Применение управляемого устройства продольной компенсации с целью повышения выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС

А.А.Комухов; М.С.Кустикова; А.А.Мартиросян; И.А.Москвин.
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
г. Иваново, РФ
E-mail: komuhov@mail.ru, mashenka_2525@mail.ru, moskvin_ilya@mail.ru, martirosian_a@rambler.ru

***Аннотация* — В программном комплексе MATLAB создана математическая модель участка электрической сети. Исследовано влияние устройства продольной компенсации с тиристорным управлением на статическую и динамическую устойчивость электроэнергетической системы.**

Ключевые слова — устройство продольной компенсации с тиристорным управлением; математическая модель; устойчивость

Influence of the operated device of series compensation on mode parameters

Aleksandr Komuhov; Maria Kustikova; Akop Martirosjan; Il'ja Moskvin.
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, RF
E-mail: komuhov@mail.ru, mashenka_2525@mail.ru, martirosian_a@rambler.ru, pavelf93@yandex.ru

***Abstract* — The mathematical model of an electric-power grid has been created in MATLAB. The influence of thyristor controlled series capacitors on static and dynamical stability of electric-power system was researched.**

Keywords — thyristor controlled series capacitors; mathematical model; stability

В последние годы на фоне роста потребления электроэнергии в России наблюдается отставание ввода новых генерирующих мощностей. В связи с этим все больше региональных энергосистем становятся дефицитными. Для обеспечения надежности работы ЕЭС России и электроснабжения потребителей необходимо развитие электрических сетей, передающих мощность из избыточных регионов в дефицитные.

Наиболее явно выраженным избыточным регионом является южная часть ОЭС Сибири, где сосредоточены сразу несколько крупных электростанций, среди которых самая мощная электрическая станция России – Саяно-Шушенская ГЭС (СШ ГЭС) с установленной мощностью 6400 Мвт. Мощность от Саяно-Шушенской ГЭС выдается в сеть по четырем воздушным линиям 500 кВ, две из которых имеют небольшую длину 30,9 км и идут до подстанции 500 кВ «Означенное». Две другие ЛЭП идут до подстанции 500 кВ «Новокузнецкая» и имеют длину 450 км. Пропускная способность этих двух протяженных линий электропередачи ведет к ограничению максимальной выдаваемой мощности станции. В связи с этим установленная мощность крупнейшей в стране станции в полной мере не используется.

В качестве мероприятия, направленного на увеличение пропускной способности линий 500 кВ Саяно-Шушенская – Новокузнецкая, в данной работе было рассмотрено применение управляемой продольной емкостной компенсации (УПК) в середине этих ЛЭП.

Для оценки эффективности предложенного мероприятия выполнено математическое моделирование участка рассматриваемой сети (Рис. 1) в программном комплексе MATLAB с использованием графической среды Simulink.

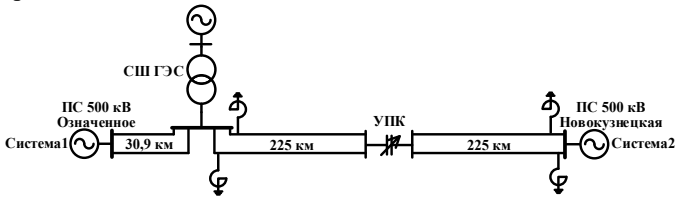

Рис. 1. – Схема исследуемого участка сети

Модель участка состоит из эквивалентного генератора, эквивалентного трансформатора, воздушных линий электропередачи 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая и СШ ГЭС – Означенное, шунтирующих реакторов, управляемого устройства продольной компенсации, двух эквивалентных систем (Рис. 2).

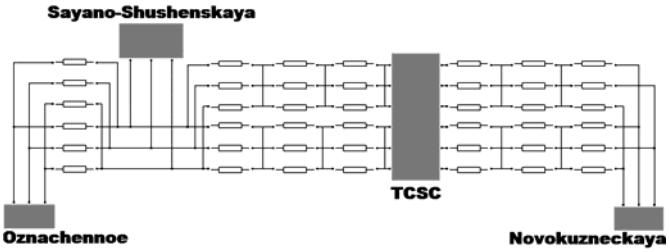

Рис. 2. – Модель исследуемого участка сети

Генератор смоделирован на основе уравнений Горева-Парка и представляет собой эквивалент десяти гидрогенераторов СВФ-1285/275-42, установленных на ГЭС. Модель генератора учитывает наличие тиристорной системой возбуждения, параметры которой приближены к реальным. Данная модель позволяет наиболее точно моделировать электромеханические переходные процессы. Модель трансформатора является эквивалентом пяти групп однофазных трансформаторов ОРЦ-533000/500. Линии электропередачи представлены моделями ЛЭП с распределенными параметрами. Модели эквивалентных систем представляют собой трехфазный источник напряжения с сопротивлениями прямой и нулевой последовательности, характеризующими внешнюю сеть. Сопротивления определены по значениям токов короткого замыкания на подстанциях «Новокузнецкая» и «Означенное» и в отходящих от них ЛЭП.

Устройство управляемой продольной компенсации установлено в каждую фазу. Параметры устройства подобраны таким образом, чтобы степень компенсации индуктивного сопротивления ВЛ СШ ГЭС – Новокузнецкая изменялась от 30% до 50%. Под степенью компенсации понимается отношение сопротивления УПК к сопротивлению линии. Суммарная мощность устройства для двух линий составляет 1010 МВА. Схема устройства представляет собой конденсаторную батарею емкостью 80 мкСм, включенную последовательно в ЛЭП и тиристорно-реакторную группу, включенную параллельно конденсаторной батарее (Рис. 3). Индуктивность тиристорно-реакторной группы составляет 300 мГн, сопротивление тиристоров в проводящем состоянии составляет 1 мОм.

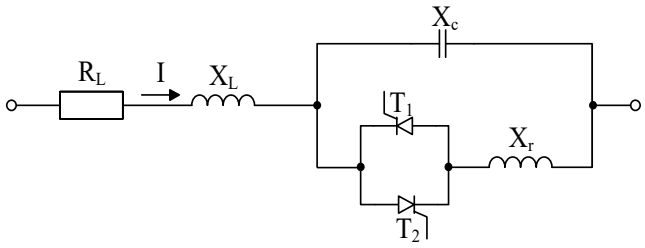

Рис. 3. – Принципиальная схема устройства продольной компенсации с тиристорным управлением

Изменение эквивалентного сопротивления устройства происходит за счет изменения угла отпирания тиристоров. Закон регулирования подобран таким образом, чтобы степень компенсации увеличивалась при увеличении тока в линии (Рис. 4).

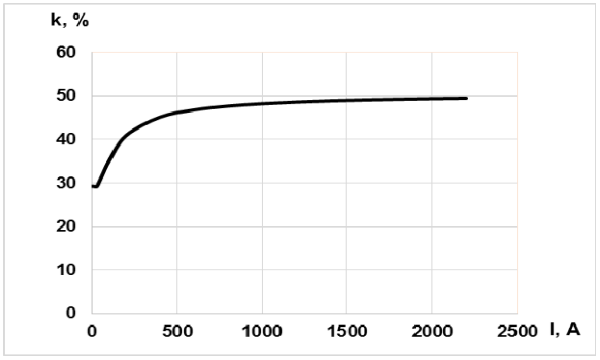

Рис. 4. – Зависимость степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП от протекающего по линии тока

Для улучшения демпфирования колебаний режимных параметров, возникающих при различных возмущениях, осуществляется регулирование по первой и второй производным частоты (Рис. 5).

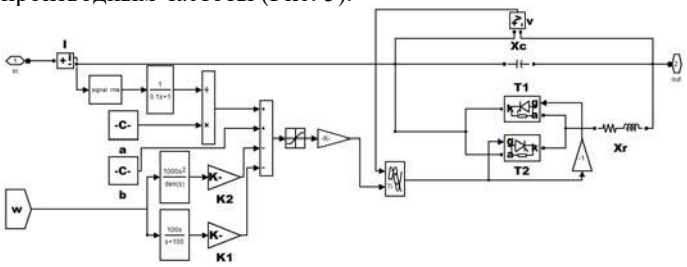

Рис. 5. – Модель устройства продольной компенсации с тиристорным управлением

Для проверки правильной работы модели были рассчитаны токи коротких замыканий на шинах подстанций «Означенное» и «Новокузнецкая» и сравнены с реальными. Различие в результатах составило менее 1%.

Согласно методическим указаниям по устойчивости максимально допустимый переток определяется:

1) условием обеспечения статической устойчивости;

2) условием отсутствия токовой перегрузки сетевых элементов;

3) условием обеспечения динамической устойчивости.

С использованием составленной модели участка сети было произведено утяжеление режима по активной мощности генерации Саяно-Шушенской ГЭС. Полученные при утяжелении угловые характеристики мощности линий электропередачи СШ ГЭС – Новокузнецкая изображены на Рис. 6.

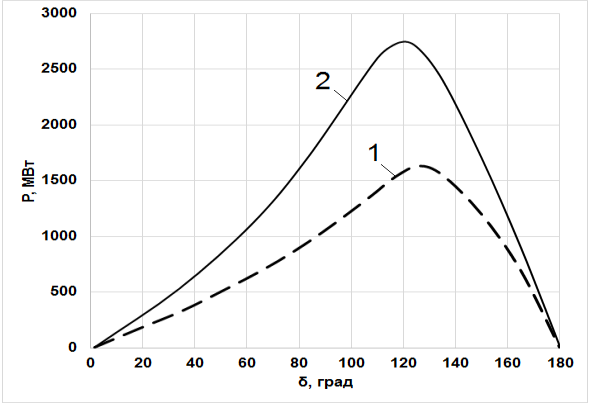

Рис. 6. – Угловые характеристики мощности связи 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая: 1 – без УПК; 2 – с УПК

Из рисунка следует, что при наличии УПК пропускная способность ЛЭП увеличивается на 1010 МВт. При использовании продольной компенсации распределение мощности в линиях значительно меняется в сторону увеличения перетока по протяженным ЛЭП. В связи с этим повышение максимальной выдаваемой мощности станции по условию сохранения статической устойчивости незначительно. С учетом нормативного коэффициента запаса статической апериодической устойчивости максимальное значение генерируемой мощности составляет: 6974 МВт – для существующей схемы, 7082 – для схемы с продольной компенсацией на линиях.

При максимальной загрузке станции (6400 МВт) по каждой линии 500 кВ СШ ГЭС – Означенное протекает ток 3380 А, что больше длительно допустимого (2835 А). Максимальная генерация СШ ГЭС по условию отсутствия токовой перегрузки составляет 5375 МВт. При наличии УПК происходит перераспределение потоков активной мощности по отходящим от ГЭС линиям. При максимальной загрузке станции ток, протекающий по коротким линиям, снижается до длительно допустимого.

При определении предела по динамической устойчивости в качестве нормативного возмущения было рассмотрено однофазное короткое замыкание на линии 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая вблизи шин станции. Отключение линии происходит через 0,34 секунды после возникновения КЗ действием УРОВ при отказе одного выключателя. Автоматика отключения генераторов срабатывает через 0,1 секунды после возникновения короткого замыкания. Предельная генерируемая мощность станции в доаварийном режиме, при которой после возмущения не нарушается синхронизм, составляет 5150 МВт. На Рис. 7 показано изменение передаваемой от ГЭС мощности при возникновении КЗ.

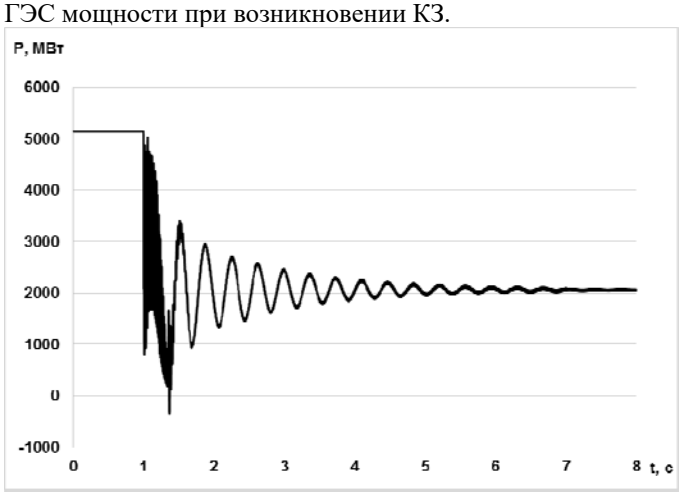

Рис. 7. – Переходный процесс при возникновении КЗ в схеме без УПК

При наличии управляемой продольной компенсации на линиях вся установленная мощность станции может быть выдана в сеть. График, иллюстрирующий переходный процесс при коротком замыкании для случая с УПК, показан на Рис. 8.

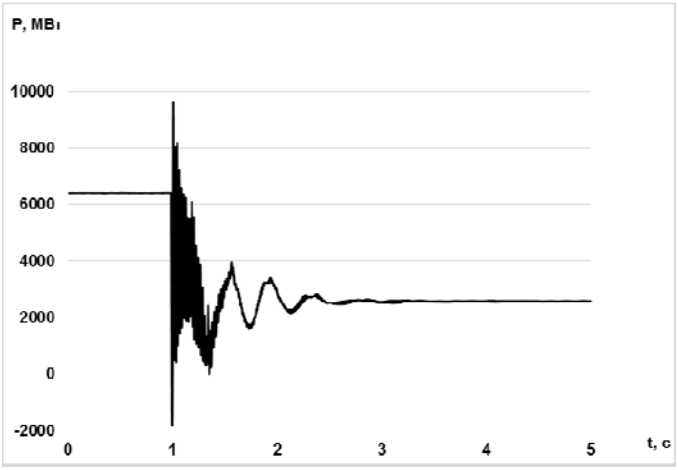

Рис. 8. – Переходный процесс при возникновении КЗ в схеме с УПК

Максимальная мощность, которую может выдавать в сеть Саяно-Шушенская ГЭС по условию выполнения всех критериев, составляет 5150 МВт. Ограничивающим фактором является низкий предел динамической устойчивости. При наличии управляемого устройства продольной компенсации на линии вся установленная мощность станции может быть выдана в сеть.

Ток электродинамической стойкости выключателей на Саяно-Шушенской ГЭС составляет 128 кА. Ударный ток короткого замыкания без УПК составляет 91 кА, при наличии УПК эта величина равна 99 кА. Существующее коммутационное оборудование способно отключать токи короткого замыкания при установленном УПК на линиях. Использование предложенной тиристорной системы управления устройства не вызывает сильного искажения напряжения сети. Гармонический анализ показал, что при использовании УПК значения показателей несинусоидальности напряжения на шинах подстанции «Новокузнецкая» не превышают нормально допустимых (Рис. 9). Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 0,85% при нормально допустимом значении 2%.

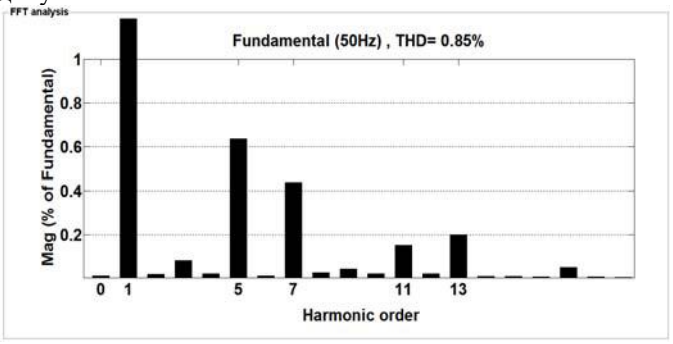

Рис. 9. – Гармонический анализ кривой напряжения на шинах ПС 500 кВ «Новокузнецкая»

Напряжение вдоль ВЛ 500 кВ СШ ГЭС – «Новокузнецкая» во всех режимах находится в допустимых пределах (Рис. 10). В режимах, близких к холостому ходу, необходимо подключение шунтирующих реакторов по концам ЛЭП.

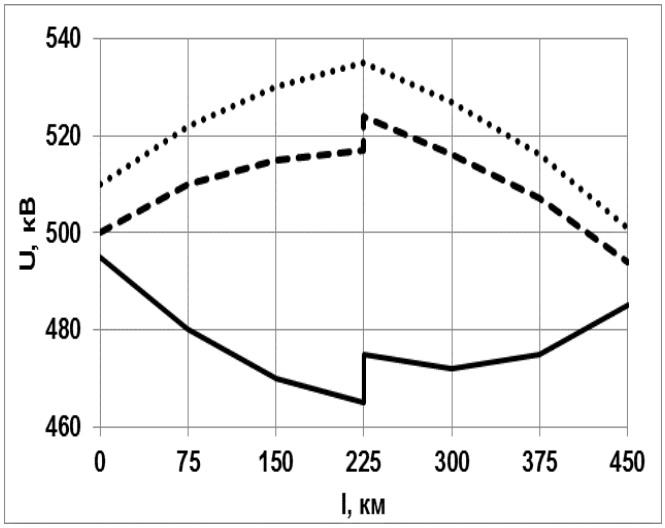

Рис. 10. – Диаграмма распределения напряжения вдоль ВЛ 500 кВ СШ ГЭС – «Новокузнецкая»:
1 – Ргэс=6400 МВт; 2 – Ргэс=1200 МВт; 3 – Ргэс=0 МВт

Для установки УПК планируется строительство переключательного пункта, распределительное устройство которого изображено на Рис. 11.

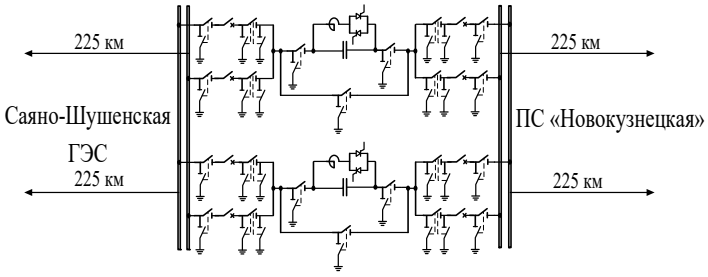

Рис. 11. – Схема распределительного устройства переключательного пункта

Данная схема обладает высокой ремонтопригодностью и является наиболее надежной (при повреждении любого элемента на подстанции связь ГЭС с системой не окажется нарушенной). Помимо этого, такая схема позволяет при повреждении на линии отключать не всю ЛЭП, а только ту ее половину, на которой возникло повреждение. Благодаря этому значительно повышается предел передаваемой мощности в ремонтных схемах.

Стоимость проекта по внедрению устройства продольной компенсации составляет 5 миллиардов рублей. В эту сумму входят стоимость строительства переключательного пункта, на котором устанавливается УПК (19,1%), стоимость выключателей (25,3%), стоимость УПК (55,6%).

Альтернативным мероприятием по увеличению максимальной выдаваемой мощности Саяно-Шушенской ГЭС является строительство дополнительной ЛЭП 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая. Стоимость строительства составит 8,9 миллиардов рублей. В эту сумму входят стоимость строительства самой линии электропередачи (80,4%), стоимость выключателей (10,9%), стоимость шунтирующих реакторов по концам ЛЭП (5,8%), стоимость реконструкции распределительных устройств на СШ ГЭС и на ПС 500 кВ «Новокузнецкая» (2,9%).

Источником окупаемости проекта по внедрению продольной компенсации является увеличение продаваемой электроэнергии на Саяно-Шушенской ГЭС. В среднем чистый доход от продажи одного МВт*ч энергии на станции составляет 1000 рублей. Максимальная загрузка станции возможна только в течение 50 дней в году. При достигнутом увеличении выдачи мощности на 1250 МВт срок окупаемости проекта составляет 3,5 года.

Таким образом, установка управляемой продольной компенсации в середине двух параллельных линий электропередачи 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая решит проблему ограничения выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС. При этом данное мероприятие не окажет негативного влияния на параметры режима сети и будет экономически эффективным.

Список литературы

[1] Голов В.П., Мартиросян А.А. Влияние законов регулирования устройств продольной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета.2003.Выпуск 5.С.41-44.

[2] Комухов А.А., Фирстов П.Е., Нечаев Е.В, Мартиросян А.А., Москвин И.А. Устройство продольной компенсации с тиристорным управлением // ВЕСТНИК РНК СИГРЭ. – 2014. – Вып.4. – С. 110 – 115.

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

[4] Мартиросян А.А. Повышение устойчивости электроэнергетических систем с применением регулируемой продольной компенсации: дис. канд. техн. наук. – Иваново, 2009. – 146 с.

[5] Электрические системы. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.

[6] ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 20 с.