

На правах рукописи

Равжиндамба Давааням

**ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
МОНГОЛИИ**

Специальность 05.14.02 — Электростанции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Брянцев Александр Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Попов Максим Георгиевич

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

Защита состоится «_____» _____ 2003 года в 10 часов на заседании
диссертационного Совета Д 212.229.11 при Санкт-Петербургском
государственном политехническом университете по адресу: 195251, С.-
Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке
университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2003 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.229.11
к.т.н., доцент

Е.Н. Попков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проектирование основной высоковольтной сети Монголии было выполнено в начале – середине 70-х годов, когда основным направлением развития электроэнергетики считалось постоянное увеличение объемов производства и охват большей части территории централизованным электроснабжением. В связи с большой протяженностью страны общая длина линий электропередачи 220 кВ составляет 1715 км, 110 кВ – 2216 км.

Однако структурная перестройка народного хозяйства России в период 1990 – 2002 гг., оказавшая существенное воздействие на развитие народного хозяйства и энергетики Монголии, привела к снижению общих объемов производства и снижению спроса на электрическую энергию.

Поскольку общая длина ВЛ 220 кВ и 110 кВ весьма велика, то генерация реактивной мощности является весьма значительной (около 300 МВАр). В режимах малых нагрузок такая генерация реактивной мощности привела к недопустимому повышению напряжения и необходимости отключения линий электропередачи, что приводит к снижению надежности энергоснабжения.

Поэтому одной из основных проблем при осуществлении электрических режимов ЦЭС Монголии является управление уровнями напряжений в режимах минимальных нагрузок.

Следует отметить, что с этой проблемой столкнулись энергосистемы многих развитых стран, в том числе и России. В энергосистемах с разветвленной высоковольтной сетью автоматические регуляторы возбуждения генераторов, как правило, не справляются с потреблением избыточной реактивной мощности. Режим недовозбуждения является неблагоприятным для генераторов всех типов, - для турбогенераторов этот режим опасен с точки зрения теплового состояния крайних пакетов железа статора и лобовых частей. Проблема потребления зарядной мощности высоковольтной воздушной линии электропередачи (ВЛ) проявилась особенно ярко после ввода в эксплуатацию протяженных линий электропередачи классов 500, 750 и 1150 кВ. Оказалось, что применение неуправляемых реакторов приводит к резкому снижению пропускной способности таких электропередач. В связи с этим в конце 80-х годов были развернуты исследовательские работы по созданию и внедрению в электроэнергетических системах управляемых шунтирующих реакторов (УШР). В настоящее время наиболее известными конструктивными решениями в области создания УШР являются УШР трансформаторного типа и реакторы, управляемые подмагничиванием. Особенности конструкций и характеристик этих реакторов рассмотрены в главе 1.

В настоящее время в ЦЭС Монголии установлено несколько неуправляемых реакторов, но их использование влечет неоптимальное

распределение потоков реактивных мощностей и, соответственно, повышение уровня активных потерь, особенно в режимах малых нагрузок.

К настоящему моменту в ЕЭС России эксплуатируются два УШР, управляемых подмагничиванием сердечника, – один на номинальное напряжение 110 кВ, мощностью 25 МВАр (подстанция Кудымкар, Пермьэнерго), второй на напряжение 220 кВ, мощностью 100 МВАр (подстанция Чита). Один реактор трансформаторного типа построен и эксплуатируется в энергосистеме Индии, – на номинальное напряжение 400 кВ, мощностью 50 МВАр.

Практика использования УШР (на ПС Кудымкар) показала, что в результате ввода реактора в эксплуатацию в режиме автоматической стабилизации напряжения колебания напряжения в точке подключения ограничены величиной $\pm 1,5\%$ относительно напряжения уставки (114 кВ), при одновременном сокращении числа коммутаций БСК и РПН трансформаторов примерно в 100 раз; в часы максимума графика нагрузки потери энергии в прилегающей сети снижены, что обеспечивает окупаемость реактора менее чем за 3 года;

Цели и задачи работы. Основными целями работы стали следующие: проверка эффективности применения УШР для стабилизации уровней напряжений и уменьшения потерь активной мощности за счет оптимизации распределения потоков реактивной мощности в ЦЭС Монголии; исследование влияния регулирования УШР на показатели статической и динамической устойчивости ЭЭС простой структуры; проверка полученных результатов в расчетной схеме ЦЭС Монголии.

Для достижения поставленных целей потребовалось:

- выполнить исследование установившихся режимов ЦЭС Монголии при различных способах компенсации реактивной мощности;
- разработать комплексные математические модели для исследования демпферных свойств и электромеханических переходных процессов электропередачи с УШР в среде Modelica;
- выполнить исследование демпферных свойств электропередачи, содержащей генератор, оснащенного быстродействующей системой возбуждения, и управляемый шунтирующий реактор с различными законами управления;
- выполнить оценку эффективности УШР при их установке в ЦЭС Монголии.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- в среде Modelica разработана методика математического моделирования переходных процессов электропередачи с УШР для анализа процессов при конечных возмущениях и демпферных свойств;
- выполнены исследования демпферных свойств электропередачи, содержащей генератор, оснащенного быстродействующей системой

возбуждения, и управляемый шунтирующий реактор с различными законами управления;

- выполнено исследование электромеханических переходных процессов для оценки влияния УШР при конечных возмущениях в условиях электропередачи простой структуры и в условиях ЦЭС Монголии.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

На основе анализа установившихся режимов работы ЦЭС Монголии разработаны рекомендации по установке в энергосистеме управляющих шунтирующих реакторов для нормализации уровней напряжений и снижения потерь мощности в сети. Даны рекомендации по использованию законов управления УШР в условиях ЦЭС Монголии. Разработанное программное обеспечение, полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в проектных и эксплуатационных организациях при определении условий эксплуатации управляемых шунтирующих реакторов в ЭЭС, расчетах показателей статической устойчивости и переходных процессов при конечных возмущениях в энергосистеме. Разработанное программное обеспечение используется в научной работе кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ при анализе электромеханических переходных процессов в энергосистемах.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры "«Электрические системы и сети»" а также на научно-технических конференциях, проводимых в СПбГТУ. По теме диссертации опубликовано две печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований. Содержание работы изложено на 152 страницах, иллюстрируется 35 рисунками и 42 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен обзор энергетики и особенностей народного хозяйства Монголии, обоснована актуальность работы.

В первой главе диссертации рассмотрены средства регулирования напряжения и устройства регулирования реактивной мощности в высоковольтной электрической сети. Выполнен анализ и сопоставление характеристик применяемых на практике управляемых шунтирующих реакторов – трансформаторного типа и реакторов, управляемых подмагничиванием сердечника.

Вторая глава работы посвящена вопросам математического моделирования элементов энергосистемы, в том числе генераторов и управляемых шунтирующих реакторов для выполнения расчетов установившихся режимов ЭЭС Монголии и анализа показателей устойчивости и расчетов переходных процессов.

При расчетах установившихся режимов работы энергосистемы генератор моделируется источником с заданной активной мощностью и заданным модулем напряжения (с учетом ограничений по реактивной мощности), а управляемый реактор - заданным модулем напряжения в узле подключения и заданными ограничениями по потребляемой реактивной мощности.

Математическая модель для анализа электромеханических переходных процессов разработана на основе уравнений синхронного генератора без учета быстропереходных процессов в статорной цепи. В продольной оси рассмотрены два контура – контур возбуждения и эквивалентный демпферный; в поперечной оси моделируются два эквивалентных демпферных контура.

В основу математического описания АРВ положены передаточные функции его отдельных элементов. Математическая модель АРВ описывается системой дифференциальных уравнений 6 порядка.

Линеаризованный закон регулирования УШР имеет вид:

$$(1 + pT_p) * \Delta b_p = K_{\Delta U} * \Delta U + K_I * \Delta I + K_{\Delta \omega} * \Delta \omega + K_{p\Delta \omega} * p\Delta \omega, \quad (1)$$

где T_p – постоянная времени реактора, с,

Δb_p – проводимость реактора, о.е.,

$K_{\Delta U}$, K_I , $K_{\Delta \omega}$, $K_{p\Delta \omega}$ - коэффициенты регулирования по отклонению напряжения, тока линии, отклонению частоты напряжения и по производной частоты напряжения. Частота напряжения и производная частоты напряжения вычисляются в узле подключения реактора; в случае регулирования по току используется ток подходящей к узлу линии; регулирование по току может сочетаться с применением параметров стабилизации $\Delta \omega$ и $p\Delta \omega$.

В третьей главе приведены результаты расчетов установившихся режимов ЦЭС Монголии; на их основе рассмотрены вопросы установки УШР для обеспечения баланса реактивных мощностей и снижения потерь активной мощности в сети 220 и 110 кВ.

В Центральной энергосистеме Монголии работают 5 теплофикационных электростанций с установленной мощностью 796 МВт.

Следует отметить, что энергосистема имеет суммарную располагаемую мощность электростанций, достаточную для обеспечения электроэнергией потребителей своей зоны, но по ряду режимных ограничений вынуждена импортировать электроэнергию.

К режимным условиям, прежде всего, относятся: отсутствие в ЦЭС маневренных мощностей (ГЭС, ГАЭС), необходимость работы станций по теплофикационному графику и низкий регулировочный диапазон угольных котлоагрегатов. Стремление к отказу от ежесуточных пусков-остановов котельного оборудования приводит к ограничению количества

работающих в часы максимальных нагрузок котлов, что влечет необходимость импорта энергии. С другой стороны, увеличение объемов выдачи избытков мощности в ночные часы в Бурятскую энергосистему ограничивается контрактными условиями на обмен электроэнергией между ОЭС Сибири в ЦЭС Монголии.

В режиме минимума нагрузки электростанции ЦЭС генерируют 290,7 МВт, при этом переток в ОЭС Сибири составляет 30 МВт.

В режиме максимума нагрузки электростанции ЦЭС генерируют 520 – 540 МВт, при этом переток из ОЭС Сибири составляет 12 - 20 МВт.

На данный момент в энергосистеме действуют 5 подстанций 220 кВ с общей установленной мощностью трансформаторов 880 МВА;

Расчет установившегося режима, соответствующий минимальной нагрузке энергосистемы, показывает, что даже при включении всех шунтирующих реакторов (общая мощность ШР в сети составляет 180 МВАр) на подстанциях Баганур, Чойр, Улан-Батор, Эрдэнэт и Дархан (Рис.1) режим при всех включенных линиях класса 220кВ не может быть реализован, так как напряжения в системообразующей сети 220 кВ (ПС Дархан, Эрдэнэт и Чойр) выше допустимых, а балансирующий узел потребляет реактивную мощность 100,9 МВАр, что эквивалентно установке реактора данной мощности.

Режим с приемлемыми уровнями напряжений может быть обеспечен только при отключении ряда параллельных цепей линий. В этом случае надежность энергоснабжения существенно снижена, поскольку питание достаточно мощного узла нагрузки в районе города Дархан осуществляется по протяженным одноцепным ВЛ 220 кВ ТЭЦ-4 – Эрдэнэт (257,7 км) и Эрдэнэт – Дархан (157,7 км), одноцепной ВЛ 208 ТЭЦ-4 – Дархан (275 км) и протяженным ВЛ 110 кВ, связывающим шины 110 кВ ТЭЦ– 4 с районом города Дархан. Для обеспечения баланса

Таблица 1.

Активные потери при отключенных параллельных цепях линий, включенной ВЛ208 и включенных ШР в узлах .

U _{ном}	Тип	Потери в ЛЭП		Потери в тр.-рах	
		МВт	%	МВт	%
220	Всего:	4,315	55,32	0,302	3,87
110	Всего:	2,421	31,04	0,37	4,74
35	Всего:	0,358	4,59	0,034	0,43
	Сумма:	7,094	90,95	0,706	9,05

Суммарные потери: 7,8 МВт.

реактивных мощностей требуется включение ШР мощностью 140 МВАр на подстанциях: Улан-Батор (40 МВАр), Баганур (20 МВАр), Чойр (20 МВАр), Эрдэнэт (20 МВАр), Дархан (40 МВАр). Кроме того, желательно включение двух неуправляемых реакторов малой мощности

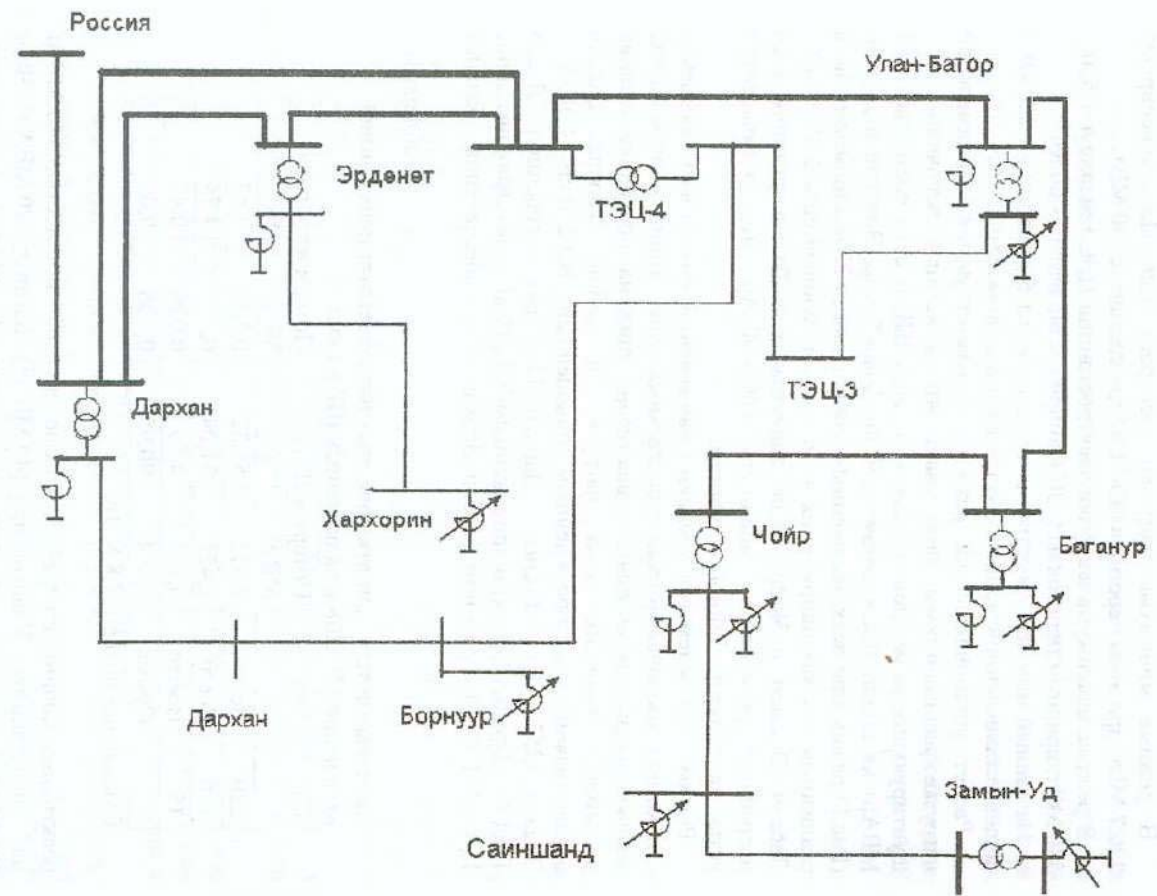


Рис.1. Структура сетей 110 и 220 кВ ЦЭС Монголии с указанием мест установки ШР и предлагаемых УШР

(3,3 МВАр) на подстанциях Саиншанд и Замын-Уд. Без установки этих реакторов из-за слабой загрузки весьма протяженной ВЛ между этими подстанциями напряжения в сети повышаются до 130 – 132 кВ, а потери возрастают на 0,5 МВт.

Анализ перетоков мощностей по линиям электропередачи показал, что наиболее рациональна следующая расстановка управляемых шунтирующих реакторов: ПС Улан-Батор – 25 МВАр, Баганур – 25 МВАр, Чойр – 25 МВАр; эти реакторы устанавливаются в дополнение к существующим неуправляемым. На подстанциях Хархорин и Борнур устанавливается по одному УШР мощностью 10 МВАр. Ранее была обоснована установка реактора 3,3 МВАр на ПС Замын-Уд. Потери в данном режиме иллюстрируются таблицей 2.

Таблица 2.

Активные потери при отключенных параллельных цепях линий, включенной ВЛ 208, УШР в узлах Улан-Батор 110, Баганур, Чойр, Хархорин, Борнуур и ШР в узлах № 18 (Дархан, 40 МВАр).

U _{ном}	Тип	Потери в ЛЭП		Потери в тр.-рах	
		МВт	%	МВт	%
220	Всего:	3.883	57.49	0.283	4.19
110	Всего:	1.879	27.82	0.349	5.17
35	Всего:	0.332	4.92	0.027	0.4
	Сумма	6.095	90.24	0.66	9.76

Суммарные потери: 6,755 МВт.

Как показывает таблица 2, суммарные потери активной мощности в ЦЭС Монголии при установке УШР за счет некоторого повышения уровней напряжения и нормализации потоков реактивной мощности по сравнению с потерями при использовании ШР (табл. 1) снизились с 7,8 МВт до 6,76 МВт, т.е. на 13,4 %, что обосновывает экономическую целесообразность установки УШР.

Режим максимальных нагрузок соответствует зимнему периоду эксплуатации ЦЭС. Для реализации данного режима потребовалось включение ШР мощностью 20 МВАр на подстанциях Улан-Батор, Баганур, Чойр, Эрдэнэт, Дархан, ШР мощностью 3,3 МВАр на ПС Саиншанд, УШР мощностью 3,3 МВАр на ПС Замын-Уд.

В режиме максимальных нагрузок уровни напряжений в сети 110 кВ, питающейся от ПС Эрдэнэт оказываются сниженными (порядка 105 – 108 кВ). Данные значения напряжений находятся в пределах допустимых, но, как известно, пониженные напряжения способствуют увеличению потерь. Характеристики данного режима иллюстрируются данными таблицы 3.

Таблица 3.

Активные потери в максимальном режиме, включенных ШР и УШР (3,3 МВАр) на ПС Замын-Уд.

U _{ном}	Тип	Потери в ЛЭП		Потери в тр.-рах	
		МВт	%	МВт	%
220	Всего:	3,387	51,14	0,978	14,77
110	Всего:	1,683	25,42	0,373	5,63
35	Всего:	0,167	2,52	0,034	0,51
	Сумма	5,237	79,09	1,385	20,91

Суммарные потери: 6,622 МВт.

Установка УШР в высоковольтной электрической сети Монголии позволяет решить проблемы понижения напряжений и потребления реактивной мощности генераторами ТЭЦ-4. Установившийся режим работы ЦЭС при максимальных нагрузках иллюстрируется данными таблицы 4.

Таблица 4.

Активные потери в максимальном режиме при включенных УШР.

U _{ном}	Тип	Потери в ЛЭП		Потери в тр.-рах	
		МВт	%	МВт	%
220	Всего:	3,011	48,81	0,938	15,21
110	Всего:	1,68	27,23	0,351	5,69
35	Всего:	0,156	2,53	0,032	0,53
	Сумма	4,846	78,58	1,321	21,42

Суммарные потери: 6,168 МВт.

В режиме при установке УШР повышены уровни напряжений в узлах сети, питающихся от ПС Эрдэнэт, исключен режим потребления реактивной мощности генераторами ТЭЦ-4 и, как следствие, снижены потери активной мощности с 6,622 до 6,168 МВт, т.е. на 6,86 %.

Результаты расчетов режимов обобщены в таблице 5.

Таблица 5.

Требуемая мощность реакторов в расчетных режимах, МВАр.

ПС	Улан-Батор	Баганур	Чойр	Борнуур	Дархан	Эрдэнэт	Хархорин
Узел	4, 5	38, 39	11,37	12	18	14	32
Режим минимальных нагрузок ЦЭС Монголии:							
ШР	40	20	20	–	40	20	–
УШР	40,1	13,4	37	5,4	40	–	8,2

Режим максимальных нагрузок ЦЭС Монголии:							
ШР	20	20	20	–	20	20	–
УШР	36	25	31,1	0	40	–	0,6

На основе сопоставления режимов при минимуме и максимуме нагрузки был сделан окончательный выбор необходимой мощности УШР.

На ПС Улан-Батор потребляемая реактором мощность варьируется в пределах 40,1-36,0 МВАр, следовательно, из соображений экономии, можно оставить в работе неуправляемый ШР мощностью 20 МВАр в узле и ввести в работу УШР мощностью 25 МВАр. На ПС Баганур потребляемая реактором мощность изменяется в пределах 13,4-25,0 МВАр, следовательно, на этой подстанции нужно полностью вывести из работы неуправляемый ШР мощностью 20 МВАр и установить управляемый реактор мощностью 25 МВАр. На ПС Чойр ситуация аналогична положению на ПС Улан-Батор. На ПС Борнуур и Хархорин ранее реакторов не было, там требуется установка УШР мощностью 10 МВАр. На ПС Эрдэнэт предлагается оставить один ШР 20 МВАр. На ПС Дархан предлагается оставить работающими ШР мощностью 40 МВАр.

Рассмотренные предложения сведены в таблице 6.

Таблица 6.

Требуемая к установке мощность УШР, МВАр.

ПС	Улан-Батор	Баганур	Чойр	Борнуур	Дархан	Эрдэнэт	Хархорин
Узел	4, 5	38, 39	11,37	12	18	14	32
ШР	20		20		40	20	
УШР	25	25	25	10			10

На основе проделанного анализа установившихся режимов работы выполнена приближенная технико-экономическая оценка эффективности применения УШР в ЦЭС Монголии. Показано, что за счет использования УШР может быть достигнута значительная экономия потерь, а срок окупаемости не превышает трех лет (Таблицы 7,8).

Таблица 7.

Расчет экономического эффекта от использования УШР.

NN п/п	Наименование показателя	Условные обозначения	Размерность	Численные значения
1	Суммарные потери за год при работе с ШР	Sшр	Тыс. \$ / год	2924,7
2	Суммарные потери за год при работе с УШР	Sушр	Тыс. \$ / год	2620,7
3	Экономический эффект от использования УШР	$\mathcal{E} = S_{шр} - S_{ушр}$	Тыс. \$ / год	304,0

Таблица 8.

Расчет полной стоимости установленных УШР.

NN п/п	Наименование показателя	Условные обозначения	Размерность	Численные значения
1	Суммарная установленная мощность УШР в энергосистеме	M	кВАр	95000
2	Удельная стоимость УШР	УС	\$ / кВАр	7,5
3	Полная стоимость установленных УШР	$C = M * УС$	тыс.\$	712,5
4	Срок окупаемости УШР	T _{ок}	Год	2,34

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследований показателей статической устойчивости и расчетов переходных процессов ЭЭС различной структуры при конечных возмущениях. Моделирование выполнено в среде Modelica. Программное обеспечение позволяет выполнить численную линеаризацию исходных уравнений системы и производить расчет характеристических чисел, пользуясь программной средой MatLab. Предварительная оценка эффективности УШР при конечных возмущениях выполнена в условиях расчетной схемы «генератор - линия электропередачи - промежуточная подстанция с УШР - линия электропередачи – приемная система бесконечной мощности». Расчетная схема электропередачи с УШР приведена на рис.2.

Эта схема состоит из двух участков линий. Индуктивное сопротивление первого участка изменялось в пределах $x_{Л1} = 0,2 - 0,4$, второго – также в пределах $x_{Л2} = 0,2 - 0,4$. Принималось, что УШР

включен на шины промежуточной подстанции. Передаваемая мощность в расчетной схеме — 0,85 о. е. (за базисную принята натуральная мощность линии). Предполагалось, что регулирование реактора может осуществляться по отклонению напряжения ΔU , отклонению тока линии, отклонению частоты $\Delta \omega_U$ напряжения и производной отклонения частоты $p\Delta \omega_U$ напряжения в точке присоединения реактора. Закон регулирования УШР приведен выше (1).

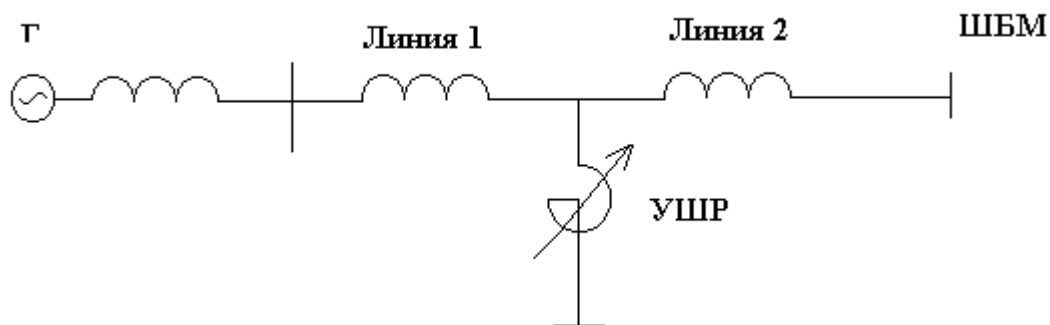


Рис. 2. Схема электропередачи с УШР.

При традиционном подходе к регулированию, то есть применению на генераторе и УШР «сильного» закона регулирования показатели устойчивости являются весьма благоприятными. Они приведены в таблице 9.

Таблица 9.

Характеристические числа для электропередачи с УШР при $X_{Л1} = 0,2$ и $X_{Л2} = 0,2$ и регулировании генератора и УШР.

Вещественная часть	-85,51	-38,18	-25,84	-21,75	-25,4	-11,02	-2,83	-2,67	-5,54	-0,84
Мнимая часть	0	0	0	29,3	0	11,57	8,53	1,55	0	0

Следует указать на то обстоятельство, что при регулировании только УШР показатели демпфирования колебаний также весьма высоки (Таблица 10).

Таблица 10.

Характеристические числа для электропередачи с УШР при $X_{Л1} = 0,2$ и $X_{Л2} = 0,2$ и регулировании только УШР ($K_{\Delta U} = -10$, $K_{0\omega} = 5$, $K_{1\omega} = 2$).

Вещественная часть	-118,7	-38,46	-25,64	-24,3	-14,3	-6,49	-3,02	-6,05	-2,45	-0,56
Мнимая часть	0	0	0	0	0	14,5	6,04	1,12	0	0

На основании данных таблицы 4.3 можно сделать вывод о положительном влиянии УШР (при условии наличия в законе регулирования сигналов стабилизации). Это весьма существенно для условий Монгольской энергосистемы, в которой генераторы оснащены системами регулирования возбуждения пропорционального типа.

При анализе показателей устойчивости более протяженной электропередачи ($X_{Л1} = 0,4$ и $X_{Л2} = 0,4$) основные закономерности, характеризующие влияние законов регулирования в основном сохраняются. Так, при пропорциональном законе регулирования возбуждения генератора наиболее высокие показатели устойчивости получаются при применении для регулирования УШР сигнала отклонения напряжения и стабилизирующих параметров $\Delta\omega_U$, $p\Delta\omega_U$.

Соответствующий результат иллюстрируется данными таблицы 11.

Таблица 11

Характеристические числа для электропередачи с УШР при $X_{Л1} = 0,4$ и $X_{Л2} = 0,4$ и регулировании только УШР ($K_{\Delta U} = -10$, $K_{0\omega} = 5$, $K_{1\omega} = 2$).

Вещественная часть	-104,4	-38,46	-25,64	-24,07	-14,3	-10,58	-3,66	-6,03	-3,03	-0,84
Мнимая часть	0	0	0	0	0	16,32	7,32	0	0	0

Именно этот вариант регулирования является наиболее перспективным для условий Монголии, поскольку модернизация систем возбуждения генераторов (электромашинного и высокочастотного типов)

в ближайшей перспективе не предусматривается, что в настоящее время обуславливает достаточно низкие уровни демпфирования. Установка в ряде точек УШР с регулированием по отклонению напряжения и параметрам стабилизации позволит заметно повысить показатели демпфирования колебаний.

В заключение для рассмотренных выше условий регулирования (АРВ-СД на генераторе и регулирование реактора с учетом стабилизирующих параметров) была рассчитана зависимость достигаемой степени устойчивости от постоянной времени реактора. Полученные результаты представлены в Таблице 12.

Таблица 12.

Зависимость степени устойчивости от постоянной времени реактора.

T_p, c	α
0,01	-2,94
0,05	-2,97
0,1	-3
0,3	-3,05
0,5	-3,07
0,6	-3,05
0,8	-2,93
1	-2,77
1,5	-2,4

Полученный результат показывает, что для обеспечения высоких показателей затухания необязательно стремиться к минимальным значениям постоянной времени реактора, составляющим $T_p = 0,01 \dots 0,02 c$.

Максимальные степени устойчивости достигаются при T_p , составляющей $0,3 \dots 0,6 c$, приемлемые значения показателей затухания – даже при $T_p = 1 c$. Учитывая полученные результаты, большинство расчетов переходных процессов выполнены при значении $T_p = 0,1 c$.

Результаты, характеризующие устойчивость маловозмущенного движения, полученные в условиях упрощенной расчетной схемы электропередачи, были проверены в той же расчетной схеме при приложении к системе конечных возмущений.

В качестве аварийных возмущений рассматривались короткие замыкания вблизи генератора и вблизи управляемого реактора. Длительность коротких замыканий составляла $t_{к.з.} = 0,12 c$.

Для примера на рис. 3 и 4 сопоставлены (с точки зрения величины вылета угла на первом колебании ротора) результаты расчетов переходного процесса при регулировании УШР и при отсутствии регулирования (при одинаковой длительности короткого замыкания). В

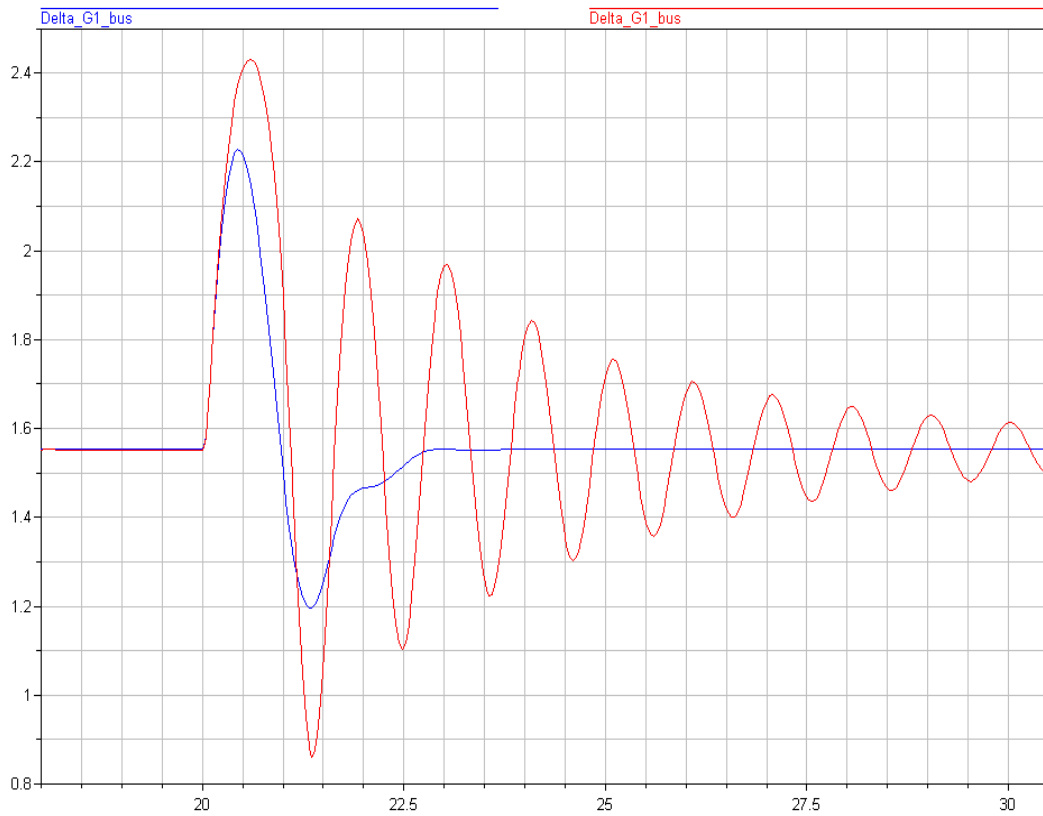


Рис.3. Изменение угла ротора генератора при коротком замыкании при регулировании УШР (а); при применении нерегулируемого ШР (б).

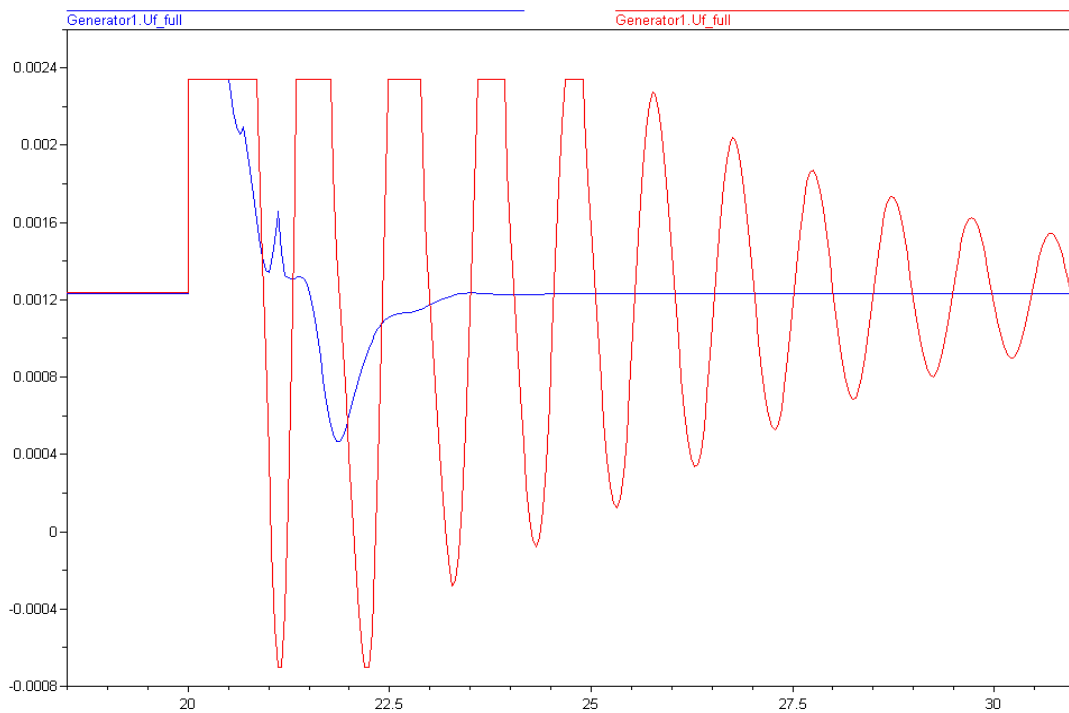


Рис.4. Изменение напряжения возбуждения в тех же условиях.

рассматриваемых условиях изменение проводимости реактора определяет снижение величины угла на первом колебании угла на 11,5 эл. град. (Рис.3). Однако наиболее заметным является улучшение демпфирования послеаварийных колебаний ротора, а также благоприятное воздействие на работу системы регулирования возбуждения генератора (Рис.4). В целом можно сделать вывод о сравнительно невысокой эффективности УШР с точки зрения влияния на ограничение вылета угла на первом колебании, однако в рассматриваемых условиях весьма велико влияние УШР на демпфирование послеаварийных качаний.

Полученные результаты методического характера были проверены в условиях ЦЭС Монголии. Расчеты были выполнены по экспериментальной программе для ПЭВМ, разработанной на кафедре «Электрические системы и сети» под руководством д.т.н. профессора А.А. Рагозина. Эта программа позволяет выполнять расчеты переходных процессов при конечных возмущениях с учетом изменения проводимостей управляемых шунтирующих реакторов. В качестве расчетной схемы для исследований динамической устойчивости была принята эквивалентная схема ЦЭС Монголии, содержащая 47 узлов.

В качестве возмущения рассматривалось трехфазное короткое замыкание на шинах 220 кВ ТЭЦ 4 с последующим отключением одной из параллельных цепей линии электропередачи ТЭЦ 4 – Эрденет 220. Полученные результаты можно кратко охарактеризовать следующим образом.

При отсутствии в ЦЭС Монголии управляемых реакторов устойчивость параллельной работы генераторов энергосистемы нарушается по нескольким связям. В случае установки в упомянутых выше узловых точках энергосистемы УШР, регулируемых только по отклонению напряжения, динамическая устойчивость сохраняется, хотя послеаварийный режим характеризуется несколько сниженными уровнями напряжений и наличием слабодемпфированной колебательной составляющей практически во всех переменных. В случае применения на реакторах стабилизирующих сигналов характер переходного процесса улучшается (Рис.5).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Выполнено исследование установившихся режимов электрической сети Центральной энергетической системы Монголии. В связи со значительной протяженностью сетей напряжения 110 и 220 кВ эти режимы характеризуются избыточной реактивной мощностью, генерируемой линиями электропередачи, особенно в режимах малых нагрузок. Напряжения в узловых точках сети превышают наибольшие рабочие напряжения, а генераторы энергосистемы работают в режимах

потребления реактивной мощности. Установленные в ЭЭС неуправляемые шунтирующие реакторы не обеспечивают решения проблемы потребления избыточной реактивной мощности, и в качестве вынужденного мероприятия приходится прибегать к отключению параллельных цепей линий электропередачи, либо к отключению части линий, что снижает показатели надежности энергоснабжения и вызывает дополнительные потери активной мощности.

2. При выборе средств компенсации реактивной мощности предпочтение отдано управляемым шунтирующим реакторам, применение которых позволяет эффективно решить проблемы потребления избыточных реактивных мощностей при достаточной простоте эксплуатации и приемлемых экономических показателях.
3. На основе расчетов установившихся режимов ЦЭС Монголии, выполненных с учетом УШР, обоснована целесообразность установки регулируемых реакторов общей мощностью 95 МВАр в пяти узловых точках сети 110 кВ и одного (3,3 МВАр) – в сети 6 кВ. Применение УШР позволяет решить следующие проблемы:
 - нормализовать напряжения в режимах минимальных и максимальных нагрузок;
 - исключить режимы потребления реактивной мощности генераторами системы, особенно ТЭЦ-4;
 - снизить перетоки реактивной мощности по линиям электропередачи и за счет этого уменьшить потери активной мощности (на 13,4% в режиме минимальных нагрузок и на 6,8% в режиме максимальных нагрузок).
4. Предварительная технико-экономическая оценка проекта установки УШР в ЦЭС Монголии показала, что срок окупаемости может составить около трех лет.
5. Разработана методика математического моделирования электромеханических переходных процессов электропередачи при применении УШР с различными законами регулирования. Выполнены оценки показателей статической устойчивости электропередачи при различных законах управления реакторов, которые указали на возможность значительного повышения устойчивости ЭЭС с УШР.
6. Показано, что высокие показатели демпфирования малых колебаний могут быть достигнуты на основе применения УШР с «сильным» законом регулирования в условиях регулирования возбуждения генератора по пропорциональному закону.
7. Выполнены исследования динамической устойчивости ЭЭС с УШР для энергосистем различной структуры – простейшей электропередачи и реальной схемы ЦЭС Монголии. Расчеты переходных процессов при коротких замыканиях в различных точках простейшей электропередачи подтвердили эффективность предложенных законов

управления УШР. Показано, что УШР не обладает значительной эффективностью с точки зрения ограничения величины вылета угла ротора генератора на первом колебании, но при существенно улучшает демпфирование послеаварийных качаний ротора.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Равжиндамба Давааням, Филина О.Л., Смолвик С.В. Применение управляемых шунтирующих реакторов для оптимизации режимов высоковольтной сети Монголии/ Труды СПбГПУ. Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 6-7 июня 2002 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.
2. Равжиндамба Давааням, Филина О.Л., Шилович А.Н. Обеспечение режимов высоковольтной сети Монголии / Труды СПбГПУ. Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 6-7 июня 2002 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.