

В. К. ШАБАД

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Допущено

Учебно-методическим объединением

вузов России по образованию в области

энергетики и электротехники в качестве

учебного пособия для студентов высших учебных заведений,

обучающихся по специальностям «Электрические станции»

и «Электроснабжение» направления подготовки

«Электроэнергетика» и направлению подготовки

«Электроэнергетика и электротехника»

(модуль «Электроэнергетика»)



Москва

Издательский центр «Академия»

2013

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.27я73
Ш121

Рецензенты:

зав. кафедрой «Электроснабжение и электрические машины» МГАУ им.
В.П.Горячкина, д-р техн. наук, проф. *Т. Б. Лещинская*;
председатель УМК по специальности 140211 «Электроснабжение»,
канд. техн. наук, доц. *Г. В. Шведов*;
инженер СРЗА ПУ ЦЭС МРСК СК, канд. физ.-мат. наук *Е. Д. Борзов*

Шабад В. К.

Ш121 Электромеханические переходные процессы в электро-
энергетических системах : учеб. пособие для студ. учрежде-
ний высш. проф. образования / В. К. Шабад. — М. : Изда-
ТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АКАДЕМИЯ», 2013. — 192 с. — (Сер. Бакалавр-
риат).

ISBN 978-5-7695-9822-7

Учебное пособие создано в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», профили «Электроснабжение» и «Электрические станции» (квалификация «бакалавр»).

Рассмотрены физические процессы, происходящие в электроэнергетической системе при характерных для нее возмущениях режима. Изложены методы расчетов электромеханических переходных процессов и условий устойчивости режимов работы системы. Описан порядок выбора современных мероприятий по обеспечению и повышению устойчивости электрической системы и узлов нагрузки.

Приведены примеры решения задач, необходимые при изучении дисциплины «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах».

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.27я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым
способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-7695-9822-7 © Шабад В. К., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

Надежность работы электроэнергетических систем обеспечивается целым рядом мероприятий, разработка и организация которых невозможны без понимания сложных физических процессов, происходящих в системах в нормальных и аварийных режимах. Информация об этом рассредоточена по различным печатным изданиям и учебникам и трудна для восприятия студентами и неспециалистами в данной области.

Содержащиеся в них сведения не систематизированы для изложения в соответствии с государственным образовательным стандартом, в который дисциплина «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» входит как одна из профильных, базовых дисциплин для студентов электроэнергетических специальностей.

Надобность в книге, где доступно и системно изложены основы современной теории переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС), назрела давно: последнее издание учебника В. А. Веникова «Переходные электромеханические процессы в электрических системах» было в 1985 г. За прошедшее время произошли изменения в практике расчетов, разработаны новые мероприятия по улучшению устойчивости.

В данной книге рассмотрены электромеханические переходные процессы, происходящие в электрической системе и узлах нагрузки, после различных нормальных и аварийных возмущений (оперативные переключения, включение и отключение нагрузок, короткие замыкания, сбросы нагрузки и т. д.). Изложены методы расчетов для простейшей ЭЭС, приведены примеры практических расчетов, методики выбора мероприятий по обеспечению устойчивой работы узлов нагрузки и электрической системы.

Для самостоятельной работы в конце каждой главы даны контрольные вопросы. Сведения, изложенные в настоящем учебном пособии, являются фундаментом, который необходим в дальнейшем при освоении современных методов проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем.

Расчеты режимов и устойчивости электроэнергетических систем, оснащенных автоматическими устройствами, требуют знания элементов теории автоматического управления, некоторые положения которой приведены в приложении.

Основу книги составили конспекты лекций, которые на протяжении многих лет автор читает в Московском государственном открытом университете (МГОУ).

При изложении основ теории электромеханических переходных процессов автор опирался на работы П. С. Жданова и В. А. Венникова.

Автор выражает искреннюю благодарность доценту кафедры ЭЭС МЭИ, канд. техн. наук О. Н. Кузнецову за помощь, оказанную им при подготовке рукописи.

Общая характеристика электроэнергетической системы.

Электронергетическая система является сложным электротехническим комплексом, включающим в себя производство, распределение и использование электрической энергии. Она объединяет большое количество электростанций, потребителей внутрисистемных и межсистемных связей.

Объединение автономно работающих электростанций и нагрузок в электронергетическую систему потребовалось в связи с необходимостью надежного электроснабжения потребителей. Кроме того, параллельная работа различных типов электростанций (например, ТЭС и ГАЭС) позволила ввести экономичные режимы работы, как электростанций, так и системы в целом.

Первые электронергетические системы нашей страны были сформированы в первой половине XX в. (Московская, Ленинградская, Уральская и др.). По мере роста мощности местных энергосистем началась организация их параллельной работы в составе территориальных энергообъединений (были созданы объединенные энергосистемы — ОЭС).

Это позволило еще больше повысить надежность и экономичность работы энергосистем. Затем была сформирована единая энергосистема европейской части страны и, наконец, единая энергосистема страны (ЕЭС России). Современная ЕЭС России состоит из 7 ОЭС: Центра, Северо-Запада, Средней Волги, Юга, Урала, Сибири, Востока.

Анализ режимов работы таких систем, включающих в себя большое число составляющих ее элементов (работающие параллельно электрические машины, передающие и распределительные сети значительной протяженности, различные нелинейные и резкопеременные нагрузки) усложнился. Появилась необходимость расчета и анализа не только электромагнитных переходных процессов, характеризующих начальную стадию переходного процесса, но и развивающихся вслед за ними электромеханических процессов.

Под электромеханическими переходными процессами в электронергетических системах понимают процессы движения роторов генераторов и двигателей относительно друг друга под воздействием механических и электромагнитных моментов, действующих на их валах. При движении роторов машин одновременно происходят изме-

нения электрических величин, характеризующих режим электроэнергетической системы (токов, напряжений, мощностей и др.).

Знание хода электромеханических процессов важно для определения характера конечного режима электроэнергетической системы (устойчивый, неустойчивый), а также для нахождения электрических параметров при пуске, включении в сеть и остановке электрических машин. Одна из важнейших задач при изучении электромеханических переходных процессов — это задача обеспечения устойчивой работы электроэнергетической системы. Здесь под термином «устойчивая работа системы» имеется в виду способность системы сохранять постоянство установленного диспетчером режима в процессе своего функционирования.

Проблема устойчивости параллельной работы электрических машин (генераторов и двигателей) возникла давно. Еще в начале прошлого столетия столкнулись с тем, что пропускная способность линий электропередачи, служивших для передачи мощности от удаленных электростанций в энергосистему, ограничивалась условиями обеспечения устойчивости. Ряд случаев нарушения устойчивой работы электрической системы и узлов нагрузки, сделал проблему устойчивости весьма актуальной и потребовал спешного ее разрешения.

В электроэнергетической системе всегда имеют место изменения режима, вызванные различными причинами.

В связи с выполнением заданного графика нагрузки происходят синхронизация и включения в сеть генераторов электрических станций, включение и отключение электроприемников потребителей; включения и отключения трансформаторов; оперативные переключения на подстанциях.

Такие операции вызывают небольшие дискретные изменения режима (тока, мощности и т. д.). Эти изменения происходят в нормальных режимах работы системы и их называют «малыми» возмущениями режима.

Но в системе возможны и более сильные возмущения:

- короткие замыкания в элементах электрической системы и последующие отключения поврежденного электрооборудования;
- сбросы нагрузки из-за повреждений механического оборудования;
- кратковременные перерывы электроснабжения потребителей при коротких замыканиях в питающей сети с последующими отключением и работой автоматических устройств повторного включения и резервирования;
- групповой самозапуск двигателей после кратковременного перерыва питания и т. п.

Эти возмущения имеют случайный характер и в основном проявляются в аварийных режимах, и их называют «большими».

Изменения режима приводят к нарушению баланса моментов на валах генераторов и электродвигателей. Как следствие они вызыва-

ют изменения взаимных положений роторов синхронных машин и скольжений асинхронных двигателей, т. е. начинается переходный электромеханический процесс.

Перечисленные возмущения при определенных условиях могут вызвать нарушение синхронной работы генераторов электростанций и (или) «опрокидывание» (выпадение из синхронизма синхронных двигателей и торможение асинхронных) двигателей узлов нагрузки. Нарушения работы энергосистем, имеющие необратимый характер, называют *нарушениями устойчивости электрической системы*. В общем случае под устойчивостью системы понимают ее *способность возвращаться после возмущения в исходный режим или близкий к нему*.

Нарушение устойчивости параллельной работы электрических станций в электроэнергетической системе может привести к системной аварии: разделению объединенной системы на изолированно работающие части, нарушению электроснабжения большого числа потребителей, а в некоторых случаях к полному нарушению работы частей системы и нарушению электроснабжения целых промышленных районов. Поэтому обеспечение устойчивости электроэнергетических систем является одним из важнейших вопросов при проектировании и эксплуатации энергетических объектов, таких как электрические станции и крупные узлы нагрузки. Недостаточное внимание к этой проблеме приводит к развитию системных аварий с полным прекращением электроснабжения больших промышленных и жилых районов.

Нарушения устойчивости могут иметь и локальный характер. Так, при снижении напряжения в узлах нагрузки в послеаварийных режимах распределительной сети, при коротких замыканиях в сети электроснабжения отдельных предприятий возможно выпадение из синхронизма синхронной (синхронных двигателей) и торможение асинхронной (асинхронных двигателей) нагрузки. Хотя эти локальные нарушения устойчивости могут не приводить к выпадению из синхронизма генераторов энергосистемы, их возникновение опасно. Торможение двигателей и их остановка отрицательно сказываются на ходе технологического процесса предприятия, которое в результате терпит существенный материальный ущерб.

Очевидно, что бесперебойное электроснабжение потребителей в значительной мере зависит от способности электрической системы противостоять различного рода возмущениям, обычно возникающим при ее работе. Надежная работа энергосистемы определяется многими факторами и среди них один из важнейших это ее устойчивость к этим возмущениям.

При изучении устойчивости электрической системы проводится анализ реакции системы на «малые» и «большие» возмущения. Рассматривается, прежде всего, поведение электромеханических преобразователей энергии: генераторов и двигателей. Именно их свойства и режим работы определяют ход электромеханического процесса:

движение роторов электрических машин и связанные с ним изменения электрических величин.

Установившийся режим работы электрической системы должен быть устойчивым. Для этого нужно, чтобы были обеспечены необходимые запасы устойчивости режима в соответствии с нормативными документами¹. Требования по устойчивости должны быть выполнены и при проектировании электрических систем.

Анализ устойчивости электроэнергетической системы предусматривает большой объем сложных расчетов.

Результаты расчетов используют в следующих случаях:

- выбор основного оборудования электрических станций и линий электропередачи;
- выбор средств противоаварийной автоматики и их настройки;
- назначение режимов, безопасных с точки зрения нарушения устойчивости параллельной работы генераторов электрической системы и узлов нагрузки.

Таким образом, обеспечение устойчивости режимов работы системы является одним из необходимых условий надежного электроснабжения потребителей электрической энергией.

В настоящей книге значительное внимание уделено изучению физических процессов, происходящих при возникновении различных возмущений в электрической системе, приведены методы расчета и анализа мероприятий по повышению устойчивости. При этом достаточно подробно рассмотрены как вопросы устойчивости узлов нагрузки, так и общие вопросы устойчивости электрических систем. Рассмотрены также режимы пуска, остановки и самозапуска электродвигателей.

Приведены примеры расчетов по выбору необходимых мероприятий по повышению устойчивости электроэнергетической системы.

Следует отметить, что расчеты даны на примерах схем простейших электроэнергетических систем. Упрощенное представление электрических машин и их систем регулирования дает возможность выполнять расчеты вручную. В настоящее время в практике исследований, проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем широко используется вычислительная техника. Она позволяет выполнять необходимые расчеты устойчивости для сложных систем и при достаточно точном представлении элементов электроэнергетической системы (учитываются процессы в электрических машинах, в системах регулирования возбуждения, системах регулирования первичных механизмов, действие противоаварийной автоматики и т. д.). Однако умение вести расчеты вручную для простейшей системы облегчает в дальнейшем овладение технологией расчетов сложных электроэнергетических систем на ЭВМ.

¹ Методические указания по устойчивости энергосистем. — М.: НЦ ЭНАС, 2004.

В период с 2001 по 2008 г. в электроэнергетической отрасли проводилась реформа для повышения эффективности ее работы, увеличения объема инвестиций в электроэнергетику в целом. В ходе реформы произошли изменения структуры отрасли, вызванные переходом с плановой на рыночную экономику. Изменились некоторые функции диспетчерского управления, но научно-технические аспекты функционирования энергосистем при этом не изменились.

История изучения электромеханических процессов в электроэнергетических системах. Впервые потребность в изучении электромеханических процессов в электрических системах возникла в начале 1920–х гг. в США в связи с образованием электроэнергетических систем. Там были проведены первые исследования переходных электромеханических процессов и Р. Парком (1928) была предложена математическая модель синхронной машины.

В нашей стране работы в этой области в 1926—1930 гг. начали ученые Л. И. Сиротинский, Н. Н. Щедрин и А. А. Смуров. Далее они были продолжены Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым. В 1933 г. была издана книга «Устойчивость параллельной работы энергосистем» (она была утверждена в качестве Руководства для энергетических вузов) С. А. Лебедева и П. С. Жданова, в которой были изложены основные вопросы устойчивости параллельной работы электрических систем. В этой работе были использованы результаты исследований лабораторий высоковольтных сетей Всесоюзного электротехнического института (Д. А. Городский и Р. М. Кантор) и материалы журнала «ТАИЕЕ».

В 1930—1935 гг. ленинградский ученый А. А. Горев исследовал электрическую систему на основе теории устойчивости движения А. А. Ляпунова (1892) и предложил свою математическую модель синхронной машины, аналогичную модели Р. Парка (позже она получили известность как уравнение Парка—Горева). Работы по разработке методов расчета устойчивости электрических систем продолжались, и в 1938 г. И. М. Маркович, И. С. Брук и С. А. Совалов предложили и обосновали возможность оценки устойчивости режима энергосистемы с помощью «практических» критериев. Одновременно велись работы по созданию средств расчета сложных электрических систем — расчетных столов постоянного и переменного тока (Д. И. Азарьев). В 1938—1941 гг. велось интенсивное внедрение средств автоматики в электрические системы страны. Так, в 1940—1941 гг. И. А. Сыромятников сначала в энергосистеме Азербайджана «Азэнерго», затем и в энергосистемах Москвы, Ленинграда и других активно внедрял автоматическое регулирование и управление возбуждением синхронных машин и устройства режимной автоматики. Во время Великой Отечественной войны эти работы продолжались и помогли значительно уменьшить число системных аварий, особенно в Уральской энергосистеме, куда была перебазирована большая часть промышленности страны.

Первые регуляторы возбуждения были электромеханическими, обладавшими большой зоной нечувствительности, что ограничивало их возможности по повышению устойчивости систем.

Создание системы компаундирования генераторов (Л. В. Цукерник), «сильного» регулирования возбуждения (М. М. Ботвинник, Г. Р. Герценберг, В. А. Веников, И. А. Глебов и др.) в 1950—1955 гг. позволило улучшить устойчивость систем, содержащих дальние электропередачи, и в частности, повысить пропускную способность передачи Куйбышев (в настоящее время Самара) — Москва.

Применение регуляторов без зоны нечувствительности и особенно «сильного» регулирования потребовало разработки новых методов расчета электромеханических переходных процессов. Были опубликованы работы (И. Д. Урусов, Г. В. Михневич, И. В. Литкенс, Э. С. Лукашов, И. А. Груздев, О. В. Щербачев, М. Л. Левинштейн, В. А. Строев и др.), позволившие разработать методику расчетов устойчивости сложных систем, реализуемую на ЭВМ. Для совершенствования средств автоматического регулирования были проведены испытания на электродинамических моделях в МЭИ (В. А. Штробель), Институте электромеханики АН СССР (В. Е. Каштелян) и в электроэнергетических системах.

Начатые еще в 1930–е гг. работы по быстродействующему управлению вращающим моментом паровой турбины для улучшения устойчивости получили свое развитие в работах Я. Н. Лугинского, Б. П. Мурганова, Г. Р. Герценберга, А. А. Юрганова и др.

Было проведено много исследований асинхронного хода синхронных машин и их ресинхронизации. В нашей стране в этой области был выполнен целый ряд работ (П. С. Жданов, И. А. Сыромятников, Л. Г. Мамиконянц, А. А. Хачатуров и др.).

Исследование устойчивости узлов нагрузки (П. С. Жданов, Н. И. Соколов, С. И. Гамазин, Ю. Е. Гуревич и др.) позволило разработать методы расчета устойчивости отдельно узлов нагрузки и учета нагрузки при расчетах переходных процессов в энергосистеме в целом.

При рассмотрении проблем устойчивости электрических систем в историческом аспекте следует отметить, что отношение к тем или иным вопросам развития энергосистем у нас и за рубежом было различным. В отечественных энергосистемах улучшение устойчивости и пропускной способности связей в электрических системах достигалось не только внедрением электропередач повышенного напряжения (500, 750, 1150 кВ), увеличением количества линий, установкой дополнительных источников реактивной мощности, но и в значительной степени интенсивным внедрением противоаварийной системной автоматики и режимными мероприятиями (автоматической разгрузкой, синхронным и несинхронным автоматическим повторным включением, автоматическим регулированием возбуждения, обеспечением условий результирующей устойчивости, делением системы на

несинхронно работающие части и пр.). Большое внимание уделялось вопросам надежности и живучести энергосистем (Д. А. Арзамасцев, С. А. Савалов, Ю. Н. Руденко, М. Н. Розанов, М. Г. Портной и др.).

В зарубежных системах (Канады, США, Скандинавских стран) большее внимание обращали на усиление связей, резервирование и проведение других, требующих вложения значительных финансовых средств, мероприятий при меньшем внимании к режимным мероприятиям. Недостаточное применение последних было одной из причин возникновения в энергосистемах США ряда тяжелых аварий (например, 13 июля 1977 г. произошло полное нарушение электроснабжения г. Нью-Йорка, продолжавшееся в течение суток). Но было бы несправедливым не отметить того, что определенный интерес к системам регулирования возбуждения для повышения устойчивости американских электроэнергетических систем в свое время был проявлен (В. Фрей, К. Лаванши, Ч. Конкордия, Г. Крон, Э. Кимбарк, Э. Кларк, Р. Рюденберг и др.). И с некоторым запозданием (относительно наших разработок), но активно была воспринята и осуществлена идея «сильного» регулирования возбуждения синхронных машин (П. Дандено, В. Ватсон, Ф. Демелло и др.).

В России первое систематическое изложение теории переходных электромеханических процессов в электрических системах было выполнено в 1958 г. проф. В. А. Вениковым в работе «Переходные электромеханические процессы в электрических системах», которая в дальнейшем издавалась как учебник для студентов электроэнергетических специальностей.

Основные термины и определения. Основные термины и определения, приведенные в данной книге, расшифрованы далее.

Энергосистема — совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, электрически соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической и тепловой энергии при общем управлении этим режимом.

Электрическая система (электрическая часть энергосистемы) — совокупность электроустановок электрических станций и электрических сетей энергосистемы.

Электроэнергетическая система — электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электрической энергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Система электроснабжения — совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией.

Узел нагрузки — подстанция высокого напряжения (источник электроэнергии), питающая сеть и различные электроприемники (двигатели, разного рода преобразователи, освещение, сварочные установки, электрические печи и т. д.).

Установившийся режим — режим электроэнергетической системы, который характеризуется неизменными параметрами. Медленные изменения режима, связанные с изменением потребления и генерации электроэнергии в течение суток, работой устройств регулирования частоты и активной мощности, рассматриваются как последовательность установившихся режимов.

Возмущение режима — дискретное изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (например, включение и отключение электроприемников и источников электрической энергии, короткие замыкания, переключения на резервное питание и т. п.).

Переходный процесс — переход из одного установившегося режима электроэнергетической системы в другой, который начинается с момента возмущения и продолжается до окончания вызванных этим возмущением электромагнитных и электромеханических процессов.

Нормальный режим — режим электроэнергетической системы, при котором все потребители снабжаются электрической энергией надлежащего качества в соответствии с договорами и диспетчерскими графиками, а значения технических параметров режима системы и оборудования находятся в пределах допустимых значений; имеются нормативные оперативные резервы мощности.

Аварийный режим — режим, возникающий в результате аварий в электроэнергетической системе (короткое замыкание, аварийные отключения нагрузок, генераторов и др.).

Послеаварийный режим — режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима.

Системная авария — нарушение нормального режима работы всей или значительной части электроэнергетической системы, связанная с массовым нарушением электроснабжения потребителей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие процессы называют электромеханическими переходными процессами? Назовите причины, их вызывающие.
2. Что такое возмущающие воздействия, малые и большие возмущения? Приведите примеры.
3. Что понимают под нарушением устойчивости электроэнергетической системы?
4. Каковы причины и последствия системных аварий?
5. Как связаны между собой вопросы обеспечения устойчивости энергосистем и надежность электроснабжения потребителей?

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И УЗЛОВ НАГРУЗКИ

1.1. Общие понятия и допущения при изучении электромеханических переходных процессов

Переходные процессы в электрической системе возникают всегда, когда нарушается баланс электрических и механических сил, действующих в системе. Поэтому, чтобы иметь представление о том, как поведут себя электрические машины при возмущении, необходимо знать, как при этом изменяются механические и электромагнитные моменты, действующие на валах этих машин.

Для аналитического изучения переходных процессов необходимо составить математическое описание электроэнергетической системы, создать ее математическую модель. Под математической моделью в общем случае понимают аналитические, графические, табличные и другие описания объекта или процесса, которые связывают наблюдаемые величины с внешней средой, представляемой в виде воздействий. Если результаты, полученные при операциях с математической моделью, соответствуют результатам эксперимента над реальным объектом, математическую модель считают адекватной (полностью соответствующей) натуре. Каждому параметру, характеризующему состояние реальной физической системы, при построении математической модели соответствует переменная или функция.

Параметры системы или режима могут меняться при изменении значений переменных нелинейно, в этих случаях система называется нелинейной.

Очень трудно составить такую математическую модель, которая бы точно отражала все свойства реального объекта. При рассмотрении физических процессов, происходящих в энергосистеме после возмущений, учитывают явления, которые отражают сущности процессов. Например, во время переходных процессов в энергосистеме важно проследить изменения ЭДС, токов, напряжений, мощностей, угловых скоростей роторов и механических моментов вращающихся машин. Расчеты, позволяющие проанализировать изменение этих величин при детальном учете всех элементов электрической системы, очень

сложны. Поэтому вводят определенные допущения, которые позволяют значительно упростить анализ.

Основные упрощающие допущения, принимаемые при анализе электромеханических переходных процессов, следующие:

- предполагается, что изменения угловых скоростей малы, а значит, в относительных единицах момент равен мощности, т.е. $M^* = P^*$;
- принимается, что изменение активной электрической мощности происходит мгновенно, что означает отказ от учета апериодических составляющих тока и напряжения во всех элементах электрической системы;
- не учитывается насыщение стали генераторов и трансформаторов;
- синхронная машина (генератор, двигатель) представляется в расчетах схемой замещения в виде ЭДС E и индуктивного сопротивления X (упрощенное представление, но допустимое при приближенных расчетах и при рассмотрении физических процессов движения роторов электрических машин, что показано далее).

Приведенные основные допущения используют при составлении математической модели для ориентировочных проектных и эксплуатационных расчетов. Преимуществами принятого упрощенного математического описания являются не только простота вычислительных операций, но и наглядность, облегчающая понимание происходящих явлений.

Ниже анализируются математические описания и характеристики отдельных элементов электрической системы, составляющих ее математическую модель.

1.2. Математическая модель синхронной машины

1.2.1. Исходные уравнения

Рассмотрим двухполюсную синхронную машину, состоящую из неподвижной части — статора, на которой расположены обмотки трех фаз, и вращающейся части — ротора с расположенной на ней обмоткой возбуждения (влияние демпферных контуров на роторе не будем учитывать).

Ротор такой машины имеет две оси симметрии. Ось, совпадающую с осью полюсов, принято называть продольной осью ротора (ось d), а ось, перпендикулярную к ней, — поперечной осью ротора (ось q). Примем, что продольная ось опережает по направлению вращения поперечную.

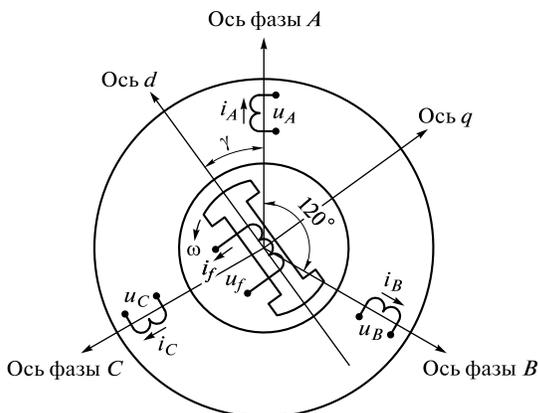


Рис. 1.1. Принципиальная схема синхронной машины

Предположим, что обмотки статора расположены симметрично как относительно друг друга, так и относительно оси вращения. Их магнитные оси сдвинуты друг относительно друга на 120° электрических градусов (рис. 1.1).

Пренебрегаем потерями в стали и не учитываем насыщение во всех частях машины.

Обозначаем параметры машины, относящиеся к ее статорным обмоткам, индексами A, B, C , а к обмотке возбуждения — индексом f . Рассмотрим генераторный режим работы синхронной машины, когда токи статора имеют направление от зажимов в сеть, а ток ротора i_f из сети к зажимам, т.е. то направление, при котором созданный им магнитный поток совпадает с положительным направлением продольной оси. Тогда с учетом направлений токов можно записать дифференциальные уравнения контуров обмоток в виде:

$$\begin{aligned}
 u_A &= -Ri_A - \frac{d\Psi_A}{dt}; \\
 u_B &= -Ri_B - \frac{d\Psi_B}{dt}; \\
 u_C &= -Ri_C - \frac{d\Psi_C}{dt}; \\
 u_f &= R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt},
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где R, R_f — активные сопротивления соответственно контуров каждой фазы и цепи возбуждения; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f$ — результирующие потокосцепления соответствующих обмоток; t — время.

Потокосцепления при принятых допущениях представляют собой линейные зависимости от тока данного контура и токов магнито-

связанных с ним других контуров. Коэффициентами пропорциональности при этом будут индуктивность L рассматриваемого контура и его взаимоиндуктивность M с другими контурами. Введя у L и M индексы соответствующих обмоток, можно записать:

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f;$$

$$\Psi_B = M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f;$$

$$\Psi_C = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f;$$

$$\Psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f.$$

Во вращающейся машине только L_f неизменно, остальные значения L и M зависят от положения ротора относительно обмоток статора (см. рис. 1.1, угол γ) и, следовательно, являются функциями времени. Таким образом, коэффициенты системы дифференциальных уравнений контуров обмоток — переменные величины, что усложняет решение этой системы уравнений. Для упрощения решения дифференциальные уравнения контуров обмоток машины с переменными коэффициентами преобразуют в уравнения с постоянными коэффициентами.

Смысл выполняемых преобразований состоит в том, что при изучении электромагнитных процессов в контурах синхронной машины совершается переход от неподвижной трехосной системы отсчета (A, B, C) к вращающейся вместе с ротором двухосной системе ($d, q, 0$) с помощью обобщенного вектора тока. При этом переменные в исходных уравнениях заменяются новыми переменными, линейно связанными с исходными. Так, действительные токи i_A, i_B, i_C можно заменить новыми фиктивными токами i_d, i_q, i_0 , представляющими собой проекции обобщенного вектора тока на оси d и q и связанными с исходными токами следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_A \cos \gamma + i_B \cos(\gamma - 120) + i_C \cos(\gamma + 120)]; \\ i_q &= \frac{2}{3} [i_A \sin \gamma + i_B \sin(\gamma - 120) + i_C \sin(\gamma + 120)]; \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_A + i_B + i_C). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Новые переменные i_d, i_q, i_0 называют соответственно продольным, поперечным и нулевым токами статора. Для симметричных режимов при соединении обмоток в звезду с изолированной нейтралью и при несимметричных режимах $i_0 = 0$. Обычно эту составляющую при анализе электромеханических процессов не рассматривают.

Обратные соотношения при известных токах i_d и i_q имеют вид (рис. 1.2):

$$\begin{aligned} i_A &= i_d \cos\gamma + i_q \sin\gamma; \\ i_B &= i_d \cos(\gamma - 120) + i_q \sin(\gamma - 120); \\ i_C &= i_d \cos(\gamma + 120) + i_q \sin(\gamma + 120). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Для напряжений и потокосцеплений используются однотипные выражения. Например, для фазы A с учетом $i_0 = 0$

$$\begin{aligned} u_A &= u_d \cos\gamma + u_q \sin\gamma; \\ \Psi_A &= \Psi_d \cos\gamma + \Psi_q \sin\gamma. \end{aligned}$$

Если в исходных уравнениях (1.1) выразить напряжение, потокосцепление и ток через составляющие d и q , получим

$$\begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\gamma}{dt}; \\ u_q &= -Ri_q - \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\gamma}{dt}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Уравнение для обмотки возбуждения остается в том же виде:

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}.$$

В приведенных уравнениях в системе относительных единиц потокосцепления

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_f; \\ \Psi_q &= L_q i_q; \\ \Psi_f &= M_{ad} i_d + L_f i_f, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где L_d — синхронная продольная индуктивность обмотки статора; L_q — синхронная поперечная индуктивность обмотки статора; M_{ad} — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора в продольной оси; L_f — индуктивность обмотки возбуждения.

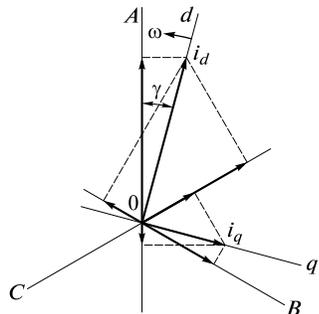


Рис. 1.2. Определение мгновенных токов по продольной и поперечной составляющим

Особенность полученных уравнений — отсутствие индуктивных, зависящих от положения ротора относительно обмоток статора, т. е. от угла γ . При этом относительные значения индуктивностей равны соответствующим им индуктивным сопротивлениям:

$$L_d = X_d; M_{ad} = X_{ad}; L_q = X_q; L_f = X_f.$$

Переход к новым переменным в координатах $d, q, 0$ позволил преобразовать исходную систему уравнений (1.1) в систему уравнений (1.4), где все коэффициенты постоянны и, таким образом, указанные выше трудности решения уравнений устранены. Приведенные уравнения были получены независимо друг от друга американским инженером Р. Парком и российским ученым А. А. Горевым и носят название уравнений Парка — Горева.

Угол γ изменяется во времени по закону

$$\gamma = (\omega_c + \Delta\omega)t + \gamma_0,$$

где ω_c — синхронная угловая скорость вращения ротора; $\Delta\omega$ — угловая скорость ротора относительно синхронно вращающейся оси; γ_0 — начальный угол.

Следовательно

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_c + \Delta\omega$$

или в относительных единицах

$$\frac{d\gamma}{dt} = 1 + s,$$

где s — скольжение ротора относительно синхронной оси.

Тогда уравнения (1.4) могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - (1+s)\Psi_q; \\ u_q &= -Ri_q - \frac{d\Psi_q}{dt} + (1+s)\Psi_d. \end{aligned} \quad (1.6)$$

В уравнениях (1.6) $\frac{d\Psi_d}{dt}$ и $\frac{d\Psi_q}{dt}$ называют трансформаторными ЭДС по осям d и q , а $(1+s)\Psi_q$ и $(1+s)\Psi_d$ — ЭДС вращения.

Уравнения (1.6) описывают электромагнитные процессы, происходящие в синхронной машине. Обычно при анализе электромагнитных процессов в синхронных машинах пренебрегают изменениями их угловых скоростей вращения ($s = 0$) и тогда в относительных единицах измерения уравнения (1.6) принимают вид

$$\begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q; \\ u_q &= -Ri_q - \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d. \end{aligned} \quad (1.7)$$