

На правах рукописи

Сатанин Владислав Владимирович

**ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И
УСТОЙЧИВОСТИ МЕЖСИСТЕМНОЙ ТРАНЗИТНОЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 330кВ КОЛЬСКАЯ АЭС – ЛЕНЭНЕРГО.**

Специальность 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена на кафедре "Электрические системы и сети" государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты доктор технических наук,
Долгополов Андрей Геннадиевич
кандидат технических наук, с.н.с.
Кац Пинкус Янкелевич

Ведущая организация научно-исследовательский институт по
передаче электрической энергии постоянным током высокого напряжения
(ОАО НИИПТ)

Защита состоится "10" июня 2005 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургском государственном политехническом университете» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Автореферат разослан " " мая 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 212.229.02
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Развитие объединенных электроэнергетических систем, охватывающих большие территории с многочисленными мощными электрическими станциями, обуславливает необходимость углубленного рассмотрения вопросов обеспечения статической и динамической устойчивости их параллельной работы. Вопрос обеспечения устойчивой работы объединенных энергосистем остро стоит во многих странах мира, о чем свидетельствуют многочисленные системные аварии, сопровождающиеся продолжительным нарушением электроснабжения значительного числа потребителей. Высокая стоимость линий электропередачи заставляет полностью использовать их пропускную способность, возлагая решение задачи обеспечения устойчивости на вспомогательные силовые устройства, обеспечивающие ее заданные или допустимые показатели. На сегодняшний день предложено множество путей решения этой проблемы, но с появлением новой более мощной техники возникают новые требования к согласованию настроечных параметров регулирующих устройств и новые ограничения на режимы работы линий электропередачи.

Объектом исследования является протяженная электропередача 330 кВ, отходящая от Кольской атомной электростанции. Анализ состояния электроэнергетической сети ОЭС Северо-Запада показал, что одной из основных проблем является недостаточная пропускная способность транзита 330кВ Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго из-за того, что имеет место недоиспользование возможной выработки электроэнергии Кольской АЭС и «запертая» мощность в Кольской и Карельской энергосистемах.

В данной работе выполнено исследование применения управляемой поперечной компенсации для улучшения характеристик установившихся режимов и обеспечения устойчивости протяженной транзитной линии электропередачи переменного тока. В качестве устройств компенсации на усиленной второй цепи 330кВ электропередаче предполагается применение статических тиристорных компенсаторов (СТК) или других устройств, способных как потреблять, так и генерировать реактивную мощность. Применение СТК позволяет существенно улучшить распределение напряжения вдоль линии электропередачи и одновременно обеспечить достаточно высокие показатели демпфирования малых колебаний. Весьма важным для практической реализации является вопрос о расстановке СТК по промежуточным подстанциям транзита, выборе законов регулирования СТК, установленных в различных точках электропередачи, и о выборе настроечных параметров СТК.

Работа выполнялась в рамках реализации программы «Создание в единой энергосистеме России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока и устройств регулирования напряжения», предусмотренной приказом РАО «ЕЭС России» № 488 от 19.09.2003.

Целью работы является рассмотрение влияния устройств поперечной компенсации на статические и динамические свойства электрической системы. Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ состояния рабочих режимов электропередачи Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго в прошедшие годы и при перспективном оптимистическом росте нагрузок ОЭС Северо-Запада. Рассмотрено усиление транзита при последовательном сооружении второй цепи Кольско – Карельского транзита.
2. Определены допустимые и предельные режимы работы рассматриваемой электропередачи и выполнена оценка потерь в существующей и усиленной схемах.
3. На основе анализа установившихся режимов работы при применении СТК на транзите обоснован выбор точек их установки на подстанциях.
4. Выполнен анализ статической устойчивости при различных вариантах усиления транзита и установки компенсирующих устройств.
5. Даны рекомендации по настройке каналов системы регулирования генераторов Кольской АЭС для улучшения статической и динамической устойчивости энергосистемы.
6. Разработана методика математического моделирования СТК в программе «Мустанг» и выполнены исследования динамической устойчивости в полной схеме с применением этой модели. Получены оценки влияния СТК на динамическую устойчивость Кольской и Карельской энергосистем.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработка методики математического моделирования СТК в программе «Мустанг» для расчета динамической устойчивости в сложных схемах.
2. Произведена сравнительная оценка эффективности применения управляемых компенсирующих устройств или конденсаторных батарей совместно с включенными параллельно с ними коммутируемыми шунтирующими реакторами.
3. Выполнено исследование влияние характеристик СТК на пропускную способность и потери протяженной транзитной электропередачи.

Практическая ценность работы

Разработанный метод расчета динамической устойчивости в сложных схемах энергосистем при наличии регулируемого устройства поперечной компенсации в энергосистеме может применяться при решении научно-исследовательских и проектных задач для определения управляющих воздействий при возмущениях в сети.

Выполнены исследования, позволившие определить комплекс мер для предотвращения нарушения устойчивости параллельной работы Кольской и Карельской энергосистем для перспективной схемы электропередачи 330 кВ.

Сформулированы рекомендации по оптимальной расстановке СТК с точки зрения обеспечения уровней напряжения и потерь мощности.

Расчетно-экспериментальным путем продемонстрирована возможность увеличения передаваемой мощности из Колэнерго в Ленэнерго при применении комплекса по усилению транзита и установке СТК.

Выработанные в процессе работы приемы анализа и расчетные методики могут использоваться при рассмотрении перспективных вопросов установки управляемых устройств компенсации реактивной мощности в энергосистемах с линиями электропередачи различных классов напряжения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научных семинарах кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ и на научно-технических конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах» 2003-2005 годах.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 3 печатных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре главы и заключение, изложенные на 151 странице. Содержит 5 приложений, 66 рисунков, 27 таблиц, список литературы из 99 наименований. Общий объем работы 171 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы. Определены цель исследования, решаемые для ее достижения задачи, сформулирована научная новизна и практическая ценность, представлена апробация и внедрение результатов диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу современного положения в объединенной энергосистеме Северо-Запада. Рассмотрены проблемы и особенности развития семи энергосистем, входящих в состав объединенной энергосистемы. Выполнен обзор литературы, касающейся компенсации реактивной мощности ВЛ, рассмотрены технико-экономические показатели различных устройств поперечной компенсации.

Энергосистемы ОЭС Северо-Запада обслуживают потребителей Архангельской, Ленинградской, Мурманской, Новгородской и Псковской областей, Карельской и Коми Республик, г. Санкт-Петербурга, охватывая территорию в 1256 тыс. кв.км с населением около 12,2 млн. человек.

По ОЭС Северо-Запада и отдельным энергосистемам ОЭС в течение последних пяти лет с 1998 по 2002 гг. в ОЭС Северо-Запада наблюдался рост электропотребления, его годовой темп составил 3,8%; 2,8%, 4,0% и 1,1%, соответственно, в 1999, 2000, 2001 и 2002 гг.

Наиболее плотный график электрической нагрузки имеют Кольская и Карельская энергосистемы, в которых число часов использования максимума нагрузки составляет около 7000 часов.

В ОЭС Северо-Запада эксплуатируются две атомные электростанции: Кольская АЭС – 1760 МВт и Ленинградская АЭС – 4000 МВт; три крупные конденсационные электростанции, работающие на органическом топливе: Киришская ГРЭС (1800 МВт), Печорская ГРЭС (1060 МВт, проектная мощность 1275 МВт), Псковская ГРЭС (430 МВт, проектная мощность 645 МВт). В энергосистемах региона 56 ТЭЦ, из которых 34 блок-станции. Наиболее мощной является Южная ТЭЦ в г. Санкт-Петербурге – 800 МВт. Количество гидроэлектростанций, которые эксплуатируются в ОЭС Северо-Запада, равно 36. Наиболее мощной ГЭС является Верхне-Тулумская ГЭС в Колэнерго – 268 МВт. Гидроэлектростанции сосредоточены в Кольской, Карельской и Ленинградской энергосистемах.

Анализируя состояние существующей основной электрической сети 220 кВ и выше ОЭС Северо-Запада необходимо отметить постоянную загрузку транзита 330 кВ Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго:

Передача мощности осуществляется в Карельскую энергосистему и далее в Ленинградскую энергосистему. Большую часть времени загрузка достигает максимально допустимой величины 500 – 600 МВт.

Из-за недостаточной пропускной способности транзита имеет место недоиспользование возможной выработки электроэнергии Кольской АЭС и «запертая» мощность в Кольской и Карельской энергосистемах. Расчетная величина «запертой» электроэнергии составляет $2 \div 2,5$ млрд. кВт·ч, а величина недоиспользованной мощности в указанных энергосистемах – около 850 МВт.

Проблема «запертой» мощности усугубляется в период паводка при работе ГЭС северной части Карелии максимальной мощностью и при выводе в ремонт практически любой ВЛ 330 кВ, отходящей от Кольской АЭС, а также на всем протяжении транзита Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго.

Большинство аварийных отключений ВЛ 330 кВ, отходящих от Кольской АЭС, приводит к ограничению выдачи мощности электростанции и необходимости отключения от одного до трех генераторов.

Поэтому электроснабжение Карельской энергосистемы является недостаточно надежным, дефицит мощности которой покрывается от Кольской и Ленинградской энергосистем.

Проблемы «запертой» мощности Кольской – Карельской энергосистем и Кольской АЭС, повышения надежности выдачи мощности Кольской АЭС и электроснабжения потребителей Карельской энергосистемы можно решить усилением сети на транзите Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго.

На сегодняшний день принято решение о сооружении второй ВЛ 330 кВ от Кольской АЭС до Киришской ГРЭС в следующей последовательности:

- сооружение ВЛ 330 кВ Кольская АЭС – Петрозаводск с вводом в 2008 г.;
- сооружение ВЛ 330 кВ Петрозаводск – Сясь – Киришская ГРЭС с вводом в 2009–2010 гг.

В 2003 г. разработан проект строительства 2-ой ВЛ 330 кВ Кольская АЭС – ПС Княжегубская – ПС Лоухи – Путкинская ГЭС – Онда.

Работа протяженных электропередач переменного тока существенно осложняется из-за необходимости регулирования реактивной мощности и напряжения. Используемые для этой цели шунтирующие реакторы (ШР) с неизменными параметрами не обеспечат плавного регулирования.

В 1954-57 годах М.С.Либкинд разработал насыщающийся и управляемый реакторы с магнитопроводом, выполненным по типу электрической машины переменного тока, но с неподвижным «ротором».

В настоящее время наиболее известными конструктивными решениями в области создания управляемых шунтирующих реакторов (УШР) являются управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа, конструкция которого разрабатывается членом-корреспондентом РАН профессором СПбГПУ Г.Н. Александровым, и реакторы, управляемые подмагничиванием сердечника, разрабатываемые коллективом, в который входят д.т.н. профессор А.М.Брянцев (ОАО «ЭЛУР», Москва) и д.т.н. профессор Г.А. Евдокунин (СПбГПУ).

Более универсальными устройствами, чем управляемые реакторы являются статические тиристорные компенсаторы (СТК), так как помимо регулирования потребляемой мощности они могут при наличии в их составе конденсаторной части обеспечивать и регулирование реактивной мощности в емкостном квадранте. С другой стороны, они создаются, как правило, сравнительно низковольтными. При наличии на подстанции трансформаторов со свободными третичными обмотками это обстоятельство не является существенным. Важной особенностью СТК является их высокое быстродействие.

Основы разработки СТК в России были выполнены специалистами МЭИ и ВЭИ в 70-е годы, позже они были развиты и продолжены в институтах Энергосетьпроект, ВНИИЭ, НИИПТ.

Во второй главе описаны основные математические модели элементов электроэнергетической системы и приемы их реализации в различных программных средах, включая существующие программные комплексы для расчетов установившихся режимов и динамической устойчивости сложных энергосистем.

В общем комплексе исследований условий работы электрических систем (расчеты нормальных, переходных, послеаварийных режимов, токов короткого замыкания, статической устойчивости, оптимизации текущих и перспективных режимов и др.) основную роль играют расчеты установившихся режимов. Они представляют не только непосредственный интерес для целей проектирования и эксплуатации, но используются также для получения исходных данных при исследовании других, перечисленных выше,

вопросов. Удельный вес расчетов установившихся режимов в современной расчетной практике составляет до 80 %.

Представлены расчетные модели, применяемые в программном комплексе «Мустанг-95», в которых учитываются электромагнитные переходные процессы в обмотке возбуждения и демпферных контурах, и переходные процессы в системе возбуждения, включая АРВ. Уравнения системы возбуждения (СВ) и уравнения АРВ образуют единый блок и составлены таким образом, что они пригодны для описания практически всех существующих СВ и АРВ (при условии соответствующего задания параметров). Предусмотрена возможность моделирования всех типов СВ. Применяются высокоэффективные алгоритмы расчета динамической устойчивости.

В главе представлен весь набор параметров генераторов, участвующих в переходных процессах (данные согласованы с Колэнерго и Карел-энерго).

Рассмотрена модель статического тиристорного компенсатора (СТК) - как многофункционального статического устройства, обеспечивающего плавное изменение потребляемой или выдаваемой им реактивной мощности на шинах его подключения в соответствии с заданным законом.

В программах расчета установившихся режимов СТК моделируется следующим образом:

- задается значение модуля напряжения в точке присоединения СТК;
- задаются значения Q_{\min} и Q_{\max} , при этом $U = \text{const}$ при $Q_{\min} < Q < Q_{\max}$.

При работе СТК в режиме потребления реактивной мощности проводимость при регулировании (ТРГ) трансформаторно-реакторной группы изменяется по закону

$$B_L = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \omega L},$$

а при работе СТК в режиме выдачи реактивной мощности при полностью закрытых тиристорах его проводимость изменяется по закону $B_C = k\omega C$, где $k = 1, 2, \dots, N$;

Рис 1. Принцип работы СТК косвенной компенсации в энергосистеме: схема замещения СТК; б - статическая характеристика СТК: 1 - в диапазоне регулирования; 2 - в режиме потребления, при $U > U_{\max}$; 3 - в режиме выдачи, при $U < U_{\min}$

C - емкость одной группы ТРК; N - число групп ТРК. Результирующая проводимость СТК в любом режиме изменяется как $B = B_C - B_L$

Схема регулирования СТК для системных расчетов представлена на рис.1 а, где обозначено: U - напряжение в узле подключения СТК, которое должен поддерживать СТК; $U_{уст}$ - уставка напряжения, задаваемая автоматическому регулятору АРК; $X_{см}$ - реактивное сопротивление, определяющее статизм вольтамперной характеристики СТК. E_c, X_c - ЭДС и эквивалентное сопротивление системы переменного тока. Напряжение на шинах подключения СТК к системе определяется выражениями:

$$U = U_{уст} + I_{СТК} x_{СТ},$$

$$U = U_{уст} + \frac{I_{СТК}^2 x_{СТ}}{I_{СТК}} = U_{уст} - \frac{Q_{СТК}}{I_{СТК}},$$

где $Q_{СТК} = I_{СТК}^2 x_{СТ}$ - мощность, потребляемая СТК, откуда $Q_{СТК} = (U_{уст} - U) I_{СТК}$ - статическая характеристика СТК в диапазоне регулирования (рис.1. кривая 1). При изменении проводимости B в функции сигнала рассогласования АРК СТК поддерживает напряжение на шинах подключения с заданным статизмом в пределах $U_{min} \leq U \leq U_{max}$ (рис 1.б).

Предполагается, что проводимость СТК регулируется по отклонению напряжения ΔU , по отклонению частоты напряжения $\Delta \omega$ и по производной отклонения частоты напряжения $r\Delta \omega$ в точке присоединения СТК. Возможно регулирование по току линии.

Линеаризованный закон регулирования имеет вид:

$$(1 + pT_{СТК}) * \Delta b_{СТК} = K_{\Delta U} * \Delta U [+ K_I * \Delta I + K_{\Delta \omega} * \Delta \omega + K_{СТК\Delta \omega} * r\Delta \omega],$$

где $T_{СТК}$ – постоянная времени СТК, с,

$\Delta b_{СТК}$ – проводимость СТК, о.е.,

$K_{\Delta U}, K_I, K_{\Delta \omega}, K_{СТК\Delta \omega}$ - коэффициенты регулирования по отклонению напряжения, тока линии, отклонению частоты напряжения и по производной частоты напряжения.

[...] – применение регулирования по отклонению частоты и тока используется крайне редко и практически на территории России не реализовано.

Предлагаемая модель СТК реализуется в программном комплексе «Мустанг-95» как «автоматика», отслеживающая уровень напряжения в узле, где установлено управляемое компенсирующее устройство реактивной мощности (УКУ РМ), которое поддерживает напряжение на уровне 350кВ.

Действие СТК реализуется по фактору превышения или понижения модуля напряжения в узле, где установлен СТК. Если, например, напряжение выше уставки (в нашем случае уставка по напряжению $U=350кВ$), то выполняется «действие» автоматики, направленное на увеличение «Шунта проводимости» по формуле:

$$Y_{шг(нов)} = Y_{шг(стар)} + \Delta Y_{шг}, \text{ где}$$

$\Delta Y_{шг} = Y_{шг}/n$, n – число «ступеней», аппроксимирующих регулировочную характеристику СТК.

В третьей главе приведены результаты расчетов установившихся режимов электропередачи при установке устройств управляемой поперечной компенсации. Показано, что использование УКУ РМ приводит к заметному улучшению распределений потоков реактивной мощности и, соответственно, значений напряжений в узловых точках электропередачи и снижению потерь.

Схема участка ОЭС Северо-Запада, содержащая рассматриваемую транзитную электропередачу, приведена на рис 2.

Результаты электрических расчетов существующей схемы в режиме максимума нагрузки демонстрируют следующую картину. Поток активной мощности убывает по мере удаления от Кольской АЭС, и, соответственно, изменяется режим напряжений на промежуточных подстанциях транзита и перетоки реактивной мощности. На шинах 330 кВ Кольской АЭС поддерживается напряжение 355 кВ. Наиболее низкий уровень напряжения имеет место на ПС Ондская (335 кВ). Далее величины передаваемых мощностей снижаются по отношению к натуральной мощности линии, что способствует повышению напряжения. Потери в сети 330 кВ в данном режиме составляют 450,3 МВт.

Характеристики установившегося режима работы существенно изменяются в случае установки на двух подстанциях транзита управляемых устройств поперечной компенсации. Принимая во внимание перспективы развития транзита, рассмотрен вариант установки на ПС Лоухи и ПС Ондская СТК мощностью 180 МВАр каждый.

Учитывая достаточно сильную зависимость предела передаваемой мощности от реактивной мощности СТК, более подробно рассмотрены пределы передаваемых мощностей и режимы работы электропередачи при различных вариантах развития транзита. В качестве варианта усиления транзита, на основе полученного в первой главе анализа электрической сети, реализуется вариант строительства ВЛ 330 кВ Кольская АЭС – Князегубская ГЭС – Путкинская ГЭС – Онда – Петрозаводск – Сясь – Киришская ГРЭС. Применение СТК позволяет поддерживать напряжение на шинах соответствующих подстанций на уровне 350 кВ.

Как следует из сопоставительного анализа, при сооружении ВЛ 330 кВ КоАЭС – Киришская ГРЭС величина дополнительно передаваемой мощности по сравнению с пропускной способностью существующей сети (596 МВт), составит величину порядка 395 МВт, а при дополнительно установленных СТК на ПС Лоухи и ПС Ондская – 520 МВт. Результаты расчетов обобщены на рис. 3 и таблице 1.

Таким образом, относительное увеличение передаваемой мощности за счет установки устройств поперечной компенсации составляет 0,35 МВт на 1 МВАр мощности компенсирующих устройств.

Табл. 1

Виды схем	Без СТК		СТК на ПС Лоухи		СТК на ПС Лоухи и Петрозаводск		СТК на ПС Лоухи и ПС Онда	
	Р _{п-ред}	Р _{доп 20%}	Р _{п-ред}	Р _{доп 20%}	Р _{п-ред}	Р _{доп 20%}	Р _{п-ред}	Р _{доп 20%}
Существующая схема	765	596	832	652	869	683	918	723
ВЛ 330 кВ КАЭС-Князегубская	801	626	858	673	898	707	945	746
ВЛ 330 кВ от КАЭС до Лоухи	851	668	894	703	941	743	986	780
ВЛ 330 кВ от КАЭС до Путкинской	940	742	980	775	1039	824	1074	853
ВЛ 330 кВ от КАЭС до Онда	1015	804	1072	852	1133	903	1159	924
ВЛ 330 кВ от КАЭС до Петрозаводск	1156	922	1223	978	1282	1027	1307	1048
ВЛ 330 кВ от КАЭС до Сясь	1217	973	1283	1028	1338	1073	1373	1103
ВЛ 330 кВ от КАЭС до Киришская ГРЭС	1239	991	1297	1039	1350	1083	1393	1119

Рис.3

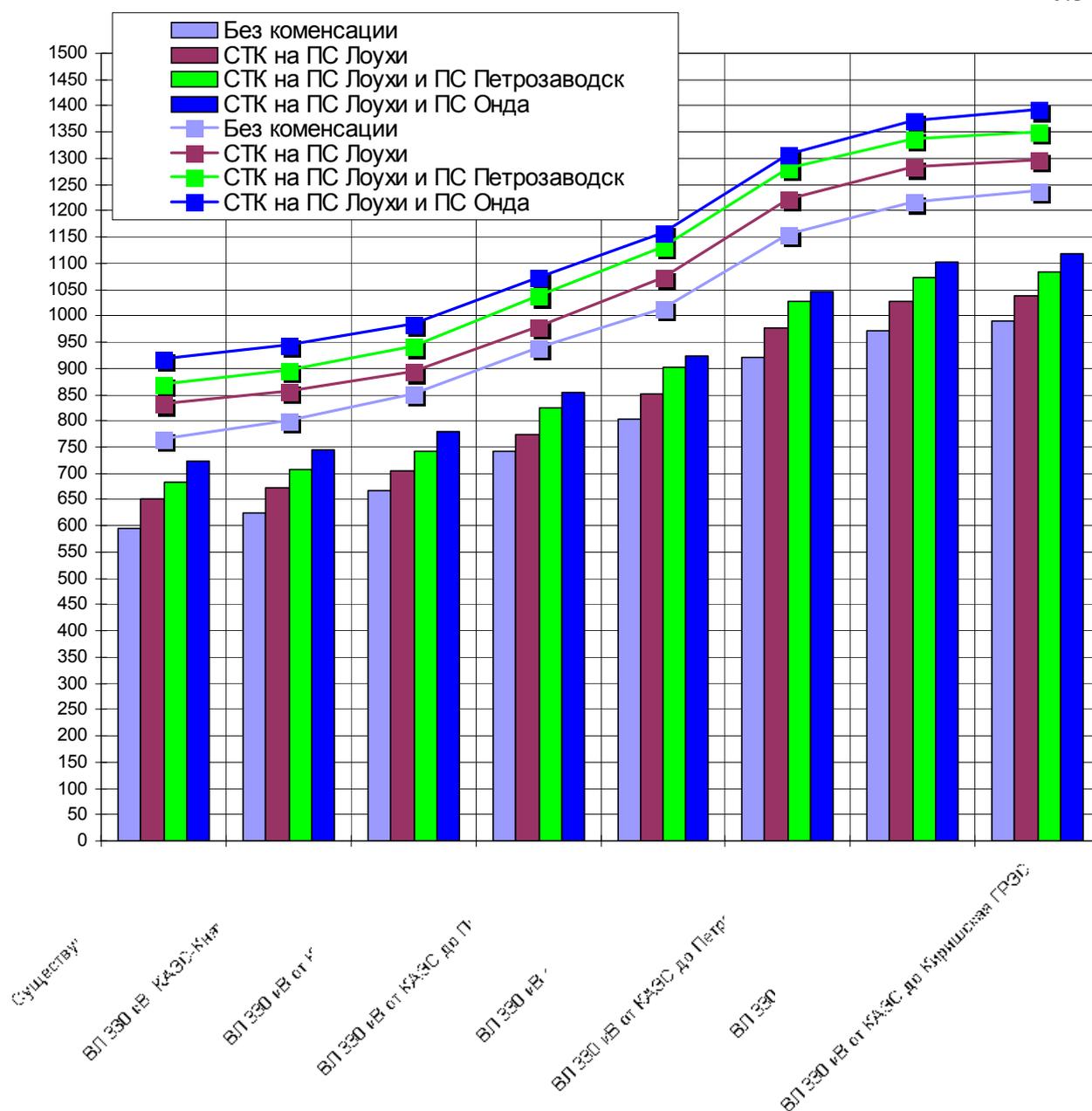


Рис. 4. Потери в существующей схеме при установке СТК на различных подстанциях.

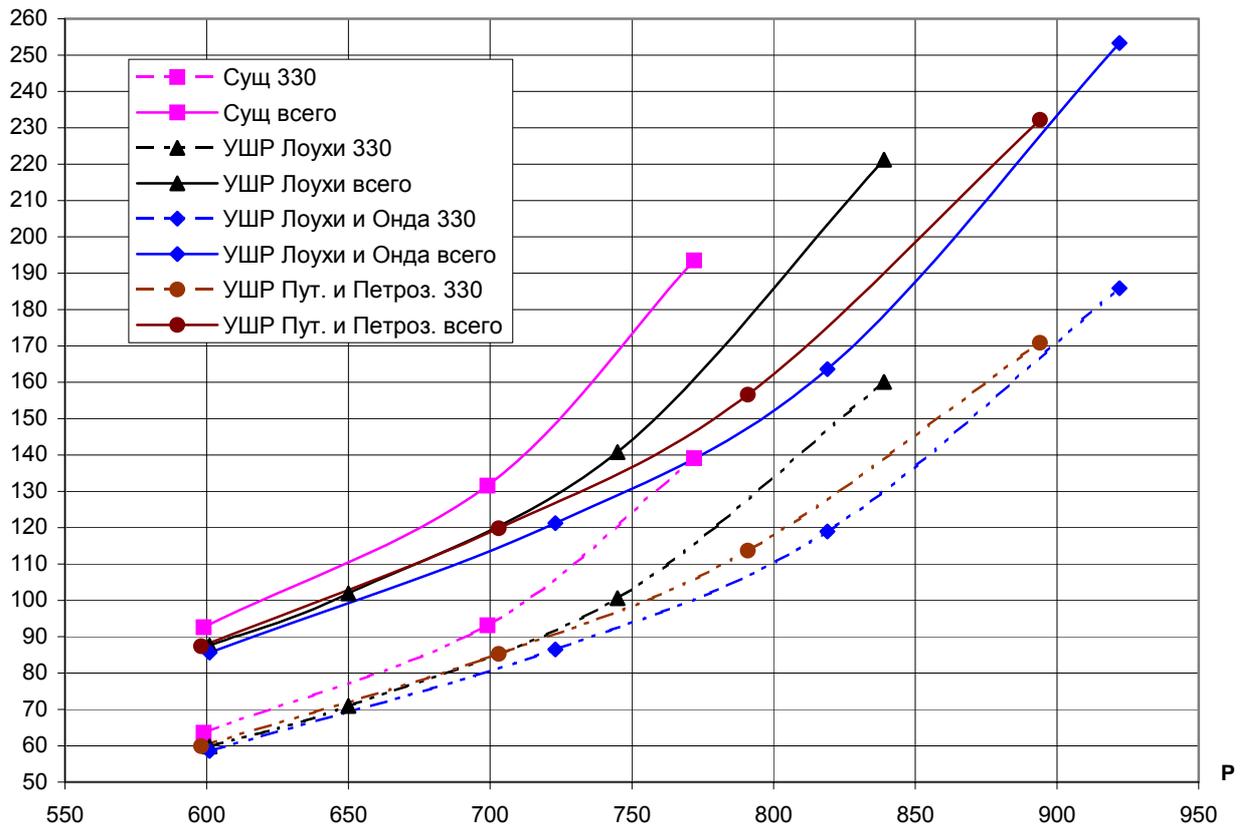
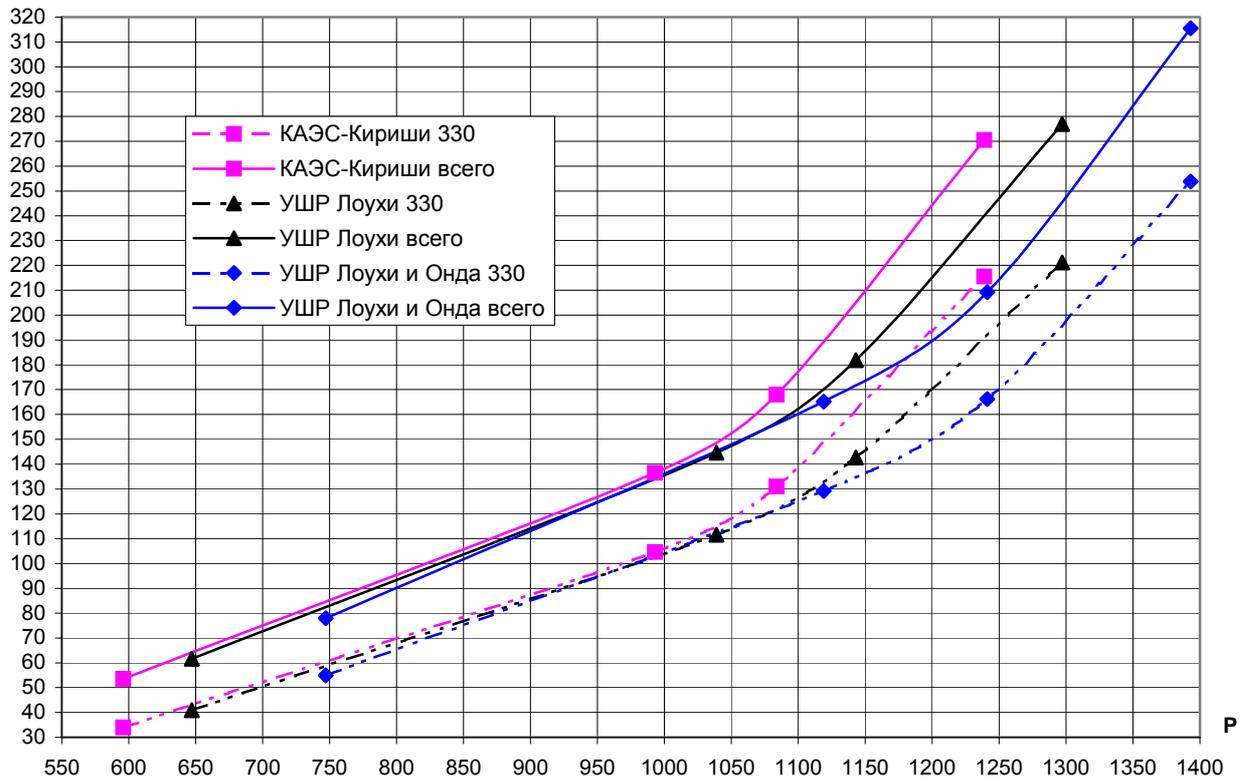


Рис. 5. Потери в полной перспективной схеме при установке СТК на различных подстанциях.



На рис. 4 приведены кривые, характеризующие изменение потерь в существующей линии 330 кВ при условии применения СТК на ряде подстанций транзитной электропередачи. Крутизна кривой для существующей схемы без СТК соответствует увеличению потерь приблизительно на 15 МВт при увеличении перетока на 50 МВт.

Рис. 5 иллюстрирует изменение потерь в линии 330 кВ и сети ОЭС Северо-запада в целом. В диапазоне передаваемых мощностей от 700 до 1120 МВт увеличение перетока на 100 МВт соответствует росту потерь приблизительно на 18 МВт. Эффективность СТК с точки зрения экономии потерь проявляется только при величинах перетоков мощности, приближающихся к предельным.

При реализации полной схемы усиления транзита могут осуществляться режимы, характеризуемые увеличением передаваемой мощности до 1000 – 1100 МВт (что соответствует возрастанию перетока на 400 – 500 МВт по сравнению с существующей одноцепной схемой); величина потерь при этом возрастает на 40 – 80 МВт. Таким образом, целесообразна реализация перетоков до 1000 МВт.

Четвертая глава посвящена оценке статической и динамической устойчивости в условиях эквивалентной упрощенной и полной схемы исследуемого объекта.

Исследование статической устойчивости и переходных процессов при конечных возмущениях электропередачи 330 кВ Кольская АЭС – ПС Княжегубская – ПС Лоухи – ПС Путкинская – ПС Кондопога – ПС Петрозаводская – ПС Сясь – Киришская ГРЭС выполнялось в эквивалентной схеме приведенной на рис 6.

В качестве основных средств улучшения динамических свойств электроэнергетической системы (ЭЭС) рассмотрены выбор и оптимизация настроек каналов регулирования возбуждения синхронных генераторов. Выполнен анализ различных вариантов закона регулирования возбуждения генераторов Кольской АЭС и влияние постоянной времени возбудителя на динамические свойства системы при условии, что на ПС Лоухи и ПС Ондская установлены СТК мощностью ± 180 Мвар. Приведен анализ динамических свойств системы при выбранных оптимальных настройках коэффициентов регулирования генераторов Кольской АЭС (K_{0u} и K_{1u} , $K_{0\omega}$ и $K_{1\omega}$) при отсутствии устройств поддержания напряжения на транзите. По условиям апериодической и колебательной устойчивости оптимальными настройками АРВ Кольской АЭС в режиме передачи допустимой мощности 2 о.е. являются следующие величины: $K_{0u} = -100$, $K_{1u} = -10$, $K_{0\omega} = 1$, $K_{1\omega} = 1$.

В таблице 2 приведены результаты расчета собственных значений матрицы переменных состояния (корни характеристического полинома) для электропередачи Кольская ЭС – Карельская ЭС - Ленэнерго, оснащенной регулирующими устройствами поддержания напряжения на ПС Лоухи и ПС Ондская, а также при отсутствии компенсирующих устройств ($b_{R3}=0$, $b_{R5}=0$).

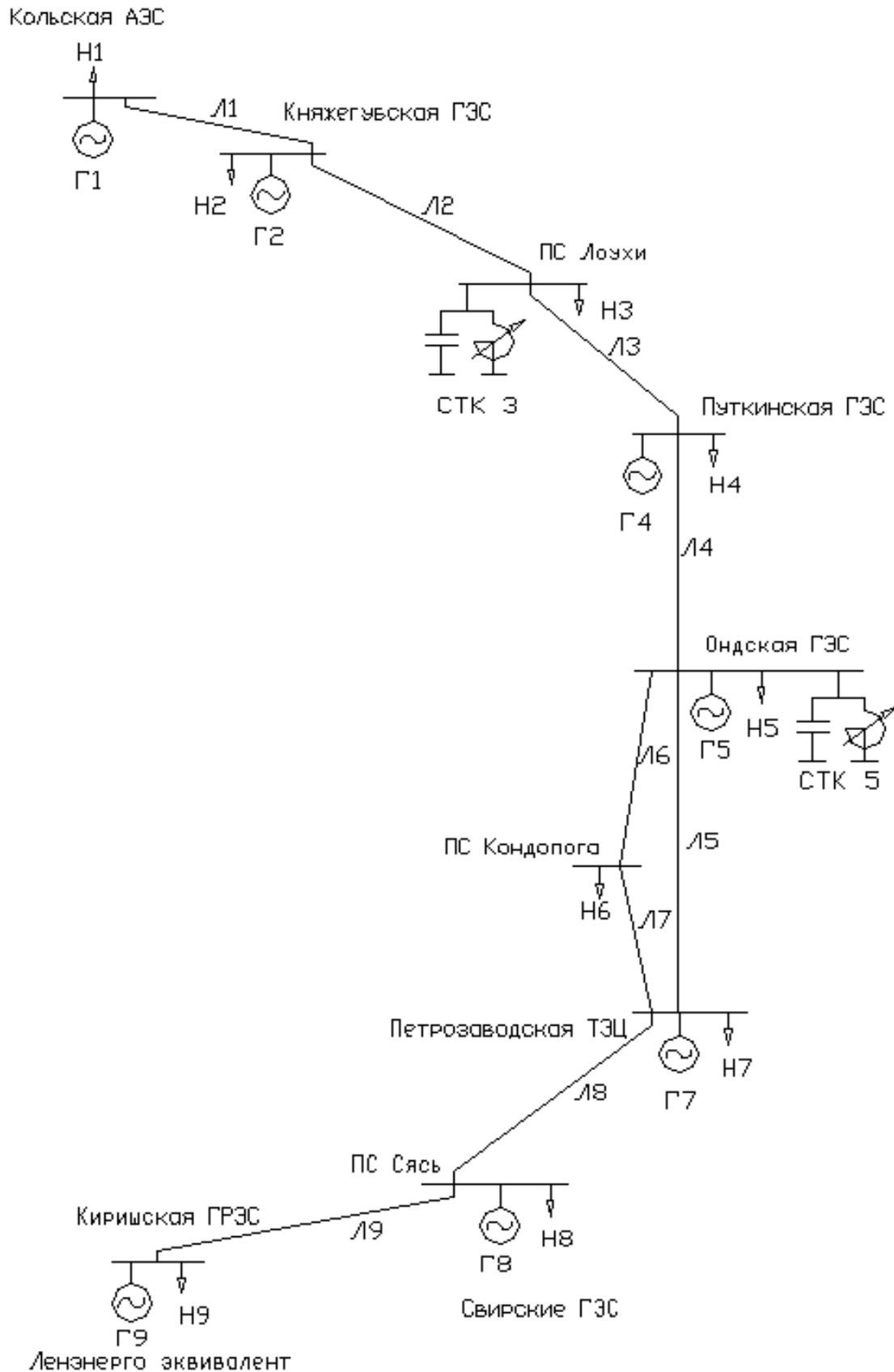


Рис. 6. Упрощенная схема Кольской и Карельской ЭС для изучения статической и динамической устойчивости.

Табл. 2

$P_{G1}=2 \text{ o.e.}$ $K_{0u} = -100, K_{1u} = -10$ $b_{R3} = 0,116 \quad b_{R5} = 0,166$	$P_{G1}=2 \text{ o.e.}$ $K_{0u} = -100, K_{1u} = -10,$ $K_{0\omega} = 1, K_{1\omega} = 1$ $b_{R3} = 0,116 \quad b_{R5} = 0,166$	$P_{G1}=2 \text{ o.e.}$ $K_{0u} = -100, K_{1u} = -10,$ $K_{0\omega} = 1, K_{1\omega} = 1$ $b_{R3} = 0 \quad b_{R5} = 0$
-0.57832 ± 8.0205i		
-0.91361	-0.95958 ± 0.0866i	-0.95191 ± 0.059284i
-0.76006 ± 6.0741i	-0.76499 ± 6.0533i	-0.69108 ± 5.9395i
-0.61167 ± 0.067765i	-0.60877 ± 0.052502i	-0.67633
-0.55369 ± 1.2446i	-0.65244 ± 1.1538i	-0.61642 ± 1.026i
-0.51654 ± 6.9105i	-0.51111 ± 6.9148i	-0.49145 ± 6.7963i
-0.33476 ± 5.3463i	-0.37472 ± 5.3624i	-0.37146 ± 5.2402i
-0.073696 ± 3.6711i	-0.34497 ± 3.5551i	-0.3711 ± 3.4433i
-0.25511 ± 4.7966i	-0.25587 ± 4.801i	-0.40562 ± 4.6844i
-0.35879	-0.35843	-0.3903
-0.31934	-0.32016	-0.32347
-0.29946	-0.29947	-0.31435
-0.25651	-0.25657	-0.27332
-0.21797	-0.21891	-0.20624
-0.80119	-0.8302	-0.82552

Для более детального анализа влияния настроек АРВ на динамическую устойчивость при использовании рассмотренных вариантов регулирования возбуждения и управления компенсирующими устройствами были рассчитаны аварии на линиях 330 кВ схемы, приведенной на рис. 6. Результаты расчетов динамической устойчивости систематизированы в таблице 3.

Табл. 3

Место повреждения	$P_{G1}=2 \text{ o.e.}$ $K_{0u} = -100, K_{1u} = -10$ $K_{0\omega} = 0, K_{1\omega} = 0$ $b_{R3}=0,116 \quad b_{R5}=0,166$	$P_{G1}=2 \text{ o.e.}$ $K_{0u}=-100, K_{1u}=-10,$ $K_{0\omega} = 1, K_{1\omega} = 1$ $b_{R3}=0 \quad b_{R5}=0$	$P_{G1}=2 \text{ o.e.}$ $K_{0u}=-100, K_{1u}=-10,$ $K_{0\omega} = 1, K_{1\omega} = 1$ $b_{R3}=0,116$ $b_{R5}=0,166$
	ВЛ 330кВ ПС Князегубская – ПС Лоухи вблизи шин ПС Князегубская.	Устойчивость не сохраняется	Устойчивость не сохраняется
ВЛ 330кВ ПС Лоухи – Путкинская ГЭС вблизи шин ПС Лоухи.	Устойчивость не сохраняется	Устойчивость не сохраняется	Устойчивость сохраняется
ВЛ 330кВ Путкинская ГЭС – Ондская ГЭС вблизи шин Путкинской ГЭС.	Устойчивость не сохраняется	Устойчивость сохраняется	Устойчивость сохраняется
ВЛ 330кВ Ондская ГЭС – ПС Петрозаводская вблизи шин Ондской ГЭС.	Устойчивость не сохраняется	Устойчивость сохраняется	Устойчивость сохраняется

Влияние управляемых компенсирующих устройств на переходные процессы оценивалось сравнением характера изменения параметров при тяжести возмущений, соответствующей пределу динамической устойчивости.

Заметно более быстрое время затухания колебаний взаимных углов при наличии устройств поддержания напряжения после аварии, близкой по тяжести к двухфазному к.з. на землю.

Во второй части главы приводятся результаты исследования динамической устойчивости в подробной схеме электропередачи с использованием программного комплекса «Мустанг-95» со следующими целями:

1) Определения условий протекания переходных процессов при расчетных авариях в сети 330 кВ транзита Колэнерго-Карелэнерго-Ленэнерго, определенных «Руководящими указаниями по устойчивости энергосистем».

2) Определения необходимых противоаварийных мероприятий, обеспечивающих сохранение параллельной работы трех энергосистем Колэнерго, Карелэнерго и Ленэнерго при повреждениях в сети транзита 330-220 кВ различной степени тяжести при наличии или отсутствии управления устройствами компенсации реактивной мощности.

Расчеты выполнены для режимов передачи допустимой мощности для трех вариантов компенсации реактивной мощности:

- Установка устройств выдачи реактивной мощности в сети 330кВ на ПС Лоухи и ПС Ондская для поддержания напряжения на данных подстанциях на уровне 350кВ, т.е. на ПС Лоухи установлены БК – 90Мвар, на ПС Ондская БК – 180Мвар;

- Установка УКУ РМ в сети 330кВ на ПС Лоухи и ПС Ондская для поддержания напряжения на данных подстанциях на уровне 350кВ, т.е. на ПС Лоухи и ПС Ондская установлены УКУ РМ – ± 180 Мвар;

- Установка устройств выдачи и потребления реактивной мощности в сети 330кВ на ПС Лоухи и ПС Ондская для поддержания напряжения на данных подстанциях на уровне 350кВ, т.е. на ПС Лоухи установлены БК – 180Мвар и ШР – 6х60Мвар, на ПС Ондская БК – 180Мвар и ШР - 6х60Мвар;

Результаты расчетов представлены в таблице 4. Анализ результатов этих расчетов показал, что при авариях на шинах станции, а также на ВЛ 330 кВ, отходящих от Кольской АЭС по тяжести повреждения близких к двухфазному к.з. на землю и отключаемых основной защитой, нарушается устойчивая работа генераторов станций Колэнерго и Карелэнерго относительно Ленэнерго для варианта при отсутствии управления на установленных КУ. Для сохранения параллельной работы станций требуется отключение четырех гидрогенераторов на Князегубской ГЭС (4х36 МВт). Однако если на ПС Лоухи и ПС Ондская установлены УКУ РМ, то потребуются отключение трех гидрогенераторов.

Результаты расчетов динамической устойчивости

Табл. 4

N	Место повреждения	Повреждения близкие к двухфазным к.з. на землю, характеристики переходного процесса и противоаварийные мероприятия необходимые для сохранения устойчивости.	
		СТК ± 180 МВар на шинах 330кВ Ондской ГЭС и ПС Лоухи	КБ 180 МВар на шинах 330кВ Ондской ГЭС, КБ 95 МВар на шинах 330кВ ПС Лоухи
1	ВЛ 330кВ Кольская АЭС – ПС Князегубская вблизи шин станции.	Необходимо отключение 100МВт на генераторах ГЭС.	Необходимо отключение 140МВт на генераторах ГЭС.
2	ВЛ 330кВ Кольская АЭС – ПС Князегубская вблизи шин ПС.	Устойчивость сохраняется	Устойчивость сохраняется
3	ВЛ 330кВ ПС Князегубская- ПС Лоухи вблизи шин ПС Лоухи.	Устойчивость сохраняется	Устойчивость сохраняется
4	ВЛ 330кВ ПС Лоухи-Путкинская ГЭС вблизи шин Путкинской ГЭС.	Устойчивость сохраняется	Устойчивость сохраняется
5	ВЛ 330кВ Путкинская ГЭС – Ондская ГЭС вблизи шин Ондской ГЭС.	Устойчивость сохраняется	Устойчивость сохраняется
6	ВЛ 330кВ Ондская ГЭС – ПС Кондопожская вблизи шин Ондской ГЭС.	Необходимо отключение 40МВт на генераторах ГЭС.	Необходимо отключение 80МВт на генераторах ГЭС.
7	ВЛ 330кВ Ондская ГЭС – ПС Петрозаводская вблизи шин Ондской ГЭС.	Необходимо отключение 60МВт на генераторах ГЭС.	Необходимо отключение 100МВт на генераторах ГЭС.
8	ВЛ 330кВ Ондская ГЭС – ПС Петрозаводская вблизи шин ПС Петрозаводская.	Необходимо отключение 20МВт на генераторах ГЭС.	Необходимо отключение 80МВт на генераторах ГЭС.

Выводы

1. На примере Кольско-Карельского транзита в подробной схеме сети Северо-Западного региона с напряжениями 150-220-330 кВ рассмотрено применение компенсирующих устройств для осуществления передачи «запертой» мощности и электроэнергии КоАЭС. Показано, что управляемые компенсирующие устройства могут существенно увеличить пропускную способность транзита, создавая значительный запас по статической устойчивости.
2. Выполнена оценка предельных и допустимых режимов работы рассматриваемой электропередачи в существующих и усиленной схемах.
3. На основе анализа вариантных расчетов установившихся режимов транзита в условиях применения СТК даны рекомендации по их оптимальной расстановке на подстанциях. В качестве точек точек установки двух СТК мощностью ± 180 МВАр рекомендованы подстанции Лоухи и Ондская.
4. Применение СТК позволяет увеличить предельную передаваемую мощность на 12,5% и рабочую мощность на 13%.
5. Эффективность СТК с точки зрения экономии потерь проявляется при величинах перетоков мощности, приближающихся к предельным.
6. Анализ статической устойчивости, выполненный на основе расчета характеристических чисел для условий эквивалентной схемы Кольско – Карельского транзита, позволил сформулировать рекомендации по настройкам каналов регулирования СТК.
7. Разработаны методики математического моделирования регулируемых устройств поперечной компенсации для применения в программах расчета динамической устойчивости сложных электроэнергетических систем («Мустанг», «Дакар»).
8. В качестве альтернативы установке регулируемых устройств компенсации реактивной мощности рассмотрен вариант дискретного регулирования конденсаторных батарей по факту повышения и снижения напряжения.
9. Исследования динамической устойчивости, выполненные в эквивалентной и развернутой схеме Кольского участка ОЭС Северо-Запада подтвердили высокую эффективность применения СТК. Доказано, что возможности СТК в увеличении предельных по условиям динамической устойчивости значений передаваемых мощностей невелики, но регулирование СТК приводит к облегчению протекания переходных процессов и существенно улучшает демпфирование послеаварийных колебаний.
10. При авариях, близких по тяжести к двухфазным коротким замыканиям на землю на рассматриваемом объекте произведено сравнение рассматриваемых дискретного и непрерывного методов регулирования реактивной мощности. При применения СТК исключено значительное количество коммутаций выключателей, однако при применении коммутируемых конденсаторных батарей эффект достигается при одинаковом объеме противоаварийных мероприятий.

Основные положения диссертации отражены в публикациях.

1. Маслов А.В., Сатанин В.В. «Исследование предельных по условиям статической устойчивости режимов транзита Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго» // Материалы научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», изд-во СПбГПУ, СПб, 2004г.
2. Петошин В.С., Сатанин В.В. «Исследование динамической устойчивости транзита Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго» // Материалы научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», изд-во СПбГПУ, СПб, 2004г.
3. Сатанин В.В. «Исследование эффективности применения устройств регулируемой поперечной компенсации для повышения запасов устойчивости транзита Колэнерго – Карелэнерго – Ленэнерго» // Материалы научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», изд-во СПбГПУ, СПб, 2005г.