Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

ЛЯМОВ Александр Сергеевич

Математическое моделирование и исследование эффективности силовых устройств управления электроэнергетической системы

Направление подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника

Код и наименование

Направленность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Код и наименование

Научный доклад

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: аспирант
Лямов Александр Сергеевич
Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Беляев Андрей Николаевич

Санкт-Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института энергетики федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой:	Зверев Сергей Геннадьевич кандидат технических наук, доцент Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)
Научный руководитель:	Беляев Андрей Николаевич доктор технических наук, профессор Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)
Рецензент:	Сорокин Евгений Владимирович кандидат технических наук, доцент Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы Противоаварийное управление» (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте библиотеки по адресу: https://elib.spbstu.ru/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия в ряде ведущих стран в области электроэнергетики проводится реструктуризация отрасли с целью повышения показателей экономической эффективности, а также удовлетворения социальных и законодательных ограничений, связанных со строительством линий электропередач. В контексте указанных целей, а также с учетом растущего спроса электроэнергии, встает необходимость повышения эффективности существующих сетей.

Одним из эффективных решений данной проблемы представляется применение устройств гибких систем передачи переменного тока (ГСППТ, в зарубежной терминологии FACTS), основной задачей которых является управление потоками мощности как в установившихся, так и в переходных режимах работы электроэнергетической системы. Отсутствие контроля за потоками мощности в некоторых случаях снижает надежность сети и увеличивает технологические потери мощности. Возможность управления током дает значительный потенциал в повышении пропускной способности линий электропередачи и контроля потоков мощности. Такая возможность появляется за счет регуляторов устройств ГСППТ, оказывающих воздействие на взаимосвязанные параметры режима работы сети, к которым относятся ток, напряжение, фазовый сдвиг по концам передачи, продольное и поперечное сопротивления.

Однако по своей природе все преобразовательные элементы должны быть выполнены на полную мощность установки, что сказывается на повышении стоимости устройства и идет вразрез с задачей повышения экономической эффективности. Но благодаря особенностям устройств FACTS, их применение возможно для решения не одной, а сразу нескольких проблем энергорайона. В данном случае, значительное преимущество в выборе решения проблем отводится устройствам FACTS в силу

использования меньшего числа установок, что приводит к сокращению выделенной площади, а также уменьшению капитальных затрат.

Одними из таких устройств являются статический поперечный компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) и статический синхронный продольный компенсатор реактивной мощности (ССПК).

Цели и задачи научной работы

Целью работы является исследование влияния силовых устройств управления электроэнергетической системы, таких как ССПК и СТАТКОМ.

Задачами работы являются:

1. анализ современных устройств продольного, поперечного и смешанного регулирования, основанных на использовании силовой электроники;
2. выявление недостатков существующих устройств компенсации реактивной мощности и режимного регулирования;
3. разработка математических моделей СТАТКОМ и ССПК для расчета переходных процессов с реализацией возможных управляющих воздействий и ограничений, а также оценка их эффективности;
4. тестирование разработанной модели и алгоритмов управляющих воздействий на примере реальной схемно-режимной ситуации в энергосистеме;
5. выполнение исследований по оценке влияния устройств силового режимного регулирования на статическую и динамическую устойчивость.

Научная новизна

1. Разработана методика математического моделирования устройств силового режимного регулирования (СТАТКОМ и ССПК), основанная на воспроизведении их внешних характеристик.
2. Предложены эффективные структуры систем автоматического управления ССПК с использованием обратных связей по отклонению

скольжения, производной отклонения скольжения, отклонению частоты напряжения и производной отклонения частоты напряжения, а также представлены возможности влияния указанных каналов регулирования ССПК на демпферные свойства энергосистемы и протекание переходных процессов.

3. Выполнено количественное сопоставление эффективности применения автоматического регулятора (АР) ССПК и автоматического регулятора возбуждения сильного действия (АРВ СД) генератора на базе корневого анализа с применением методики одновременной координации настроек регуляторов.
4. Представлена оценка влияния ССПК на увеличение максимальной выдаваемой мощности гидроэлектростанции в составе сложного энергообъединения и улучшение демпферных свойств примыкающего района энергосистемы.

Практическая значимость работы

1. Реализованы простые математические модели СТАТКОМ и ССПК, пригодные для расчета переходных процессов сложных энергосистем.
2. Отмечено значительное влияние каналов регулирования АР ССПК на динамическую устойчивость и демпфирование переходных процессов.
3. Показана возможность применения одного устройства ССПК как для регулирования потоков мощности, так и в целях значительного увеличения максимальной выдаваемой мощности станции и улучшения динамической устойчивости.

Методы исследования

В работе использовались методы теории электрических машин, математического моделирования электроэнергетической системы (ЭЭС), теории автоматического регулирования, численных методов решения дифференциальных уравнений, корневого анализа характеристического уравнения системы, одновременной координации настроек регуляторов.

Защищаемые научные положения

1. Методика математического моделирования двух устройств силового режимного регулирования: СТАТКОМ и ССПК, основанная на их представлении источниками регулируемых ЭДС.
2. Оптимизация показателей устойчивости электроэнергетической системы на основе применения устройств силового режимного регулирования.
3. Комплексное решение задачи регулирования потоков мощности, повышения передаваемой мощности и устойчивости ЭЭС при применении одного типа устройства FACTS.

Степень достоверности

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, основана на применении реальных внешних характеристик устройств FACTS и подтверждена результатами расчётов на персональном компьютере.

Апробация результатов работы

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering (2019 ElConRus) (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2019);
2. IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering (2020 ElConRus) (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2020).

Публикации

По теме диссертации в соавторстве опубликовано 7 печатных работ, из них 4 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

Личный вклад автора

Разработка и тестирование математических моделей СТАТКОМ и ССПК, определение структуры и создание цифровой модели АР ССПК, расчет показателей статической и динамической устойчивости энергосистем различной сложности, применение многокритериальной оптимизации в отношении настройки коэффициентов регулирования каналов АР ССПК и АРВ СД генераторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснование актуальности выбранной темы исследования, степень её разработанности, цели и задачи научной работы, научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, защищаемые научные положения, степень достоверности, апробация результатов работы, публикации и личный вклад автора.

В первой главе выполнен анализ имеющихся средств компенсации реактивной мощности на основе ГСППТ [1,4,7,9,1210], описаны достоинства и недостатки различных типов устройств [5,6,8,10,11]. Основными преимуществами устройств на базе силовой электроники является плавное и независимое воздействие с высокой степенью быстродействия на параметры электропередачи [20,21,22,23]. Кроме того, устройства ГСППТ обладают способностью плавно управлять взаимосвязанными параметрами режима, определяющими надежность работы энергосистем [27,28,29]. Основными недостатками устройств на базе силовой электроники являются высокие стоимость и потери активной мощности в устройствах, а также необходимость применения фильтров высших гармоник для фильтрации искажений напряжения и тока или применения многопульсных, многоуровневых преобразователей [24,25,26]. Согласно выполненному анализу наиболее эффективным устройством среди статических поперечных средств компенсации является СТАТКОМ за счет независимости выдачи реактивной мощности от напряжения в точке подключения устройства и повышенного быстродействия перехода из максимального режима потребления реактивной мощности в максимальный режим генерации. Наиболее эффективным устройством среди статических продольных устройств компенсации является ССПК за счет независимого от тока линии создания падения напряжения и повышенного быстродействия устройства, направленного на демпфирование колебаний потоков мощности.

Во второй главе представлены математические модели СТАТКОМ и ССПК, служащие для расчета электромеханических переходных процессов в ЭЭС. Моделирование генератора в системе координат 0qd проведено согласно [3].

Предполагается, что силовой преобразователь СТАТКОМ способен инжектировать чисто емкостной или чисто индуктивный ток в линию.

В качестве входной переменной предлагается напряжение на шинах высокого напряжения сети в точке подключения устройства $U_{ст}$, заданное своими проекциями U_q и U_d на координатные оси q и d.

Проводимость СТАТКОМа ($b_{ст}$), обратно пропорционально зависящая от индуктивного сопротивления сглаживающего реактора и согласующего трансформатора ($x_\Sigma = x_{ст} = 0{,}2$), принимается в относительных единицах равной

$$b_{ст} = S_{ст}/x_{ст}.$$

Мощность СТАТКОМа $S_{ст}$ задается в исходных данных.

Уравнение приращения ЭДС СТАТКОМа $\Delta E_{ст}$ на основе передаточной функции рассчитывается следующим образом:

$$\Delta E_{ст} = \frac{K_{st} \cdot (U_{ст} - U_{уст})}{1 + pT_v}, \quad (1)$$

где $U_{уст}$ – заданная величина уставки по напряжению, K_{st} – коэффициент регулирования канала отклонения напряжения (K_{st} = -1…-10), T_v – постоянная времени канала отклонения напряжения (T_v = 0,001 с).

Величина приращения ЭДС ограничивается на уровне соответствующем номинальной мощности преобразователей СТАТКОМа ($S_{ст}$) в относительных единицах, путем ограничения модуля тока, равного произведению $\Delta E_{ст} \cdot b_{ст}$.

В связи с тем, что моделирование основано на использовании общей координатной системы 0qd связанной с математической моделью генератора, необходимо определить коэффициенты распределения приращения ЭДС по соответствующим осям:

$$\begin{aligned} K_q &= |U_q|/U_{ст}, \\ K_d &= |U_d|/U_{ст}. \end{aligned} \quad (2)$$

D,q - составляющие тока СТАТКОМа вычисляются в соответствии с соотношениями, связывающими напряжение на зажимах СТАТКОМа и его ЭДС:

$$I_{q\text{ст}} + jI_{d\text{ст}} = \left(E_{q\text{ст}} + jE_{d\text{ст}} - U_q - jU_d\right) \cdot jb_{\text{ст}}, \quad (3)$$

откуда следует, что

$$I_{q\text{ст}} = -b_{\text{ст}} \cdot (E_{d\text{ст}} - U_d), \quad (4)$$

$$I_{d\text{ст}} = b_{\text{ст}} \cdot \left(E_{q\text{ст}} - U_q\right). \quad (5)$$

Часть уравнений в круглых скобках являются проекциями приращений ЭДС СТАТКОМа соответственно на d и q координатные оси. Составляющие токов определяются по следующим выражениям:

$$I_{q\text{ст}} = -\,b_{\text{ст}} \cdot \Delta E_{\text{ст}} \cdot K_d \cdot sign(U_d), \quad (6)$$

$$I_{d\text{ст}} = \ b_{\text{ст}} \cdot \Delta E_{\text{ст}} \cdot K_q \cdot sign\left(U_q\right). \quad (7)$$

Прямое использование токов, вычисленных по алгебраическим выражениям (6) и (7), в балансе токов в точке подключения СТАТКОМа приводит к вычислительной неустойчивости. Для исключения указанной вычислительной неустойчивости токи, участвующие в уравнении баланса токов, вычисляются на основе следующих передаточных функций:

$$I_{d\text{ст р}} = \frac{I_{d\text{ст}}}{1 + pT_s}, \quad (8)$$

$$I_{q\text{ст р}} = \frac{I_{q\text{ст}}}{1 + pT_s}, \quad (9)$$

где T_s – постоянная времени, определяющая запаздывание реакции СТАТКОМа на изменение управляющего воздействия по каналу регулирования ЭДС, обычное значение T_S = 0,0033…0,01 с.

При моделировании ССПК предполагается, что его силовой преобразователь способен добавлять падение напряжения с различными знаками (на зажимах обмотки высшего напряжения согласующего трансформатора), соответствующего падению напряжения на чисто индуктивных или емкостных элементах сети.

Входной переменной является значение тока I_m в обмотке высшего напряжения согласующего трансформатора, последовательно подключенной к контролируемой ветви. Значение тока I_m определяется своими проекциями токов I_q и I_d, отображенными на оси q и d общей координатной системы.

Индуктивное сопротивление обмотки высшего напряжения согласующего трансформатора ССПК ($x_{пст}$) принимается в относительных единицах в диапазоне 0.04…0.1 о.е.

Мощность устройства $S_{сспк}$ задается в исходных данных и должна выбираться исходя из технико-экономического анализа конкретного случая применения. Обычно мощность ССПК находится в диапазоне 0,05…0,2 о.е. мощности контролируемой линии.

Сигнал управления ΔI_m определяется по отклонению измеряемого тока от уставки $I_{уст}$, согласно следующей передаточной функции:

$$\Delta I_m = \frac{K_{0i}(I_m - I_{уст})}{1 + pT_i}, \quad (10)$$

где K_{0i} – коэффициент регулирования пропорционального канала АР ССПК по отклонению тока (K_{0i} = -10 … -100); T_i – постоянная времени пропорционального канала АР ССПК по отклонению тока (T_i = 0,01 с), отражающая запаздывание измерения входного параметра.

Составляющие проекций ЭДС ССПК вычисляются с учетом следующей передаточных функций:

$$\Delta E_{qсспк} = \frac{\Delta I_m \cdot x_{сспк} \cdot I_d}{1 + pT_{сспк}}, \quad (11)$$

$$\Delta E_{dсспк} = \frac{-\Delta I_m \cdot x_{сспк} \cdot I_q}{1 + pT_{сспк}}, \quad (12)$$

где $T_{сспк}$ – постоянная времени, отражающая запаздывание преобразователя напряжения устройства (T_i = 0,01 с).

Для ограничения управляющих воздействий с учетом номинальной мощности ССПК требуется контролировать величины $\Delta E_{qсспк}$ и $\Delta E_{dсспк}$ на уровне проекций ЭДС ССПК, рассчитанных относительно номинальной

мощности ССПК $S_{сспк}$. Для этого рассчитываются коэффициенты распределения в общей координатной системе 0qd:

$$K_q = |I_q|/I_m,$$

$$K_d = |I_d|/I_m.$$

Составляющие напряжений ССПК вычисляются в соответствии с ограничениями:

$$\Delta U_{qсспк} = if\ abs(\Delta E_{qсспк}) >= S_p * K_d\ then\ S_p * K_d * sign(\Delta E_{qсспк})\ else\ \Delta E_{qсспк}; \quad (13)$$

$$\Delta U_{dсспк} = if\ abs(\Delta E_{dсспк}) >= S_p * K_q\ then\ S_p * Kq * sign(\Delta E_{dсспк})\ else\ \Delta E_{dсспк}, \quad (14)$$

где $S_p = if\ S_{сспк\_изм} > S_{сспк}\ then\ \frac{(S_{сспк} - K_y(S_{сспк} - S_{сспк\_изм}))}{1 + pT_{s1}}\ else\ S_{сспк}$ – вспомогательная переменная, используемая для повышения вычислительной устойчивости, практически равна $S_{сспк}$; K_y – коэффициент регулирования ($K_y = -1000 \ldots - 10000$); T_{S1} – служебная постоянная времени, служащая для предотвращения вычислительной неустойчивости (T_{S1} = 0,01 с) .

В качестве оценки эффективности ССПК по улучшению демпфирования колебаний и колебательной статической устойчивости, предлагается рассмотреть канал по отклонению скольжения ротора генератора *s* относительно синхронной оси. Для этого введем новую передаточную функцию:

$$\Delta E_{\Delta s} = \frac{K_{0\omega} \cdot s}{1 + pT_{0\omega}}, \quad (15)$$

где $K_{0\omega}$ – коэффициент регулирования пропорционального канала АР ССПК по отклонению скольжения ($K_{0\omega}$ = -10 … -100); $T_{0\omega}$ – постоянная времени пропорционального канала АР ССПК по отклонению скольжения ($T_{0\omega}$ = 0,02 с), отражающая запаздывание работы преобразователя напряжения устройства и измерения входного параметра.

Кроме того, полезно рассмотреть влияние на статическую устойчивость канала по производной отклонения скольжения ротора генератора *s* относительно синхронной оси.

$$\Delta E_{\Delta s1} = \frac{p \cdot k_{1\omega} \cdot s}{1 + pT_{1\omega}}, \quad (16)$$

где $K_{1\omega}$ – коэффициент регулирования дифференциального канала АР ССПК по отклонению скольжения ($K_{1\omega}$ = -10 … -100); $T_{1\omega}$ – постоянная времени дифференциального канала АР ССПК по отклонению скольжения ($T_{1\omega}$ = 0,02 с), отражающая запаздывание работы преобразователя напряжения устройства и измерения входного параметра.

Тогда уравнения 2 и 3 примут следующий вид:

$$\Delta E_{qсспк} = \Delta E_{q\Delta I} + \Delta E_{\Delta s} + \Delta E_{\Delta s1}, \quad (17)$$

$$\Delta E_{dсспк} = \Delta E_{d\Delta I} + \Delta E_{\Delta s} + \Delta E_{\Delta s1}\,, \quad (18)$$

Составляющие напряжений ССПК определяются с учетом ограничений, указанных в уравнениях 13, 14.

На примере простейшей схемы сети, представленной на рисунке 1, можно показать влияние каналов регулирования по отклонению скольжения и ее производной на протекание переходных процессов. Моделирование переходных процессов проводилось в ПК «Dymola» [13].

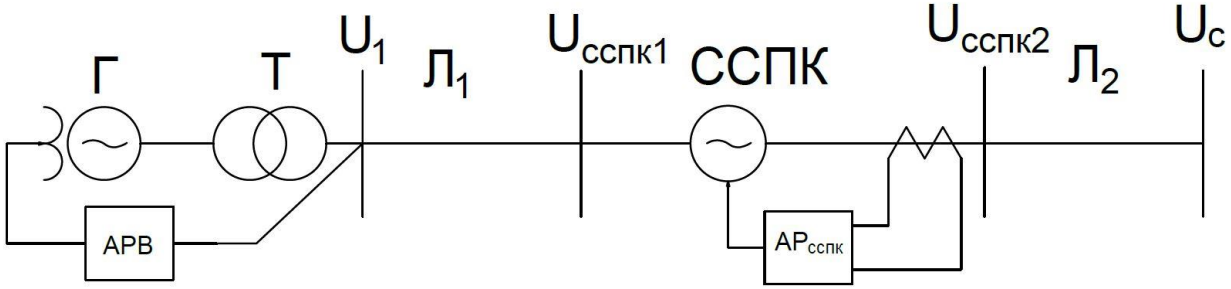

Рисунок 1 – Схема сети для исследования влияния каналов регулирования АР ССПК на переходные процессы

В качестве возмущения принято проходящее трехфазное КЗ на стороне обмотки ВН повышающего трансформатора длительностью 0,06 с. На рисунке показано изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы при проходящем трехфазном КЗ при выведенных из работы каналах стабилизации АР ССПК и АРВ СД генератора.

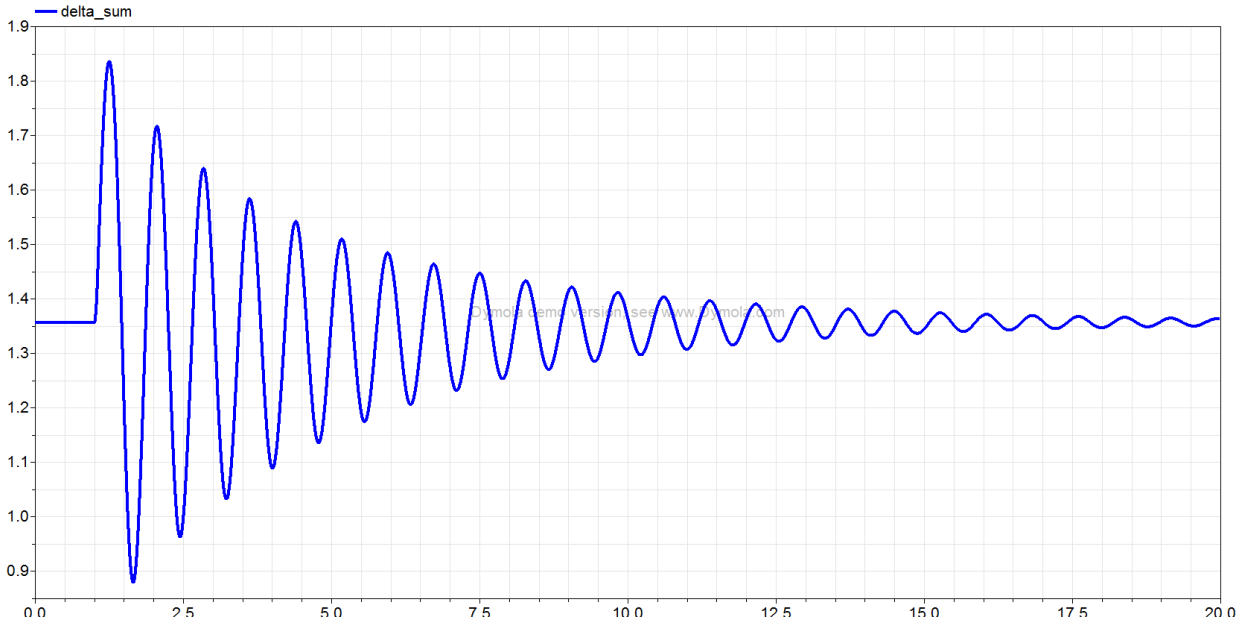

Рисунок 2 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы при проходящем трехфазном КЗ длительностью 0,06 с.

Эффективность каналов регулирования по отклонению скольжения и производной отклонения скольжения в схеме сети, показанной на рисунке 1, представлены на рисунках 3 и 4 соответственно. В момент времени 1 с. возникает проходящее трехфазное короткое замыкание длительностью 0,1 с.

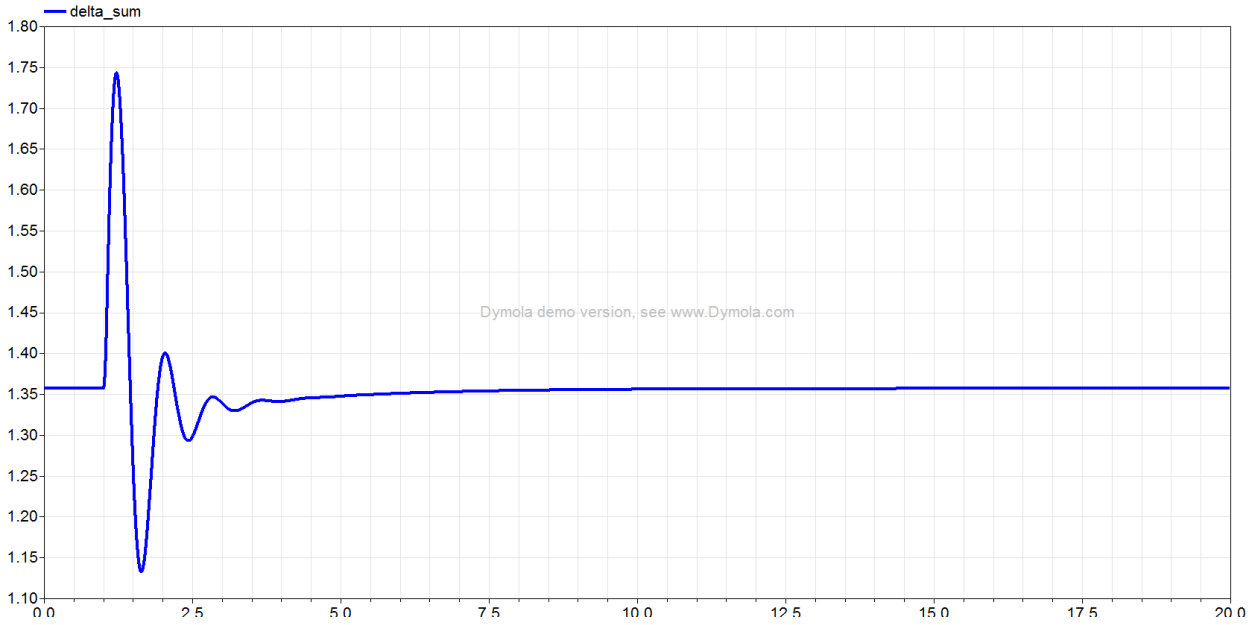

Рисунок 3 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы при проходящем трехфазном КЗ длительностью 0,06 с. при использовании канала АР ССПК по отклонению скольжения генератора s

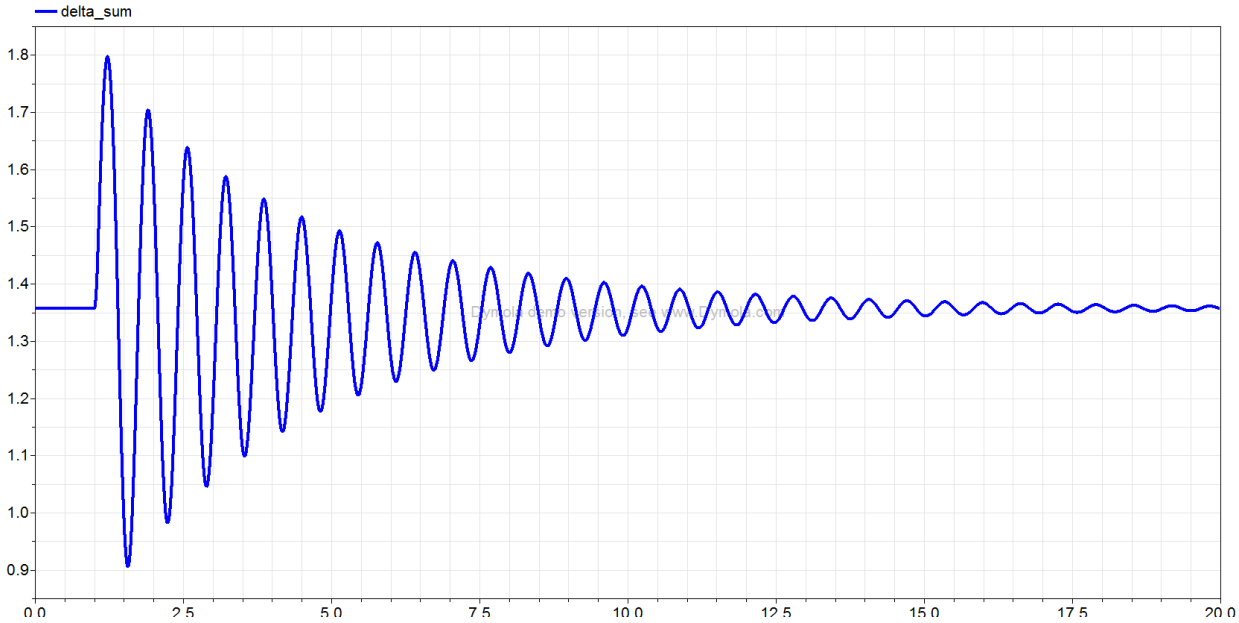

Рисунок 4 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы при проходящем трехфазном КЗ длительностью 0,06 с. при использовании канала АР ССПК по производной отклонения скольжения генератора s

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что наибольшей эффективностью, с целью демпфирования колебаний системы, является применение канала по отклонению скольжения генератора. Также стоит отметить положительное влияние канала по производной отклонения скольжения генератора на переходный процесс.

Однако, в реальных условиях эксплуатации ЭЭС получение АР ССПК данных по отклонению скольжения ротора генератора s относительно синхронной оси затруднено. Наиболее простым, но, предположительно, менее эффективным способом влияния на колебательную статическую устойчивость является применение обратной связи по отклонению частоты напряжения, которое возможно легко измерить в месте установки ССПК. В d,q координатах отклонение частоты напряжения возможно определить следующим образом:

$$f_U = \mathrm{a}rctg(U_d/U_q), \tag{19}$$

$$f_{sys} = \omega_c \cdot s\,, \tag{20}$$

$$f_{sum} = \frac{f_U}{1 + pT_{fb}} + \frac{p \cdot f_{sys}}{1 + pT_{fb}}. \quad (21)$$

где T_{fb} – постоянная времени (T_{fb} = 0,07 с), отражающая запаздывание при измерении частоты напряжения сети.

Моделирование каналов по отклонению частоты напряжения и ее производной осуществляется подобно уравнениям 6 и 7:

$$\Delta E_{\Delta f} = \frac{k_{0\omega} \cdot f_{sum}}{1 + pT_{0\omega}}, \quad (22)$$

$$\Delta E_{\Delta f1} = \frac{p \cdot k_{1\omega} \cdot f_{sum}}{1 + pT_{1\omega}}. \quad (23)$$

где $T_{0\omega}$, $T_{1\omega}$ – постоянные времени ($T_{0\omega}$, $T_{1\omega}$ = 0,01 с), отражающие запаздывание работы преобразователя напряжения устройства.

Тогда уравнения 2 и 3 примут следующий вид:

$$\Delta E_{qсспк} = \Delta E_{q\Delta I} + \Delta E_{\Delta f} + \Delta E_{\Delta f1}, \quad (24)$$

$$\Delta E_{dсспк} = \Delta E_{d\Delta I} + \Delta E_{\Delta f} + \Delta E_{\Delta f1}, \quad (25)$$

Эффективность каналов регулирования по отклонению частоты напряжения и ее производной в схеме сети, показанной на рисунке 1, представлены на рисунках 5 и 6 соответственно. В момент времени 1 с. возникает проходящее трехфазное короткое замыкание длительностью 0,06 с.

Анализ рисунков 5 и 6 показывает, что наибольшей эффективностью, с целью демпфирования качаний системы, является применение канала по отклонению частоты напряжения, однако, демпфирование колебаний системы ухудшается в сравнении со случаем использования скольжения генератора s в качестве входного сигнала пропорционального и дифференциального каналов АР ССПК. Данный эффект закономерен, в силу наличия большего запаздывания при измерении частоты напряжения.

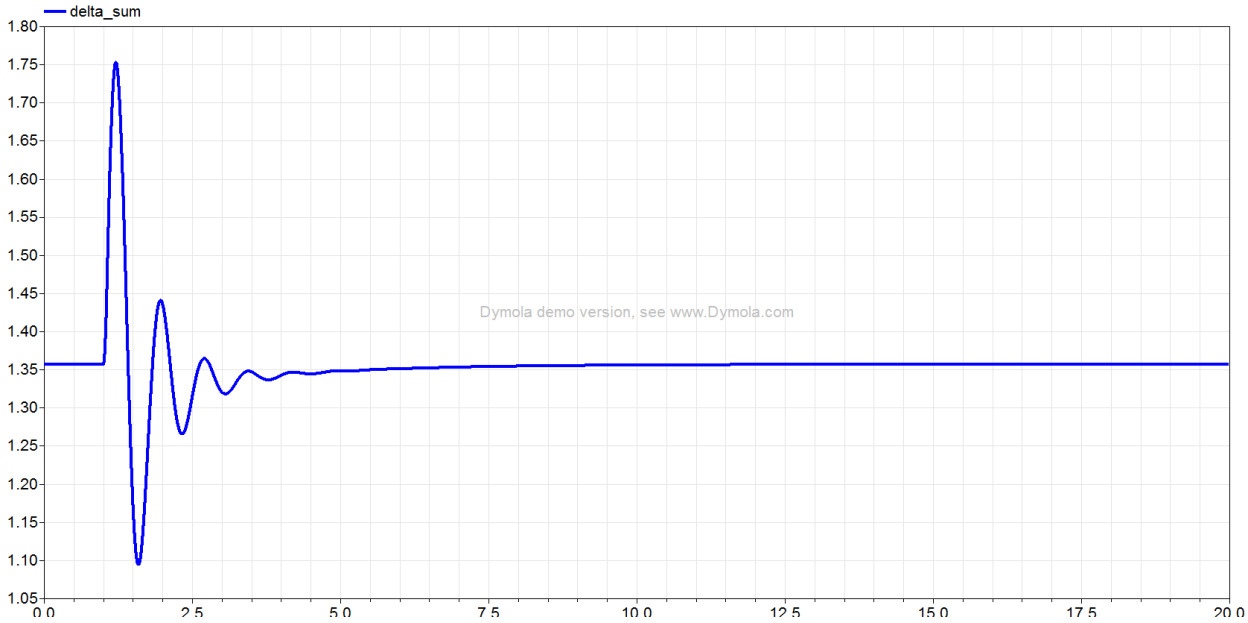

Рисунок 5 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы при проходящем трехфазном КЗ длительностью 0,06 с. при использовании канала АР ССПК по отклонению частоты напряжения сети

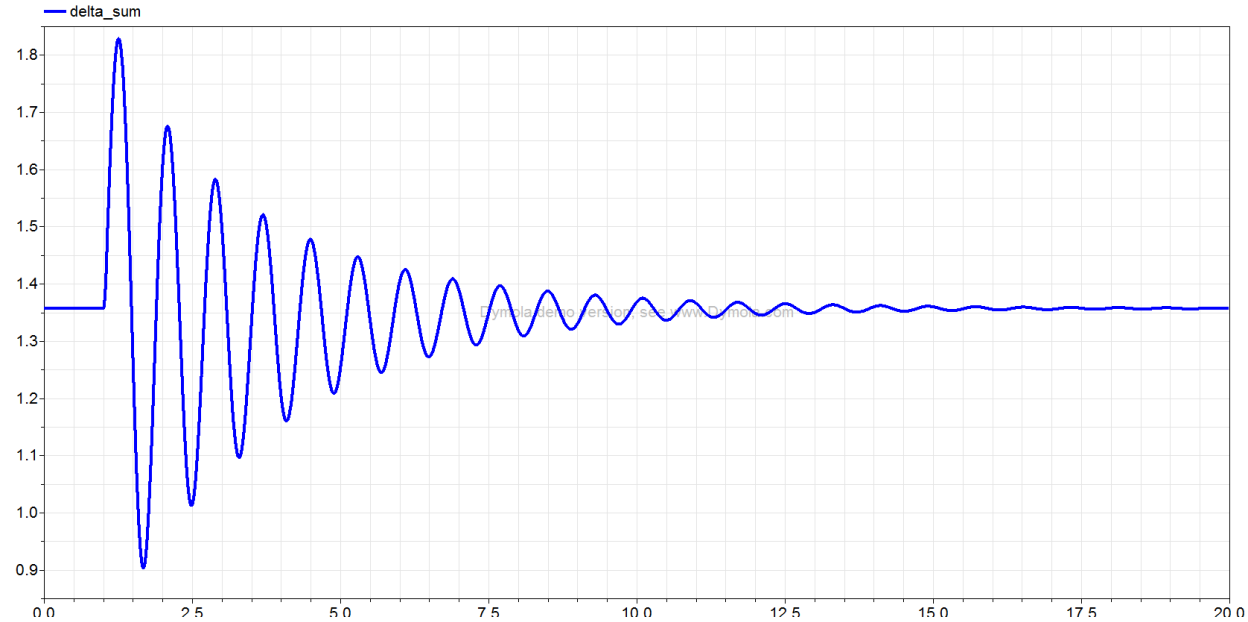

Рисунок 6 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы при проходящем трехфазном КЗ длительностью 0,06 с. при использовании канала АР ССПК по производной отклонения частоты напряжения сети

Стоит отметить, что в установившемся режиме работы ЭЭС статизм регулирования потока мощности (тока) в контролируемом участке сети имеет обратно пропорциональную зависимость от коэффициента регулирования пропорционального канала по отклонению тока K_{0i}. Увеличение K_{0i}, по

аналогии с увеличением коэффициента регулирования канала по отклонению напряжения в АРВ СД, уменьшает статизм регулирования, но значительно ухудшает колебательную статическую устойчивость передачи, поэтому целесообразно ввести интегральный канал регулирования по отклонению тока в качестве меры по исключению статизма регулирования, работающий только в установившемся режиме. Тогда уравнение 10 принимает вид:

$$\Delta I_m = \frac{K_{0i}(I_m - I_{ycm})}{1 + pT_i} + \frac{K_{int}(I_m - I_{ycm})}{p + p^2 T_{int}}, \quad (26)$$

Также во второй главе был произведен выбор оптимальных коэффициентов регулирования по методу одновременной координации настроек регуляторов [14,16,18].

Координация настроек АР представляет собой сложную процедуру, даже если она направлена на улучшение демпферных свойств системы в окрестности лишь одного установившегося режима [15,17]. Выбранный метод одновременной координации настроек регуляторов позволяет определить коэффициенты каналов регулирования АРВ СД генераторов и АР ССПК для совокупности рассматриваемых режимов работы. Также к достоинствам данной методики относится возможность использования большого количества переменных, участвующих в оптимизации.

В виде функции качества используется сумма разности заданного показателя затухания (α_{min}) и всех корней, лежащих правее α_{min}:

$$F = \sum_{\alpha_i \le \alpha_0} (\alpha_0 - \alpha_i)^v \quad (26)$$

где α_0 – заданная величина показателя качества; α_i – вещественные части корней, взятые с обратным знаком; v – параметр (v = 2, 3,...).

При заданном α_0 функция F зависит только от корней 1-4, лежащих правее пунктирной прямой (Рисунок 7). Данные корни принято называть доминирующими. Вклад каждого из доминирующих корней в уравнение тем больше, чем дальше от пунктирной прямой он расположен. С другой

стороны, так как функция F зависит от группы доминирующих корней, корни 5-6 не участвуют в формировании F до тех пор, пока при варьировании переменных, участвующих в оптимизации, не окажутся правее α_0.

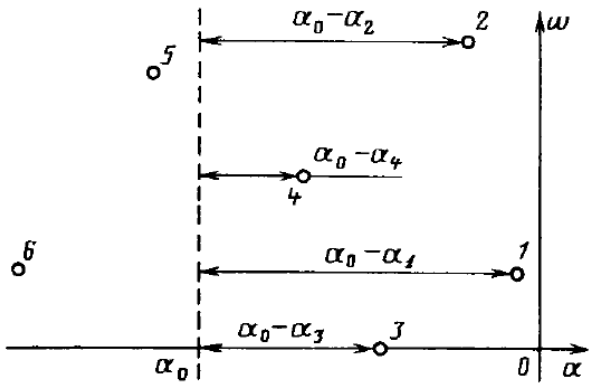

Рисунок 7 – Схема формирования функции качества

Еще одним параметром функции F является показатель v, с ростом которого вклад самого правого корня возрастает. Согласно [19] достаточным считается коэффициент $v=2$.

Как было сказано выше, изложенная методика поиска настроек регуляторов по условию эффективного демпфирования процессов в зоне одного установившегося режима может быть распространена на решение более сложной задачи выбора общей настройки регуляторов, обеспечивающей наилучшее затухание переходных процессов для совокупности режимов. Для этого функция качества формируется следующим образом:

$$F = F^{(1)} + F^{(2)} + \cdots + F^{(\mathrm{n})} = \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{n}} F^{(\mathrm{k})} \tag{27}$$

$$F^{(k)} = \sum_{\alpha_i{}^{(\mathrm{k})} \le \alpha_0{}^{(\mathrm{k})}} \left(\alpha_0{}^{(\mathrm{k})} - \alpha_i{}^{(\mathrm{k})}\right)^v \tag{28}$$

где $F^{(k)}$ – функция качества для k-ого режима; $\alpha_0{}^{(k)}$ – заданная величина показателя качества для k-ого режима; $\alpha_i{}^{(k)}$ – вещественные части корней, взятые с обратным знаком для k-ого режима; n – количество режимов.

В качестве примера, в схеме сети, показанной на рисунке 1, в таблицах 1 и

Таблица 2 представлены корни характеристического уравнения при совместной настройке регуляторов АРВ СД генератора и АР ССПК для трех режимов работы электропередачи. В таблице 1 настройка регуляторов произведена для номинального режима работы генератора. С зафиксированными коэффициентами каналов регулирования АР генератора и ССПК корни характеристического уравнения рассчитаны для трех режимов работы электропередачи. В таблице 2 корни характеристического уравнения рассчитаны с учетом настройки регуляторов для совокупности режимов.

Таблица 1 – Корни характеристического уравнения электропередачи. Настройка регуляторов произведена по номинальному режиму работы генератора (P_{gen}=0.9 о.е.)

АРВ СД генератора: K0ω=-2.141, K1ω=0.3; АР ССПК: K0ω=-0.191, K1ω=-0					
P_{gen}=0.2 о.е.		P_{gen} =0.5 о.е.		P_{gen} =0.9 о.е.	
α, 1/с	jβ, 1/с	α, 1/с	jβ, 1/с	α, 1/с	jβ, 1/с
-0.496	0i	-0.430	0i	-0.49	0i
-1.029	0i	-1.046	0i	-1.102	0i
-3.382	±5.719i	**-3.495**	±7.039i	**-5.065**	±7.311i
-7.085	±30.53i	-5.622	±30.19i	-6.436	±29.17i
-7.918	0i	-9.007	±6.399i	-6.787	±7.077i
-10	0i	-10	0i	-10	0i
-11.6	±4.501i	-10.62	0i	-10.875	0i

Таблица 2 – Корни характеристического уравнения электропередачи. Настройка регуляторов произведена для совокупности режимов

АРВ СД генератора: K0ω=-1.39, K1ω=0.491; АР ССПК: K0ω=-0.189, K1ω=-0					
P_{gen} =0.2 о.е.		P_{gen} =0.5 о.е.		P_{gen} =0.9 о.е.	
α, 1/с	jβ, 1/с	α, 1/с	jβ, 1/с	α, 1/с	jβ, 1/с
-0.498	0i	-0.433	0i	-0.497	0i
-1.019	0i	-1.03	0i	-1.067	0i
-3.574	±5.93i	**-3.683**	±7.731i	**-4.254**	±9.191i
-7.017	±30.76i	-5.417	±30.7i	-6.122	±29.87i
-8.578	0i	-7.422	±5.826i	-6.165	±5.114i
-10	0i	-10	0i	-10	0i
-10.06	±4.386i	-10.85	0i	-11	0i

Согласно представленным результатам расчетов видно, что показатель затухания колебательных процессов, соответствующий самому правому корню, в таблице

Таблица 2 по модулю больше показателя демпфирования самой правой пары комплексно сопряженных корней в таблице 1. Таким образом подтверждается эффективность изложенной методики поиска настроек регуляторов по условию демпфирования для совокупности режимов работы рассматриваемой энергосистемы. Следует отметить, что показатель затухания колебательных процессов, соответствующий самому правому корню, в таблице

Таблица 2 в любом из режимов меньше показателя демпфирования самой правой пары комплексно сопряженных корней в таблице 1 при P_{gen}=0,9 о.е.

Воспользовавшись данной методикой, возможно определить степень влияния ССПК на протекание переходных процессов для трех основных случаев:

1) в работе участвует только АРВ СД генератора станции;
2) в работе участвует только АР ССПК;
3) совместная работа АРВ СД генератора и АР ССПК.

На рисунках 8-10 представлено изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы для трех указанных случаев. В соответствии с ними в таблице 3 приведены корни характеристического уравнения.

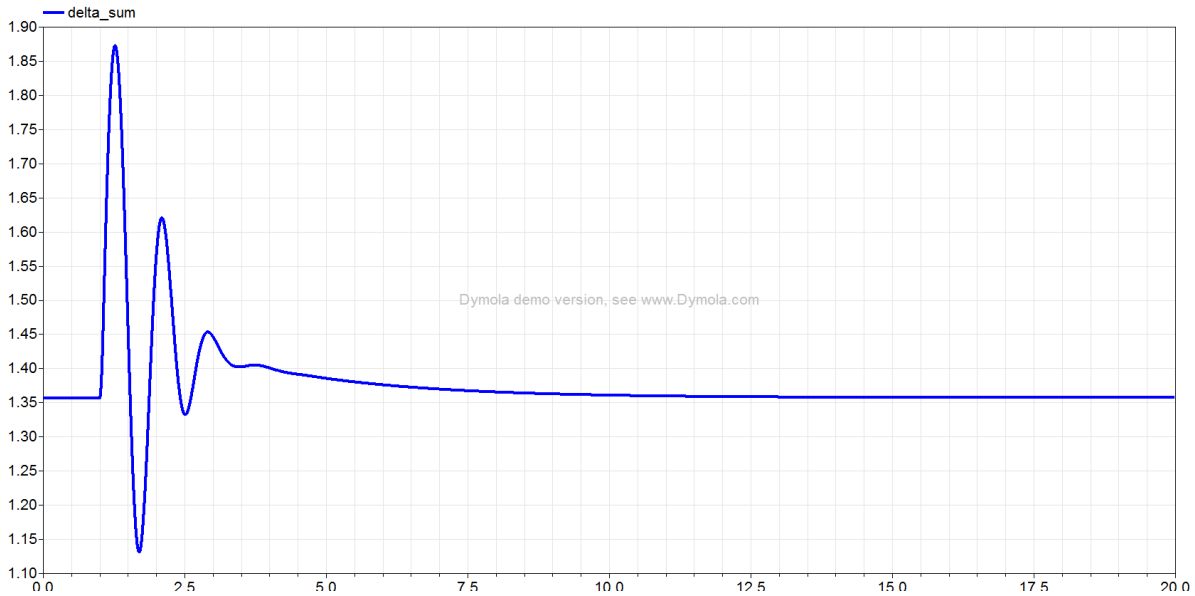

Рисунок 8 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы с учетом настройки АРВ СД генератора

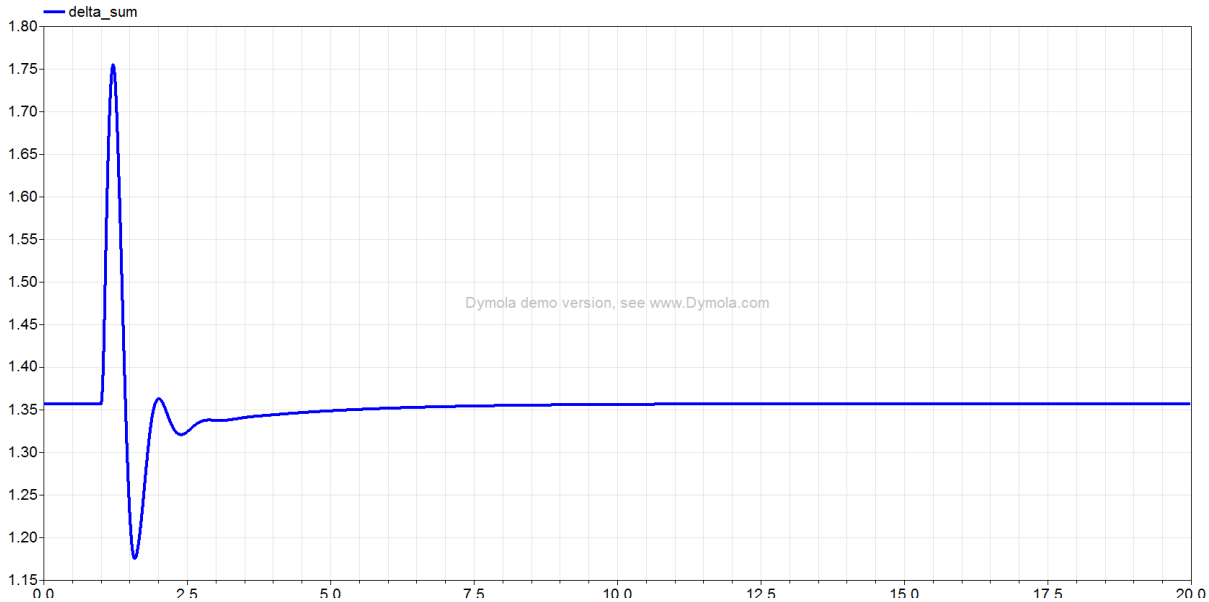

Рисунок 9 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы с учетом настройки АР ССПК

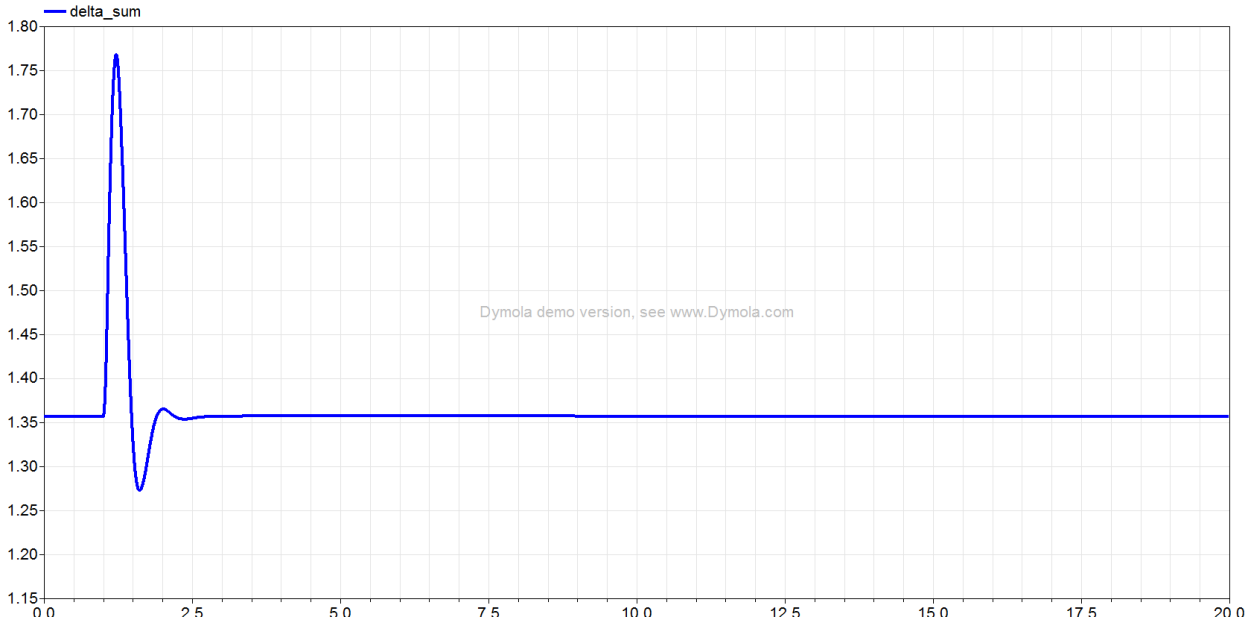

Рисунок 10 – Изменение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы с учетом настройки АРВ СД генератора и АР ССПК

Таблица 3 – Корни характеристического уравнения электропередачи при совместной и раздельной работе регуляторов генератора и ССПК

АРВ СД: K0ω=-9.96, K1ω=1.19		АР ССПК: K0ω=-0.196, K1ω=0		АРВ СД: K0ω=-2.14, K1ω=0.3 АР ССПК: K0ω=-0.191, K1ω=0	
α, 1/с	jβ, 1/с	α, 1/с	jβ, 1/с	α, 1/с	jβ, 1/с
-0.442	0i	-0.50919	0i	-0.49	0i
-1.486	0i	-1	0i	-1.102	0i
-2.805	±6.057i	**-3.018**	±7.219i	**-5.065**	±7.311i
-5.143	±11.33i	-5.784	±27.99i	-6.436	±29.17i
-10	0i	-8.783	0i	-6.787	±7.078i
-10.92	0i	-10	0i	-10	0i
-14.29	0i	-14.29	0i	-10.88	0i

Согласно результатам расчетов, применение только АР ССПК больше влияет на затухание переходного процесса по сравнению с применением только АРВ СД генератора. К тому же пиковое значение угла ротора генератора относительно вектора напряжения системы меньше при применении только АР ССПК. Однако комбинирование применение

регуляторов генератора и ССПК дает наибольшую эффективность: показатель затухания самой правой пары комплексно сопряженных корней более чем на 40% превосходит аналогичные показатели затухания в случаях применения только одного регулятора АРВ СД генератора или АР ССПК.

В третьей главе на примере переходных процессов в энергорайонах реальной ЭЭС продемонстрировано значительное влияние работы как ССПК на динамическую устойчивость и показатели демпфирования переходных процессов, так и СТАТКОМ на поддержание напряжения в нормальном и аварийном режиме работы сети.

Богучанская ГЭС является крупной электростанцией в восточной Сибири. Установленная мощность станции 2997 МВт. Выдача мощности Богучанской ГЭС осуществляется на напряжении 220 и 500 кВ (Рисунок 11). Три генератора мощностью 333 МВт каждый подключены к РУ 220 кВ и шесть генераторов мощностью 333 МВт каждый подключены к РУ 500 кВ.

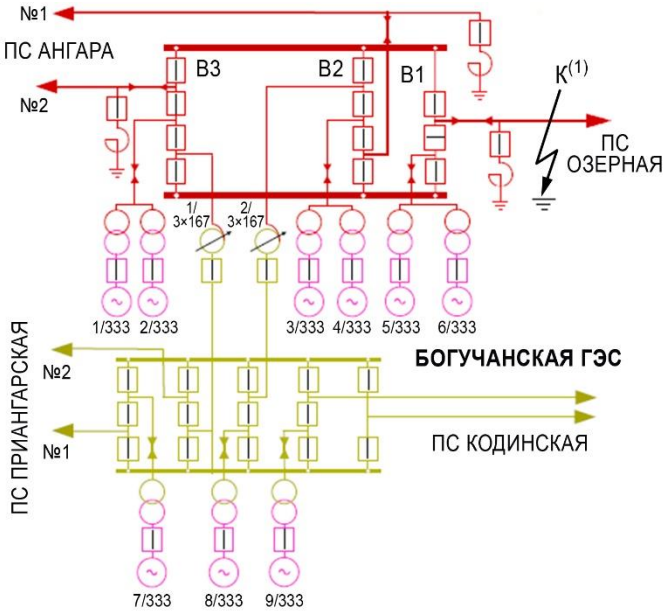

Рисунок 11 – Схема выдачи мощности Богучанской ГЭС

Принципиальная однолинейная схема сети в районе Богучанской ГЭС представлена на рисунке 12.

В настоящее время максимальная допустимая мощность, выдаваемая Богучанской ГЭС, ограничена по условию сохранения динамической устойчивости. При нормативном возмущении третьей группы [2], а именно

однофазном КЗ на ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная вблизи шин станции с отказом шинного выключателя в РУ 500 кВ Богучанской ГЭС и действием УРОВ.

Логика работы релейной защиты представлена на рисунке 13. В момент времени 1 с происходит КЗ на ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная вблизи шин станции. Через 0,04 с основная защита ВЛ посылает сигнал на отключение выключателей ЛЭП. В 1,085 с срабатывает шинный выключатель ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная в РУ 500 кВ ПС 500 кВ Озерная. Выключатель В1 не отрабатывает сигнал на отключение и в момент времени 1,215 с резервная защита подает сигнал на отключение выключателей В2 и В3 в РУ 500 кВ Богучанской ГЭС. В момент времени t=1,255 с. В результате срабатывания выключателей В2 и В3, ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная отключается с двух сторон.

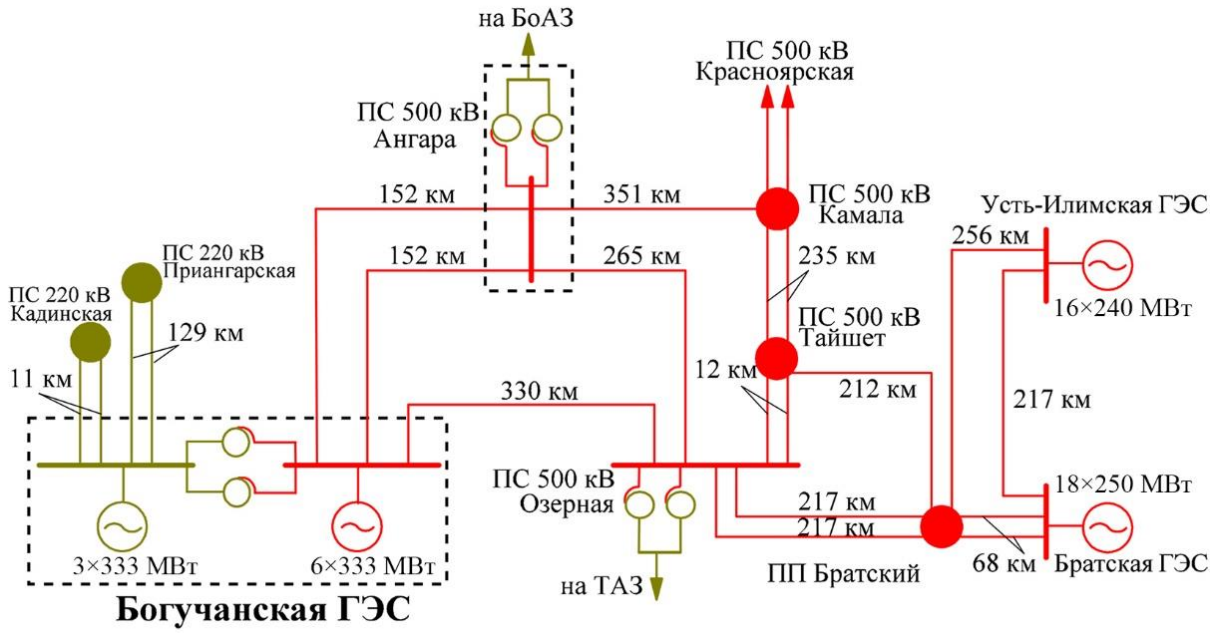

Рисунок 12 – Принципиальная однолинейная схема сети района Богучанской ГЭС

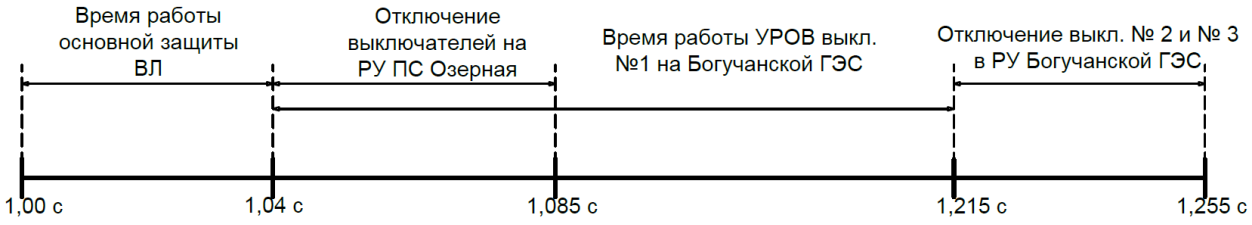

Рисунок 13 – Логика срабатывания релейной защиты

Без применения устройств ССПК на отходящих присоединениях, максимальная выдаваемая мощность Богучанской ГЭС равна 2224 МВт. По условиям ограничения минимальной выдаваемой мощности каждым генератором, одновременно в работе могут находиться 8 гидрогенераторов.

В целях увеличения максимально-допустимой выдаваемой мощности станции предлагается рассмотреть установку двух ССПК в отходящие ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – ПС 500 кВ Ангара № 1,2. Принципиальная однолинейная схема района Богучанской ГЭС с учетом предлагаемой установки ССПК представлена на рисунке 14.

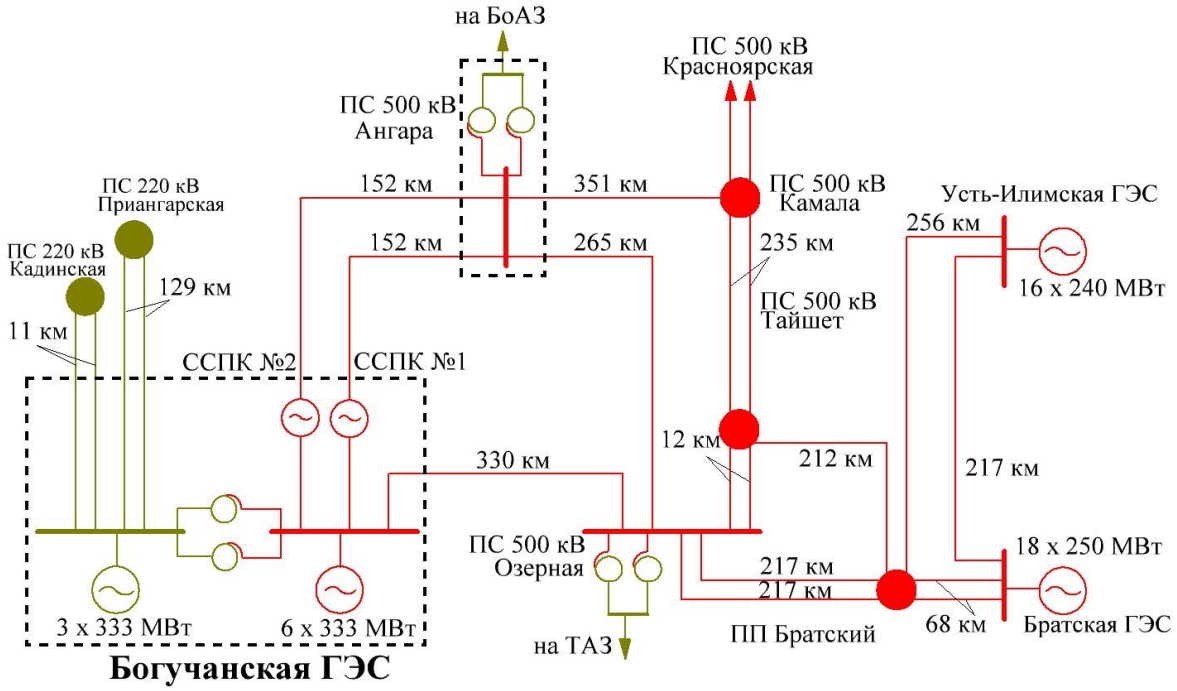

Рисунок 14 – Принципиальная однолинейная схема сети района Богучанской ГЭС с учетом установки ССПК

Моделирование переходных процессов осуществлялось в программном комплексе «Dymola». Режим работы электростанций в районе Богучанской ГЭС соответствует зимнему максимуму нагрузок. Модели нагрузок представлены шунтами постоянной проводимости, увеличение мощности генерации Богучанской ГЭС компенсируются базисным узлом, представленным шинами 500 кВ ПС 500 кВ Камала.

Схема модели сети района Богучанской ГЭС в ПК «Dymola» представлена на рисунке 15. За базисную мощность принято $S_{БАЗ}$=999/0.9=1111 МВА, $U_{БАЗ}$=500 кВ.

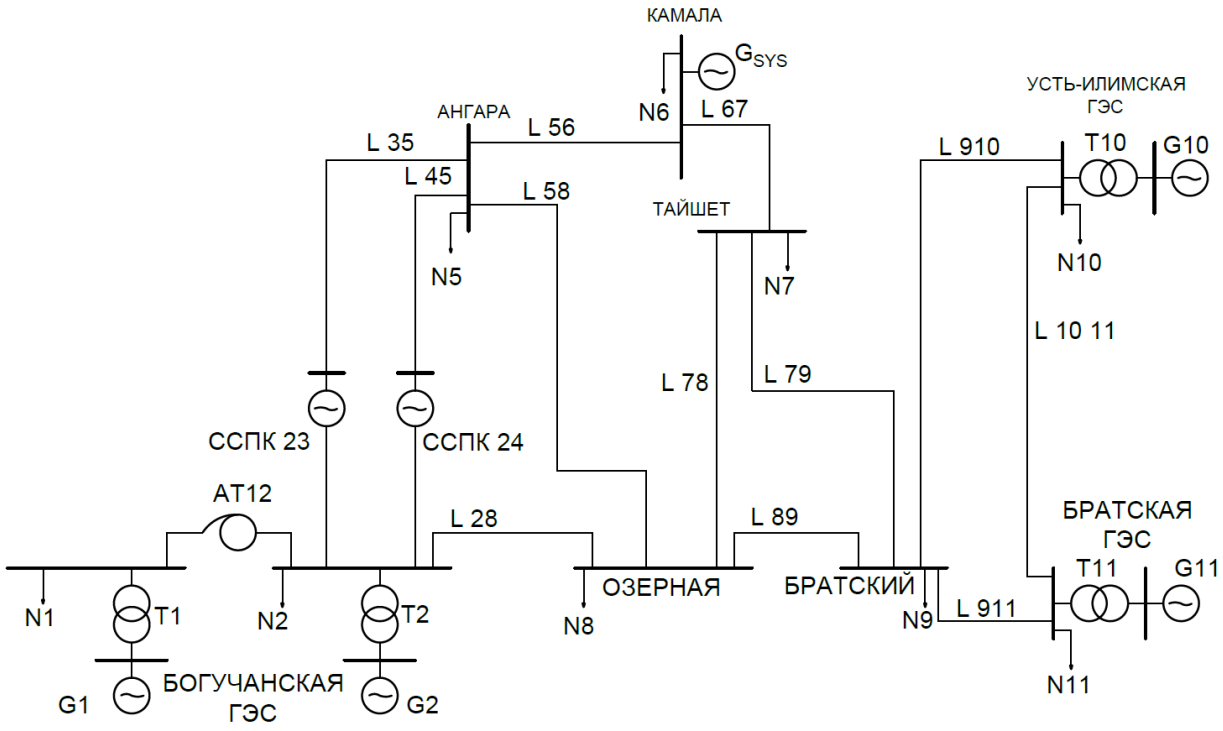

Рисунок 15 – Схема модели сети района Богучанской ГЭС

Сравнительная таблица потоков мощности по линиям в ПК «RastrWin» и ПК «Dymola» представлены в таблице представлены в таблице Таблица 4. Относительная погрешность не превышает 10%, в связи с чем можно сделать вывод о достаточной сходимости моделей. Установление подобного режима в ПК «Dymola» возможно с учетом задания статизма регуляторов турбин генераторов. Уровень генерации объединенных генераторов станций в ПК «Dymola» и ПК «RastrWin» представлен в таблице 5.

Таблица 4 – Верификация установившегося режима работы ЭЭС в районе Богучанская ГЭС

Наименование ветви	Величина потока мощности P, МВт		Относительная погрешность, %
	ПК «Dymola»	ПК «RastrWin»	
АТ1 Богучанской ГЭС	83,3	83,4	-0,2
АТ2 Богучанской ГЭС	83,3	83,4	-0,2
ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Ангара №1	676,2	685,0	-1,3
ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Ангара №2	677,2	686,1	-1,3
ВЛ 500 кВ Ангара – Камала	333	332,2	0,3
ВЛ 500 кВ Ангара – Озерная	142,1	141,8	0,3
ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная	438	435,6	0,6
ВЛ 500 кВ Камала – Тайшет №1	332,7	325,4	2,3
ВЛ 500 кВ Камала – Тайшет №2	332,7	326,1	2,1
ВЛ 500 кВ Тайшет – Озерная №1	328,9	299,8	9,8
ВЛ 500 кВ Тайшет – Озерная №2	328,9	317,2	3,7
ВЛ 500 кВ Тайшет – Братский	317,4	329,3	-3,7
ВЛ 500 кВ Озерная – Братский №1	305,4	281,3	8,6
ВЛ 500 кВ Озерная – Братский №2	305,4	317,0	-3,7
ВЛ 500 кВ Братский – Усть-Илимская ГЭС	998,7	977,5	2,2
ВЛ 500 кВ Братский – Братская ГЭС №1	498,9	486,0	2,7

Наименование ветви	Величина потока мощности P, МВт		Относительная погрешность, %
	ПК «Dymola»	ПК «RastrWin»	
ВЛ 500 кВ Братский – Братская ГЭС №2	498,9	505,9	-1,4
ВЛ 500 кВ Усть-Илимская ГЭС – Братская ГЭС	864,1	829,4	4,2

Таблица 5 – Уровень генерации объединенных генераторов станций в ПК «Dymola» и ПК «RastrWin»

Наименование ветви	Величина генерируемой мощности P, МВт		Относительная погрешность, %
	ПК «Dymola»	ПК «RastrWin»	
РУ 220 кВ Богучанская ГЭС	552,2	550	0,5
РУ 500 кВ Богучанская ГЭС	1652,4	1650	0,2
Усть-Илимская ГЭС	2493,5	2491	0,2
Братская ГЭС	3508,5	3499	0,3

Согласно описанной выше логике срабатывания релейной защиты, проведены расчеты переходных процессов. На рисунках 16 и 17 показаны объединенные углы роторов групп генераторов на шинах 220 и 500 кВ и напряжение в РУ 500 кВ Богучанской ГЭС.

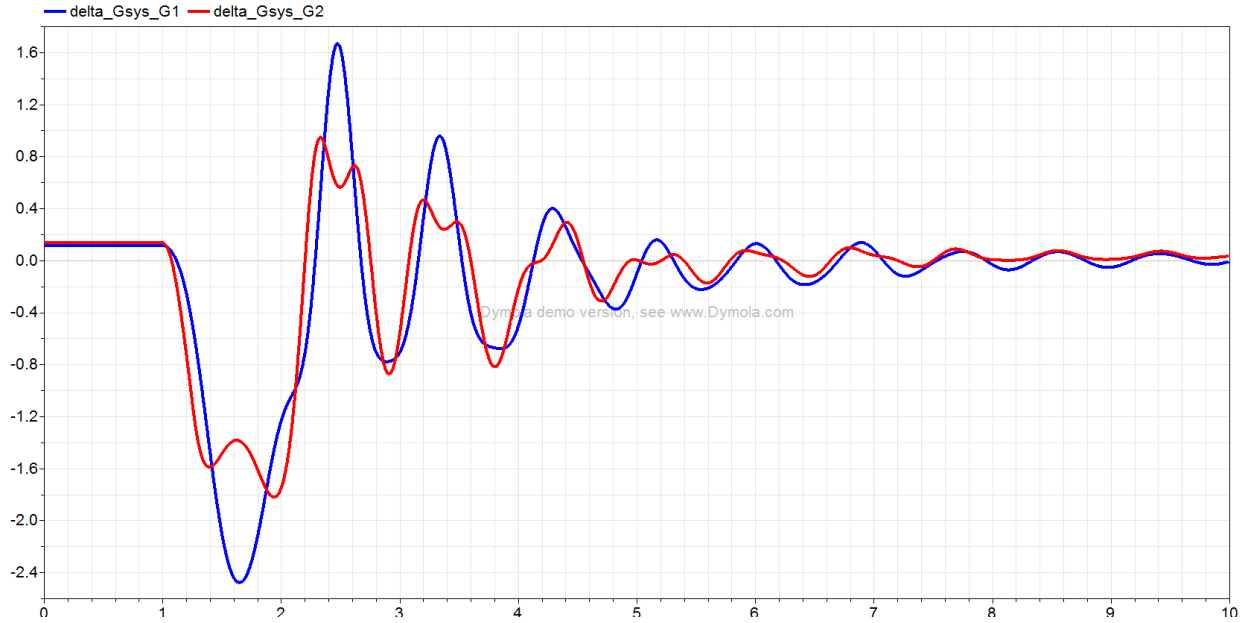

Рисунок 16 – Объединенные углы роторов групп генераторов на шинах 220 (синяя кривая) и 500 (красная кривая) кВ Богучанской ГЭС (ССПК отсутствует, $P_{ГЭС}$=2205 МВт)

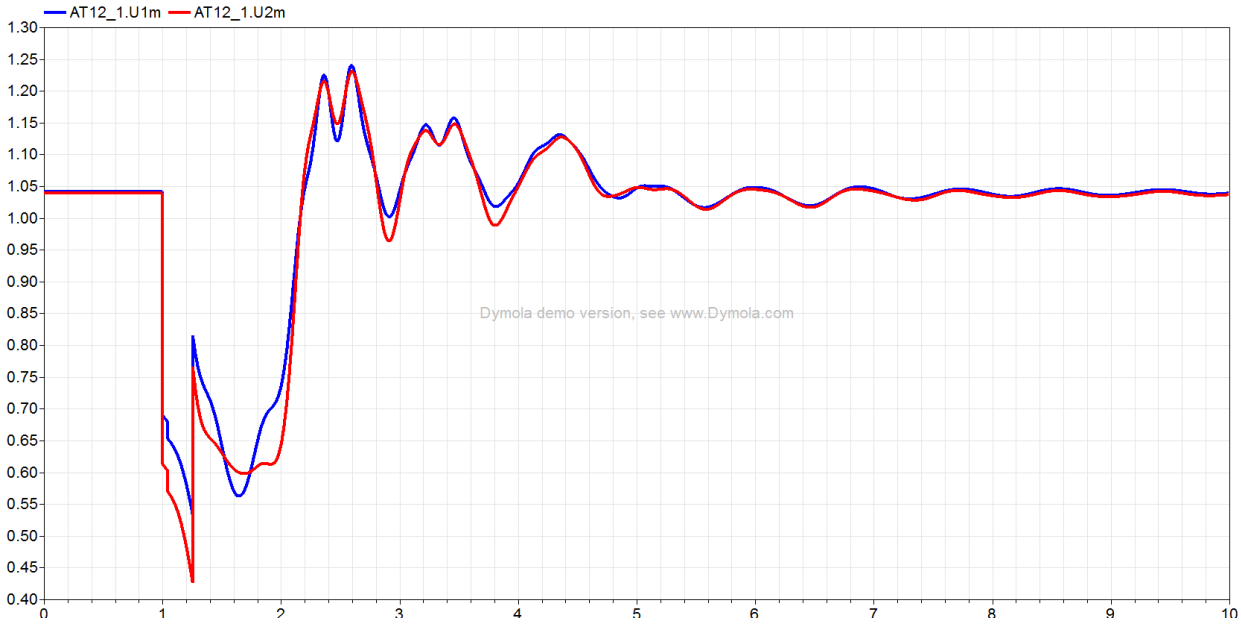

Рисунок 17 – Напряжение в РУ 220 (синяя кривая) и 500 (красная кривая) кВ Богучанской ГЭС при нормативном возмущении (ССПК отсутствует, $P_{ГЭС}$=2205 МВт)

В таблице Таблица 6 представлены корни характеристического уравнения, соответствующие данным переходным процессам при демпфировании только АРВ генераторов.

Таблица 6 – Корни характеристического уравнения ЭЭС (ССПК отсутствует, $P_{ГЭС}$=2205 МВт)

АРВ СД G_1 и G_2: K0ω=-0.4, K1ω=0.15	
α, 1/с	jβ, 1/с
-0.45413	0i
-0.47237	**±8.0581i**
-0.53181	±11.559i
-0.56223	±25.656i
-0.62388	**±14.567i**
-0.66657	**±5.0247i**
-0.78826	0i
-0.97359	0i
-1	0i

Далее рассматривается установка двух ССПК в РУ 500 кВ Богучанской ГЭС на отходящие присоединения ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Ангара №1,2. Мощность каждого ССПК принята равной 0,2 о.е., что составляет примерно 0,1 от натуральной мощности рассматриваемой линии. В целях демонстрации влияния работы ССПК на протекание переходных процессов при нормативных возмущениях, на рисунках 18 и 19 показаны объединенные углы роторов групп генераторов на шинах 220 и 500 кВ и напряжение в РУ 500 кВ Богучанской ГЭС при сохранении выдаваемой мощности станции $P_{ГЭС}$=2207 МВт. Видно, что применение каналов регулирования АР ССПК по отклонению и производной отклонения частоты напряжения сети улучшает динамическую устойчивость (первое колебание углов роторов генераторов по сравнению с расчетами без ССПК меньше), а также положительно влияет на демпфирование переходных процессов. В таблице Таблица 7 представлены корни характеристического уравнения соответствующих данным переходным процессам.

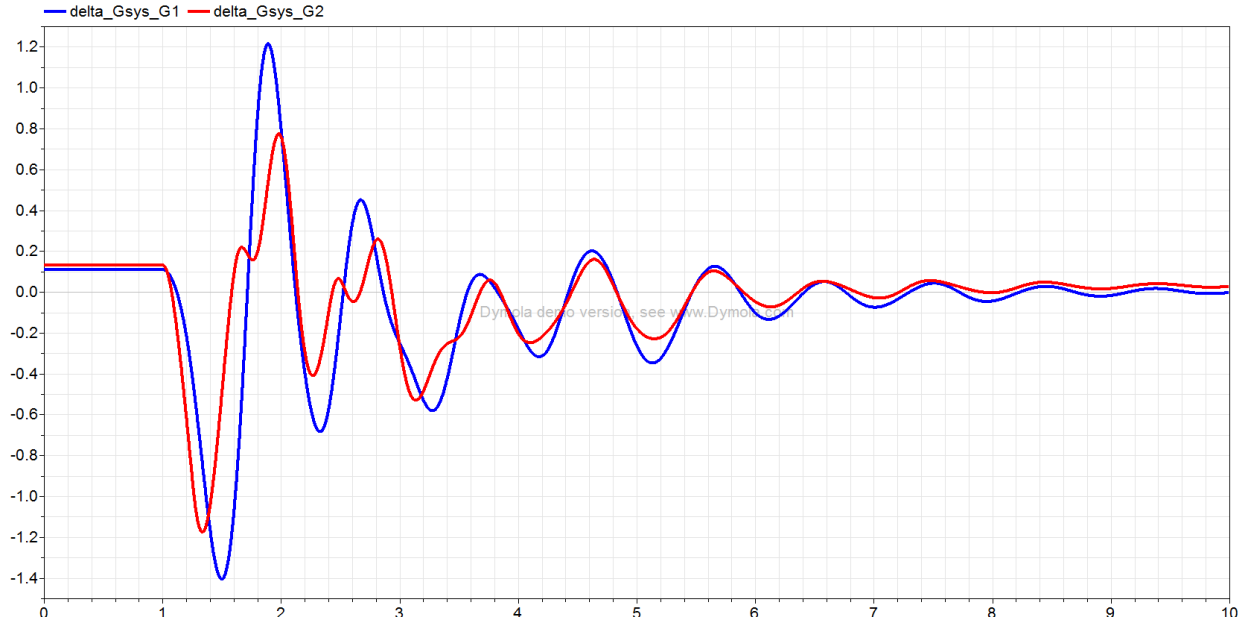

Рисунок 18 – Объединенные углы роторов групп генераторов на шинах 220 (синяя кривая) и 500 (красная кривая) кВ Богучанской ГЭС ($S_{ССПК1,2}$=222 МВА, $P_{ГЭС}$=2205 МВт)

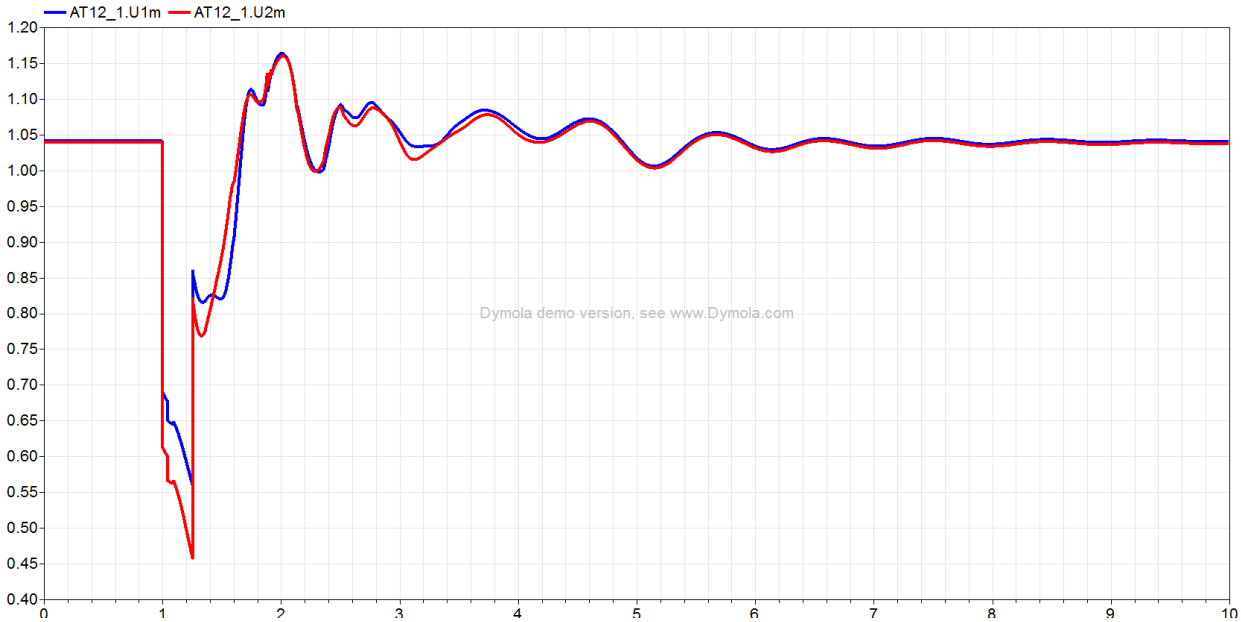

Рисунок 19 – Напряжение в РУ 220 (синяя кривая) и 500 (красная кривая) кВ Богучанской ГЭС при нормативном возмущении ($S_{ССПК1,2}$=222 МВА, $P_{ГЭС}$=2205 МВт)

Таблица 7 – Корни характеристического уравнения ЭЭС ($S_{ССПК}1,2$=222 МВА, $P_{ГЭС}$=2205 МВт)

АРВ СД G_1 и G_2: K0ω=-0.4, K1ω=0.15 АР $ССПК_{23}$ и $ССПК_{24}$: K0ω=-0.029, K1ω=0.00012	
α, 1/с	jβ, 1/с
-0.45278	0i
-0.54071	±11.277i
-0.56236	±25.115i
-0.61116	**±7.4372i**
-0.7733	0i
-0.8225	**±4.9415i**
-0.91915	**±14.021i**
-0.96988	0i
-1	0i

Сравнивая таблицы Таблица 6 и Таблица 7, видно, что с учетом применения ССПК показатели затухания пар комплексно сопряженных корней, на которые оказывают влияние рассматриваемые устройства FACTS, увеличиваются по модулю от 24 до 45%.

С учетом применения метода многокритериальной оптимизации были выбраны настройки коэффициентов регулирования каналов АР ССПК. Максимально-допустимая выдаваемая мощность станции при применении двух ССПК мощностью 0.2 о.е. каждый увеличивается на 383,9 МВт, объединенные углы роторов групп генераторов на шинах 220 и 500 кВ и напряжение в РУ 500 кВ Богучанской ГЭС также представлены на рисунках 20 и 21. В таблице Таблица 8 представлены корни характеристического уравнения, соответствующие данным переходным процессам.

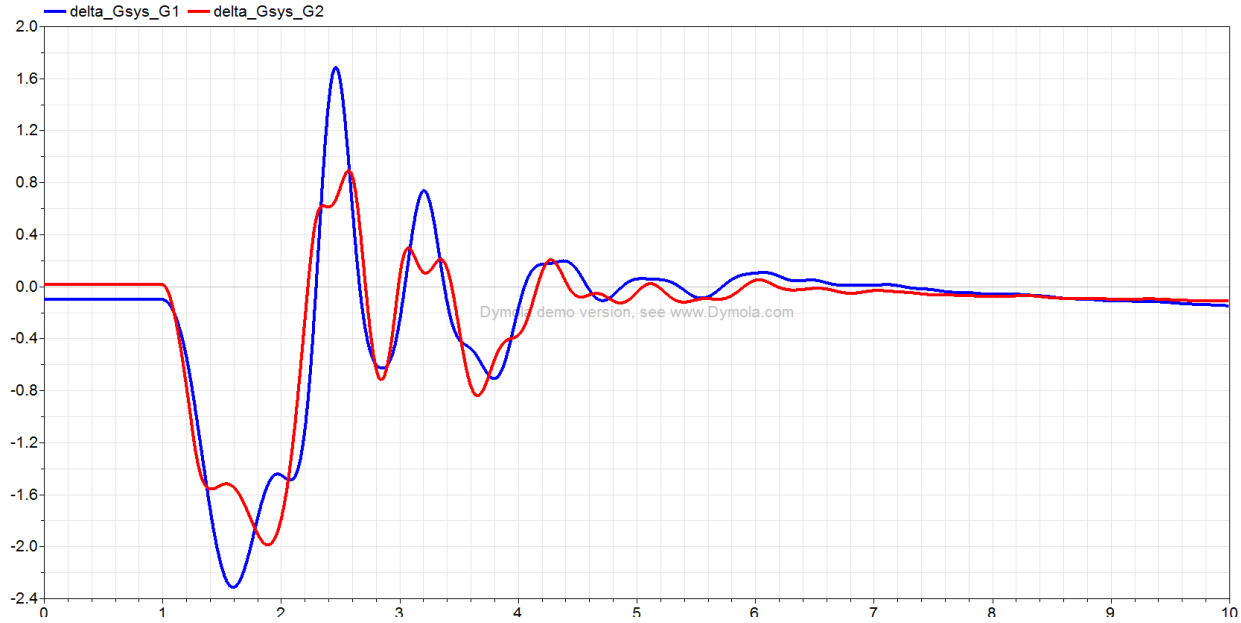

Рисунок 20 – Объединенные углы роторов групп генераторов на шинах 220 (синяя кривая) и 500 (красная кривая) кВ Богучанской ГЭС ($S_{ССПК1,2}$=222 МВА, $P_{ГЭС}$=2589 МВт)

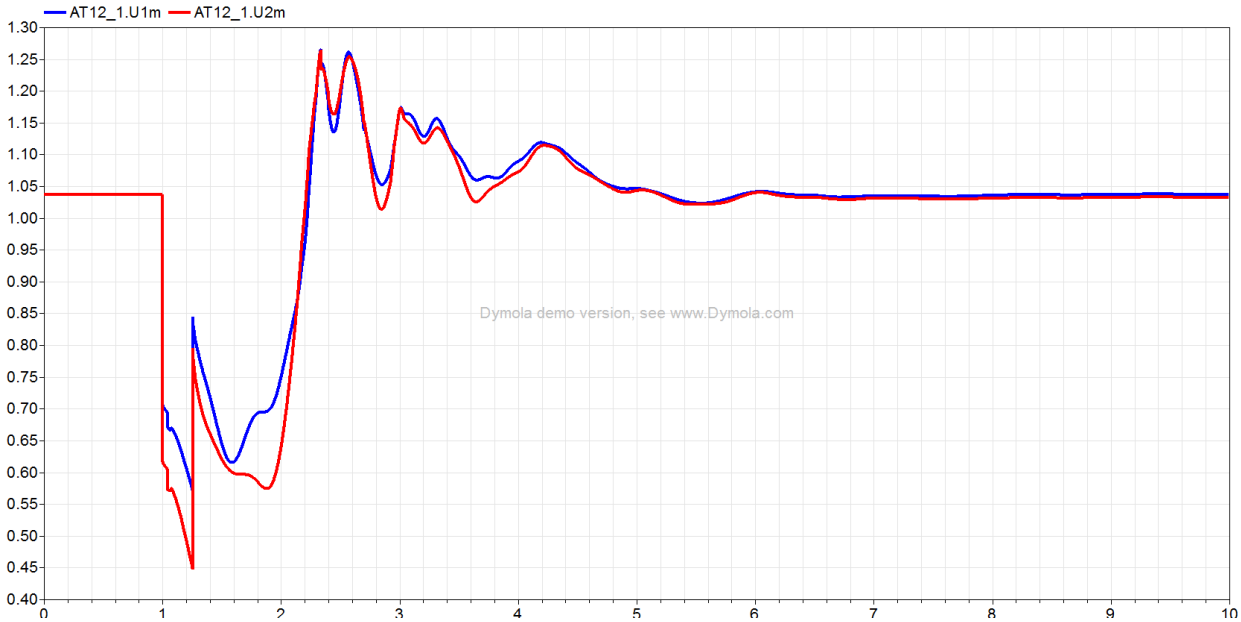

Рисунок 21 – Напряжение в РУ 220 (синяя кривая) и 500 (красная кривая) кВ Богучанской ГЭС при нормативном возмущении ($S_{ССПК1,2}$=222 МВА, $P_{ГЭС}$=2589 МВт)

Таблица 8 – Корни характеристического уравнения ЭЭС ($S_{ССПК}1,2$=222 МВА, $P_{ГЭС}$=2589 МВт)

АРВ СД G_1: K0ω=-0.85, K1ω=0.11 АРВ СД G_2: K0ω=-0.44, K1ω=0.12 АР $ССПК_{23}$: K0ω=-0.03 АР $ССПК_{24}$: K0ω=-0.028	
α, 1/с	jβ, 1/с
-0.2881	0i
-0.4977	±5.7552i
-0.5089	0i
-0.56241	±25.709i
-0.60012	±11.348i
-0.65442	±19.036i
-0.73895	0i
-0.84751	0i
-0.90341	±14.915i

Во всех представленных выше случаях применение ССПК значительно сказывается на демпфировании переходного процесса и динамической устойчивости, что в итоге приводит к увеличению максимальной выдаваемой мощности Богучанской ГЭС.

Следует отметить, что повышение мощности рассматриваемых устройств FACTS положительно сказывается на увеличении максимально выдаваемой Богучанской ГЭС мощности, однако полностью снять ограничение невозможно, в связи с конечной пропускной способностью ЛЭП.

Также в третьей главе рассмотрено применение СТАТКОМ на транзите 110 кВ ПС 220 кВ Ручьи – ПС 330 кВ Каменногорская. При работе сети в режиме зимнего максимума и отключении одной ВЛ 110 кВ Гарболовская – Ручьи №1(2) происходит снижение напряжения на подстанциях

рассматриваемого транзита, в связи с чем на транзите 110 кВ ПС 220 кВ Ручьи – ПС 330 кВ Каменногорская применяется автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН) на ПС 110 кВ Гарболовская и ПС 110 кВ Сосновская.

Схема моделируемой сети представлена на рисунке 22. За базисную мощность принято $S_{БАЗ}$=100 МВА, $U_{БАЗ}$=110 кВ. В момент времени 30 с. происходит аварийное отключение одной цепи ВЛ 110 кВ Гарболовская – Ручьи.

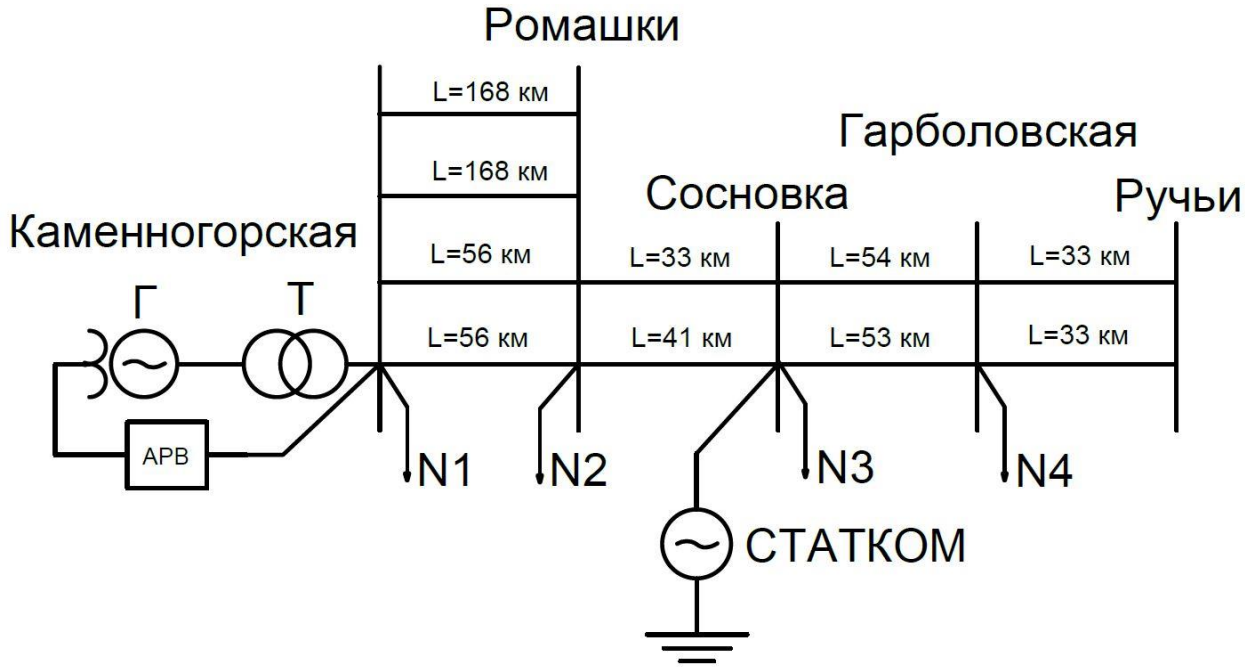

Рисунок 22 – Схема транзита 110 кВ Ручьи – Каменногорская

Согласно [2], минимально допустимое напряжение сети 110 кВ в нормальном режиме работы сети не должно быть ниже 88,55 кВ или, с учетом рассматриваемых базисных величин, ниже 0,805 о.е. Минимально допустимое напряжение сети 110 кВ в аварийном режиме работы сети не должно быть ниже 84,7 кВ или, с учетом рассматриваемых базисных величин, ниже 0,77 о.е. На рисунке 23 представлено напряжение на шинах 110 кВ ПС 110 кВ Сосновка. При выведенном из работы СТАТКОМ (синяя кривая), напряжение в нормальном режиме равно 0,814 о.е., что выше минимально допустимого напряжения сети. Однако, при отключении ВЛ 110 кВ Ручьи–Гарболовская, напряжение падает до 0,76 о.е., что уже выходит

за границы минимально допустимого напряжения в послеаварийном режиме. Предлагается в РУ 110 кВ ПС 110 кВ Сосновка установить СТАТКОМ мощностью 60 МВА. С учетом использования СТАТКОМ (красная кривая), уровень напряжения на шинах 110 кВ ПС 110 кВ Сосновка как в нормальном, так и послеаварийном режимах работы сети оказывается в рамках минимально допустимых величин.

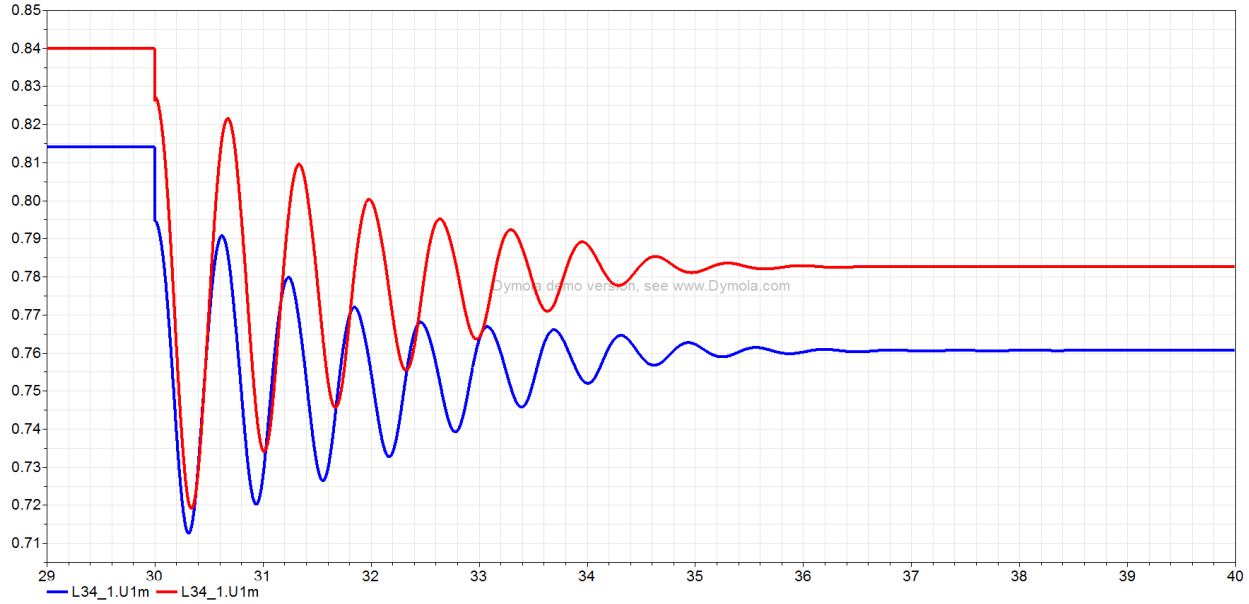

Рисунок 23 – Напряжение на шинах 110 кВ ПС 110 кВ Сосновка (СТАТКОМ выключен – синяя кривая; СТАТКОМ включен – красная кривая)

СТАТКОМ, как в нормальном, так и послеаварийном режимах работы сети, работает в режиме выдачи максимальной реактивной мощности. Следует отметить, что ток, инжектируемый преобразователем напряжения СТАТКОМ не зависит от напряжения сети, что является значительным преимуществом относительно классических конденсаторных батарей. Кроме того, согласно СиПРЭ Ленинградской области на 2020-2024 годы, планируется строительство ЛЭП 110 кВ Ручьи–Токсово–Гарболовская для исключения снижения уровня напряжения ниже минимально допустимой границы. Установка СТАТКОМ в РУ 110 кВ ПС 110 кВ Сосновка позволяет исключить дополнительное сетевое строительство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа существующих устройств FACTS как на примере простейшей электропередачи, так и в модели сложной энергосистемы выявлены наиболее эффективные варианты силового режимного регулирования.
2. Реализованы простые математические модели СТАТКОМ и ССПК, пригодные для расчета электромеханических переходных процессов в крупных энергообъединениях.
3. Предложены эффективные структуры систем автоматического управления ССПК с использованием обратных связей по отклонению скольжения, производной отклонения скольжения, отклонению частоты напряжения и производной отклонения частоты напряжения, а также представлены возможности влияния указанных каналов регулирования ССПК на демпферные свойства энергосистемы и протекание переходных процессов.
4. Выполнено количественное сопоставление эффективности применения автоматического регулятора (АР) ССПК и автоматического регулятора возбуждения сильного действия (АРВ СД) генератора на базе корневого анализа с применением методики одновременной координации настроек регуляторов.
5. Представлена оценка влияния ССПК на увеличение максимальной выдаваемой мощности гидроэлектростанции в составе сложного энергообъединения и улучшение демпферных свойств примыкающего района энергосистемы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Лямов А. С., Паздерин А. В., Солодянкин С. А. Анализ характеристик мощности электропередач с устройствами FACTS // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2017. – № 1 (76). – С. 77 – 86.

2. Лямов А. С., Смоловик С. В., Солодянкин С. А., Тупицина А. Л., Шишкин А. С. Исследование влияния быстродействующих устройств режимного регулирования на показатели устойчивости // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2018. – № 1 (78). – С. 35 – 44.

3. Денисенко А. И., Лямов А. С., Смоловик С. В., Тупицина А. Л. Регулировочные характеристики статического синхронного продольного компенсатора // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. – № 2 (81). – С. 107 – 112.

4. Лямов А. С., Смоловик С. В., Тупицина А. Л. Устойчивость электропередачи со статическим синхронным продольным компенсатором // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2020. – № 1 (82). – С. 102 – 108.

Статьи в других изданиях:

1. Sergey V. Smolovik, Aleksandr S. Liamov, Vladislav V. Teplukhin, Anna L. Tupitsina, Vladimir S. Chudny. Power-angle characteristics of transmission line with FACTS devices // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. – pp. 784 – 788;

2. Sergey V. Smolovik, Aleksandr S. Liamov, Anna L. Tupitsina, Vladimir S. Chudny, Irina E. Ryndina. Analysis of the Unified Power Flow Controller Influence on Transient Processes // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. – pp. 1080 – 1082;

3. Sergey V. Smolovik, Vladimir S. Chudny, Artem I. Denisenko, Aleksandr S. Liamov, Anna L. Tupitsina. Control Characteristics of Static Synchronous Series Compensator // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020. – pp. 1329 – 1332.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hingorani N. G., Gyugyi L., Understanding FACTS, IEEE Press, N.Y., 2000, 428 pp.

2. Методические указания по устойчивости энергосистем, утверждённые приказом Минэнерго России от 03.08.2018 № 630.

3. А. Н. Беляев. "Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. Часть3", Г.А. Першиков, Е.Н. Попков, С.В. Смоловик, В. С. Чудный, Изд-во Политехн. ун-та, 2017, 97 с.

4. Mircea Eremia, Advanced solutions in power systems. HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence / Chen-Ching Liu, Abdel-Aty Edris. – USA, by John Wiley & Sons, Inc., 2016 – 1033 pp.

5. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 Мвар пущен в эксплуатацию. // Электричество.-2002.- №3.- С.64-66

6. Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А. и др. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35-500 кВ. // Электротехника.- 2003.- №1.

7. Bin Wu, High-Power Converters and AC Drives. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA 2006, 450 pp.

8. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей // ЭЛЕКТРОТЕХНИКА № 2, 2017.

9. Грюнбаум Р, Уллерюд Ю, «FACTS: новейшее средство увеличения пропускной способности». Гибкость сети. АББ Ревю 4/2005, стр 21-24.

10. Дементьев Ю.А. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях // Электричество.- 2003. №9. с.2-11.

11. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи. Е.А. Марченко, Ю.А. Розовский С.С. Шур. – М.,Л.: ГЭИ, 1957. – 48 с.

12. Ситников В. Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе элементов гибких электропередач (FACTS)/ Автореферат дисс. докт. техн. наук, Иваново, 2009, 34 с.
13. Dymola. User’s Manual URL: https://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf
14. Груздев И.А., Труспекова Г.Х., Устинов С.М. Одновременная координация настроек регуляторов возбуждения генераторов на базе численного поиска // Электричество, 1984. № 3. С. 51-53.
15. Литкенс И.В., Филинская Н.Г. Выбор настроек АРВ в многомашинной энергосистеме // Электричество. 1986, № 4, с. 15-19.
16. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
17. Груздев И.А., Стародубцев А.А., Устинов С.М. Условия достижения наилучшего демпфирования переходных процессов в энергосистемах при численном поиске настроек АРВ-СД // Известия высших учебных заведений. Энергетика, 1990, № 11, с. 21-25.
18. Устинов С.М. Метод численного поиска настроек регуляторов для обеспечения устойчивости больших энергообъединений // Известия академии наук. Энергетика, 2015, № 2. С.49-56.
19. Груздев И.А., Торопцев Е.Л., Устинов С.М. Определение настроек АРВ для совокупности режимов энергосистемы // Электричество, 1986, №4. С.11-15
20. Kumar N. S., Srinivasan R., Damping improvement by FACTS devices: a comparison between STATCOM, SSSC and UPFC. International journal of electric and power engineering, 2008, pp 171 - 178.
21. Larsen, E. V., Clark, K., Miske Jr., S. A., and Urbanek, J. Characteristics and rating considerations of thyristor controlled series compensation. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 2, pp. 992–1001, April 1994.

22. Murali D., Rajaram M., «Transient energy analysis for STATCOM and SSSC applications». International journal of electric and power engineering. Issue 3, Volume 4 2009, pp 191-197.
23. Mihalic, R., Zunko, P, and Povh, D. Improvement on transient stability using unified power flow controller. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 1, pp. 485–492, January 1997.
24. L.Ran, L.Holdsworth, G.A. Purtus. ”Dynamic selective harmonic elimination of a three-level inverter used for static VAr compensation”. 32 conf. IEEE Power Electronic Specialist, июнь 2001, стр. 1549-1554.
25. «IGCT – integrated gate-commutated thyristors» / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/ABB_Flyer_IGCT_2015.pdf.
26. Bin Wu, High-Power Converters and AC Drives. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA 2006, 450 pp.
27. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.; ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 312 с.:ил.
28. Padiyar K.R., «FACTS controllers in power transmission and distribution». 2007.
29. Predrag C. Stefanov, Aleksandar M. Stankovic, «Modeling of UPFC Operation Under Unbalanced Conditions With Dynamic Phasors». IEEE transactions on power systems, Vol. 17, No. 2, May 2012, pp. 395 - 403.