

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Сайёда Гулмуродовича Джононаева** «Исследование режимов горной межсистемной связи 500 кВ на примере электропередачи Кыргызстан–Таджикистан», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»

I. Основной целью диссертационной работы является исследование режимов горной межсистемной связи 500 кВ «Кыргызстан – Таджикистан» и способа ликвидации однофазных коротких замыканий.

II. Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений, поскольку надёжность экспорта электроэнергии из Кыргызстана и Таджикистана в страны Южной Азии зависит в значительной степени от надёжного функционирования энергообъединения «Кыргызстан–Таджикистан», и при этом важным вопросом является исследование режимов горной межсистемной связи 500 кВ Кыргызстан – Таджикистан, способов ликвидации повреждений на линии, разработка мер по сохранению динамической устойчивости этого энергообъединения при авариях на межсистемной связи 500 кВ Кыргызстан – Таджикистан.

III. Научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

Научная новизна диссертации состоит в том, что

- предложено техническое решение для симметрирования нормального режима, основанное на установке в нетранспонированной линии элементов взаимной индукции между крайними фазами;

- разработана методика для совместного анализа динамической устойчивости энергообъединения и режима на линии в паузу однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ);

- предложен способ осуществления адаптивного ОАПВ, основанный на кратковременном одностороннем включении аварийной фазы со стороны промежуточной системы.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что разработанная программа может быть использована для уточненного расчета токов дуги подпитки в паузу ОАПВ. Даны рекомендации, которые могут быть полезны при возникновении аварийных режимов в межсистемной связи 500 кВ Кыргызстан – Таджикистан. А также предложено техническое решение по осуществлению ОАПВ в нетранспонированных линиях путем подключения к фазе, занимающей среднее положение, резервных реакторов, предусмотренных на линии.

IV. Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы основывается на корректном применении математического аппарата теории переходных электромеханических процессов в электрических системах и теории волновых процессов в линиях высокого напряжения, обоснованность которых доказана многолетней практикой их применения.

V. Общая характеристика диссертации и личный вклад автора.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 107 наименований. Работа изложена на 151 страницах машинописного текста, который поясняется 87 рисунками и 10 таблицами.

Большинство представленных в работе материалов получено лично автором.

Во введении отражены актуальность темы, основные положения, выносимые на защиту, их научная и практическая ценность, структура работы.

В первой главе представлена общая характеристика энергосистем Кыргызстана и Таджикистана. Энергосистема Кыргызской Республики в основном состоит из объектов гидроэнергетики, самая крупная гидростанция - Токтогульская ГЭС (1200 МВт, 5110 ГВт·ч). Существующая система Таджикистана в основном представлена также объектами гидроэнергетики и несколькими тепловыми станциями, которые обеспечивают дополнительную энергию в сухие сезоны и пиковые периоды. Большая часть генерации в Таджикистане приходится на Нурекскую ГЭС (3000 МВт, 11650 ГВт·ч).

В регионе имеется экспортный излишек мощности, который почти всегда приходится на летние месяцы.

Кыргызстан, Таджикистан, Афганистан и Пакистан подготовили соглашения о торговле электроэнергией и создании регионального рынка электроэнергии в Центральной и Южной Азии, которые состоят в том, чтобы организовать экспорт мощности из Кыргызстана и Таджикистана в Пакистан и Афганистан в объеме от 1000 МВт до 1300 МВт. Предполагается, что большую часть производимой электроэнергии будет использовать Пакистан, где острая нехватка электроэнергии прогнозируется уже в обозримом будущем.

В рамках проекта по передаче и торговле электроэнергией Центральная Азия – Южная Азия (CASA–1000) планируется строительство подстанций постоянного тока, прокладка новых высоковольтных линий электропередачи постоянного и переменного тока. По проекту CASA–1000 высоковольтная линия переменного тока пройдет между подстанциями Датка (Кыргызстан) и Худжанд (Таджикистан) и свяжет между собой энергосистемы Кыргызстана и Таджикистана.

Одним из условий надежного функционирования будущего энергообъединения является сохранение его динамической устойчивости при авариях на связи 500 кВ Датка – Худжанд – Душанбе. К определяющим авариям на ВЛ 500 кВ относятся однофазные короткие замыкания (ОКЗ), доля которых превышает 90% от общего числа аварий. Порядка 70% ОКЗ является неустойчивыми и успешно ликвидируются при ОАПВ, что значительно сокращает число возможных нарушений динамической устойчивости.

Во второй главе приводятся способы симметрирования нормального режима в линиях сверхвысокого напряжения (СВН), так как при создании линий СВН особое внимание уделяется вопросам несимметрии, поскольку длины линий на отдельных участках могут достигать 500 км.

Приводится схема, при помощи которой можно выявить негативные последствия от несимметрии параметров ВЛ СВН. Сопоставление

приведённых данных по несимметрии традиционных нетранспонированных линий с рекомендуемыми нормами показывает: для ВЛ 500 кВ Датка – Худжанд длиной 477 км коэффициент несимметрии по напряжению обратной последовательности достигает почти 5%, что превышает нормируемую допустимую величину, и поэтому необходимо принятие мер по ограничению несимметрии.

Наиболее радикальной мерой симметрирования параметров ВЛ является транспозиция её фаз. Как правило, использование одного цикла транспозиции достаточно, чтобы уменьшить коэффициенты несимметрии до допустимых величин. Но в тяжелых условиях прохождения трассы (например, горная местность) транспозиционные опоры существенно усложняют и удорожают линию. Многолетний опыт проектирования и эксплуатации линий электропередачи показывает, что транспозиция ослабляет механическую и электрическую прочность линий, вызывая вместе с тем увеличение стоимости сооружения и эксплуатации линий, приводит к некоторому снижению надежности линии, затрудняет проведение профилактических испытаний и ремонтных операций на них.

В работе предлагается решение для симметрирования параметров линии, которое приводит к упрощению конструкции трёхфазной линии и снижению её взаимного сопротивления. Суть решения состоит в том, что в линии, содержащей фазы с горизонтальным расположением в пространстве, симметрирование режима осуществляется за счет установки в средней части линии элементов взаимной индукции (ЭВИ) между крайними фазами. ЭВИ включаются постоянно, осуществляя снижение коэффициента несимметрии как по обратной последовательности, так и по нулевой последовательности.

В конце главы приводится технико-экономическое сопоставление вариантов симметрирования нормального режима. По предварительным расчетам установка элементов взаимной индукции вместо использования транспозиционных опор обходится дешевле на 35 – 40%, что говорит об экономической эффективности данного способа симметрирования.

В третьей главе дается анализ динамической устойчивости при авариях на линиях 500 кВ, связывающих энергосистемы Кыргызстана и Таджикистана. Для выявления основных особенностей динамической устойчивости данного энергообъединения, включающего межсистемную связь 500 кВ, рассмотрены расчётные случаи, отражающие условия её работы. Преобладающим видом аварий в ВЛ СВН являются ОКЗ. При этом значительная часть ОКЗ представляет неустойчивые дуговые аварии, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле БАПВ или ОАПВ.

Минимальная бестоковая пауза при БАПВ обычно принимается порядка 0,5 сек, в случае ОАПВ она зависит от величины токов дуги подпитки и может находиться в диапазоне 0,5–3,0 сек. В главе проанализирован характер динамических переходов при использовании БАПВ и ОАПВ различной продолжительности и показано, при каких условиях обеспечивается выдача 1000 МВт из узла Датка (Кыргызстан) в направлении Таджикистана.

Анализ динамических переходов при ликвидации аварий на ВЛ Датка – Худжанд и ВЛ Душанбе – Худжанд в цикле БАПВ показал, что динамическая устойчивость нарушается. Приемлемой мерой для сохранения динамической устойчивости могло бы стать отключение части генераторов Токтогульской ГЭС.

Динамическая устойчивость при аварии на ВЛ Датка – Худжанд может быть сохранена, если длительность паузы ОАПВ не превышает 0,65 сек. При длительности паузы 1,1 сек, требуемой по условию успешного гашения вторичной дуги, динамическая устойчивость нарушается. Возможной мерой для сохранения динамической устойчивости может быть отключение части генераторов Токтогульской ГЭС. Как показали расчеты, в рассматриваемом случае достаточно отключить один генератор.

Более эффективной мерой повышения динамической устойчивости является форсировка возбуждения генераторов. Генераторы Токтогульской ГЭС оснащены АРВ сильного действия с двукратной форсировкой возбуждения. Динамический переход при использовании форсировки и

расфорсировки возбуждения генераторов Токтогульской ГЭС оказывается устойчивым без отключения генератора.

Динамическая устойчивость при авариях на ВЛ Душанбе – Худжанд сохраняется при любой длительности паузы ОАПВ, в том числе и при длительности паузы 1,1 сек, требуемой по условию успешного гашения вторичной дуги.

Данные в главе рекомендации могут быть использованы при возникновении аварийных режимов в межсистемной связи 500 кВ Кыргызстан – Таджикистан.

В четвертой главе рассмотрены особенности осуществления ОАПВ в транспонированных и нетранспонированных линиях 500 кВ с использованием четырехлучевых реакторов.

Успешность ликвидации дуговых коротких замыканий в цикле ОАПВ, с одной стороны, определяется характеристикой дуги подпитки, возникающей в длинных воздушных промежутках, а с другой – эффективностью применяемых на линии способов снижения вторичных токов дуги (ВТД) и восстанавливаемых напряжений (ВН) в месте горения дуги после её погасания.

В главе приводится обоснование расчётных схем и алгоритмов для анализа ВН и ВТД в транспонированных воздушных линиях при идеальной транспозиции, при реальной транспозиции и при отсутствии транспозиции, так как каждый из этих случаев имеет свои особенности. Адекватное моделирование линии является необходимым условием для получения правильных результатов. В главе приведен разработанный автором алгоритм, который позволяет оценить эффективность ОАПВ с учетом реальной транспозиции в линиях 500 кВ. Длительность паузы успешного ОАПВ прогнозируется в пределах 0,5 – 1,0 сек, если ВТД будет удовлетворять условию $I_d \leq 45A_{\text{амп}}$.

Как следует из проведенных расчетов, для ВЛ Датка – Худжанд, которую предполагается оснастить четырьмя реакторами, при учете реальной транспозиции длительность паузы ОАПВ будет составлять 0,75 сек.

Проверка по допустимости ВН в режиме паузы ОАПВ показала, что ВН как в начале ВЛ, так и в её конце, где установлены ограничители перенапряжений (ОПН), не превышают требуемый уровень. Для варианта нетранспонированной линии ВТД достигают 70 А и соответственно для их гашения требуется длительность паузы ОАПВ 1,75 сек. Снизить ВТД и соответственно сократить паузу ОАПВ можно за счёт подключения резервной фазы реактора к соответствующей фазе ВЛ, как это предложено в работе. Но и по условию обеспечения допустимого уровня ВН вариант без использования резервной фазы недопустим, поскольку ВН как в начале ВЛ, так и в её конце, где установлены ОПН, превышают требуемый уровень.

Существующая линия Душанбе – Худжанд оснащена двумя реакторами, транспозиция на линии отсутствует. При двух подключенных к линии реакторах значения ВТД обеспечивают паузу ОАПВ в пределах 1 сек. Однако при этом на линии возникают резонансные условия независимо от величины сопротивления нейтрального реактора. Таким образом, при осуществлении ОАПВ на линии Душанбе – Худжанд должен быть исключен режим с двумя реакторами, подключенными к линии.

Как следует из проведенного анализа, ток дуги подпитки зависит от угла δ , изменяющегося в процессе динамического перехода, и соответственно длительность искомой паузы ОАПВ, определяющей характер динамического перехода, также зависит от угла δ . В конце главы приведена последовательность совместного анализа динамической устойчивости двухмашинного энергообъединения и режима на линии в паузу ОАПВ.

В пятой главе предлагается способ осуществления адаптивного ОАПВ в ВЛ СВН. Существующие адаптивные ОАПВ снижают вероятность включения фазы на завершающей стадии на неустранившееся однофазное КЗ, но полностью не исключают такой ситуации. Предложенный способ позволяет с высокой степенью надёжности идентифицировать все возможные случаи неустранившегося однофазного КЗ.

Двусторонне отключенная аварийная фаза может находиться в одном из трёх состояний: неустранившееся ОКЗ, дуговое замыкание и отсутствие

повреждения на фазе. Двусторонне отключенную аварийную фазу включают односторонне со стороны промежуточной системы, измеряют действующее значение тока этой фазы на включенном конце и сравнивают с заданной уставкой. Если измеренный ток выше уставки, то на фазе имеется короткое или дуговое замыкание, в противном случае замыкание на фазе отсутствует, и она успешно включается с другой стороны. Заданная уставка по току выбирается из условия отстройки от наибольшего тока I_{\max} , определяемого на односторонне включенном конце фазы при отсутствии повреждения. В интервале длин 100-500 км в зависимости от числа шунтирующих реакторов на линии уставка составляет не более 220 А (для линий 500 кВ), в то время как возможный диапазон токов на включенном конце аварийной фазы при наличии ОКЗ или дуги составляет не менее 600 А, что почти в 3 раза превосходит уставку.

Включение со стороны промежуточной системы, мощность которой, как правило, существенно меньше, чем мощность примыкающих систем, характеризуется малыми токами короткого замыкания при условии, если ОКЗ сохраняется на фазе, и поэтому не представляет опасности для оборудования. Предложенный способ гарантирует надежную идентификацию дугового повреждения, которое невозможно обнаружить на двусторонне отключенной аварийной фазе.

Заключение содержит основные выводы, сформулированные по результатам исследований. Они обобщают теоретические и практические результаты, подчёркивают научную значимость работы.

VI. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Материалы диссертации и автореферата соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.02:

п.6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;

п.7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем»;

п.9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»;

п.12 «Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению».

VII. Апробация диссертационной работы и публикации

Основные положения работы докладывались на международных конференциях и семинарах. Результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ.

VIII. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертационная работа Джононаева С.Г. отвечает требованиям соответствующих п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

IX. По диссертации имеются следующие замечания:

1. В автореферате ссылка на статью 3 (издания ВАК) по теме АШФ. В диссертации тема АШФ не рассматривается. В диссертации приведена эта статья под номером 103. Ссылка есть на стр.77 диссертации, причем с нарушением порядка следования: [103-107], вставленная в текст между ссылками на 74 и 75.

2. В автореферате имеются ссылки 5 (Свидетельство) и 6 (Патент), отсутствующие в диссертации.

3. Действительно, как это указано в диссертации, преобладающими по частоте возникновения являются однофазные КЗ. Однако, в соответствии с Приказом Минэнерго РФ от 3 августа 2018 г. N 630 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем,

надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок. Методические указания по устойчивости энергосистем" нормативными возмущениями в сети 500 кВ являются:

- 1) Отключение сетевого элемента основной защитой при однофазном коротком замыкании (далее - КЗ) с неуспешным автоматическим повторным включением (далее - АПВ).
- 2) Отключение сетевого элемента резервной защитой (при невыполнении на сетевом элементе основной защиты) при однофазном КЗ с неуспешным АПВ.
- 3) Отключение сетевого элемента основной защитой при двухфазном КЗ на землю с неуспешным АПВ.
- 4) Отключение сетевого элемента основной защитой при однофазном КЗ с отказом одного выключателя.
- 5) Отключение в результате нормативного возмущения группы I двух воздушных линий электропередачи (далее - ВЛ), кабельно-воздушных линий электропередачи (далее - КВЛ), провода воздушной части которых размещены на одних опорах на протяжении более 50% длины более короткой ВЛ (воздушной части КВЛ).

Из них наиболее тяжелыми являются возмущения 4, 5. Эти возмущения способны вызвать нарушение динамической устойчивости, их следует учитывать при проектировании и разработке мер по сохранению устойчивости. Таким образом, следует обосновать целесообразность сделанного выбора вида возмущения, а также его роль в контексте исследования.

4. В дальнейшем анализе в главе 3 использован качественный метод расчета динамической устойчивости – метод площадей. В современных условиях для определения последствий выбранных возмущений и выбора мер по сохранению устойчивости прибегают к существующим специализированным программам по расчету динамической устойчивости. Таким образом, получают точные результаты, в которых учтен ряд

существенных факторов: характеристики и загрузки генераторов, настройки их регуляторов возбуждения, работа форсировок возбуждения, работа регуляторов скорости, работа релейной защиты и противоаварийной автоматики полной схемы энергосистемы.

Для подтверждения справедливости результатов, полученных на основе качественного метода, требуются выборочные расчеты устойчивости по существующим программам.

5. Для реактированных линий 500 кВ существует проблема задержки нулей тока, приводящая к аварийному отказу элегазовых выключателей при коммутациях неуспешного АПВ и постановки ВЛ под напряжение. Эта тема в диссертации не отражена.

Х. Заключение

Высказанные замечания не опровергают ни научных, ни практических результатов диссертации и не меняют общего положительного мнения о работе.

Представленная к защите кандидатская диссертация С. Г. Джононаева является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований предложены технические решения и разработана методика, касающиеся нормальных и аварийных режимов связи 500 кВ на примере электропередачи Кыргызстан–Таджикистан.

Диссертация содержит необходимые для диссертационной работы составляющие: математические модели схем и режимов работы межсистемной связи, анализ влияния различных факторов на предмет исследования, обобщающие выводы.

По актуальности темы исследования, новизне подхода к решению рассматриваемой проблемы, практической значимости полученных результатов диссертационная работа С. Г. Джононаева отвечает критериям, установленным для научно-квалификационных работ на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Считаю, что представленная работа «Исследование режимов горной межсистемной связи 500 кВ на примере электропередачи Кыргызстан–Таджикистан» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы», а её автор Сайёд Гулмуродович Джононаев заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по названной специальности.

Официальный оппонент
кандидат технических наук
по специальности 05.14.12 –
Техника высоких напряжений,
заместитель директора по науке
ООО «Болид», г. Новосибирск,

 Наумкин
Иван Егорович

Сведения:

Организация: Общество с ограниченной ответственностью «БОЛИД».

Юридический адрес: 630015, г. Новосибирск, ул. Электrozаводская, 2, корп.6.

Почтовый адрес: 630015, г.Новосибирск-15, а/я 119.

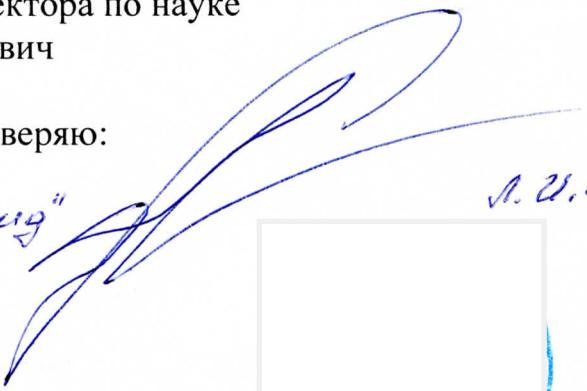
Телефон: +7 (383) 325-33-17

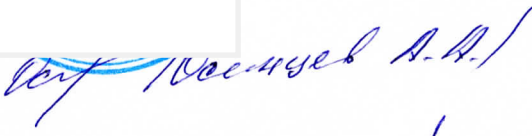
Должность: заместитель директора по науке

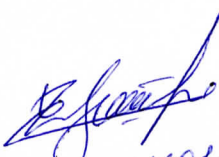
Ф.И.О.: Наумкин Иван Егорович

Подпись И.Е. Наумкина заверяю:

Директор ООО «Болид»

 А. У. Сарман

Отзыв получен 03.06.2019г.  Васильев А.А.

С отзывом ознакомлен 03.06.2019г.  Джононаев С.