

Утверждаю
Зам. директора
ЭЛТИ по УР

И.В. Плотникова

« _____ » _____

2003 г.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к рабочей программе и по выполнению
курсовой работы для студентов по направлению 140200 Электроэнергетика
и для студентов Института дистанционного образования

АННОТАЦИЯ

При изучении разделов курса осваиваются основы электромеханических переходных процессов, связанных с расчетом и анализом устойчивости параллельной работы синхронных генераторов и двигательной нагрузки электроэнергетических систем. Рассматриваются особенности построения математических моделей, методы расчета и физическая интерпретация переходных процессов при больших и малых возмущениях в энергосистемах. Обосновываются мероприятия по предотвращению нарушений устойчивости энергосистем.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели преподавания дисциплины: сформировать у студентов базовые знания о физике электромеханических переходных процессов в современных автоматически регулируемых электроэнергетических системах, физической сути мероприятий по сохранению устойчивости энергосистем и математических основах ее исследования. В результате изучения курса студенты должны получить практические навыки анализа условий протекания электромеханических переходных процессов, их расчета и физического истолкования получаемых результатов.

Задачи изложения и изучения дисциплины: поставленные цели достигаются путем лекционного изложения теоретического курса, приобретения теоретических знаний по лекциям и учебникам, выполнения цикла лабораторных работ, сопровождаемых анализом получаемых результатов, выполнения курсовой работы, охватывающей основные разделы курса, проведения текущего и итогового контроля знаний.

2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Основные положения курса

Основные понятия и определения. Содержание курса. Место курса в обучении. Виды переходных процессов. Основные положения, принимаемые при анализе. Определения статической и динамической устойчивости энергосистем [1]: гл.1.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Настоящий раздел дает общее представление об электромеханических переходных процессах и вопросах, возникающих при их изучении. Большая часть раздела имеет описательный характер и легко воспринимается при чтении. При изучении раздела следует ответить на все контрольные вопросы к главе 1 [1].

2.2. Статическая устойчивость энергосистем

Уравнение движения ротора генератора, формы его записи в различных системах исчисления. Понятие о статической устойчивости энергосистемы. Практические критерии статической устойчивости одномашинной системы. Устойчивость генератора, работающего через сложную пассивную электрическую сеть. Статическая устойчивость генератора с автоматическим регулированием возбуждения. Математические основы метода малых колебаний. Самораскачивание роторов генераторов. Статическая устойчивость двух станций соизмеримой мощности. Автоматическое регулирование скорости вращения роторов генераторов и частоты в энергосистеме. Неустойчивость, лавина частоты и ее предотвращение. Аperiodическая статическая устойчивость сложных энергосистем [1]: приложения 3, 4; гл. 4, 8; [2].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал данного раздела посвящен рассмотрению переходных процессов энергосистем при малых возмущениях режима. Исследование поведения системы при таких возмущениях проводится методом малых колебаний. При этом задачи исследования не ограничиваются только проверкой статической устойчивости энергосистем. Важно выбрать такие параметры режима и параметры системы, чтобы возникшие в процессе работы энергосистемы малые колебания возможно быстрее затухали и, тем более, не вызывали самораскачивания, т.е. нарастающих колебаний генераторов в системе.

При изучении данного раздела следует особое внимание уделить критериям статической устойчивости. Необходимо подробно разобрать метод малых колебаний и применение его для суждения об устойчивости системы, в частности, по виду корней характеристического уравнения. Для закрепления материала целесообразно ответить на контрольные вопросы по данной теме и рассмотреть приведенные в учебнике [1] примеры.

2.3. Динамическая устойчивость энергосистем

Понятие о динамической устойчивости энергосистем. Основные допущения при анализе динамической устойчивости. Способ площадей и критерий динамической устойчивости. Предельный угол отключения поврежденной цепи линии электропередачи. Метод последовательных интервалов и предельное время отключения поврежденной цепи. Проверка устойчивости при работе ТАПВ и ОАПВ на линиях электропередачи. Процессы при отключении части генераторов. Процессы при форсировке возбуждения. Условия успешной синхронизации при вводе в работу синхронного генератора. Динамическая устойчивость двухмашинной энергосистемы. Динамическая устойчивость энергосистем с дефицитом мощности [1]: гл. 4, 7; [2].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При исследовании динамической устойчивости приходится иметь дело с переходными процессами, сравнительно быстро протекающими во времени (например, за время длительности короткого замыкания, отключения поврежденного участка и послеаварийного переходного процесса).

При динамических переходах энергосистем ЭДС генераторов и их реактивные сопротивления изменяются в течении рассматриваемого переходного процесса. Однако в целях упрощения расчетов часто принимают, что переходная ЭДС каждого генератора и его соответствующее сопротивление в период всего рассматриваемого процесса остаются неизменными. Это равносильно допущению, что результирующие потокосцепления с замкнутыми контурами в продольной оси машины остаются неизменными.

Наличие автоматических регуляторов возбуждения практически у всех генераторов, работающих на отечественных электростанциях, обеспечивает такие условия увеличения тока возбуждения, при которых значение переходной ЭДС за время переходного процесса остается практически неизменным. Поэтому упрощенное рассмотрение процессов приводит к результатам, обладающим во многих случаях удовлетворительной степенью точности.

При изучении данного материала следует обратить внимание на правило площадей и метод последовательных интервалов, которые обычно принимаются при исследовании динамической устойчивости. Ценность последнего метода заключается в том, что он дает возможность сравнительно просто получить картину протекания сложного процесса во времени. Должно быть также четко усвоено влияние постоянной инерции машины, в частности, на то, что она влияет на допустимое время отключения повреждения и в то же время не влияет на предельный угол отключения.

Правило площадей и метод последовательных интервалов в несколько измененном виде могут быть применены и для расчета динамической устойчивости электрической системы, состоящей из двух станций соизмеримой мощности.

При подготовке темы следует ответить на контрольные вопросы и рассмотреть примеры к главам 7 и 8 [1] в соответствии с вопросами программы.

2.4. Асинхронные режимы, ресинхронизация и результирующая устойчивость энергосистем

Понятия и определения: синхронные качания, асинхронный ход, ресинхронизация, результирующая устойчивость. Параметры и характеристики элементов электрических систем при асинхронных режимах: элементы электрической сети, синхронные генераторы, первичные двигатели, нагрузка. Ресинхронизация генератора, работающего в асинхронном режиме с повышенной скоростью. Изменение параметров режима при асинхронном ходе генераторов. Электрический центр качаний [1]: гл. 14.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К асинхронным относятся такие режимы электроэнергетических систем, когда скорости вращения у части синхронных машин значительно отклоняются от средней рабочей частоты в системе. К наиболее опасным относятся асинхронные режимы в виде двухчастотного и многочастотного асинхронного хода генераторов больших частей электроэнергетических систем. В таких режимах наблюдается глубокое снижение напряжений в узлах электрической сети, приводящее в ряде случаев к существенным отключениям нагрузки.

При изучении раздела важно хорошо усвоить содержание терминов: синхронные качания, асинхронный ход, ресинхронизация, результирующая устойчивость, электрический центр качаний. Следует обратить внимание на опасность асинхронных режимов для синхронных машин и асинхронной нагрузки.

Весьма полезно проработать примеры и контрольные вопросы к гл. 14 [1].

2.5. Статическая устойчивость нагрузки

Статические характеристики пассивной, синхронной и асинхронной нагрузки. Статические характеристики комплексной нагрузки. Регулирующие эффекты нагрузки. Критерий статической устойчивости асинхронного электродвигателя. Критическое скольжение и критическое напряжение асинхронного электродвигателя. Лавина напряжения. Влияние внешнего сопротивления и частоты энергосистемы на статическую устойчивость асинхронного электродвигателя. Вторичные признаки устойчивости асинхронного электродвигателя. Вторичные признаки устойчивости узла с комплексной нагрузкой. Влияние компенсирующих устройств на статическую устойчивость нагрузки [1]: гл. 11; [5].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Свойства нагрузок в установившихся режимах работы электрической системы определяются их статическими характеристиками, то есть зависимостями активной и реактивной мощностей от величин напряжения и частоты. Используя эти характеристики, можно более точно определить величину действительного предела передаваемой по линиям системы мощности по условиям устойчивости.

Следует иметь в виду, что первичный признак устойчивости асинхронного двигателя для комплексной нагрузки зачастую не может быть использован, так как параметры эквивалентного двигателя неизвестны. В таких случаях более удобны вторичные критерии (признаки) устойчивости косвенно отражающие переход через критическое скольжение двигателей.

В процессе изучения материала данного раздела следует четко уяснить такие понятия как комплексная нагрузка, статическая характеристика, регулирующий эффект, критическое скольжение, критерии (признаки) статической устойчивости нагрузки. Необходимо ясно представить себе всю

физическую картину поведения комплексной нагрузки в процессе постепенного изменения режима, приводящего к образованию лавины напряжения. Следует учесть, что возникновению лавины напряжения способствуют в системе следующие факторы:

- 1) соизмеримость мощностей питающей станции и узла нагрузки;
- 2) недостаточно высокий уровень возбуждения на станции;
- 3) увеличенные реактивные связи между станцией и узлом нагрузки;
- 4) высокая средняя загрузка асинхронных двигателей в узле нагрузки;
- 5) повышение частоты в системе.

Весьма полезно разобрать приведенные в [1] примеры и ответить на соответствующие программе контрольные вопросы.

2.6. Переходные процессы в узлах нагрузки энергосистем при больших возмущениях

Возмущающие воздействия и большие возмущения в узлах нагрузки. Динамические характеристики нагрузки: осветительная нагрузка; асинхронные двигатели; синхронные двигатели. Режимы нагрузки при больших возмущениях: наброс нагрузки на синхронный двигатель; самозапуск асинхронных двигателей; самоотключения электроустановок и восстановление нагрузки. Мероприятия по снижению больших возмущений и их влияния на нагрузку: мероприятия в энергосистеме; мероприятия на промышленных предприятиях [2]: гл. 12; [5].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Анализ устойчивости электрической нагрузки при больших возмущениях в энергосистеме является необходимым этапом исследований при выборе структуры систем электроснабжения, определении состава и размещения устройств релейной защиты и автоматики, а также при выборе настроечных параметров этих устройств. При таких исследованиях принимаются во внимание как нормальные эксплуатационные переходные режимы, так и аварийные возмущения, связанные с короткими замыканиями в электрической сети, отключением поврежденных элементов, включением резервных источников питания, синхронными качаниями генераторов и другими явлениями в энергосистеме.

Расчеты устойчивости нагрузки требуют глубоких знаний в области электромеханических переходных процессов и умения математически формулировать задачу, вводя при этом обоснованные упрощения математической модели.

Учитывая эти замечания, при изучении раздела следует обратить внимание на особенности рассматриваемых аварийных ситуаций, характеристики протекающих процессов, методы их расчета и мероприятия по повышению динамической устойчивости нагрузки.

Весьма полезно рассмотреть приведенные в [1] примеры и ответить на контрольные вопросы.

2.7. Мероприятия по повышению устойчивости и качества переходных процессов энергосистем

Основные мероприятия, изменяющие параметры оборудования. Дополнительные мероприятия. Мероприятия режимного характера. Техно-экономические показатели мероприятий [1]; [4]: гл. 18.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Средствами, улучшающими устойчивость электрических систем и получившими широкое применение, являются: быстросрабатывающее отключение короткого замыкания, автоматическое повторное включение отключенной линии или фазы, автоматическое регулирование возбуждения с форсированием его при глубоких посадках напряжений, автоматическая разгрузка по частоте. В связи с широким применением указанных мероприятий резко повысилась надежность работы электрических систем.

Повышение устойчивости путем улучшения характеристик основного оборудования связано с увеличением его стоимости, поэтому в первую очередь должны быть использованы более экономичные способы повышения устойчивости - применение средств автоматизации.

Так, например, сильное регулирование возбуждения позволяет поддерживать неизменным напряжение на выводах генератора или за повышающим трансформатором. Это, в свою очередь, позволяет отказаться от снижения синхронного и переходного сопротивлений генератора.

Форсирование и высокий потолок возбуждения в сочетании с механическим или электрическим (путем включения нагрузочных сопротивлений) торможением позволяет решить вопросы динамической устойчивости и отказаться от снижения переходного сопротивления и увеличения механической постоянной инерции роторов генераторов.

Для повышения пропускной способности и улучшения устойчивости дальних электропередач переменного тока наиболее перспективным следует считать автоматическое регулирование возбуждения сильного действия синхронных генераторов, импульсную разгрузку турбин, включение нагрузочных сопротивлений, применение продольной компенсации, установку синхронных компенсаторов с автоматическим регулированием возбуждения сильного действия на промежуточных подстанциях и др.

Выбор тех или иных средств улучшения устойчивости производится в каждом конкретном случае на основании технико-экономического сопоставления.

При изучении раздела следует ответить на все контрольные вопросы к главе 18 учебника [4].

3. ЗАДАНИЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

3.1. Расчет статической устойчивости двухмашинной энергосистемы

Для заданной двухмашинной электрической системы (рис.1) построить угловые характеристики мощности, определить пределы передаваемой мощности от станции «А» и «Б», коэффициенты запаса статической устойчивости обеих станций в исходном режиме, относительный угол между ЭДС ($\delta_{12\text{пред}}$), соответствующий пределу статической аperiodической устойчивости. Расчеты выполнить для двух случаев:

- 1) генераторы станций «А» и «Б» снабжены регуляторами пропорционального действия;
- 2) генераторы станций «А» и «Б» снабжены регуляторами сильного действия.

3.2. Расчет предельного угла и времени отключения КЗ для одномашинной системы

Для станции «А», работающей на шины неизменного напряжения и частоты ($U_H = const, \omega = const$), рассчитать предельные по условию сохранения динамической устойчивости угол и время отключения двухфазного КЗ на землю, происходящего на одной из цепей ЛЭП на расстоянии от начала.

3.3. Расчет устойчивости динамического перехода системы

Для станции «А», работающей на шины неизменного напряжения и частоты ($U_H = const, \omega = const$), провести расчет и оценить устойчивость динамического перехода при следующих условиях: одна из цепей ЛЭП находится в ремонте, а в заданной точке рабочей цепи ЛЭП происходит однофазное КЗ на землю, которое отключается через $\Delta t_{\text{кз}} = 0,2$ с и далее с интервалом $\Delta t = 0,4$ с после отключения КЗ происходит успешное ОАПВ ранее поврежденной фазы.

3.4. Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости системы (исследовательская часть)

Обосновать мероприятия, повышающие предел передаваемой мощности по условиям статической устойчивости на 20% для станции «А» (снабженной регуляторами сильного действия), работающей через одноцепную ЛЭП на шины неизменного напряжения и частоты ($U_H = const, \omega = const$).

Примечания:

1. Активными сопротивлениями генераторов, трансформаторов и ЛЭП пренебречь.
2. Действие АРВ учесть приближенно: для АРВ пропорционального типа генераторы вводятся в схему замещения как $E' = const$ и $X_{\Gamma} = X'_d$, для АРВ сильного действия – $U_{\Gamma} = const$ и $X_{\Gamma} = 0$.

3. Нагрузку учесть приближенно, заменив ее сопротивлением $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$.
4. Принять погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности ЛЭП $X_1 = 0,4$ (Ом/км).

В схеме нулевой последовательности принять:

- 1) для одной цепи ЛЭП $X_0 = 3,5 X_1$;
- 2) взаимное индуктивное сопротивление нулевой последовательности между цепями 1 и 2 двухцепной ЛЭП $X_{1-2} = 3 \times 0,66 X_1$ (при КЗ на двухцепной ЛЭП).
5. На шинах нагрузки в исходном режиме принять $U_H = 110$ кВ, $\cos \varphi_0 = 0,97$ для всех соединений.

3.5. Исходные данные к курсовой работе

Исходные данные для курсовой работы приведены в четырех таблицах. Вариант выбирается по первым двум буквам фамилии и инициалам студента. Так студенту Иванову Анатолию Сергеевичу следует из первой таблицы взять вариант «И», из второй – «В», из третьей – «А», из четвертой – «С». Из первой таблицы заимствуются параметры элементов системы, из второй – перетоки активной мощности по трансформаторам Т3, Т4 и мощность нагрузки, из третьей – длина ЛЭП, из четвертой – место КЗ.

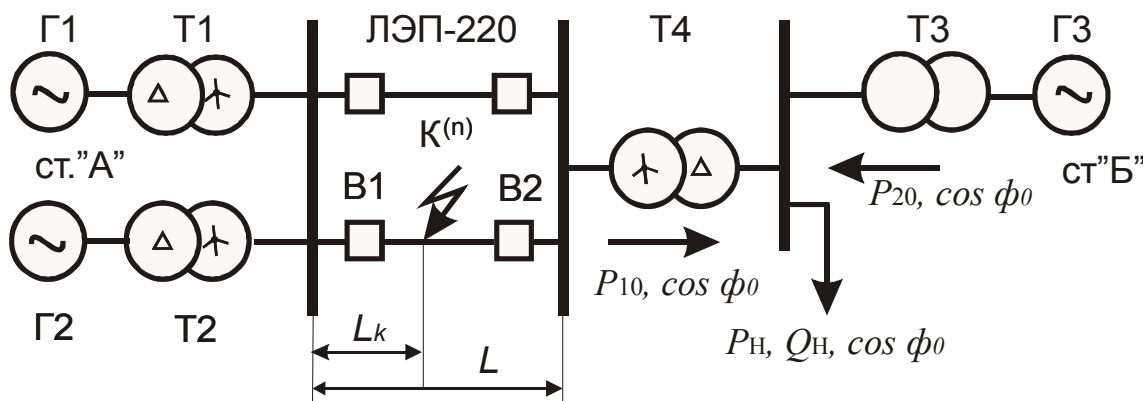


Рис.1. Однолинейная схема исследуемой системы

Параметры элементов системы

Таблица 1

№ варианта	№ элемента	ГЕНЕРАТОРЫ							
		$P_{ном}$ МВт	$\cos\varphi$ от.ед.	U_H кВ	X_d от.ед.	X'_d от.ед.	X_2 От.ед.	T_j с	
А,Б,В, Г,Д	1,2,	300	0,85	20	1,7	0,26	0,21	7	
	3	500	0,85	20	2,2	0,4	0,33	9	
Е,Ж,З, И,К	1,2,	320	0,85	15,75	2,4	0,37	0,3	7,2	
	3	500	0,85	20	2,2	0,4	0,33	9	
Л,М,Н, О,П,Р	1,2,	250	0,85	15,75	1,97	0,29	0,24	6,5	
	3	320	0,85	15,75	2,4	0,37	0,3	7,2	
С,Т,У, Ф,Х,Ц	1,2,	350	0,8	10,5	1,7	0,27	0,27	8	
	3	500	0,85	20	2,2	0,4	0,33	9	
Ч,Ш,Щ, Э,Ю,Я	1,2,	280	0,85	15,75	2,2	0,35	0,28	7,5	
	3	320	0,85	15,75	2,4	0,37	0,3	7,2	
		Трансформаторы Т1,Т2,Т3				Трансформатор Т4			
		S_H МВА	U_K %	U_{HH} кВ	U_{HB} кВ	S_H МВА	U_K %	U_{HH} кВ	U_{HB} кВ
А,Б,В, Г,Д	1,2,	400	11	20	242				
	3	630	12,5	20	121	630	13	121	220
Е,Ж,З, И,К	1,2,	500	12	15,75	240				
	3	630	12,5	20	121	630	13	121	240
Л,М,Н, О,П,Р	1,2,	400	12	15,75	240				
	3	500	12	15,75	121	400	12	121	240
С,Т,У, Ф,Х,Ц	1,2,	400	12	10,5	231				
	3	630	12,5	20	115	630	12	121	230
Ч,Ш,Щ, Э,Ю,Я	1,2,	350	12	15,75	240				
	3	400	12	15,75	121	500	12	115	240

Таблица 2

№ варианта	Загрузка генераторов
А,Б,В,Г,Д,Е,Ж,З,И	0,7 $P_{ном}$
К,Л,М,Н,О,П,Р,С,Т	0,8 $P_{ном}$
У,Ф,Х,Ц,Ч,Ш,Щ,Э,Ю,Я	0,9 $P_{ном}$

Таблица 3

№ варианта	Длина ЛЭП L (км)
А,Б,В,Г,Д,Е,Ж	200
З,И,Л,М,Н,О	225
П,Р,С,Т,У,Ф,Х	250
Ц,Ч,Ш,Щ,Э,Ю,Я	275

Таблица 4

№ варианта	Место КЗ (L _K /L)	№ варианта	Место КЗ (L _K /L)
А,Б,В,Г,Д,Е,Ж	0,3	П,Р,С,Т,У,Ф,Х	0,7
З,И,Л,Л,М,Н,О	0,5	Ц,Ч,Ш,Щ,Э,Ю,Я	0,9

3.6. Объем курсовой работы и требования к её оформлению

Курсовая работа состоит из пояснительной записки, для выполнения которой требуется примерно 20-25 часов самостоятельной работы студентов. Её объем составляет 25-30 страниц.

Записка должна содержать задание, исходные данные и расчетную схему. Решение поставленных задач должно быть разбито по разделам. В пределах каждого раздела необходимо:

1. Сформулировать задачу, решаемую в разделе;
2. Привести поясняющие схемы замещения и этапы их преобразования;
3. Пояснить последовательность решения задачи;
4. Привести расчетные формулы в общем виде с последующей подстановкой цифровых значений величин и результатов расчета;
5. Привести масштабные построения рассчитанных характеристик, дать краткий анализ полученных результатов расчета с соответствующими выводами;
6. В тексте записки дать ссылки на используемую техническую и справочную литературу;
7. В конце записки привести список использованной литературы и оглавление;
8. На последнем листе привести фактически затраченное время на работу.

3.7. Содержание курсового задания

Ниже, в таблице 5, приводится перечень разделов курсового задания и нарастающий объем выполнения в процентах.

Таблица 5

№	Наименование разделов и перечень решаемых задач	неделя
1.	Расчет статической устойчивости двухмашинной энергосистемы	
1.1.	Расчет параметров схемы замещения при АРВ пропорционального действия	10
1.2.	Расчет характеристик электромагнитной мощности генераторов	13
1.3.	Расчет коэффициентов запаса и границ статической апериодической устойчивости	14
1.4.	Расчет параметров схемы замещения при АРВ сильного действия	18

№	Наименование разделов и перечень решаемых задач	неделя
1.5.	Расчет характеристик электромагнитной мощности генераторов	21
1.6.	Расчет коэффициентов запаса и границ статической апериодической устойчивости	23
1.7.	Графическое построение характеристик электромагнитной мощности и анализ результатов расчета	30
2.	Расчет предельного угла и времени отключения КЗ для одномашиной системы	
2.1.	Расчет характеристики электромагнитной мощности нормального режима	33
2.2.	Расчет характеристики электромагнитной мощности аварийного режима	40
2.3.	Расчет характеристики электромагнитной мощности после аварийного режима	43
2.4	Расчет предельного угла и времени отключения КЗ	50
3	Расчет устойчивости динамического перехода системы	
3.1	Расчет характеристики электромагнитной мощности нормального режима	53
3.2	Расчет характеристики электромагнитной мощности аварийного режима	60
3.3	Расчет характеристики электромагнитной мощности неполнофазного режима	66
3.4	Расчет углов коммутации методом последовательных интервалов	72
3.5	Расчет площадок ускорения и торможения генераторов	77
4	Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости системы	87
5	Оформление курсовой работы	100

4. Методические указания по выполнению курсовой работы

4.1 Расчет статической устойчивости двухмашинной энергосистемы

Первым шагом расчета является составление электрической схемы замещения. В схему замещения входят все элементы рассматриваемой системы: генераторы, трансформаторы, линия электропередачи (ЛЭП) и нагрузка. Все перечисленные элементы (за исключением нагрузки) учитываются только реактивными сопротивлениями.

Приближенный учет автоматических регуляторов пропорционального действия на генераторах станций «А» и «Б» в исследованиях статической

устойчивости осуществляется тем, что генераторы входят в схему замещения неизменным значением переходной ЭДС ($E' = const$) за переходным сопротивлением X'_d .

Регулирующие свойства нагрузки с достаточной для практических целей точностью при исследовании статической устойчивости учитываются посредством представления ее схеме замещения постоянным сопротивлением

$$\underline{Z}_H = \frac{U_H^2}{S_H} (\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0) = \frac{U_H^2}{S_H^2} (P_H + j Q_H) = R_H + j X_H, \quad (1)$$

где U_H , S_H , P_H , Q_H , $\cos \varphi_0$ - соответственно, напряжение, полная, активная, реактивная мощности и коэффициент мощности нагрузки.

Решение поставленной задачи удобно вести в системе относительных единиц в такой последовательности.

1. Обозначить римскими цифрами номера ступеней трансформации:

I - ступень присоединения нагрузки;

III - ступень Г3;

II - ступень Г1 и Г2;

IV -

ступень ЛЭП.

2. Задаться на ступени I S_6 и $U_{6I} = 110$ кВ.

3. Рассчитать базисные напряжения на остальных ступенях, используя коэффициенты трансформации трансформаторов Т3, Т4, Т1:

$$U_{6II} = U_{6IV} \frac{U_{НВ(Т1)}}{U_{НН(Т1)}}; \quad U_{6III} = U_{6I} \frac{U_{НН(Т3)}}{U_{НВ(Т3)}}; \quad U_{6IV} = U_{6I} \frac{U_{НВ(Т4)}}{U_{НН(Т4)}}; \quad (2)$$

4. Определить реактивные сопротивления элементов схемы замещения:

$$\text{генераторов Г1, Г2} \quad X_{Г1,2} = 0,5 X'_{d1} \frac{U_{НГ1}^2 S_6}{S_{НГ1} U_{6II}^2}; \quad (3)$$

$$\text{генератора Г3} \quad X_{Г3} = X_{d3} \frac{U_{НГ3}^2 S_6}{S_{НГ3} U_{6III}^2}; \quad (4)$$

$$\text{трансформаторов Т1, Т2} \quad X_{Т1,2} = 0,5 \frac{U_{К(Т1)} U_{Н(Т1)}^2 S_6}{100 S_{Н(Т1)} U_{6IV}^2}; \quad (5)$$

$$\text{трансформатора Т4} \quad X_{Т4} = \frac{U_{К(Т4)} U_{НВ(Т4)}^2 S_6}{100 S_{Н(Т4)} U_{6I}^2}; \quad (6)$$

$$\text{трансформатора Т3} \quad X_{Т3} = \frac{U_{К(Т3)} U_{НВ(Т3)}^2 S_6}{100 S_{Н(Т3)} U_{6I}^2}; \quad (7)$$

$$\text{ЛЭП} \quad X_{\text{л}} = 0,5 X_1 L \frac{S_6}{U_{6IV}^2}. \quad (8)$$

Здесь парные однотипные элементы заменены одним эквивалентным сопротивлением.

Комплексное сопротивление нагрузки рассчитывается по ранее приведенной формуле с подстановкой в нее величин в относительных единицах.

Схема замещения рассматриваемой системы имеет Т-образный вид, с продольными сопротивлениями:

$$X_{c1} = X_{Г1,2} + X_{Т1,2} + X_{\text{л}} + X_{Т4}; \quad X_{c2} = X_{Т3} + X_{Г3}. \quad (9)$$

По полученным параметрам рассчитываются собственные и взаимные сопротивления схемы замещения [2, с.27].

Следующим этапом является расчет исходного режима.

Определяются потоки реактивной мощности

$$Q_{10} = P_{10} \operatorname{tg} \varphi_0; \quad Q_{20} = P_{20} \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (10)$$

и рассчитываются векторы переходных ЭДС. Для станции «А»:

$$\underline{E}'_{1(0)} = \left(U_{\text{н}} + \frac{Q_{10} X_{c1}}{U_{\text{н}}} \right) + j \frac{P_{10} X_{c1}}{U_{\text{н}}} = E'_{1(0)} \exp j \delta_{1(0)}. \quad (11)$$

Аналогичным образом находится вектор переходной ЭДС для станции «Б».

Расчет характеристик электромагнитных мощностей станций «А» и «Б» проводится по формулам :

$$P_1 = \frac{E'_{1(0)}{}^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E'_{1(0)} E'_{2(0)}}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (12)$$

$$P_2 = \frac{E'_{2(0)}{}^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E'_{1(0)} E'_{2(0)}}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}), \quad (13)$$

где δ_{12} - относительный угол между векторами переходных ЭДС.

Перед построением характеристик (рис.2) необходимо осуществить контрольную проверку по результатам исходного режима. При подстановке в последние выражения численных значений исходного относительного угла

$$\delta_{12(0)} = \delta_{1(0)} - \delta_{2(0)} \quad \text{и при правильных расчетах будут получены}$$

заданные потоки активной мощности P_{10} и P_{20} для исходного режима.

Коэффициенты запаса статической устойчивости подсчитываются для каждой станции по формулам:

$$K_{з(А)} = \frac{P_{1\max} - P_{10}}{P_{10}} \cdot 100\%; \quad (14)$$

$$K_{з(Б)} = \frac{P_{2\max} - P_{20}}{P_{20}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

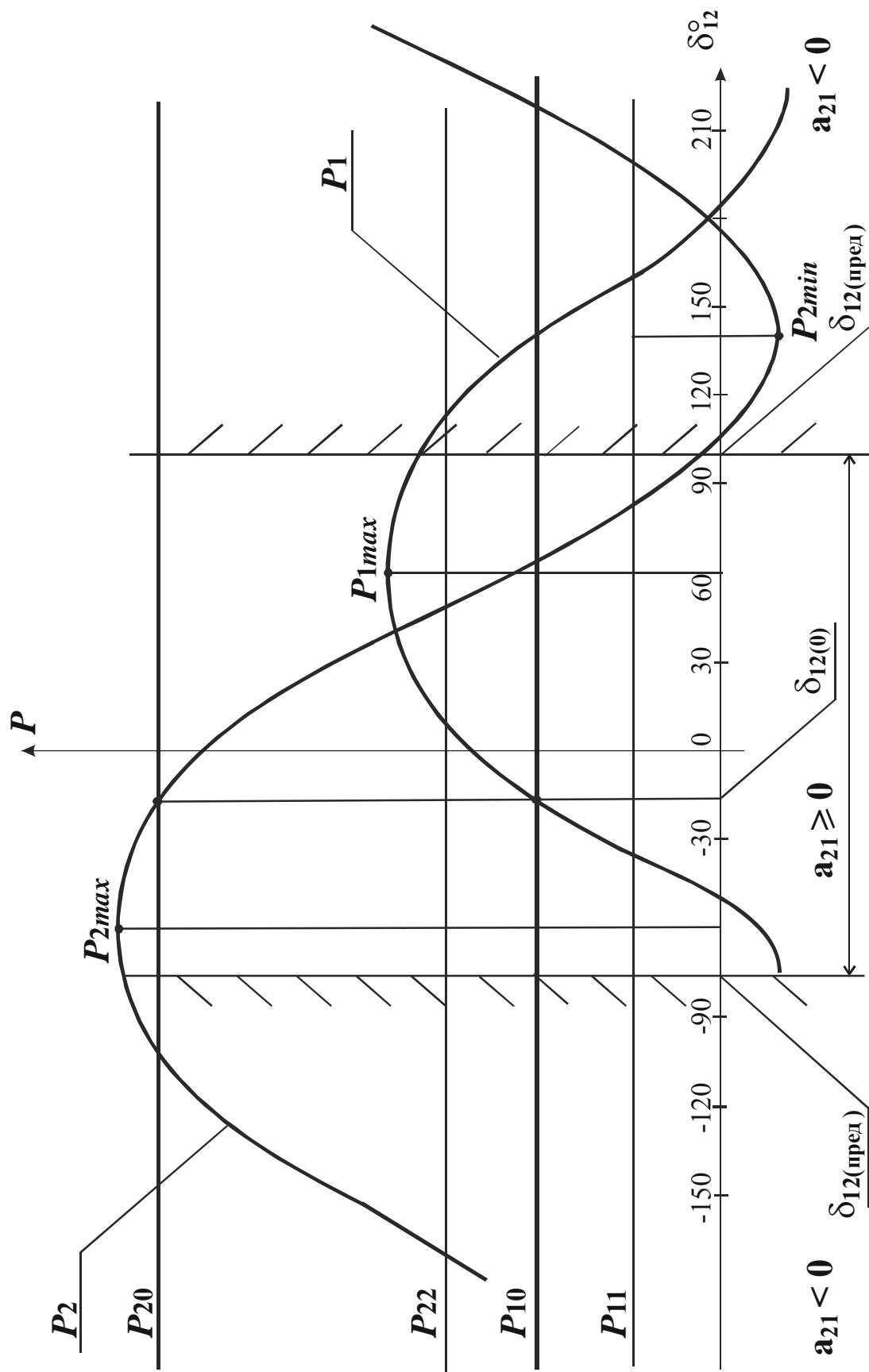


Рис.2. Угловые характеристики электромагнитной мощности двухмашинной системы

где $P_{1\max}, P_{2\max}$ – максимальные значения электромагнитных мощностей.

Границы статической аperiodической устойчивости находятся из условия равенства нулю удельного относительного ускорения роторов эквивалентных генераторов станций

$$a_{21} = \frac{1}{T_{J(A)}} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J(B)}} \frac{dP_2}{d\delta_{12}} = 0. \quad (16)$$

Решением этого уравнения является выражение

$$\operatorname{tg} \delta_{12(\text{пред})} = \frac{K_{J(A,B)} + 1}{K_{J(A,B)} - 1} \operatorname{ctg} \alpha_{12}, \quad (17)$$

которому соответствуют два значения $\delta_{12(\text{пред})}$.

Здесь принято

$$K_{J(A,B)} = \frac{T_{J(A)}}{T_{J(B)}}, \quad (18)$$

$$T_{J(A)} = 2T_{J(\Gamma 1)} \frac{S_{H(\Gamma 1)}}{S_{\bar{\sigma}}} (c); \quad T_{J(B)} = T_{J(\Gamma 3)} \frac{S_{H(\Gamma 3)}}{S_{\bar{\sigma}}} (c) \quad (19)$$

– эквивалентные постоянные инерции станций, приведенные к базисным условиям.

Вторая часть первого раздела выполняется при условии, что на генераторах станций «А» и «Б» установлены регуляторы сильного действия. В приближенных расчетах действие указанных АРВ учитывается тем, что соответствующие генераторы представляются в схеме замещения параметрами $U_{\Gamma} = \text{const}$ и $X_{\Gamma} = 0$. Вся ранее приведенная последовательность расчетов остается в силе, только в расчетных выражениях переходные ЭДС необходимо заменить на напряжения соответствующих генераторов, рассчитанных по выражениям, аналогичным (2).

В конце раздела необходимо сделать выводы с объяснением полученных результатов.

4.2. Расчет предельного угла и времени отключения КЗ для одномашинной системы

Условием динамической устойчивости одномашинной системы является неравенство $F_{\text{в.тор}} \geq F_{\text{уск}}$,

где $F_{\text{в.тор}}$ – площадь возможного торможения; $F_{\text{уск}}$ – площадь ускорения.

Предельному углу отключения КЗ с точки зрения сохранения динамической устойчивости соответствует условие $F_{\text{в.тор}} = F_{\text{уск}}$.

Указанные площади находят из характеристик электромагнитной мощности генераторов станции «А», соответствующих различным условиям работы внешней сети.

В приближенных расчетах в течение всего динамического перехода генераторы учитываются параметрами $E' = \text{const}$ и X'_d .

В этих условиях, при неучёте активных сопротивлений элементов сети характеристики электромагнитной мощности генераторов станции «А» будут описываться выражением

$$P_{1(i)} = \frac{E_{1(0)} U_H}{X_{c(i)}} \sin \delta, \quad (20)$$

в котором $X_{c(i)}$ для каждого i -того режима будет индивидуальным, а величины $E'_{1(0)}$ остаются такими же, что и в нормальном режиме.

В нормальном режиме генераторы станции «А» работают на шины неизменного напряжения и частоты ($U_H = const$, $\omega = const$), передавая активную мощность P_{10} через Т1, Т2, двухцепную ЛЭП и Т4. Поэтому параметры для характеристики нормального режима можно позаимствовать из раздела № 1: $E'_{1(0)}$, U_H , $X_{c(1)} = X_{c1}$. Перед построением характеристики нормального режима необходимо осуществить контрольную проверку: при подстановке в (3) $\delta = \delta_{1(0)}$ передаваемая мощность $P_{1(1)}$ должна быть равна P_{10} .

Для построения характеристики электромагнитной мощности генератора $P_{1(II)}(\delta)$ в аварийном режиме необходимо рассчитать сопротивление связи $X_{c(II)}$ между точками приложения \underline{E}'_1 и \underline{U}_H , соответствующее этому режиму.

Это сопротивление находится из схемы замещения аварийного режима (двухфазного КЗ на землю на одной из цепей ЛЭП). Указанная схема представляет собой схему нормального режима, в которой в точке КЗ подключен поперечный (между точкой КЗ и землей) шунт

$$X_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} \quad (21)$$

где $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ – результирующие сопротивления схем обратной и нулевой последовательностей, рассчитанные относительно клемм «КЗ» – «Земля».

Схема замещения обратной последовательности по конфигурации полностью совпадает со схемой прямой последовательности с тем отличием, что в ней генератор представлен реактансом обратной последовательности X_2 , точки приложения \underline{E}'_1 и \underline{U}_H имеют нулевой потенциал, в точке КЗ приложено напряжение обратной последовательности $\underline{U}_{2к}$. Посредством простых преобразований этой схемы определяется $X_{2\Sigma}$.

В схему нулевой последовательности входят сопротивления элементов Т1, Т2, ЛЭП, Т4. Вторичные по отношению к точке КЗ обмотки трансформаторов Т1, Т2 заземлены, а в точке КЗ приложено напряжение нулевой последовательности $U_{0к}$ (рис.3).

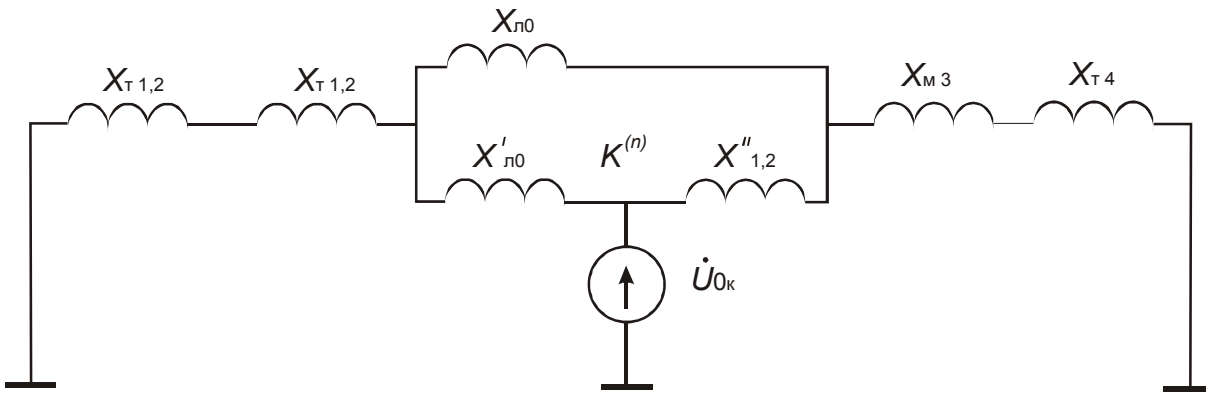


Рис. 3. Схема замещения нулевой последовательности к разделу 4.2

Особое внимание необходимо обратить на схему замещения нулевой последовательности двухцепной линии электропередачи с взаимной индуктивностью между цепями [6, с. 278-281; 7, задача 4-4].

Если через $X_{л}$ обозначить сопротивление прямой последовательности одноцепной ЛЭП в относительных единицах, то согласно условиям задания параметры ЛЭП на схеме рис.3 определяются как

$$X_{л0} = (3,5 - 3 \cdot 0,66) X_{л}; \quad X'_{л0} = X_{л0} \cdot (L_k/L); \quad X''_{л0} = X_{л0} \cdot (1 - L_k/L); \quad (22)$$

$$X_{м1} = 3 \cdot 0,66 X_{л} (L_k/L); \quad X_{м2} = 3 \cdot 0,66 X_{л} (1 - L_k/L). \quad (23)$$

Преобразовав треугольник сопротивлений $X_{л0}$, $X'_{л0}$, $X''_{л0}$ в эквивалентную звезду несложно определить $X_{0\Sigma}$.

Приведенные формулы позволяют рассчитать параметры схемы замещения аварийного режима. По этой схеме определяется сопротивление связи $X_{с(II)}$ между точками приложения $E'_{1(0)}$ и $U_{н}$.

Послеаварийному режиму соответствует отключение поврежденной цепи ЛЭП, поэтому схема замещения получается аналогичной схеме нормального режима, с тем отличием, что сопротивление ЛЭП будет в два раза больше. Из указанной схемы определяется $X_{с(III)}$, что позволяет построить угловую характеристику мощности генератора $P_{1(III)}(\delta)$ для послеаварийного режима.

Предельный угол отключения КЗ определяется по выражению

$$\cos \delta_{отк} = \frac{P_{10}(\delta_{кр}^{\circ} - \delta_0^{\circ}) \frac{\pi}{180} + P_{1m(III)} \cos \delta_{кр} - P_{1m(II)} \cos \delta_0}{P_{1m(III)} - P_{1m(II)}}, \quad (24)$$

где $P_{1m(II)}$, $P_{1m(III)}$ – максимальные значения электромагнитной мощности;

$$\delta_{\text{кр}}^{\circ} = 180^{\circ} - \arcsin \frac{P_{10}}{P_{1m(\text{III})}}. \quad (25)$$

Время ($t_{\text{отк}}$) отключения КЗ, соответствующее предельному углу отключения, определяется из зависимости $\delta = f(t)$, представляющей собой решение дифференциального уравнения движения роторов генераторов станции «А». Это решение может быть найдено одним из численных методов, например, методом последовательных интервалов.

Согласно методу последовательных интервалов весь процесс движения генераторов во времени разбивается на ряд равных промежутков $\Delta t = (0,02 \dots 0,05)$ с и далее ведется расчет в такой последовательности.

Первый интервал времени

Определяется избыток мощности, действующий в начале интервала

$$\Delta P_{(0)} = P_{10} - P_{m(\text{II})} \sin \delta_0.$$

Рассчитывается приращение угла за интервал (в эл. градусах).

$$\Delta \delta_{(1)} = K \Delta P_{(0)} / 2, \quad (26)$$

где $K = 18000 \Delta t^2 / T_{J(\text{A})}$.

Значения времени Δt и постоянной инерции $T_{J(\text{A})}$ выражены в секундах, мощность (избыток мощности) - в отн. ед.

Определяются значения угла и времени в конце интервала

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)}; \quad (27)$$

$$t_{(1)} = t_{(0)} + \Delta t.$$

Второй интервал времени

$$\Delta P_{(1)} = P_{10} - P_{m(\text{II})} \sin \delta_{(1)}; \quad (28)$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \Delta P_{(1)}; \quad (29)$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)}; \quad (30)$$

$$t_{(1)} = t_{(0)} + \Delta t.$$

Формулы для третьего и последующих интервалов аналогичны формулам для второго интервала.

Полученные значения угла $\delta_{(i)}$ и времени $t_{(i)}$ позволяют по точкам построить искомую зависимость $\delta = f(t)$.

4.3. Расчет устойчивости динамического перехода

Согласно условиям раздела 3 на оставшейся в работе цепи ВЛ происходит однофазное КЗ, которое ликвидируется отключением поврежденной фазы. С некоторой выдержкой времени происходит успешное повторное включение этой фазы и схема возвращается в исходное состояние. Необходимо ответить на вопрос: сохраняется ли в этих условиях динамическая устойчивость станции? Ответ зависит от соотношения площадей ускорения и возможного торможения, определяемых по характеристикам электромагнитной мощности.

В случае превышения площади возможного торможения над площадью ускорения угол δ , нарастающий на начальной стадии переходного режима, с некоторого момента времени (при $\delta = \delta_{\max}$) будет уменьшаться. Это является признаком сохранения синхронизма генераторов на первом цикле качаний. Для одномашинных энергосистем, как правило, синхронизм сохраняется и на последующих циклах. В сложных энергосистемах выпадение генераторов из синхронизма на последующих циклах качаний наблюдается достаточно часто.

Характеристики электромагнитной мощности для всех режимов работы внешней сети описываются уравнением (3), в котором $E'_{1(0)}$ и U_n остаются неизменными, а $X_{c(i)}$ для каждого режима вычисляется отдельно.

Для нормального (ремонтного) режима сопротивление $X_{c(I)}$ подсчитывается по выражению (1), в котором $X_{л}$ увеличено в два раза. Далее рассчитывается вектор переходной ЭДС по выражению (2), в котором $X_{c(1)}$ заменяется на $X_{c(I)}$. Здесь часто допускается ошибка, когда значение вектора $E'_{1(0)}$ автоматически заимствуют из разделов 1, 2.

По схеме замещения аварийного режима определяется сопротивление $X_{c(II)}$. При этом поперечный шунт в месте $K^{(1)}$ определяется выражением

$$X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}. \quad (31)$$

В схеме замещения нулевой последовательности для одноцепной ЛЭП следует принять $X_{л(0)} = 3,5 X_{л}$ где $X_{л}$ – сопротивление прямой последовательности.

В схеме замещения неполнофазного режима по месту разрыва фазы (между $X_{л}$ и $X_{т4}$, либо между $X_{л}$ и $X_{т1,2}$ включается добавочное сопротивление

$$X_{\Delta}^{(H)} = X_{2\Sigma}^{(H)} X_{0\Sigma}^{(H)} / (X_{2\Sigma}^{(H)} + X_{0\Sigma}^{(H)}), \quad (32)$$

где $X_{2\Sigma}^{(H)}, X_{0\Sigma}^{(H)}$ – результирующие сопротивления схем обратной и нулевой последовательностей. Отметим, что указанные сопротивления не равны аналогичным сопротивлениям при КЗ.

В частности, схема замещения обратной последовательности изображена на рис.4. Генераторы введены сопротивлением обратной последовательности, все прочие элементы – сопротивлениями прямой последовательности.

Непосредственно из схемы (рис.4) имеем

$$X_{2\Sigma}^{(H)} = X_{T1,2} + X_{T1,2} + X_{л} + X_{T4}. \quad (33)$$

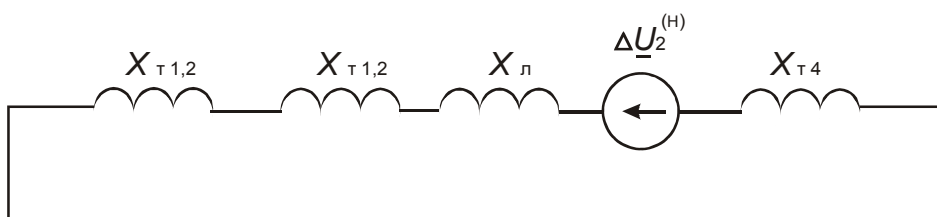


Рис.4. Схема замещения обратной последовательности к разделу 4.3.

Схема нулевой последовательности аналогична схеме, показанной на рис.4, с тем отличием, что отсутствует $X_{T1,2}$, а $X_{л0} = 3,5 X_{л}$.

Из схемы замещения неполнофазного режима определяется сопротивление связи $X_{c(III)} = X_{c(I)} + X_{\Delta}^{(H)}$, (34)

что позволяет построить соответствующую характеристику электромагнитной мощности $P_{1(III)}(\delta)$. Как правило $P_{m(III)} > P_{m(II)}$, однако возможны случаи, когда характеристика III располагается ниже характеристики II.

Следующий этап сводится к расчету углов коммутации. Таких углов три. Первый угол δ_0 , при котором в момент КЗ ($t=0$) происходит переход работы генераторов с характеристики нормального режима (I) на характеристику аварийного режима (II). Этот угол известен и заимствуется из расчета вектора переходной ЭДС для нормального режима

$$E'_{1(0)} = E'_{1(0)} \exp j \delta_0. \quad (35)$$

На протяжении времени $\Delta t_{кз}$ происходит изменение электромагнитной мощности по характеристике аварийного режима с последующим переходом (при угле отключения $\delta_{от.кз.}$) на характеристику неполнофазного режима. Этот угол находится из зависимости $\delta = f(t)$, рассчитываемой методом последовательных интервалов по характеристике аварийного режима.

С момента $t = \Delta t_{кз}$ и угла $\delta_{от.кз.}$ на интервале времени $\Delta t_{АПВ}$ электромагнитная мощность определяется по характеристике неполнофазного режима. По истечении этого времени происходит переход на характеристику нормального режима при угле $\delta_{АПВ}$. Этот угол находится из продолжения зависимости $\delta = f(t)$, построенной для неполнофазного режима. Отметим, что при расчете приращения угла $\Delta\delta$ на первом интервале движения в неполнофазном режиме значение избытка мощности, используемого в формуле, аналогичной (5), определяется как среднее арифметическое избытков мощности по характеристикам II и III при угле $\delta_{от.кз.}$ [2, с.85], т.е.

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{II} + \Delta P_{III}}{2}, \quad (36)$$

где $\Delta P_{II} = P_{10} - P_{1m(II)} \sin \delta_{от.кз.}$; $\Delta P_{III} = P_{10} - P_{1m(III)} \sin \delta_{от.кз.}$.

При переходе на характеристику нормального режима избыток мощности определяется аналогично. Максимальным (критическим) с точки зрения сохранения динамической устойчивости системы при движении по характеристике I является угол $\delta_{кр} = 180^\circ - \delta_0$.

Построив характеристики электромагнитной мощности (I, II, III) и отложив углы коммутации δ_0 , $\delta_{от.кз.}$, $\delta_{АПВ}$ и $\delta_{кр}$ можно выделить и рассчитать суммарные площади ускорения, торможения и площадь возможного торможения. Поскольку в общем случае нам известны начальные и конечные углы ($\delta_{j(н)}$ и $\delta_{j(к)}$) участков этих площадей, то можно рекомендовать общую формулу для их вычисления

$$F_j = \int_{\delta_{j(н)}}^{\delta_{j(к)}} (P_0 - P_{m(i)} \sin \delta) d\delta = P_0(\delta_{j(к)} - \delta_{j(н)}) + P_{m(i)}(\cos \delta_{j(к)} - \cos \delta_{j(н)}), \quad (37)$$

где i – номер режима, j – номер участка площади.

Следует иметь в виду, что в каждом режиме возможно наличие и положительных и отрицательных участков площади, т.е. может наблюдаться и ускорение, и торможение роторов генераторов рассматриваемой станции. Вопрос об успешности динамического перехода, т.е. о сохранении или нарушении устойчивости динамического перехода решается путем выявления наличия запасной площади торможения.

4.3. Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости системы (исследовательская часть)

Основные средства повышения статической устойчивости энергосистем достаточно подробно изложены в [4, глава 18]. Не ущемляя творческой самостоятельности студентов, укажем кратко возможные способы решения поставленной задачи.

При упрощенном учете регуляторов возбуждения сильного действия предел статической устойчивости одномашинной энергосистемы определяется выражением

$$P_m = \frac{U_G U_H}{X_c} \quad (38)$$

и, следовательно, увеличение P_m возможно увеличением U_G , U_H или уменьшением X_c .

Увеличение U_G практически в настоящее время ограничено электрической прочностью и габаритами (стоимостью) генераторов.

Увеличение напряжения на шинах приемной системы U_H возможно.

Другие средства повышения P_m связаны со снижением X_c . Сопротивление связи X_c состоит из $X_{T1,2}$, X_L , X_{T4} .

Приведенные к базисным условиям сопротивления трансформаторов X_T не зависят от номинальных напряжений их обмоток, а для ЛЭП сопротивление

$$X_{L*} = X_{L(ОМ)} \frac{S_б}{U_{(НОМ)}^2} \quad (39)$$

обратно пропорционально квадрату номинального напряжения.

При заданных $X_{T1,2}$, X_{T4} можно подсчитать требуемое увеличение номинального напряжения ЛЭП, косвенно снижающее сопротивление X_c .

Прямым средством снижения X_L является расщепление проводов.

Снижения X_c можно достичь установкой устройств продольной и поперечной емкостной компенсации. Причем одно и то же снижение X_c достигается при различных значениях мощности устройств продольной и поперечной компенсации, что предполагает их оценочное сравнение.

Студенту необходимо остановиться на одном из возможных средств повышения и привести необходимые числовые расчеты, проявив элемент исследования.

4.5. Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под статической устойчивостью электрической системы?
2. Как осуществляется учет АРВ пропорционального и сильного действия в приближенных расчетах статической устойчивости?
3. По каким параметрам ведется регулирование тока возбуждения генератора при наличии АРВ пропорционального или сильного действия?
4. Объясните механизм повышения предела статической устойчивости энергосистемы при использовании АРВ пропорционального и сильного действия.
5. Назовите средства повышения статической устойчивости энергосистемы и объясните механизм их действия.
6. Какими моделями (зависимостями) учитывается нагрузка при расчетах статической устойчивости?
7. По какому практическому критерию определяется статическая устойчивость одномашинной энергосистемы?
8. По какому практическому критерию определяется статическая устойчивость двухмашинной энергосистемы?
9. Как определяются собственные и взаимные сопротивления по схемам замещения одномашинной и двухмашинной энергосистем?
10. Назовите составляющие дифференциального уравнения движения ротора генератора.
11. Поясните разницу понятий «предел мощности» и «предел статической устойчивости».
12. Влияют ли постоянные инерции генераторов на пределы статической устойчивости одномашинной и двухмашинной энергосистем?
13. Как определяются коэффициенты запаса статической устойчивости двухмашинной энергосистемы?
14. По какому выражению вычисляется синхронизирующая мощность для одномашинной энергосистемы?
15. Что понимается под динамической устойчивостью электрической системы?
16. Почему в расчетах электромеханических переходных процессов генераторы учитываются переходными ЭДС?
17. Почему расчет электромеханических переходных процессов ведется только исходя из учета действия токов прямой последовательности?
18. Сформулируйте критерий динамической устойчивости одномашинной системы.
19. Из каких условий определяется предельный угол отключения КЗ?

20. Поясните основные фрагменты метода последовательных интервалов.
21. Чему равно сопротивление шунта при однофазном, двухфазном и двухфазном КЗ на землю?
22. Чему равно дополнительное сопротивление в схеме замещения при отключении одной и двух фаз ЛЭП?
23. Как рассчитывается предельное время отключения КЗ?
24. Как влияют величины постоянных инерции генераторов на динамическую устойчивость энергосистем?
25. Каким образом, не прибегая к расчету площадей ускорения и торможения, можно выявить нарушение динамической устойчивости системы?

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1 Литература обязательная

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М: Высшая школа, 1985.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979.

6.2 Литература дополнительная

3. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. Веникова В.А. – М.: Энергия, 1983.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978.
5. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

6.3 Учебно-методические пособия

6. Хрущев Ю.В. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. Лабораторный практикум. – Томск: Изд. ТПУ, 2002.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рабочая программа, методические указания и задания на курсовую работу

Составители: Юрий Васильевич Хрущев,
Владимир Иванович Готман

Рецензент: Борис Владимирович Лукутин

Подписано к печати
Формат 60x84/16. Бумага ксероксная.
Тираж экз. Заказ Цена свободная.
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.94.
Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина,30.