосистемы.

Выбег самозапускаемого ЭД может быть *свободным*, когда другие самозапускаемые ЭД не оказывают большого влияния на самозапуск этого ЭД, и *групповым*, когда значительно взаимное влияние само- запусковых ЭД.

При свободном выбеге напряжение на шинах отсутствует и выбег самозапускаемых ЭД происходит по индивидуальным характеристикам. При групповом выбеге и наличии остаточного напряжения ЭД связаны общими шинами. При этом ЭД с большим запасом кинетической энергии переходят в генераторный режим работы и в них создается дополнительный тормозной момент по сравнению со свободным выбегом.

На рис. 4.3 показано изменение генерируемого напряжения в зависимости от длительности перерыва питания для АД (кривая 1), синхронных ЭД (кривая 2) и синхронных ЭД с форсировкой возбуждения (кривая 3). Из рис. 3.3 видно, что АД, особенно при форсировке возбуждения, значительно увеличивают генерируемое напряжение. При этом пусковой и избыточный моменты самозапускаемых ЭД значительно снижаются, увеличивается длительность разгона и повышается температура обмоток ЭД.

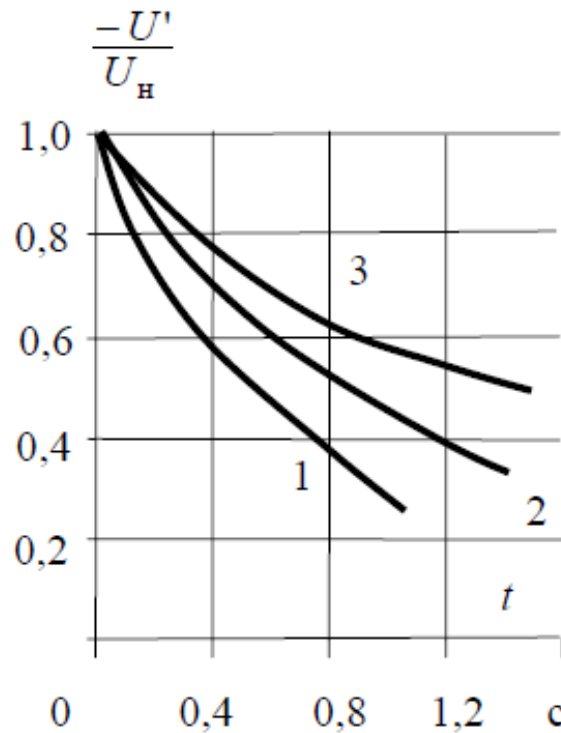


Рис. 4.3. Зависимость напряжения, генерируемого ЭД после их отключения, от времени:

1 – для АД; 2 – СД; 3 – синхронный ЭД с форсировкой возбуждения

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные параметры асинхронного двигателя?
2. Как изменяется момент АД при увеличении скольжения ?
3. Что такое режим КЗ АД?
4. Каковы особенности самозапуска электродвигателей?
5. Что называют выбегом электродвигателей?

Расчёт пуска и времени перерыва электроснабжения электродвигателей промышленного узла нагрузки

Задача № 6

Дано:

Параметры узла нагрузки: $S_{T1} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А},$

$$Д_1, Д_6 \quad \left\{ \begin{array}{l} P = 2 \text{ МВт} \\ \eta_H = 0,96 \\ \cos \varphi_H = 0,9 \end{array} \right.$$

$$Д_2, Д_3, Д_5 \quad \left\{ \begin{array}{l} P = 5 \text{ МВт} \\ \eta_H = 0,96 \\ \cos \varphi_H = 0,9 \end{array} \right.$$

$$Д_4 \quad \left\{ \begin{array}{l} P = 4 \text{ МВт} \\ \eta_H = 0,9 \\ \cos \varphi_H = 0,97 \end{array} \right.$$

Асинхронные двигатели имеют $n_H = 2950 \text{ об/мин},$ синхронные двигатели $n_H = 3000 \text{ об/мин}.$

Нагрузка: $P_H = 2 \text{ МВт} \cos \varphi_H = 0,85.$

Выполните расчет пуска электродвигателя Д1, предполагая, что мощность КЗ на шинах высшего напряжения трансформатора равна $S_{КЗ} = 600 \text{ МВА}$ (рис. 4.4).

$$x_{T1} = x_{T2} = \frac{U_K}{100} \frac{S_6}{S_T} \left(\frac{U_T}{U_6} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \frac{100}{40} \left(\frac{6,3}{6} \right)^2 = 0,28, \quad (4.3)$$

Определим сопротивление двигателя при пуске:

$$x_1 = x_6 = \frac{1}{K_{\Pi}} \frac{S_6}{S_{\Sigma 1}} \left(\frac{U_{\Pi}}{U_6} \right)^2 = \frac{1}{6} \frac{100}{2,2} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 7,6, \quad (4.4)$$

где K_{Π} – кратность пускового тока в о.е.

$$S_{\Sigma 1} = \frac{P_{\Sigma 1}}{\eta_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma}} = \frac{2}{0,96 \cdot 0,9} = 2,2 \text{ МВ} \cdot \text{А}, \quad (4.5)$$

$$x_2 = x_3 = x_5 = \frac{1}{6} \cdot \frac{100}{5,8} \cdot \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 2,9, \quad (4.6)$$

$$x_4 = \frac{1}{6,5} \cdot \frac{100}{4,8} \cdot \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 3,3, \quad (4.7)$$

$$S_{\Sigma 2} = S_{\Sigma 3} = S_{\Sigma 5} = \frac{5}{0,9 \cdot 0,96} = 5,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}, \quad (4.8)$$

$$S_{\Sigma 4} = \frac{4}{0,9 \cdot 0,97} = 4,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \quad (4.9)$$

Сопротивления электродвигателя в номинальном режиме будет равно:

$$x_{1H} = \frac{S_6}{P_{\Sigma} \operatorname{tg} \varphi_{\Sigma}} \left(\frac{U_{\Sigma}}{U_6} \right)^2 = \frac{100 \cdot 0,96}{2 \cdot 0,49} \cdot \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 98, \quad (4.10)$$

$$x_{2H} = x_{3H} = \frac{100 \cdot 0,96}{5 \cdot 0,49} \cdot \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 39. \quad (4.11)$$

Сопротивления нагрузок равны:

$$x_{H1} = x_{H2} = \frac{S_6}{P_H \operatorname{tg} \varphi_H} \left(\frac{U_H}{U_6} \right)^2 = \frac{100}{2 \cdot 0,75} \cdot \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 33. \quad (4.12)$$

Для расчета пуска используем схему замещения рис. 4.5, предположив, что выключатель Q_6 отключен.

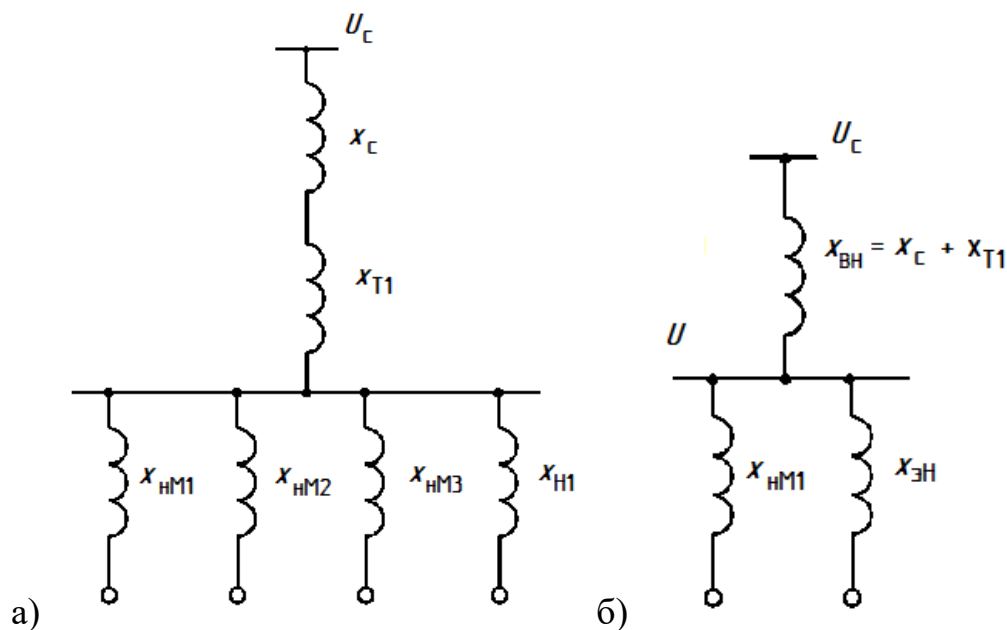


Рис. 4.5 Эквивалентные схемы к расчету прямого пуска асинхронного двигателя

Эквивалентное сопротивление нагрузки на шинах составит:

$$\frac{1}{x_{ЭН}} = \frac{1}{x_{H1}} + \frac{1}{x_{HD2}} + \frac{1}{x_{HD3}}, \quad (4.13)$$

отсюда $x_{ЭН} = 12,25$.

Общее сопротивление при пуске электродвигателя в номинальном режиме равно:

$$x_{\Sigma 1} = \frac{7,6 \cdot 12,25}{7,6 + 12,25} = 4,7. \quad (4.14)$$

Остаточное напряжение:

$$U_{*Д} = \frac{U_{*с} \cdot x_{Д}}{x_{Д} + x_{ВН}} = 1,05 \frac{4,7}{0,165 + 0,28 + 4,7} = 0,94. \quad (4.15)$$

Пусковой момент электродвигателя:

$$m_{*э} = b_{*} \cdot U_{*6}^2 = 0,7 \cdot 0,94^2 = 0,62. \quad (4.16)$$

Момент сопротивления в нашем случае $m_c = 0,1$. Так как условие трогания и разбега двигателя соблюдается, $m_{эп} > m_{сп} (0,606 > 0,1)$ то разбег двигателя будет успешным.

При этом постоянная времени пускаемого двигателя равна:

$$T_j = \frac{GD_{\Sigma}^2 n_0 n_H}{364 \cdot P_H} = \frac{1,8 \cdot 0,3 \cdot 3000 \cdot 2950}{364 \cdot 2 \cdot 10^3} = 6,7 \text{ с.} \quad (4.17)$$

Коэффициент 1,8 принят с целью учета пускового момента приводного механизма.

Задача № 7

Дано:

$$Д_5, Д_3, Д_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} P_H = 5 \text{ МВт}; GD^2 = 0,74 \text{ т/м}^2 \\ b_H = 2,5; n_H = 2950 \text{ об/мин} \end{array} \right.$$

$$Д_6 \quad \left\{ \begin{array}{l} P_H = 2 \text{ МВт}; GD^2 = 0,3 \text{ т/м}^2 \\ b_H = 2,5; n_H = 2950 \text{ об/мин} \end{array} \right.$$

Рассчитайте допустимое время перерыва электроснабжения для двигателей схемы рис. 4.4

Решение:

Предельно допустимое время перерыва электроснабжения для двигателей при $m_c = 1$ будет равно:

$$t_D = \frac{T_j}{m_c} (s_{кр} - s_H). \quad (4.18)$$

Для двигателей $Д_5, Д_3, Д_2$

$$T_j = \frac{GD_{\Sigma}^2 n_0 n_H}{364 \cdot P_H} = \frac{1,8 \cdot 0,74 \cdot 3000 \cdot 2950}{364 \cdot 5000} = 6,48 \text{ с,} \quad (4.19)$$

$$s_{кр} = s_H \left(b_H + \sqrt{b_H^2 - 1} \right) = 0,016 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,076, \quad (4.20)$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_H} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0,016, \quad (4.21)$$

Для двигателя D_6

$$T_j = \frac{GD_{\Sigma}^2 n_0 n_H}{364 \cdot P_H} = \frac{1,8 \cdot 0,3 \cdot 3000 \cdot 2950}{364 \cdot 2000} = 6,56 \text{ с}, \quad (4.22)$$

$$s_{\text{кр}} = s_H \left(b_H + \sqrt{b_H^2 - 1} \right) = 0,016 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,076, \quad (4.23)$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_H} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0,016, \quad (4.24)$$

$$t_{Д5} = \frac{T_j}{m_c} (s_{\text{кр}} - s_H) = \frac{6,48}{1} (0,076 - 0,016) = 0,388 \text{ с}, \quad (4.25)$$

$$t_{Д6} = \frac{T_j}{m_c} (s_{\text{кр}} - s_H) = \frac{6,56}{1} (0,076 - 0,016) = 0,393 \text{ с}. \quad (4.26)$$

Библиографический список.

1. Электрические машины: учебник для вузов / Вольдек А.И. М.: Энергия, 1974. 839 с..
2. Режимы работы трансформаторов: учеб. Пособие / Меркурьев Г.В – Санкт-Петербург: Издание центра подготовки кадров энергетики, 2004 г.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Энергия, 1977.
4. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.
5. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
6. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1978.
7. Электрические системы. Управление переходными режимами электроэнергетических систем / под ред. В.А. Веникова. М.: 1982.
8. Переходные процессы в электрических системах Часть 2: метод. указания / А.Н. Петрухин, И.П Чесноков, Н.Н. Якимчук – Киров: Вятский государственный технический университет, 1998.
9. Переходные процессы в электрических системах Часть 2: метод. указания. Практические занятия и контрольные работы / И.П Чесноков, А.Н. Петрухин – Киров: Вятский государственный технический университет, 1999.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Общие положения методики расчета режимов работы электрических систем.	4
1. Расчет предела передаваемой мощности и коэффициента запаса устойчивости электрической системы.....	5
2. Режимы работы синхронных генераторов и компенсаторов.....	14
• Проверка допустимости несинхронного включения генератора по возникающему току.....	21
3. Режимы работы трансформаторов.....	29
• Расчёт токораспределения при параллельной работе трёхобмоточных трансформаторов на двух обмотках при функционировании третьей на выделенную нагрузку.....	30
• Определение допустимой величины и длительности систематической перегрузки трансформатора.....	35
4. Режимы работы электродвигателей системы собственных нужд электрических станций и подстанций.....	38
• Основные положения анализа режимов работы электродвигателей	38
• Расчёт пуска и времени перерыва электроснабжения электродвигателей промышленного узла нагрузки.....	44
Библиографический список.....	50

Учебное издание

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
И ПОДСТАНЦИЙ**

Учебно-методическое пособие

**Составители: Кубарев Артём Юрьевич,
Ахметова Римма Валентиновна,
Михайлова Екатерина Владимировна,
Маргулис Сергей Михайлович.**

Кафедра электрических станций КГЭУ

Редактор М.С. Беркутова
Компьютерная верстка

Подписано в печать

Формат 60х84/16. Гарнитура Times. Вид печати РОМ. Бумага Business
Усл. печ.л. 1,39. Уч. изд.л.1,48. Тираж 30 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел КГЭУ, 420066, Казань,
Красносельская, 51