

На правах рукописи

Москвин Илья Александрович



**УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2014

Работа выполнена в ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент **Голов Валерий Павлович**

Официальные оппоненты:

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, Нижегородское предприятие магистральных электрических сетей – филиал ОАО «ФСК ЕЭС», директор;

Серов Вячеслав Ананьевич, кандидат технических наук, доцент, представительство ОАО «СО ЕЭС» в Ивановской области, ведущий эксперт

Ведущая организация

ОАО Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «Энергосетьпроект», г. Москва

Защита состоится «27» июня 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01, созданного при ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61 факс: (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.

Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Moskvin_01-04-2014.pdf

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время режимы работы электроэнергетической системы (ЭЭС) России характеризуются существенным изменением потоков мощности по дальним линиям электропередачи сверхвысокого напряжения (ДЛЭП СВН). Этот факт, а также все возрастающие трудности по отводу земли под строительство новых линий электропередачи (ЛЭП) требуют повышения их управляемости и пропускной способности. Необходимость обеспечения эффективности и надежности функционирования электроэнергетической системы в данных условиях предъявляет повышенные требования к обеспечению и повышению пределов ее статической и динамической устойчивости, а также повышению пределов передаваемой мощности ЛЭП СВН.

Установка на линии продольной ёмкостной компенсации (УПК) приводит к уменьшению эквивалентного волнового сопротивления и эквивалентной волновой длины, что позволяет существенно улучшить естественные параметры линии. В случае выполнения равномерно распределенной продольной компенсации возможно ее применение без шунтирующих реакторов. Однако такое решение нереально. Поэтому установки продольной компенсации, исходя из требований обеспечения допустимых уровней напряжения, всегда применяются в сочетании с шунтирующими реакторами. Кроме того, в ряде случаев это позволяет повысить эффективность продольной компенсации. Принципиально использование продольной компенсации позволяет передать любую мощность на любое расстояние. Но обычно решение ограничено технико-экономическими соображениями. Исследованию устройств и характеристик компенсированных электропередач, а также оптимизации их параметров и режимов было посвящено большое количество работ таких ученых, как В. А. Веников, Л. Г. Мамиконянц, В. А. Строев, Г. Н. Александров, А. А. Рагозин, Ю. Г. Шакарян, С. В. Смолоник и др. Основными выводами этих исследований являются: нецелесообразность настройки линий на нулевую длину и признание допустимой степени компенсации, не превышающей 50 %. Последнее обосновывается существенным возрастанием токов короткого замыкания, ухудшением КПД передачи, значительным ростом мощности конденсаторов и реакторов, трудностями осуществления релейной защиты, ухудшением режима по напряжению, опасностью возникновения самовозбуждения и самораскачивания и рядом других факторов. Следует отметить, что именно с проблем, возникающих при продольной компенсации индуктивного сопротивления линий свыше 50 %, за рубежом зародилась технология гибких систем передачи переменного тока.

Находящиеся в эксплуатации установки продольной компенсации показали их высокую надежность и эффективность для повышения пропускной способности и устойчивости. Надежность УПК достигла уровня таких элементов, как выключатель, трансформатор, линия и т.д.

Важность и актуальность требований к увеличению пропускной способности линий высокого напряжения, к решению проблемы компенсации реактивной мощности в современных ЭЭС и к увеличению пределов устойчивости системы привели к развитию теории управляемых электропередач или так называемых активно-адаптивных сетей. К устройствам, на основе которых строятся данные

сети, кроме прочего, относятся управляемые устройства продольной компенсации (УУПК).

Мировая практика насчитывает как минимум два вида УУПК с плавным регулированием:

- тиристорные установки продольной компенсации (ТУПК) на основе схемы, предусматривающей регулирование тока в реакторе с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров, получившей в англоязычной литературе название Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC);
- УПК на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов (УПКС), получивших в англоязычной литературе название Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

Кроме того, существуют специальные ёмкостные элементы, имеющие рассматриваемую в данном исследовании зависимость ёмкостного сопротивления от тока линии.

Наибольшее распространение на данный момент получили ТУПК, ввиду относительно низкой стоимости и простой схемы установки. Имеется возможность перехода в индуктивный режим («антикомпенсации») без физического явления резонанса в LC-контуре, что может быть действенным средством ограничения токов короткого замыкания. УПКС имеет более высокое быстродействие, что положительно влияет на систему в переходных режимах, однако их стоимость и потери выше. Следует также отметить, что при одинаковой степени компенсации ёмкость конденсаторных батарей может быть значительно ниже в случае УПКС, как и ток через конденсаторы и вентили. В целом УПКС является более подходящим решением для регулируемой продольной компенсации. Зачастую УПК разбивается на две части, одна из которых управляемая, а другая неуправляемая. В последнее время предлагается к использованию так называемая «гибридная» схема продольной компенсации, при которой блок УПК с управляемой частью включается в одну фазу, а две другие имеют постоянную степень компенсации. Данная схема экономически более выгодна, чем при использовании ТУПК или УПКС во всех трех фазах. Кроме того уменьшение в три раза тиристорных вентилях и другого регулирующего оборудования положительно сказывается на надёжности схемы. В состав УУПК включены все необходимые защиты: от повышения напряжения на выходных зажимах устройства, от превышения тока, протекающего через конденсаторы, а также защита, действующая на ограничение сопротивления $X_{УПК}$ или его обращение в ноль.

Регулируемые УПК позволяют не только увеличивать пропускную способность ЛЭП, но и положительно влияют на устойчивость системы в целом. Кроме того, УУПК способно поддерживать напряжения в узлах сети в допустимых пределах при малых перетоках мощности.

В последнее время актуальность данной работы возросла в связи с появлением необходимости выдачи больших потоков мощности с крупных электростанций, например с Саяно-Шушенской ГЭС. Кроме того, главным условием надёжности функционирования ЭЭС является обеспечение статической и динамической устойчивости. В последние годы произошло снижение запаса статической устойчивости из-за отставания ввода новых генерирующих мощностей, а

также выбытия отработавшего свой ресурс оборудования на фоне роста потребления электроэнергии.

Целью настоящей работы является исследование пропускной способности ЛЭП и устойчивости ЭЭС с регулируемой продольной компенсацией.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Формирование математической модели электроэнергетической системы из двух электростанций с УУПК.
2. Исследование характеристик установившихся режимов исследуемой ЭЭС при различных законах регулирования УПК.
3. Анализ влияния регулируемого УПК на апериодическую и колебательную статическую устойчивость ЭЭС.
4. Формирование методики определения областей устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от параметров регулируемого УПК.
5. Анализ влияния характеристик УПК на показатели динамической устойчивости.
6. Выбор параметров закона регулирования УПК с учетом возможных ограничений при сохранении положительного влияния УУПК.

Основные методы научных исследований. Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования, а именно: методы математического моделирования электроэнергетических систем, методы совместного решения дифференциальных и алгебраических уравнений, а также систем нелинейных уравнений (численные методы), методы анализа устойчивости ЭЭС, вычислительный эксперимент.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработаны математические модели электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемым устройством продольной компенсации, позволяющие проводить расчеты как установившихся, так и переходных режимов, анализ статической и динамической устойчивости.
2. Разработана методика определения областей устойчивости исследуемой электроэнергетической системы по параметру регулирования УПК.
3. Предложен подход к выбору характеристики регулирования УПК, позволяющий сохранить возможности улучшения статической и динамической устойчивости без колебательных нарушений статической устойчивости.
4. Доказана возможность использования повышенной степени продольной компенсации за счет ее регулирования без нарушения устойчивости ЭЭС.
5. Выявлена возможность нарушения колебательной статической устойчивости исследуемой ЭЭС при улучшении апериодической статической и динамической устойчивости. Данное нарушение устраняется выбором характеристики УПК с использованием предложенной методики определения областей устойчивости.

Достоверность результатов обеспечивается за счет корректного применения теории электромеханических переходных процессов, численных методов и методов математического моделирования и подтверждаются их совпадением с

результатами, полученными с применением других методик и программных продуктов, а также сравнением результатов расчетов по моделям различной степени детализации.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Соответствие диссертации формуле специальности: «...проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической... базы электроэнергетики с целью... ее транспортировки... в необходимом для потребителей количестве...».

Соответствие диссертации области исследования специальности:

- п. 6: «Разработка методов математического... моделирования в электроэнергетике»;
- п. 7: «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем»;
- п. 10: «Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным... током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов».

Практическая ценность. Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны и внедрены программы расчета установившихся и переходных режимов, а также программа утяжеления режима исследуемой ЭЭС.
2. Выработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров закона регулирования УПК в целях улучшения устойчивости ЭЭС.
3. Предложена методика определения областей устойчивости исследуемой ЭЭС по параметру регулирования УПК.
4. Выводы и результаты, сделанные в работе, могут использоваться для создания реальных устройств регулирования УПК с необходимыми характеристиками.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета на кафедре «Электрические системы», а также могут быть использованы при проектных и проектно-изыскательских работах в области электроэнергетики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель ЭЭС, состоящей из двух генераторных станций, с регулируемым УПК, используемая для анализа влияния компенсации рассматриваемого типа на установившиеся и переходные режимы.
2. Требования к параметрам закона регулирования УПК для стационарных и переходных режимов, обеспечивающие увеличение пропускной способности и улучшение устойчивости исследуемой системы без резонансных переходов и колебательного нарушения устойчивости.
3. Методика определения областей устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от параметров регулируемого УПК.

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и конкретных задач исследования, разработке математических моделей, формировании алгоритмов и программ расчета переходного процесса, установившегося режима и программы утяжеления режимов для исследования влияния регулируемого УПК

на переходные и стационарные режимы, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- на региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ – 2010», «ЭНЕРГИЯ – 2011», «ЭНЕРГИЯ – 2012» (г. Иваново, ИГЭУ);
- на международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ – 2013» (г. Иваново, ИГЭУ);
- на международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения)» (г. Иваново, ИГЭУ).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 11 работах: 4-х научных статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, а также в 7 тезисах докладов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 75 наименований. Основной текст включает 125 страниц, содержит 39 рисунка, 2 таблицы и два приложения.

Работа выполнялась в рамках государственного задания высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дается общая характеристика работы.

В первой главе представлена математическая модель исследуемой ЭЭС, которая состоит из двух электростанций, представленных эквивалентными генераторами, работающими на общую нагрузку, и связанных линией электропередачи, имеющей регулируемое УПК (рисунок 1). На рисунке 2 представлена схема замещения исследуемой ЭЭС.

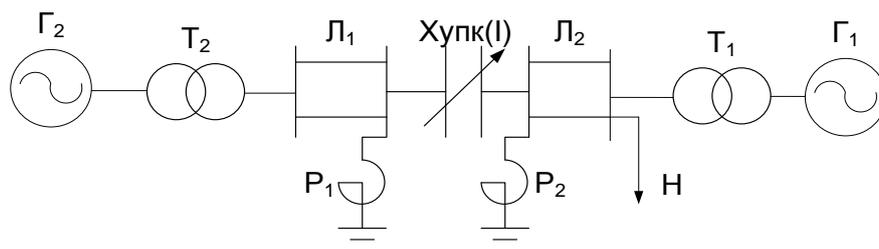


Рисунок 1 – Исследуемая электроэнергетическая система

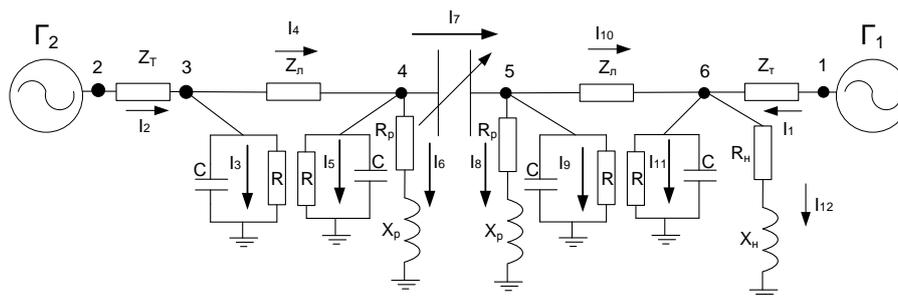


Рисунок 2 – Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Такое представление электрической системы дает возможность анализировать влияние регулируемого УПК на установившиеся режимы, переходные процессы и устойчивость исследуемой системы, позволяя тем самым формулировать основные требования к характеристикам регулируемого УПК и системам их управления. Кроме того, все выводы, сделанные для двухмашинной системы, могут быть распространены на электрические системы любой сложности.

Использована следующая формула функциональной зависимости сопротивления управляемой емкости от тока:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}, \quad (1)$$

где I – ток через УПК, о.е.;

$X_{\text{УПК}}(I)$ – сопротивление УПК, о.е.;

K_1, K_2 – коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{\text{УПК}}(I)$, определение которых является первоочередной задачей при проведении расчетов.

Данная аналитическая зависимость достаточно близка к реально возможной характеристике сопротивления регулируемого УПК и достаточно проста для анализа влияния регулируемого УПК на режимы и устойчивость исследуемой ЭЭС. С другой стороны, она является нелинейной функцией, крутизна которой в различных точках может легко изменяться с помощью соответствующего коэффициента (рисунок 3). Другими словами, данная зависимость удовлетворяет практическим и расчетным требованиям.

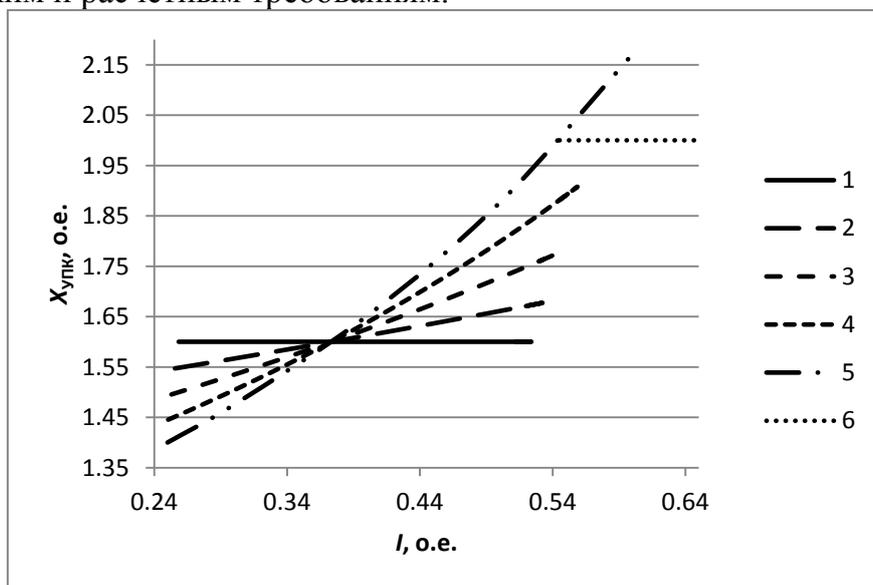


Рисунок 3 – Зависимость ёмкостного сопротивления от тока: прямая 1 – $K_2 = 0$; кривая 2 – $K_2 = 2$; кривая 3 – $K_2 = 4$; кривая 4 – $K_2 = 6$; кривая 5 – $K_2 = 8$; кривая 6 – при фиксировании $X_{\text{УПК}}(I)$

Основными элементами рассматриваемой ЭЭС являются: синхронные генераторы, трансформаторы, линия электропередачи, регулируемое в функции тока ёмкостное сопротивление УПК. Математическое описание ЭЭС составляется на основе уравнений для её отдельных элементов и связи их между собой. При составлении модели будем исходить из наиболее детального математического описания, позволяющего анализировать влияние различных факторов на результаты расчетов режимов.

Таким образом, полная математическая модель исследуемой ЭЭС состоит из 65 нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений (без учета автоматического регулирования возбуждения генераторов). Данная система является моделью, которая учитывает как электромагнитные переходные процессы в элементах ЭЭС, так и электромеханический переходный процесс. С помощью полученной модели ЭЭС возможно анализировать как переходные, так и установившиеся режимы.

Также в первой главе представлена компактная форма записи уравнений, описывающих ЭЭС, и рассмотрен алгоритм расчёта переходных электромеханических процессов в исследуемой системе.

Вторая глава посвящена исследованию установившихся режимов энергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации.

Расчет установившихся режимов системы выполнен по полной математической модели с помощью специально разработанной программы. Построение статических характеристик системы осуществлялось по программе утяжеления режимов, причем для выявления всех особенностей влияния регулируемого УПК на режимы и статические характеристики исследуемой системы утяжеление осуществлялось по различным режимным параметрам.

На рисунке 4 показана зависимость модуля падения напряжения в связи $|N(I)|$ для различных законов регулирования УПК. На рисунке 5 приведены угловые характеристики мощности.

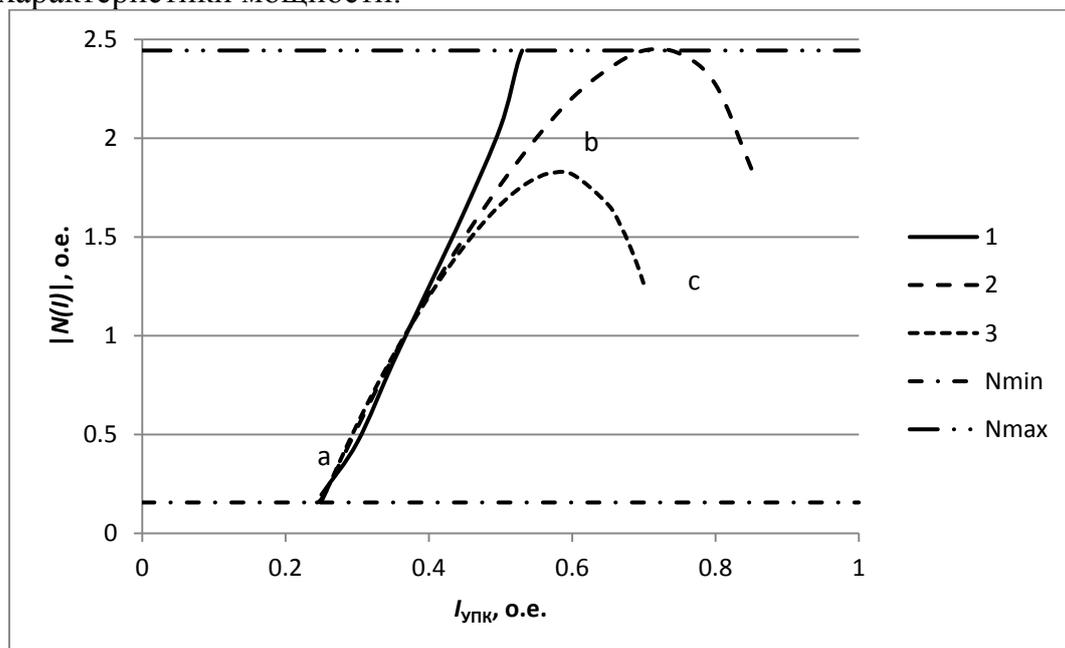


Рисунок 4 – Зависимости $|N(I)|$ для различных законов регулирования УПК: кривая 1 – $K_2 = 0$; кривая 2 – $K_2 = 9,3$; кривая 3 – $K_2 = 12$

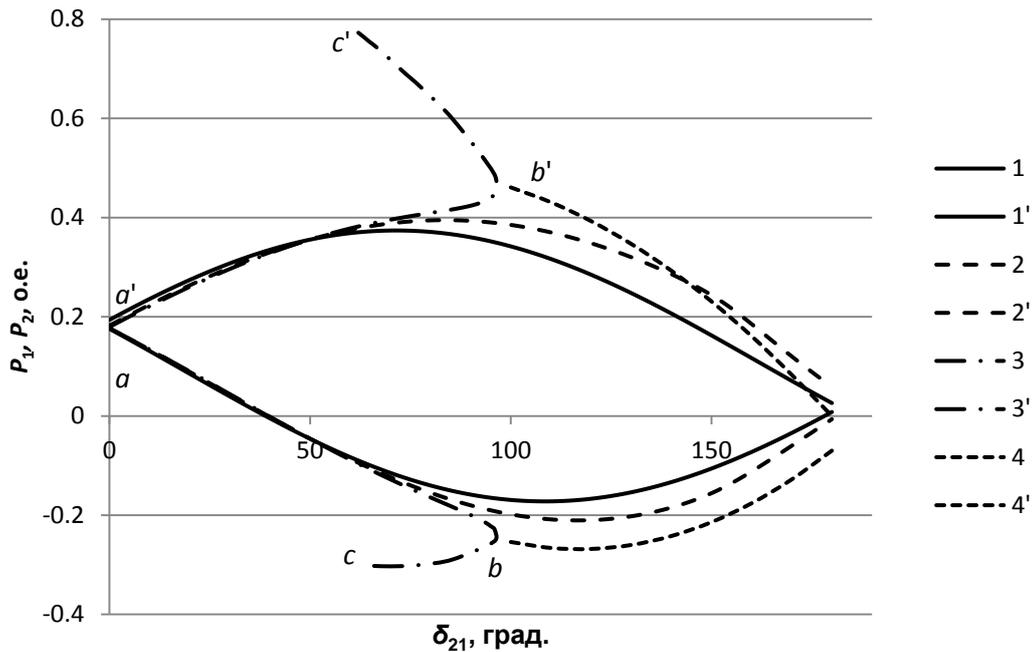


Рисунок 5 – Угловые характеристики активной мощности исследуемой системы: кривые 1, 1' – $K_2 = 0$; кривые 2, 2' – $K_2 = 9,3$; кривые 3, 3' – $K_2 = 12$; кривые 4, 4' – при фиксировании $X_{УПК}(I)$

Некоторые угловые характеристики имеют форму петли. Это обусловлено тем, что зависимость $|N(I)|$ определена не для всех значений N в диапазоне взаимных углов δ_{21} от 0° до 180° . Участку $a - b$ зависимости $|N(I)|$ соответствует участок $a - b$ петлеобразной угловой характеристики $P_1(\delta_{21})$ и $a' - b'$ характеристики $P_2(\delta_{21})$, а участку $b - c$ зависимости $|N(I)|$ – участки $b - c$ и $b' - c'$ характеристик $P_1(\delta_{21})$ и $P_2(\delta_{21})$ соответственно. Точки b и b' угловых характеристик соответствуют точке b зависимости $|N(I)|$. Значение экстремального тока зависимости $|N(I)|$ определяется из соотношения $\frac{\partial |N|}{\partial I} = 0$. Таким образом, зависимость модуля падения напряжения в связи $|N(I)|$ позволяет идентифицировать рабочие части угловых характеристик активной мощности генераторов, которые соответствуют условию $\frac{\partial |N|}{\partial I} > 0$. Угловые характеристики $P_1(\delta_{21})$ и $P_2(\delta_{21})$ показывают увеличение предельного по статической устойчивости взаимного угла δ_{21} в зависимости от закона регулирования сопротивления $X_{УПК}(I)$, а также увеличение предела передаваемой мощности по сравнению с нерегулируемым сопротивлением. Особый интерес представляет петлеобразный вид зависимостей $P_1(\delta_{21})$ и $P_2(\delta_{21})$, обусловленный, как отмечалось выше, тем, что ветвь $a - b - c$ зависимости $|N(I)|$ не достигает значения N_{\max} , соответствующего углу 180° между векторами ЭДС генераторов. Это явление имеет место в силу феррорезонансного характера зависимости $|N(I)|$. Однако этого можно избежать, если выбрать закон регулирования соответствующим образом, а именно: коэффициент при токе должен быть таким, чтобы зависимость $|N(I)|$ участком $a - b - c$ достигала значения N_{\max} . Если в некоторый момент времени отключать регулирование ёмкостного сопротивления (фиксировать $X_{УПК}$ при максимальном его значении, со-

ответствующем устойчивому режиму), можно значительно увеличить предел передаваемой мощности (кривые 4, 4' на рисунке 5). Проведенное изучение влияния закона управления регулируемого устройства продольной ёмкостной компенсации на характеристики установившихся режимов рассматриваемой электрической системы показало его эффективность в плане повышения пределов передаваемой мощности (около 30 % для каждой станции по сравнению с УПК обычного типа).

Анализ полученных статических характеристик свидетельствует, что система не критична к самому закону регулирования ёмкостного сопротивления в УПК. Другими словами, должна обеспечиваться возрастающая зависимость $X_{УПК}(I)$ с определенной крутизной, а конкретное математическое выражение может определяться возможной реализацией регулирующего устройства. Следует также отметить, что «нижние» ветви петлеобразных угловых характеристик являются рабочими частями характеристик для возможных рабочих режимов системы.

Анализ напряжений на выводах УПК показал нежелательность появления режимов с резонансными переходами, т.к. это ведёт к значительному превышению предельно допустимых значений напряжения в этих узлах. С другой стороны, наглядно проиллюстрирована способность регулируемого УПК поддерживать режимные параметры в заданных границах при передаче мощности, изменяющейся в широком диапазоне, особенно при малых перетоках мощности, что являлось существенным недостатком при использовании нерегулируемого УПК (рисунок 6).

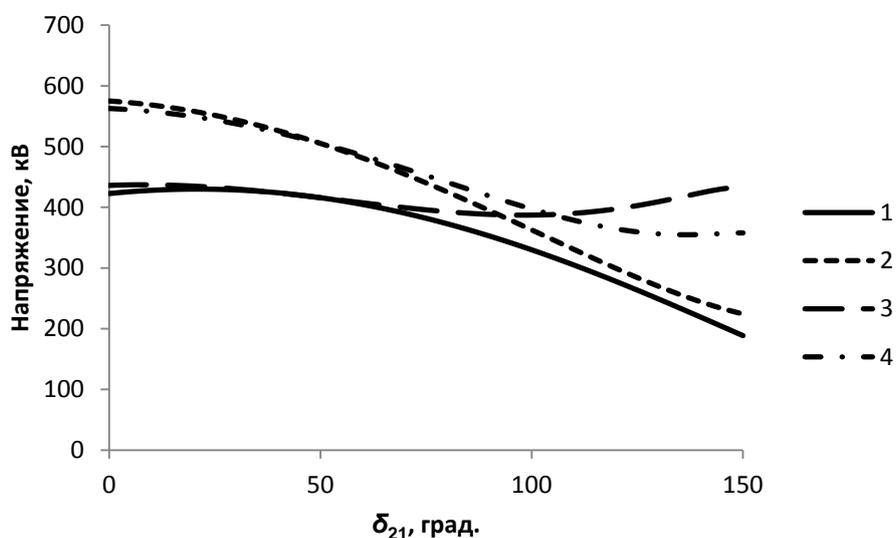


Рисунок 6 – Напряжения на выводах УПК: кривая 1 – U_4 без УУПК; кривая 2 – U_5 без УУПК; кривая 3 – U_4 с УУПК; кривая 4 – U_5 с УУПК

Кроме того, в данной главе рассмотрено использование УШР на выводах УПК в целях ограничения напряжения в узлах их подключения.

В третьей главе приведены результаты исследований аperiodической и колебательной статической устойчивости исследуемой ЭЭС.

Получено аналитическое выражение для свободного члена характеристического уравнения для анализа влияния компенсации рассматриваемого типа на апериодическую устойчивость системы:

$$a_4 = \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{21}} \right) \frac{\partial I}{\partial X_{\text{УПК}}} \frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I} - \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{\text{УПК}}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial X_{\text{УПК}}} \right) \frac{\partial I}{\partial \delta_{21}} \frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I} - \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{21}} \right). \quad (2)$$

На рисунке 7 приведены кривые изменения свободного члена характеристического уравнения для рассматриваемой системы. С увеличением коэффициента K_2 характеристики $X_{\text{УПК}}(I)$ смена знака свободного члена характеристического уравнения (2) происходит при больших значениях взаимного угла δ_{21} , что говорит о положительном влиянии регулируемого УПК на апериодическую статическую устойчивость системы. Анализ влияния закона регулирования ёмкости в УПК показал увеличение взаимного угла между векторами ЭДС генераторов по критерию сохранения апериодической статической устойчивости более чем на 30° .

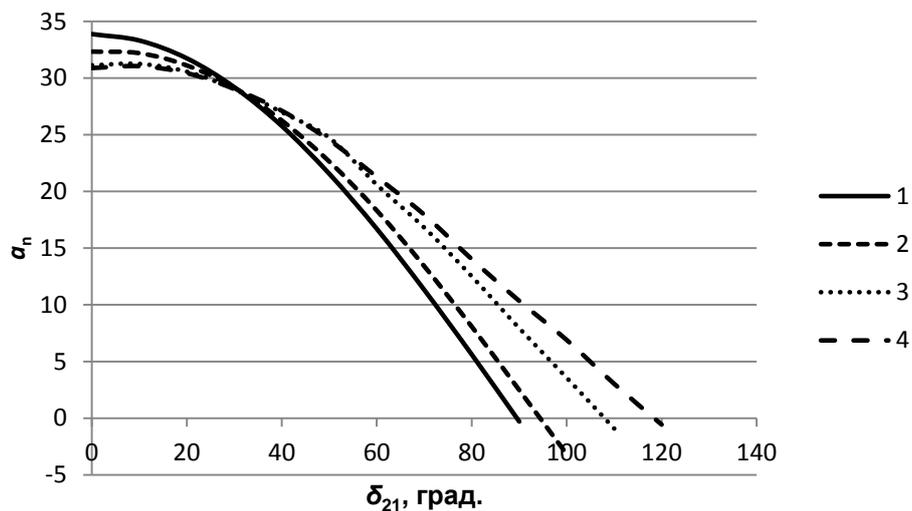


Рисунок 7 – Изменение значений свободного члена a_n характеристического уравнения рассматриваемой системы для различных законов регулирования

$X_{\text{УПК}}(I)$: кривая 1 – $X_{\text{УПК}}(I) = \text{const}$; кривая 2 – для закона регулирования $X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (32,9 - 4 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}$; кривая 3 – $X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (38,8 - 8 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}$; кривая 4 – $X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (40,26 - 9 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}$

Рассмотрено влияние изменения частоты на режимы и статическую апериодическую устойчивость исследуемой ЭЭС, в результате показана незначительность данного влияния.

Частные производные режимных параметров ЭЭС определялись численным методом с помощью отношений соответствующих приращений по полной математической модели.

Анализ колебательной статической устойчивости исследуемой системы проведен посредством вычислительного эксперимента при полном математическом моделировании. В ходе исследования последовательно увеличивалась сте-

пень компенсации и изменялся закон регулирования ёмкости в УПК посредством изменения коэффициента K_2 . При приближении к границе нарушения колебательной устойчивости в системе наблюдались процессы, представленные на рисунке 8. Это разновидность неустойчивости режима, проявляющаяся в виде самовозбуждения и самораскачивания, которые могут происходить совместно при увеличении степени продольной ёмкостной компенсации. АРВ сильного действия (АРВ СД) генераторов позволяет устранить колебания режимных параметров и значительно увеличить степень компенсации индуктивного сопротивления линии электропередачи без нарушения колебательной устойчивости. На рисунке 9 приведены те же кривые, с той же степенью компенсации и с тем же законом регулирования УПК, но с применением АРВ СД. На основании результатов исследования были определены границы устойчивости в зависимости от степени компенсации и параметров закона регулирования УПК (рисунок 10).

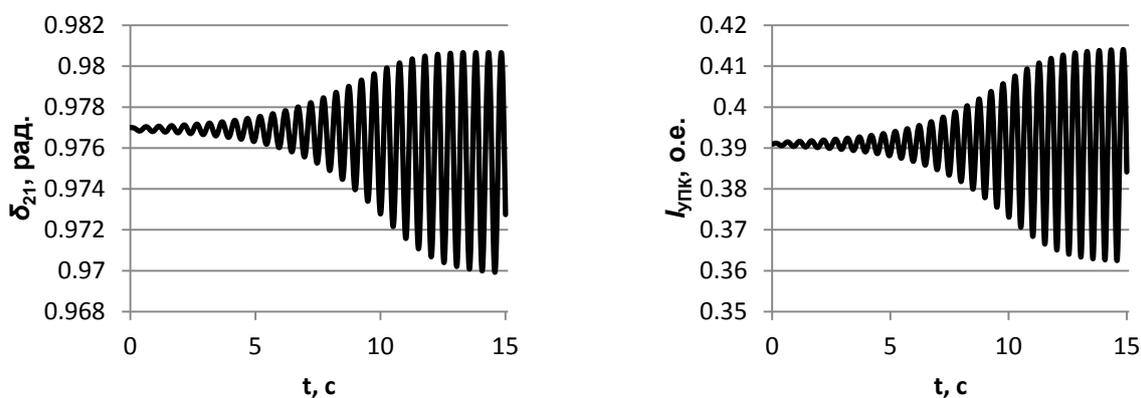


Рисунок 8 – Изменение взаимного угла между векторами ЭДС генераторов и тока через УПК по времени (степень компенсации 95 % от X_L , $K_2 = 4$)

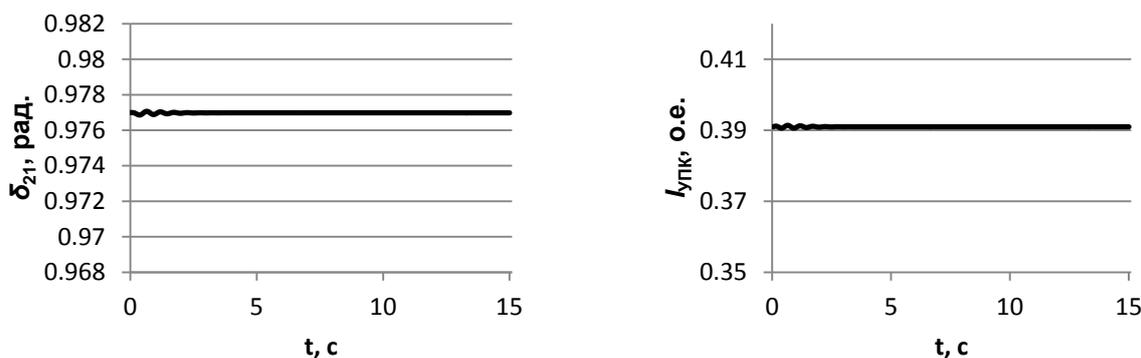


Рисунок 9 – Изменение взаимного угла между векторами ЭДС генераторов и тока через УПК по времени с учетом АРВ СД (степень компенсации 95 % от X_L , $K_2 = 4$)

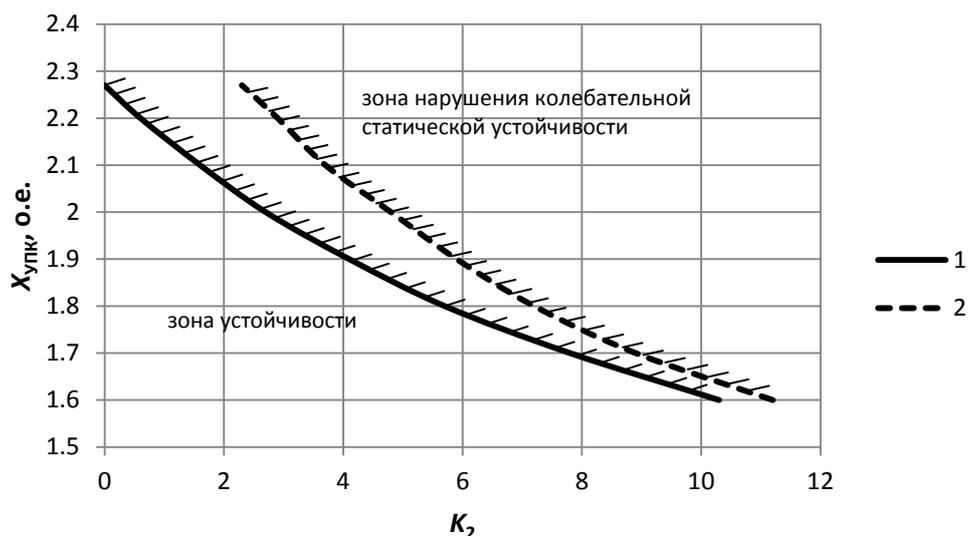


Рисунок 10 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС:
кривая 1 – без АРВ; кривая 2 – с АРВ СД

Из рисунка 10 видно, что при степени компенсации индуктивного сопротивления линии до 80 % ($X_{УПК} = 1,6$) с регулируемым УПК не наблюдается нарушения колебательной статической устойчивости во всем диапазоне возможных рабочих режимов, т.е. регулируемое УПК не приводит к появлению колебательной неустойчивости. Однако при значительных перетоках мощности ёмкостное сопротивление может принимать значение, близкое к границе зоны нарушения колебательной устойчивости. Имеет место противоречие в выборе параметров регулирования УПК с точки зрения улучшения аperiodической статической и динамической устойчивости, с одной стороны, и устранения явлений самовозбуждения и самораскачивания – с другой. Анализ предельных режимов показал, что такое отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость наблюдается при высоких значениях степени компенсации. Такая степень компенсации не применяется в практике эксплуатации электрических систем. Как показали исследования, даже при таких высоких степенях компенсации при совместном выборе законов регулирования управляемого УПК и АРВ можно устранить отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость. Эффект от АРВ, заключающийся в возможности увеличения степени продольной компенсации, составил 12,5 % (при $K_2 = 3$).

Вычислительный эксперимент позволяет точно определять диапазон изменения параметров регулирования УПК, которые не приводят к нарушению устойчивости исследуемой ЭЭС. Однако этот способ является достаточно трудоемким и требует значительных временных затрат. В связи с этим необходима методика, позволяющая достаточно просто, пусть и с некоторой потерей точности, определять возможные диапазоны варьирования параметров регулирования УПК, не приводящие к колебательным нарушениям устойчивости. Другими словами, необходим метод получения возможных значений K_2 , при которых наблюдается положительный эффект от регулируемого УПК на исследуемую ЭЭС, а именно: увеличение предела передаваемой мощности, улучшение аperiodиче-

ской статической и динамической устойчивости и нет отрицательного влияния на режим, т.е. не наблюдается колебательного нарушения устойчивости ЭЭС, вызванного самим законом регулирования УПК.

Сформирована упрощенная математическая модель исследуемой ЭЭС:

$$\begin{cases} T_{J1}p^2\delta_1 - D_1p\delta_{21} = P_{T1} - P'_{\Delta 1}, \\ T_{J2}p^2\delta_2 + D_2p\delta_{21} = P_{T2} - P_{\Delta 2}, \\ T_{d01}pE'_{q1} + E_{q1} = E_{qe1}, \\ T_{d02}pE'_{q2} + E_{q2} = E_{qe2}, \\ I = f(\delta_{21}, X_{\text{УПК}}, E_{q1}, E_{q2}), \\ X_{\text{УПК}} = f(I), \end{cases} \quad (3)$$

где I – ток через УПК.

После линеаризации системы (3) и ее преобразования составлен характеристический определитель и получено характеристическое уравнение четвертого порядка:

$$D(p) = a_0 \cdot p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p + a_4. \quad (4)$$

Запишем характеристическое уравнение (4) в следующем виде:

$$D(p) = D_0(p) + K_2 \cdot D_1(p) = 0. \quad (5)$$

Необходимо провести D -разбиение по оси K_2 . Используя метод D -разбиения по одному параметру (в нашем случае параметр – коэффициент K_2 регулирования УПК), можно определить диапазон его изменения, соответствующий сохранению устойчивости исследуемой ЭЭС. На рисунке 11 приведены области устойчивости исследуемой ЭЭС для исходного установившегося режима с исходной степенью продольной компенсации.

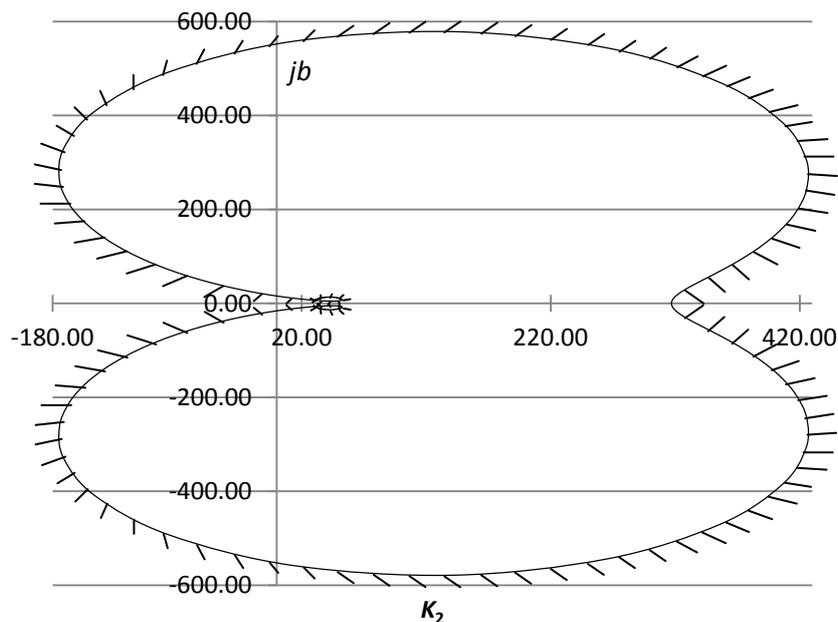


Рисунок 11 – Граница D -разбиения при $X_{\text{УПК}} = 1,6$ о.е.

Так как реальный смысл имеют только действительные положительные значения K_2 , то устойчивость исследуемой системы в точке исходного установившегося режима обеспечивается при следующих условиях:

$$0 < K_2 < 28.$$

В целях проверки полученного претендента на область устойчивости подставим K_2 из данной области в характеристическое уравнение и посчитаем корни. Для $K_2 = 10$ получили следующие корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -232,657; p_2 = -110,16; p_{3,4} = -0,549i \pm 5,008i.$$

Таким образом, получен диапазон изменения параметра регулируемого УПК, при котором сохраняется устойчивость исследуемой системы. Другими словами, получена методика определения диапазона изменения параметра регулируемого УПК в целях выбора его оптимального значения, позволяющего, с одной стороны, оказывать максимально положительный эффект на пропускную способность, статическую апериодическую и динамическую устойчивость, а с другой – не приводить к колебательному нарушению устойчивости.

Следует отметить, что при приближении режима исследуемой системы к границе колебательного нарушения устойчивости, т.е. с ростом степени продольной компенсации, диапазон изменения параметра K_2 сужается. Следует также заметить некоторое отличие полученных результатов при расчете по вышеуказанной методике и по полной модели (рисунок 10), что связано с допущениями, принятыми при составлении системы (3). Оптимальным алгоритмом является получение некоторого диапазона изменения параметра K_2 по упрощенной модели, а затем его проверка и уточнение при полном моделировании.

Показано, что при использовании регулируемого УПК не наблюдается колебательного нарушения устойчивости во всех возможных режимах и диапазонах регулирования со степенью компенсации, применяемой при эксплуатации ЭЭС. При увеличении степени компенсации вплоть до границы колебательного нарушения устойчивости отрицательное влияние закона регулирования УПК может быть устранено с помощью АРВ СД генераторов.

Четвертая глава посвящена исследованию динамической устойчивости и обеспечению требуемого качества переходных процессов исследуемой системы, содержащей две электростанции, связанные линией электропередачи с регулируемым устройством продольной компенсации. В ходе исследования были рассмотрены следующие вопросы:

1. Выявление особенностей расчета переходных процессов в электрической системе с регулируемым УПК при «больших» возмущениях.
2. Сравнение переходных процессов в электрической системе при различных характеристиках закона регулирования УПК.
3. Анализ влияния коэффициентов регулирования УПК на динамическую устойчивость и качество переходных процессов.

Основной задачей было – прояснить возможный технический эффект применения такого рода регулирования с точки зрения повышения динамической устойчивости системы, а также выявить характеристики УПК, обеспечивающие наилучшее качество переходных процессов.

Для современных исследований переходных процессов и устойчивости ЭЭС характерно использование полных математических моделей и максимально сложных расчетных схем, что в основном связано с возросшими возможностями вычислительной техники. Кроме того, в связи с использованием регулируемого УПК, ёмкостное сопротивление которого мгновенно изменяется в зависимости от тока линии, целесообразно проводить анализ динамической устойчивости исследуемой электрической системы по полной математической модели, приведенной в первой главе.

Анализ динамической устойчивости исследуемой системы проведен при «больших» возмущающих воздействиях двух видов: сбросы/набросы активной мощности генераторов станций и короткие замыкания, которые выбраны как наиболее типичные возмущения для нагруженных межсистемных связей.

Чтобы выявить влияние характеристики регулируемого УПК на переходные процессы, все результаты расчетов сравнивались с переходным процессом при постоянной степени компенсации, что осуществлялось введением коэффициента $K_2 = 0$ в соотношение (1). Результаты расчётов переходного процесса по полной математической модели с учетом электромагнитных переходных процессов в статорных цепях и элементах электропередачи представлены на рисунке 12.

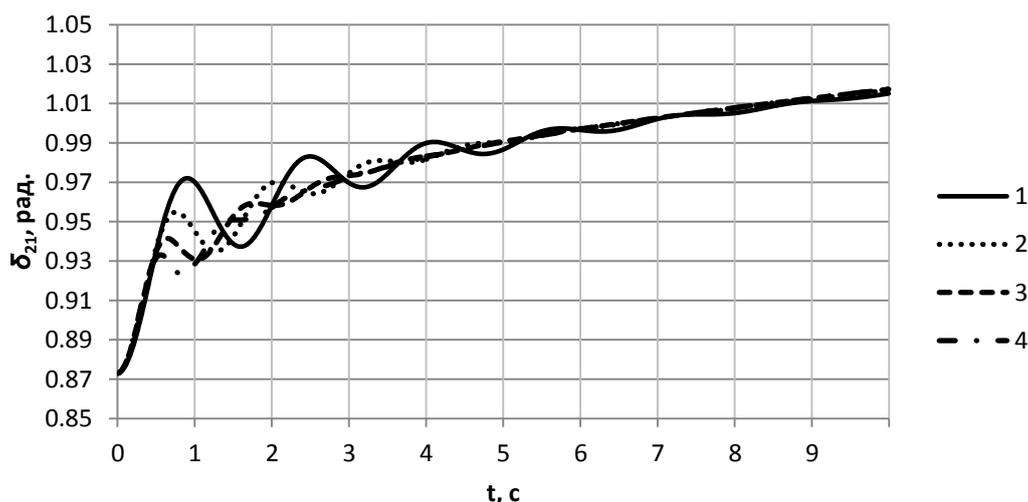


Рисунок 12 – Изменение угла между векторами ЭДС генераторов при изменении мощностей турбин СМ: кривая 1 – $X_{УПК}(I) = const$; кривая 2 – для закона регулирования $X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (32,9 - 4 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}$; кривая 3 – для закона регулирования

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (35,8 - 6 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}; \text{ кривая 4 – для закона регулирования}$$

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (37,3 - 7 \cdot I \cdot I_6) \cdot Z_6}$$

Зависимости взаимного угла между векторами ЭДС генераторов по времени для различных характеристик $X_{УПК}(I)$, задаваемых с помощью коэффициента K_2 в уравнение (1), при одинаковом возмущении исходного режима показывают различный характер переходного процесса для различных коэффициентов регулирования. Анализ кривых изменения взаимного угла между векторами ЭДС генераторов в переходном режиме при отсутствии резонансных переходов показал

существенное влияние на переходный процесс наличия в УПК управляемой ёмкости, при которой величина сопротивления $X_{УПК}(I)$ зависит от тока линии, а следовательно, от передаваемой мощности. Особенно очевидным положительное влияние регулируемой ёмкости становится в первом цикле качаний, о чем можно судить по величине вылета взаимного угла, которая уменьшается с ростом коэффициента K_2 .

На рисунке 13 приведен переходный процесс исследуемой системы с регулируемым УПК и АРВ генераторов станций. Очевидно, что АРВ, особенно АРВ сильного действия, позволяет быстро перейти к новому установившемуся режиму и положительно влияет на динамическую устойчивость системы. Использование регулируемой ёмкости в УПК позволяет повысить качество переходных процессов, вследствие чего переход к новому установившемуся режиму, который наблюдается при меньшем значении взаимного угла между векторами ЭДС генераторов, происходит практически без качаний. Все это говорит о положительном влиянии совместного регулирования УПК и АРВ на динамическую устойчивость системы.

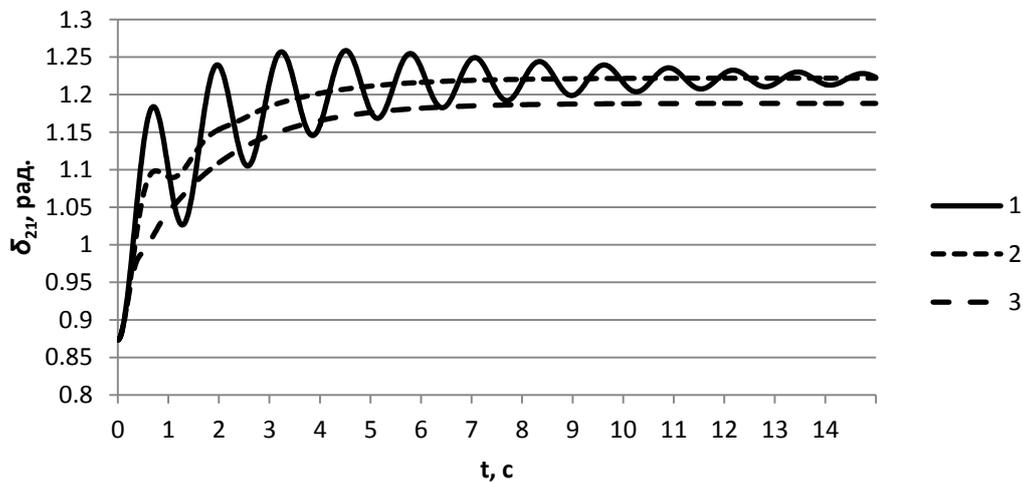


Рисунок 13 – Взаимный угол между векторами ЭДС генераторов в двухмашинной ЭЭС при «большом» возмущении: кривая 1 – с АРВ пропорционального действия; кривая 2 – с АРВ сильного действия; кривая 3 – при совместном регулировании АРВ сильного действия и УПК

Рассмотрено влияние регулируемой продольной компенсации на динамическую устойчивость исследуемой ЭЭС при трёхфазном коротком замыкании на одной из параллельных цепей второй линии длительностью 0,12 с с последующим ее отключением. С этой целью определена предельная передаваемая мощность второй станции (опорной) по критерию динамической устойчивости, а также предельное время отключения. Последовательно утяжелялся исходный режим, после чего моделировалось трёхфазное КЗ при различных значениях коэффициента регулирования УПК K_2 . Расчёты производились с помощью вычислительного эксперимента по полной математической модели.

На рисунке 14 приведен переходный процесс при указанном выше возмущающем воздействии и одинаковом исходном установившемся режиме, которому соответствовал угол $\delta_{21} = 66^\circ$. При значении $K_2 = 0$ динамическая устойчивость системы нарушается, при $K_2 = 1$ – сохраняется, что свидетельствует о по-

положительном влиянии регулируемого УПК на запас динамической устойчивости исследуемой системы.

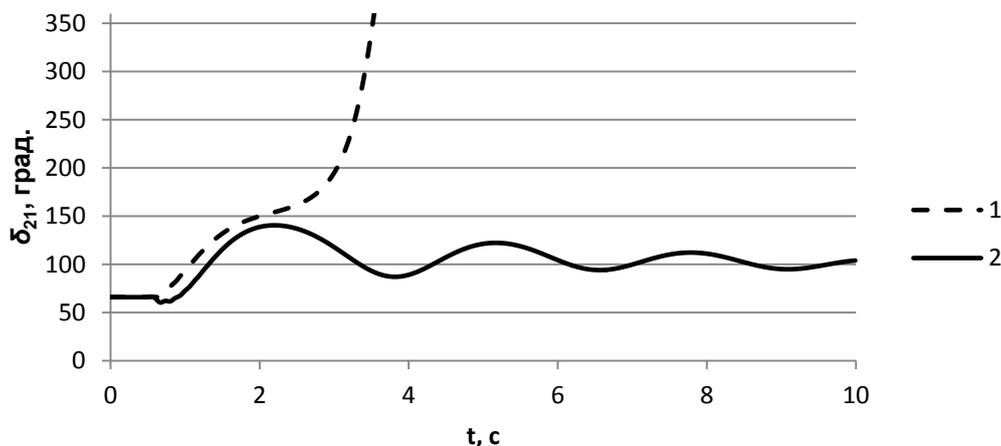


Рисунок 14 – Изменение взаимного угла между векторами ЭДС генераторов исследуемой системы при трёхфазном КЗ: кривая 1 – $K_2 = 0$; кривая 2 – $K_2 = 1$

В данном случае очевидно, что применение управляемой ёмкости в УПК увеличивает предел передаваемой мощности по условию сохранения динамической устойчивости.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сформирована математическая модель ЭЭС из двух генераторных станций, содержащая межсистемную связь с регулируемым УПК, для которой проведён комплекс исследований, направленных на повышение пропускной способности ЛЭП, улучшение статической и динамической устойчивости ЭЭС с регулируемыми в функции тока линии (передаваемой по линии мощности) УПК, что позволяет считать такую ЛЭП активно-адаптивным элементом ЭЭС.
2. Анализ статических характеристик исследуемой системы показал возникновение нежелательных явлений, эквивалентных резонансным, при определенных характеристиках закона регулирования УПК. Сформулированы требования к параметрам закона регулирования УПК, позволяющие избежать резонансных переходов. Использование регулируемого УПК на линии электропередачи позволяет существенно увеличить предел передаваемой мощности (до 30 % для каждой станции по сравнению с нерегулируемым УПК), а также способно поддерживать режимные параметры в допустимых пределах в широком диапазоне изменения передаваемой по линии мощности.
3. Показано положительное влияние регулируемого УПК на статическую аperiodическую и динамическую устойчивость исследуемой ЭЭС.
4. Предложена методика определения областей устойчивости исследуемой электроэнергетической системы по параметру коэффициента регулирования УПК, позволяющая исключить колебательное нарушение статической устойчивости.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. **Москвин, И. А.** О численном моделировании некоторой электроэнергетической системы / И. А. Москвин, С. Н. Чадов // Вестн. ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 79–81.

2. **Устойчивость** электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В. П. Голов, А. А. Мартиросян, И. А. Москвин, А. А. Виноградова // Вестн. ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 26–31.

3. **Москвин, И. А.** Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации / В. П. Голов, А. А. Мартиросян, И. А. Москвин // Вестн. ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 18–22.

4. **Москвин, И. А.** Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации / И. А. Москвин // Вестн. ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 46–50.

Публикации в других изданиях

5. **Москвин, И. А.** Математическая модель многомашинной электроэнергетической системы в простейшем представлении / И. А. Москвин // Электроэнергетика: материалы V регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ – 2010» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – Т. III. – С. 24–28.

6. **Москвин, И. А.** Интегрирование систем дифференциальных уравнений при наличии связей (алгебраических) / И. А. Москвин // Электроэнергетика: материалы VI регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ – 2011» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – Т. III. – С. 4–6.

7. **Москвин, И. А.** Параллельная реализация уравнений Горева – Парка / И. А. Москвин // Электроэнергетика: материалы VI регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ – 2012» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – Т. III. – С. 57–59.

8. **Москвин, И. А.** К вопросу об устойчивости электроэнергетических систем с регулируемой продольной компенсацией / И. А. Москвин // Энергия инновации – 2012: материалы отчетной конф. молодых ученых ИГЭУ / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – Т. I. – С. 124–127.

9. **Москвин, И. А.** Применение устройств продольной ёмкостной компенсации в передачах переменного тока / И. А. Москвин, Д. Н. Кормилицын // Электроэнергетика: материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ – 2013» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – Т. III. – С. 3–4.

10. **Москвин, И. А.** Самовозбуждение в электроэнергетической системе из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В. П. Голов, И. А. Москвин // Вестн. Рос. нац. комитета СИГРЭ: сб. докл. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – Вып. 1. – С. 280–281.

11. **Москвин, И. А.** Устойчивость электроэнергетических систем с регулируемой продольной компенсацией / И. А. Москвин // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т; Академия электротехн. наук РФ. – Иваново, 2013. – Т. 1. – С. 207–209.

МОСКВИН Илья Александрович

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать

Формат 60x84 ¹/₁₆. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина».

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.