

На правах рукописи

ФРОЛОВ Олег Валерьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СЕВЕРО-ЗАПАДА
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2007

Работа выполнена на кафедре "Электрические системы и сети" Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты доктор технических наук,
Долгополов Андрей Геннадиевич

кандидат технических наук, доцент
Герасимов Сергей Евгеньевич

Ведущая организация ЗАО «Энергопроект»

Защита состоится " _____ " июня 2007 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан " _____ " мая 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Предварительные прогнозы роста спроса на электрическую энергию в Объединенной электроэнергетической системе (ОЭС) Северо-запада показывают, что темпы роста потребления в период 2005 – 2010 гг. могут составить от 330 – 350 МВт в год при реализации умеренного сценария развития и 450 – 550 МВт в год при реализации оптимистического варианта развития экономики и коммунально-бытового сектора. Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей Санкт-Петербурга Правительством Санкт-Петербурга совместно с РАО ЕЭС России разработан план мероприятий, предусматривающий вводы новых генерирующих мощностей, интенсивное сетевое строительство и сооружение значительного количества новых подстанций 330 и 110 кВ. Планами развития предусматривается строительство второй очереди Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС-2) и значительное усиление сетей 330 и 750 кВ, существенно влияющих на надежность электроснабжения западной части Северо-западного региона. Предлагаемые варианты усиления системообразующих сетей приводят к появлению сложно-замкнутых кольцевых структур работающих параллельно сетям различных классов напряжения.

Указанные масштабные задачи ставят целый ряд научных проблем, связанных с выбором рациональной структуры сетей, управлением режимами, в том числе по активной и реактивной мощности, обеспечением необходимых запасов статической и динамической устойчивости.

Одной из сложных проблем является организация параллельной работы сетей 110, 330 и 750 кВ, обеспечивающая рациональное распределение потоков активной и реактивной мощности.

Выполненными исследованиями показано, что оптимизация потокораспределения возможна только при применении средств продольного режимного регулирования, то есть устройств, позволяющих управлять распределением мощности по элементам сети. В качестве устройств, применяемых для оптимизации потоков мощности между параллельно работающими сетями различных классов напряжения рассмотрены силовые фазорегулирующие устройства (ФРУ).

Объектом исследования является применение ФРУ для улучшения характеристик установившихся режимов электрических сетей западной части ОЭС Северо-запада, обеспечивающих электроснабжение Санкт-Петербурга. В качестве фазорегулирующих устройств предполагается применение автотрансформаторов с поперечным регулированием фазы выходного напряжения и распространенных в западных энергосистемах устройств продольного включения. Применение этих устройств позволяет оптимизировать загрузку наиболее мощных сетей класса 750 кВ, ограничить

опасные величины перетоков мощности по кабельным линиям 330 кВ и добиться снижения потерь.

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.

Актуальной задачей является разработка математических моделей ФРУ для внедрения в основные расчетные программы, используемые для расчета установившихся режимов работы и переходных процессов при возмущениях в сети, что дает возможность исследовать показатели статической устойчивости системы при применении ФРУ с непрерывным управлением.

Значительное внимание в работе уделено исследованию процессов при конечных возмущениях в ЭЭС. Проанализированы законы управления ФРУ, обеспечивающие хорошее затухание послеаварийных колебаний в условиях упрощенной модели энергосистемы.

Целью работы является рассмотрение влияния фазорегулирующих устройств продольного регулирования на характеристики установившихся режимов работы сложной электрической системы (на примере ОЭС Северо-запада), а также на статические и динамические свойства электрической системы. Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ возможных путей развития энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области с учетом планов ввода генерирующих мощностей и развития электрических сетей различных классов напряжения.

2. Разработаны рекомендации по усилению системообразующих сетей 330 и 750 кВ ОЭС Северо-запада, включающих межсистемные линии электропередачи между ОЭС Северо-запада и ОЭС Центра.

3. На основе расчетов и анализа установившихся режимов западной части ОЭС Северо-запада разработаны рекомендации по местам установки фазорегулирующих устройств (ФРУ), обеспечивающих рациональное распределение потоков мощности по параллельно работающим сетям 330 и 750 кВ и снижение потерь. Определены зависимости перетоков мощности по основным сечениям сетей 330 - 750 кВ в зависимости от величины поперечного коэффициента трансформации фазорегулирующих устройств.

4. На языке Modelica разработана методика математического моделирования переходных процессов энергосистемы простой структуры, включающей ФРУ, для анализа процессов при конечных возмущениях и демпферных свойств.

5. Выполнены расчеты установившихся режимов и динамической устойчивости западной части ОЭС Северо-запада в условиях упрощенной модели и выполнены оценки запасов статической устойчивости. Результаты расчетов динамической устойчивости в упрощенной схеме проверены в схеме сложной электрической системы.

6. Выполнен анализ параметров и характеристик трансформаторов, позволяющих регулировать фазу выходного напряжения.

7. Выполнено исследование влияния ФРУ с непрерывным управлением на показатели статической устойчивости.

Научная новизна диссертационной работы:

- на основе расчетов и анализа установившихся режимов западной части ОЭС Северо-запада разработаны рекомендации по местам установки ФРУ, обеспечивающих рациональное распределение потоков мощности по параллельно работающим сетям 330 и 750 кВ и снижение потерь;

- разработаны рекомендации по усилению системообразующих сетей 330 и 750 кВ ОЭС Северо-запада, включающих межсистемные линии электропередачи между ОЭС Северо-запада и ОЭС Центра;

- на языке Modelica разработана методика математического моделирования переходных процессов энергосистемы простой структуры, включающей ФРУ, для анализа процессов при конечных возмущениях и демпферных свойств системы;

- выполнены расчеты установившихся режимов и динамической устойчивости западной части ОЭС Северо-запада в условиях упрощенной модели и выполнены оценки запасов статической устойчивости;

- выполнено исследование влияния ФРУ с непрерывным управлением на показатели статической устойчивости.

Практическая ценность работы

Разработанные рекомендации по местам установки ФРУ западной части ОЭС Северо-запада, обеспечивающие рациональное распределение потоков мощности по параллельно работающим сетям 330 и 750 кВ и снижение потерь могут быть использованы при проектировании системообразующих сетей 330 и 750 кВ ОЭС Северо-запада, включающих межсистемные линии электропередачи между ОЭС Северо-запада и ОЭС Центра.

Разработанное в ходе выполнения диссертации программное обеспечение, полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в проектных и эксплуатационных организациях при реконструкции и проектировании электрических систем переменного тока, содержащих протяженные линии высоких классов напряжения, параллельно работающие сети различных классов напряжения, а также при выполнении исследований электромеханических процессов электрических систем и оптимизации показателей переходных процессов при авариях. Разработанное программное обеспечение используется в научной работе кафедры «Электрические системы и сети» СПбГТУ при решении задач анализа и оптимизации установившихся режимов работы существующих и перспективных ЭЭС, анализа протекания аварий в энергосистемах. Выработанные в процессе исследований приемы анализа и расчетные методики могут использоваться при рассмотрении перспективных вопросов установки управляемых устройств регулирования фазы в энергосистемах с ВЛ различных классов напряжения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научных семинарах кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ, на научно-технических конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах» 2006-2007 годах, на Всероссийском научном семинаре «Энергетическая безопасность России» 12 апреля 2006 года.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре главы и заключение, изложенные на 135 страницах. Содержит 27 рисунков, 35 таблиц, список литературы из 86 наименований.

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 рекомендации по использованию 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 с 1998 в ОЭС Северо-Запада наблюдался рост электропотребления. Среднегодовой прирост потребления электроэнергии с 2000 по 2006 г. составил 3,1%.

ОЭС Северо-Запада имеет сложную технологическую структуру состоящую из электростанций различных типов (АЭС, ГРЭС, ТЭЦ, ГЭС) суммарная установленная мощность которых практически 21 тыс. МВт, длина линий электропередач напряжением только 750 – 110 кВ более 40 тыс. км, а установленная трансформаторная мощность подстанций 750-110 кВ -более 54 тыс. МВА. Высшим напряжением в энергосистемах, входящих в состав ОЭС Северо-Запада, является 750 кВ. На этом напряжении осуществляется связь Западной части ОЭС Северо-Запада с ОЭС Центра, а также выдается мощность Ленинградской АЭС.

В ОЭС Севера-Запада более 105 электростанций включая две атомные станции (Ленинградская, Кольская), две крупные станции парогазового цикла

(Северо-Западная, Калининградская ТЭЦ-2), три крупные конденсационные электростанции (Киришская ГРЭС, Псковская ГРЭС, Печорская ГРЭС).

ОЭС Северо-запада работает параллельно с ЕЭС России, ОЭС Балтии, ОЭС Беларуси. Через вставку постоянного тока на ПС 330/400 кВ Выборгская осуществляются экспортные поставки электроэнергии в Финляндию. Кроме того, в Западной зоне ОЭС Северо-Запада выделяются генераторы для работы в энергосистемах Норвегии и Финляндии.

Уровень потребления мощности в ОЭС Северо-Запада в ближайшие 10 лет имеет устойчивую тенденцию роста по умеренному варианту в среднем 2–3 % в год, по оптимистическому варианту – 5,6% до 2010 года и 3,7% после 2010 года. Снижение прироста после 2010 года определяется:

1. Удовлетворением существующих, но не реализованных заявок прошлых лет;
2. Эластичностью спроса, связанной с ростом цены на электроэнергию из-за повышения цен на топливо, что неизбежно приведет к развитию энергосберегающих технологий.

Результаты прогнозов потребления на 2016 год по региональным энергосистемам и ОЭС Северо-Запада в целом в оптимистическом и умеренном вариантах представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Прогноз потребления электроэнергии по региональным энергосистемам на 2016 год

Энергосистема	Оптимистический вариант			Умеренный вариант		
	млрд.кВтч в 2016 г.	% за 10 лет	% в год	млрд.кВтч в 2016 г.	% за 10 лет	% в год
Архангельская	10,44	38	3	9,59	26,9	2,2
Карельская	13,66	58	4,2	12,65	45,1	3,4
Кольская	17,44	31	2,5	13,94	3,3	0,3
Коми	10,26	27	2,2	8,87	10,3	0,9
Ленинградская	67,51	83	5,6	57,68	56,2	4,1
Новгородская	4,87	35,4	2,8	4,67	29,9	2,4
Псковская	3,8	94	6,2	1,92		
Калининградская	4,96	31,4	2,5	4,53	19,9	1,7
ОЭС Северо-Запада	132,96	58,78	4,3	113,85	35,96	2,8

С учетом предполагаемых вводов и выводов мощности ОЭС Северо-Запада величина установленной мощности объединения на 01.01.2010 составит 21580 МВт, что на 1850 МВт больше чем в 2006 г. При этом рост потребления в ОЭС Северо-Запада в этот же период по оптимистическому варианту ожидается 3796 МВт, по умеренному – 1420 МВт.

Установленная мощность, с учетом вводов и выводов мощности ОЭС Северо-Запада по состоянию на 01.01.2016 г. ожидается 28692 МВт или на

8961 МВт больше чем в 2006 г. При этом рост потребления в ОЭС Северо-Запада в этот же период по оптимистическому варианту ожидается 7400 МВт.

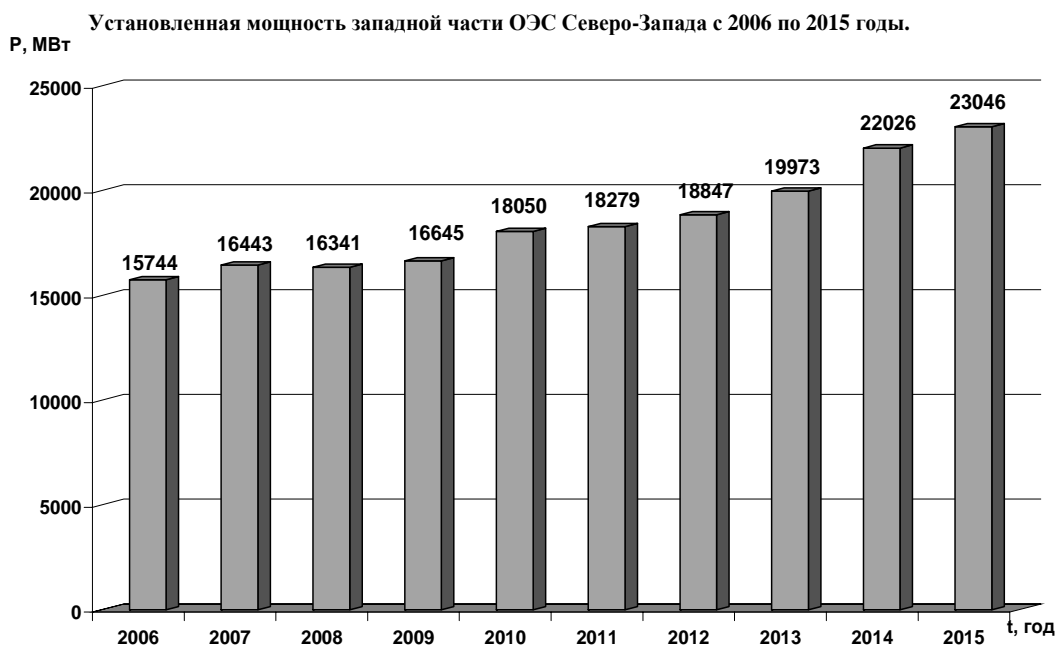


Рис.1.

Наиболее крупные вводы генерирующих мощностей ожидаются в Ленинградской энергосистеме. Изменение установленной мощности электростанций по Западной зоне ОЭС Северо-Запада представлен на рис. 1.

Ввод энергоблоков № 1 и № 2 на ЛАЭС-2 в 2013, 2014 годах позволит скомпенсировать рост потребления электроэнергии в конце десятилетия и подготовиться к выводу блоков Ленинградской АЭС-1.

В качестве перспективных мероприятий, обеспечивающих надежное энергоснабжение региона предполагаются:

- сооружение воздушно-кабельной линии 330 кВ между Ленинградская АЭС - ПС Зеленогорск – ПС Выборгская.

- Ввод в строй кольцевой структуры линий 750 кВ между Калининской АЭС, подстанцией Белозерская (район г. Череповец), подстанцией Сясь (где предполагается сооружение ГАЭС) и подстанцией Восточная, что существенно усилит связь ОЭС Северо-Запада с ОЭС Центра;

- Создание двух внутригородских кольцевых структур ВЛ 330 кВ – от ПС Западная через ПС Василеостровская на ПС Северная; замена воздушных линий 220 кВ, связывающих ПС Восточная, ПС 16, ПС 15 на кабельные линии 330 кВ; От ПС Восточная через ПС 16, ПС 15 на ПС Василеостровская и далее на ПС Северная.

- Завершение строительства второй цепи транзита 330 кВ Колэнерго-Карелэнерго-Ленэнерго.

- Ввод Юго-Западной ТЭЦ (540 МВт);

- Вводы генерирующих мощностей на электростанциях ТГК-1;

- Строительство ПС 330 кВ Восточная-2;

- Сооружение и ввод в строй ПС 330 кВ Зеленогорская;
- Строительство ОРУ 330 кВ Северной ТЭЦ;

Выполнение перечисленных мероприятий позволит обеспечить надежность режимов системообразующей сети энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области после 2010 года в условиях роста спроса на электрическую энергию, обусловленного повышением уровня жизни населения и развитием экономики региона.

Необходимо отметить, что указанные мероприятия по развитию генерирующих мощностей и электрических сетей Санкт-Петербурга приводят к появлению сложно-замкнутых кольцевых структур, объединяющих сети различных классов напряжения. Это обстоятельство требует применения средств продольного регулирования, обеспечивающих близкое к оптимальному распределение потоков активной мощности. Исследование указанных вопросов составляет основное содержание диссертации.

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.

Рассмотрены основные закономерности применения фазорегулирующих устройств для оптимизации режимов работы неоднородных электрических сетей. Рассмотрены современные способы построения фазорегулирующих устройств с тиристорными переключателями. В первом приближении сформулированы требования к параметрам и мощности устройств.

Рассмотрена конструкция автотрансформатора связи типа АОДЦТН-333000/750/330 со встроенным продольным регулированием напряжения в нейтрали и отдельным последовательным регулировочным трансформатором для поперечного регулирования напряжения под нагрузкой, включаемым между общей и регулировочной обмотками автотрансформатора.

При поперечном регулировании в нейтрали имеет место связанное регулирование, т.е. одновременное смещение по фазе векторов $U_{вн}$, $U_{сн}$. При этом эффект поперечного регулирования, т.е. взаимное смещение по фазе векторов $U_{вн}$ и $U_{сн}$ на угол $\delta = \delta_1 + \delta_2$ получается благодаря тому, что один и тот же вектор $U_{поп}$ складывается с векторами, имеющими разные модули. С учетом параметров автотрансформатора 750/330 кВ и трансформаторов поперечного регулирования (его максимальное напряжение равно 68 кВ) получаем:

для номинальных значений напряжений автотрансформатора и полностью включенной регулировочной обмотке (РО)

$$\delta_{ном} = \arctg \frac{68}{330/\sqrt{3}} + \arctg \frac{68}{750/\sqrt{3}} = 19^\circ 40' - 8^\circ 55' = 10^\circ 45'.$$

Для минимальных значений напряжений автотрансформатора и полностью включенной РО

$$\delta_{\max} = \arctg \frac{68}{290,5/\sqrt{3}} + \arctg \frac{68}{682,5/\sqrt{3}} = 22^{\circ} - 9^{\circ}50' = 12^{\circ}10',$$

что соответствует максимальному углу сдвига фаз.

Рассмотрены схемы и приведены параметры фазорегулирующих трансформаторов проходного типа, применяемых в энергосистемах западных стран.

Рассмотрены приемы математического моделирования переходных процессов синхронной машины, автоматического регулятора возбуждения и узлов нагрузки. Они использованы при разработке математических моделей Главы 4, на основе которых выполнены оценки эффективности фазорегулирующих устройств с точки зрения влияния на статическую и динамическую устойчивость простейшей эквивалентной системы, а также более сложной модели ОЭС Северо-запада.

В третьей главе приведены результаты расчетов установившихся режимов электропередачи при установке фазорегулирующих устройств. Показано, что использование приводит к заметному улучшению распределений потоков активной мощности и, соответственно, снижению потерь. Структура перспективной электрической сети иллюстрируется рис.2.

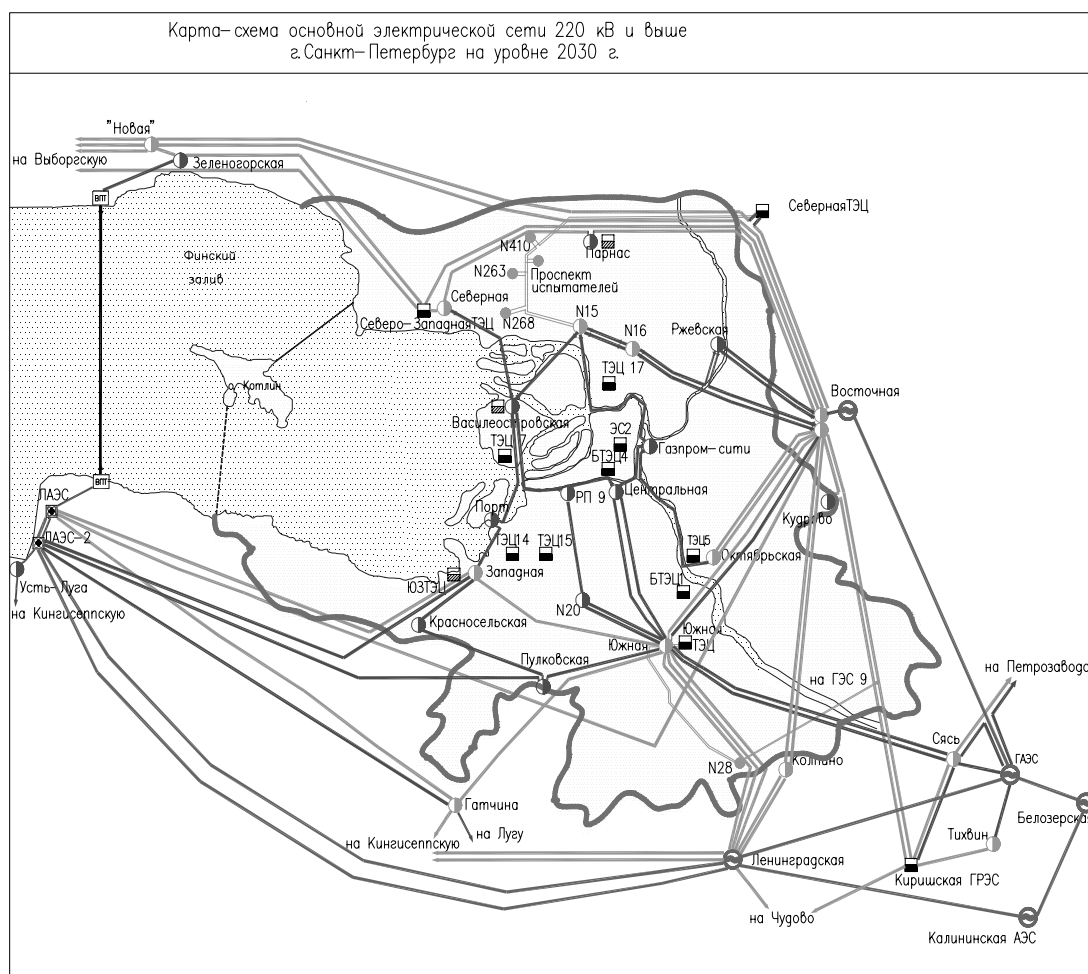


Рис.2. Перспективная структура сети.

Усиление энергосистемы привело к появлению сложной архитектуры сетей, характеризующейся наличием кольцевых структур и параллельной работой сетей различных классов напряжений. Организация рационального распределения потоков мощности в таких сложно-замкнутых сетях представляет собой сложную задачу.

Поскольку практически все кольцевые структуры рассматриваемой сети включают подстанцию 750/330/110 Восточная, то для изменения распределения потоков мощности по сечениям связанных сетей 330 и 750 кВ энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области, представленным на рисунке 3. предлагается оснастить автотрансформатор 750/330кВ на ПС Восточная устройством регулирования фазы напряжения, позволяющим изменять величину поперечной составляющей коэффициента трансформации и тем самым влиять на перетоки мощности.

Учитывая большое разнообразие электрических режимов, определяемое мощными связями с ОЭС Центра и наличием гидроаккумулирующей станции следует ориентироваться на применение устройства, способного осуществлять непрерывное изменение фазы контролируемого напряжения в соответствии с текущими структурой сети и параметрами режима.

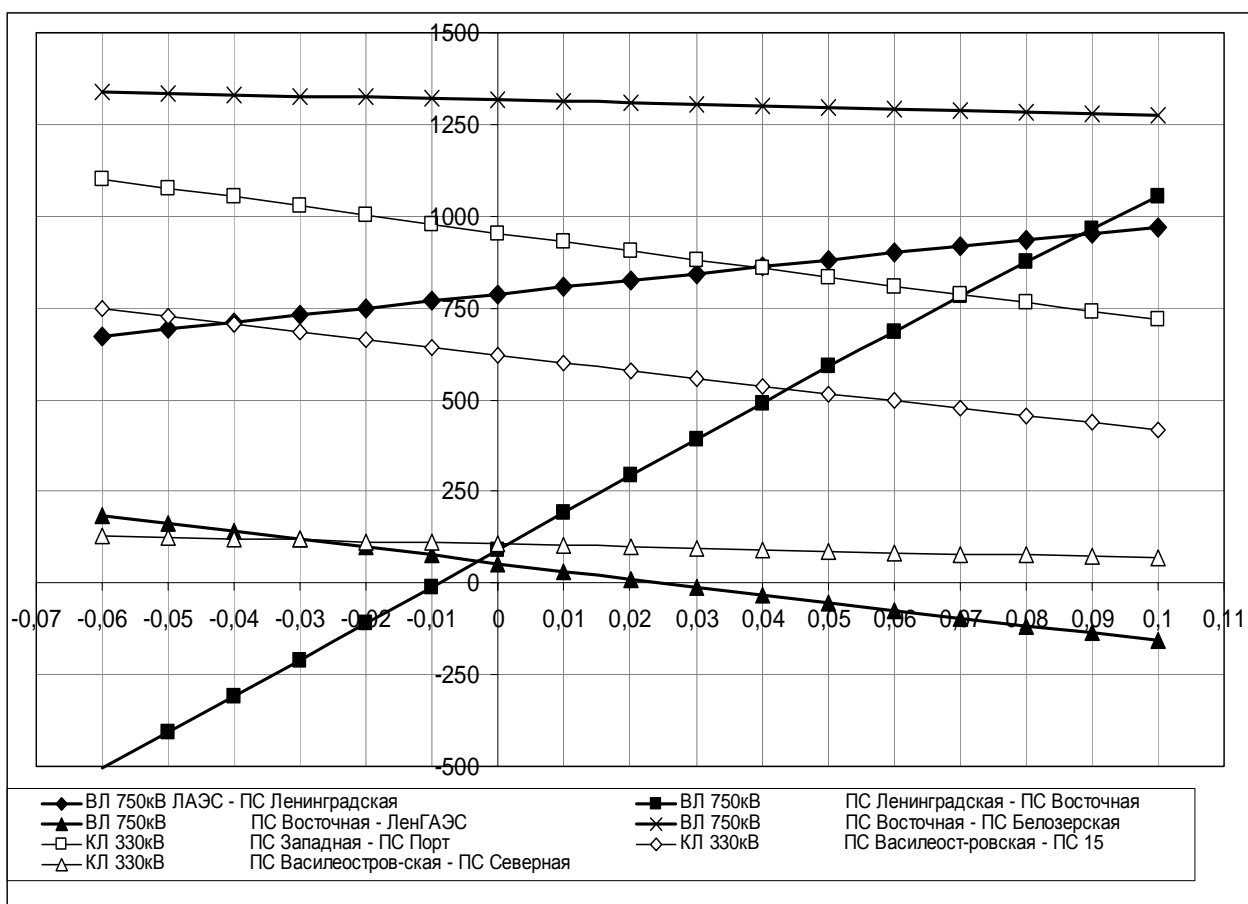


Рис 3. Перетоки мощности по ВЛ 750 кВ и КЛ 330 кВ в режиме зимнего максимума нагрузки

Сопоставление режимов показывает, что без использования продольного регулирования мощности (поперечного регулирования напряжения) не удастся загрузить участок ВЛ 750 кВ между подстанциями Восточная и Ленинградская, в то время как сети 330 кВ (особенно внутригородские связи ПС Западная – ПС Порт – ПС Василеостровская – ПС 15) являются существенно перегруженными.

Поворот фазы напряжения на 5,2 эл. градуса (0,04 о.е. по отношению к ступени напряжения 330 кВ) приводит к существенному перераспределению мощностей по сетям 330 и 750 кВ: поток мощности по ВЛ 750 кВ ПС Ленинградская – ПС Восточная возрастает с 90 до 500 МВт, что приводит к разгрузке на 10 – 12% всех внутригородских кабельных линий 330 кВ (Рис. 3). Кабельная линия 330 кВ ПС Василеостровская – ПС №15 разгружается на 88 МВт, что составляет 17% от величины загрузки.

Изменяется направление перетока мощности в сечении 330кВ ПС Ленинградская – ПС Колпино, КирГРЭС, величина перетока изменяется на 90 МВт. Существенно меняется в сторону увеличения переток по двучепной ВЛ 750 кВ ЛАЭС – ПС Ленинградская. Изменение мнимой составляющей коэффициента трансформации на 0,01 о.е. позволяет изменить величину передаваемой через автотрансформатор 750/330 кВ на ПС Восточная на 120 МВт.

Изменение наиболее характерных режимных параметров иллюстрируется рис.3. Возрастает переток через АТ 750/330 ПС Восточная и ВЛ 750 кВ ПС Восточная – ПС Ленинградская при одновременном уменьшении потоков мощности по кабельным линиям 330 кВ. Таким образом, регулирование фазы способствует возрастанию загрузки сетей 750 кВ и снижению перетоков по внутригородским сетям 330 кВ.

Характер изменения всех перетоков мощности близок к линейному. Тем не менее, следует отметить, что несмотря на некоторую разгрузку кабельных линий ПС Западная – ПС Порт – ПС Василеостровская - ПС 15 их нагрузка превышает допустимую. Этой же особенностью отличаются и послеаварийные режимы, которые также рассмотрены в данном разделе.

Близкой к оптимальной величиной поперечного коэффициента трансформации для работы в установившемся режиме зимнего максимума является 0,03-0,04 о.е.

Проблема предотвращения опасных перегрузок кабельных линий между ПС Западная и ПС Порт и далее ПС Василеостровская, ПС 15, которые были зафиксированы в предыдущих расчетах режимов, заставила выполнить проверку целесообразности установки дополнительного фазорегулирующего устройства на ПС Западная на кабельной линии 330 кВ, отходящей в сторону ПС Порт. Поскольку речь идет о системе линий 330 кВ, то предлагаемое устройство должно быть проходного типа. Мощность указанного устройства должна выбираться из соображений ограничения токовой нагрузки кабеля, то есть должна быть равной 600 – 700 МВА.

Исходя из полученных результатов, характеризующих весьма высокую эффективность ФРУ с точки зрения управления режимами работы сети, был рассмотрен вариант их совместного регулирования. Алгоритм управления ФРУ на ПС Западная строился исходя из необходимости ограничения перетока мощности по внутригородским кабельным линиям. Это позволило проанализировать возможности ФРУ ПС Восточная с точки зрения регулирования основных режимных параметров и снижения потерь в сети.

Основные результаты расчетов иллюстрируются данными рис. 4.

Пунктирными линиями на указанных рисунках показаны зависимости перетоков мощности по элементам сети при работе ФРУ ПС Западная по описанному выше алгоритму поддержания постоянной величины активной мощности (600 МВт) по КЛ ПС Западная – ПС Порт. Из зависимостей рис.4 видно, что регулировочные возможности ФРУ ПС Восточная сохраняются. В то же время рис.4 иллюстрирует возможности жесткого ограничения перетоков мощности по кабельным линиям во всем диапазоне регулирования коэффициента трансформации АТ ПС Восточная.

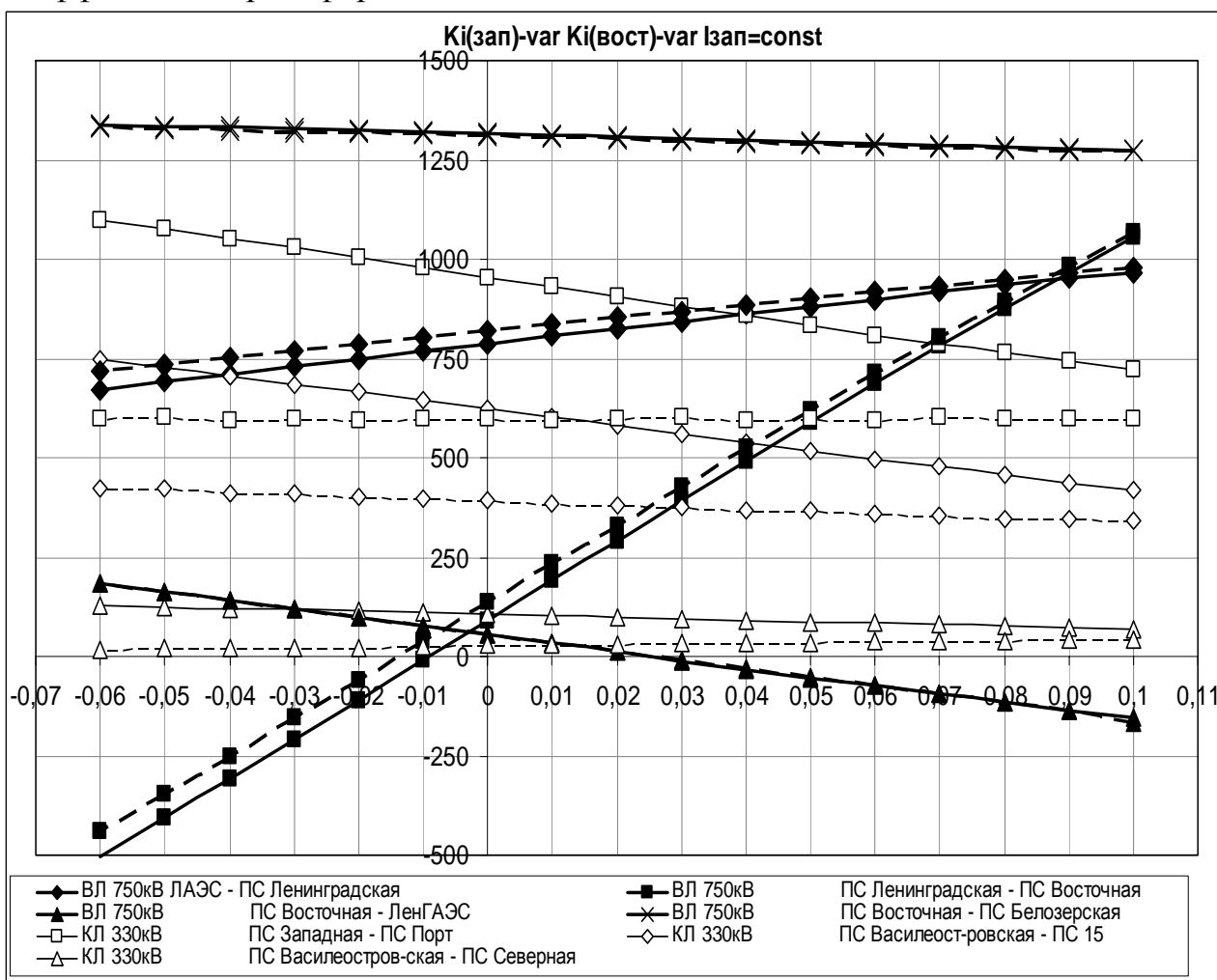


Рис.4. Зависимости перетоков мощности по ВЛ 750 кВ и кабельным линиям при совместном регулировании двух фазорегулирующих устройств.

При этом потери в сети несколько возрастают за счет разгрузки кабельных линий, обладающих малым активным сопротивлением. Несмотря на это, существует возможность снижения потерь за счет регулирования ФРУ (по крайней мере, на 1,0 – 1,5 МВт).

В целом можно сделать вывод о высокой эффективности применения фазорегулирующих устройств для управления режимами сложно-замкнутых сетей и ограничения опасных перетоков мощности по сечениям. Целесообразно включить вопрос об использовании ФРУ в перспективной электрической сети электроснабжения Санкт-Петербурга.

Использование второго ФРУ, ограничивающего ток кабельной линии позволяет отказаться от прокладки второй цепи кабельной линии длиной 26 км, что повлечет значительную экономию средств.

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

Количество работ, посвященных исследованию режимов и устойчивости электропередач с ФРУ относительно невелико. В основном ФРУ рассматривается как средство улучшения показателей установившихся режимов работы, а его возможное влияние на показатели колебательной статической устойчивости и переходные процессы при конечных возмущениях практически не рассматривались.

Применение ФРУ весьма эффективно для обеспечения режимов работы сложно-замкнутых неоднородных сетей различных классов напряжения, однако представляет интерес оценка возможности привлечения ФРУ не только к оптимизации показателей установившегося режима работы, но и повышению качества протекания переходных процессов.

Обычным критерием регулирования в сложно-замкнутой сети является минимум потерь мощности (с учетом ограничений по устойчивости). При привлечении ФРУ к улучшению системной динамики в качестве параметра регулирования целесообразно использовать скольжение ротора ближайшего генератора или величину отклонения частоты напряжения в одной из точек подключения ФРУ. Ниже приведены результаты определения показателей устойчивости при регулировании ФРУ.

Исследования по определению эффективности и особенностей работы ФРУ были выполнены в схеме электропередачи, представленной на рис. 5. Принималось, что повышающий трансформатор оснащен ФРУ. При этом закон регулирования ФРУ имеет следующий вид:

$$(1 + pT) \cdot \Delta\delta_{\text{ФРУ}} = \delta_{\text{задан}} + k_{0\omega} \cdot \Delta\omega_U,$$

где: T – постоянная времени фазорегулирующего устройства, с;

$\Delta\delta_{\text{ФРУ}}$ – угол сдвига фазы ФРУ, рад;

$\Delta\omega_U$ – отклонение частоты напряжения, рад/с.;

$\delta_{\text{задан}}$ – заданная величина сдвига в установившемся режиме;

$k_{0\omega}$ – коэффициент регулирования по отклонению частоты напряжения.

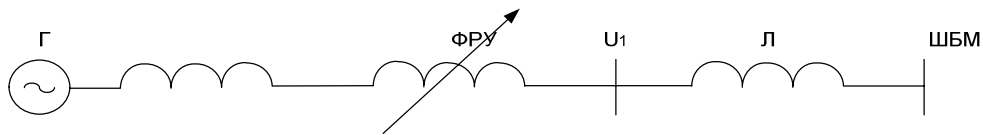


Рис. 5. Схема электропередачи с ФРУ.

В ходе исследований определялись показатели устойчивости при различных величинах постоянных времени ФРУ, коэффициентах регулирования и законах управления возбуждением генератора.

Для рассмотренных выше условий регулирования (АРВ-ПД на генераторе и регулирование ФРУ по скольжению генератора или по отклонению частоты напряжения на зажимах генератора) была рассчитана зависимость достигаемой степени устойчивости от постоянной времени ФРУ. Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2.

Зависимость степени устойчивости от постоянной времени ФРУ.

Тр, с	α
0,1	-4,994
0,2	-2,498
0,5	-1,0235
1	-0,5651
2	-0,3674
5	-0,277

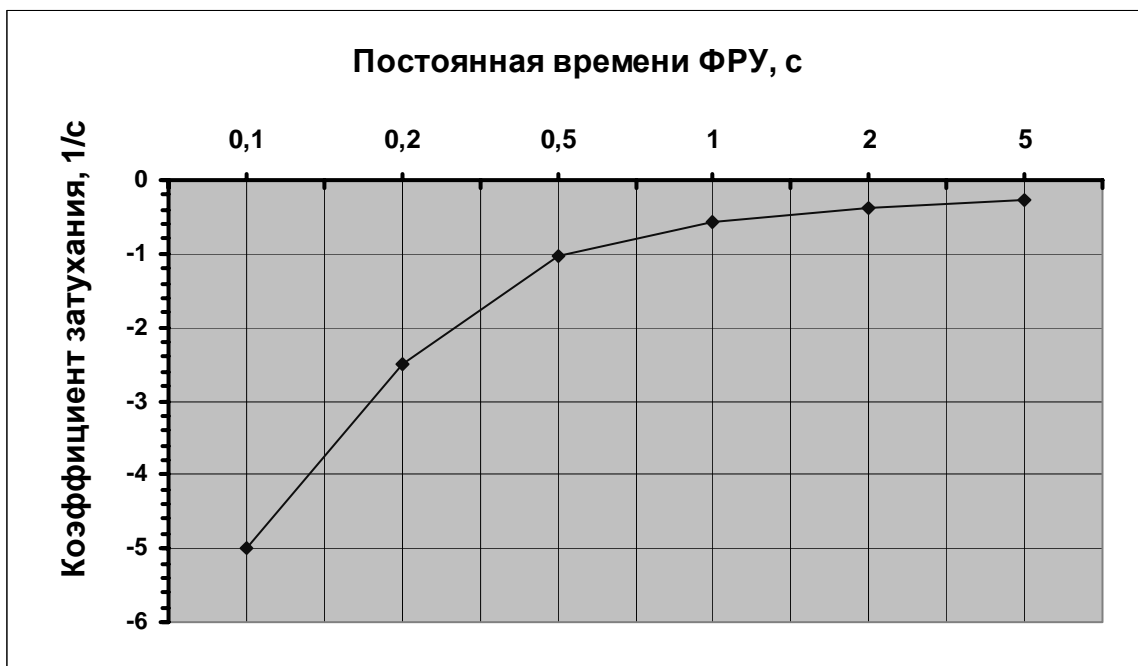


Рис. 6. Зависимость степени устойчивости системы от постоянной времени ФРУ.

Для получения приближенных оценок статической и динамической устойчивости энергосистемы, включающей Санкт-Петербург и примыкающие сети напряжением 330 и 750 кВ, были проведены предварительные оценки устойчивости в эквивалентной схеме энергообъединения, представленной на рис. 7.

В таблице 3 приведены корни характеристического полинома, характеризующие статическую устойчивость линеаризованной модели представленного эквивалента.

Как следует из данных таблицы 3, рассматриваемая эквивалентная система обладает весьма высокими показателями устойчивости. Основными факторами являются наличие мощного кольца линий 750 кВ, обуславливающие жесткие связи с ОЭС Центра, и кольцевых структур ВЛ 330 кВ.

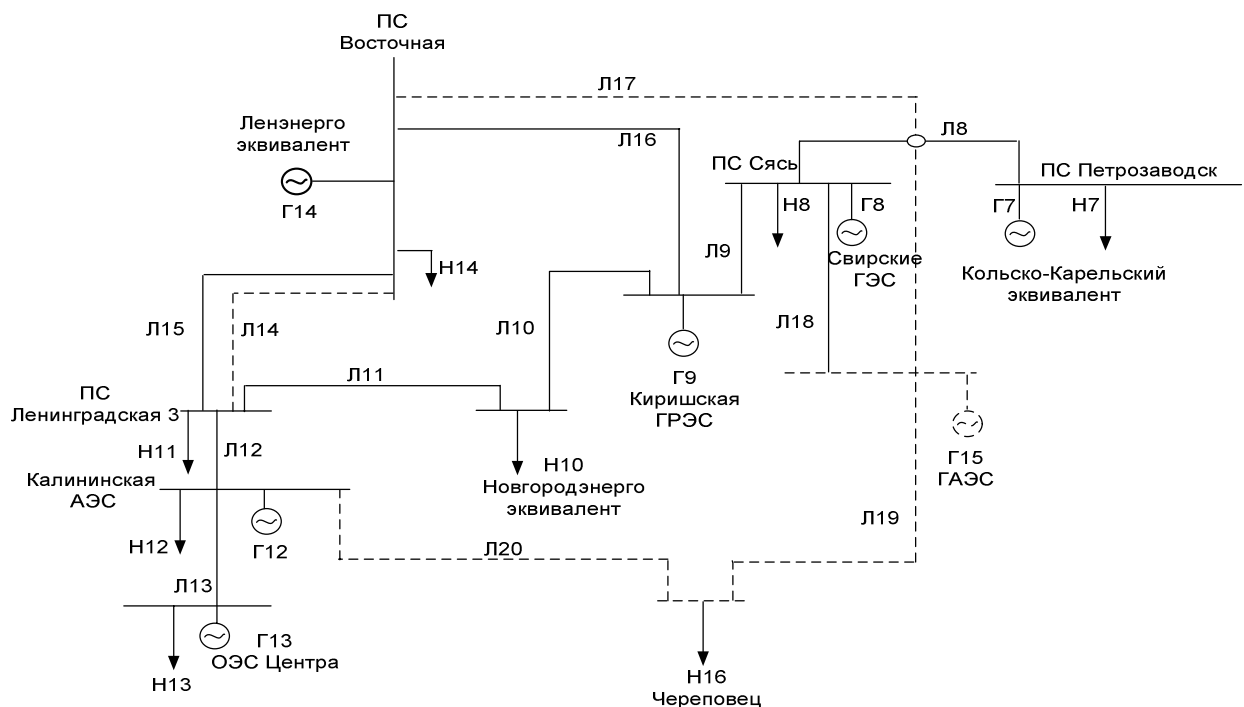


Рис.7. Эквивалентная схема энергообъединения

Указанные факторы определяют также и высокий уровень динамической устойчивости параллельной работы генераторов объединения. Исследование динамической устойчивости, выполненное в программной среде Modelica, показало, что система выдерживает трехфазное короткое замыкание длительность 0,3 с практически в любой точке (кроме подстанций Кольско-карельского транзита, не представленных в данной эквивалентной схеме).

Таблица 3.

Корни характеристического полинома
-1.0089 ± 13.128i
-0.81361 ± 12.62i
-0.72565 ± 6.1476i
-0.72416 ± 11.777i
-0.70171 ± 0.95781i
-0.5591 ± 0.22243i
-0.54096 ± 7.2104i
-0.48069 ± 5.0961i
-0.48004 ± 5.5703i
-0.43626 ± 0.0031482i
-0.40315 ± 7.7613i
-0.40063 ± 4.4676i
-0.33639
-0.29956
-0.2596
-0.23957
-0.17789

Выводы

1. Рассмотрены перспективы развития энергосистемы Санкт-Петербурга на разных этапах. Выделены ключевые моменты реконструкции и усиления сетей и ввода новых генерирующих мощностей. Показано, что в ходе развития сетей образуется несколько кольцевых структур линий 330 кВ, в том числе кабельных. Необходимо отметить большую техническую целесообразность сооружения воздушно-кабельной линии через Финский залив. Однако, параллельная работа связанных сетей напряжений 330 и 750 кВ характеризуется неравномерной загрузкой элементов и, в силу этого, повышенными потерями в сети.

2. Показано, что оптимальным решением вопроса регулирования потоков мощности по неоднородным сетям является установка фазорегулирующего автотрансформатора на подстанции «Восточная», связывающей разветвленные сети 330 кВ с линиями 750 кВ. Регулирование фазы напряжения обеспечивает равномерную загрузку систем линий электропередачи различных классов напряжения и снижение потерь мощности.

3. Принятая к реализации структура сети линий 330 кВ обуславливает в ряде режимов перегрузку внутригородских кабельных линий. Это требует установки второго фазорегулирующего устройства на ПС «Западная». Использование второго ФРУ позволяет ограничить токовые

перегрузки линий и отказаться от прокладки второй цепи кабельной линии класса 330 кВ.

4. Использование фазорегулирующих устройств позволяет снизить потери в сети в среднем на 1,5 – 2 МВт.

5. Выполнено исследование эффективности использования фазорегулирующего устройства для демпфирования колебаний в условиях простейшей электрической системы. Показано, что привлечение ФРУ с непрерывным регулированием эффективно только в условиях применения на генераторах АРВ пропорционального действия. Показано, что АРВ-СД обладает значительно большими возможностями в части обеспечения демпфирования колебаний.

6. Исследование устойчивости, выполненное для эквивалентной схемы части ОЭС Северо-запада, примыкающей к Санкт-Петербургу, показало, что рассматриваемая энергосистема обладает значительными запасами колебательной статической и динамической устойчивости, что подтверждает правильность выбранных проектных решений.

7. В целом можно сделать вывод о высокой эффективности применения фазорегулирующих устройств для управления режимами сложно-замкнутых сетей и ограничения опасных перетоков мощности по сечениям. Целесообразно включить вопрос об использовании ФРУ в перспективной электрической сети электроснабжения Санкт-Петербурга.

Основные положения диссертации отражены в публикациях:

1. Беляев А.Н., Смолоник С.В., Фролов О.В. «Обоснование необходимости применения устройств управляемой поперечной компенсации для транзитных электропередач класса 330 – 500 кВ»// Материалы Всероссийского научного семинара «Энергетическая безопасность России». 12 апреля 2006 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2006г. с.100 – 105.

2. Смолоник С.В., Фролов О.В. «Современные требования системы оперативно-диспетчерского управления к персоналу и возможности СПбГПУ по его подготовке» // Материалы Всероссийского научного семинара «Энергетическая безопасность России». 12 апреля 2006 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2006г. с.105 – 108.

3. Смолоник С.В., Фролов О.В. «Научные задачи, связанные с развитием энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области» // Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 5-1 (47), 2006. с. 65-68.

4. Фролов О.В. «Применение фазорегулирующих устройств в ОЭС Северо-запада» // Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» 18-19 мая 2007г. - Издательство СПбГПУ - Санкт-Петербург. 2007г. - с. 463-464.

5. Фролов О.В. «Направления развития деятельности системного оператора как инфраструктуры института конкурентного рынка электроэнергии» // Труды 7 Международной научно-практической конференции «Экономика, экология и общество России в 21-м столетии», СПб., 2005. с.586-590.

6. Фролов О.В. «Задачи диспетчерского управления в области поддержки торговых процедур и сопровождения конкурентного рынка электроэнергии» // Труды IX Международной научно-практической конференции «Системный анализ и управление». СПб. 2005. с.261-264.

7. Фролов О.В. «Оперативно-диспетчерское (технологическое) управление в электроэнергетике на уровне региональных энергосистем в условиях функционирования оптового и розничных конкурентных рынков электроэнергии» // Труды 4 Международной научно-практической конференции «Экономика, экология и общество России в 21-м столетии». СПб. 2002. с.74-80.