

О влиянии быстродействия управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа на стабилизацию напряжения и электромеханические переходные процессы

ШАКАРЯН Ю.Г., ФОКИН В.К., ЛИХАЧЕВ А.П.

На примере электроэнергетической системы (ЭЭС) простой структуры с наличием устройства управляемого шунтирующего реактора (УШР), включаемого непосредственно в сеть высокого или сверхвысокого напряжения (ВН, СВН), были исследованы: стабилизация напряжения в узле подключения, подавление лавины напряжения, динамическая устойчивость генераторов и возможность демпфирования электромеханических колебаний. Рассматривается устройство УШР трансформаторного типа с тиристорным управлением различного быстродействия с постоянными времени регулирования в диапазоне от 0,03 до 0,9 с. При этом исследуется работа устройства как одностороннего действия с потреблением реактивной мощности, так и двухстороннего действия на основе УШР и батареи статических конденсаторов (УШР+БСК) с потреблением или выдачей реактивной мощности. Для рассмотрения указанных электромеханических процессов использовалась цифровая однолинейная динамическая модель УШРТ–управляемая индуктивная проводимость $b_{\text{ушр}} = \text{var}$, а в комбинации УШР+БСК – с добавлением параллельно включенной емкостной проводимости $b_{\text{бск}} = \text{const}$.

Ключевые слова: электрическая сеть, лавина напряжения, стабилизация напряжения, шунтирующий реактор, динамическая устойчивость, демпфирование электромеханических колебаний

В нашей стране активно ведутся работы по созданию и внедрению в высоковольтных сетях 110–750 кВ управляемых шунтирующих реакторов (УШР) с непосредственным подключением этих устройств на стороне высокого и сверхвысокого напряжения.

Отечественной электропромышленностью разрабатываются и изготавливаются два типа УШР: на основе подмагничивания магнитопровода трансформатора постоянным током (УШРП) и на основе двухобмоточного трансформатора со 100%-м сопротивлением короткого замыкания (КЗ) и с тиристорным управлением на стороне низкого напряжения 10–35 кВ (УШРТ).

В настоящее время техническими требованиями ОАО «ФСК ЕЭС» к устройствам УШРП в части быстродействия нормируется значение времени набора (сброса) номинальной мощности устройства не ниже 0,3 с. При этом появившиеся в последние годы публикации [1–3] ставят под сомнение данные требования в сторону их ослабления.

В статье рассматривается возможность использования быстродействующих УШРТ (с постоянной времени регулирования $T_p = 0,01, 0,03$ с), присутствующих устройству исходя из его принципа действия [4–6]. При этом исследуется быстродействие УШРТ в диапазоне 0,03, 0,9 с, что задается его системой регулирования выбором определенных параметров передаточной функции регулятора.

В предлагаемой статье показано на общепринятой классической схеме сети влияние быстродействия управляемого реактора (особенно в комбинации с БСК) на различные свойства ЭЭС с точки зрения электромеханических переходных процессов, связанных с движением роторов машин и колебаний модулей напряжений и токов. И, как следствие, представлено обоснование необходимости высокого быстродействия УШРТ для ЭЭС в целом.

Влияние УШРТ на электромагнитные переходные процессы в части начальных стадий КЗ, коммутаций ВЛ и субгармонических колебаний в статье не рассматривается.

Задачей исследования является оценка влияния включенного непосредственно в сеть СВН устройства УШРТ с различным быстродействием на электромеханические переходные процессы в системе, а именно: стабилизацию напряжения в сети и устойчивость двигательной нагрузки, динамическую устойчивость генераторов станции и ЭЭС в целом, демпфирование электромеханических колебаний.

Описание исходной схемы, условий и моделей СГ и УШР. Поскольку аналитические доказательства влияния быстродействия компенсирующих устройств на переходные электромеханические процессы довольно трудоемки, то исследования (расчёты) выполнялись в сертифицированном для этой цели ПВК Eurostag для конкретной схемы, в которую входят электростанция ($2' \text{ ТВВ} = 800$, $T_{\text{jp}} = 5,5$ с), станционная ПС ($2' \text{ ТЦ } 1000000/500$)

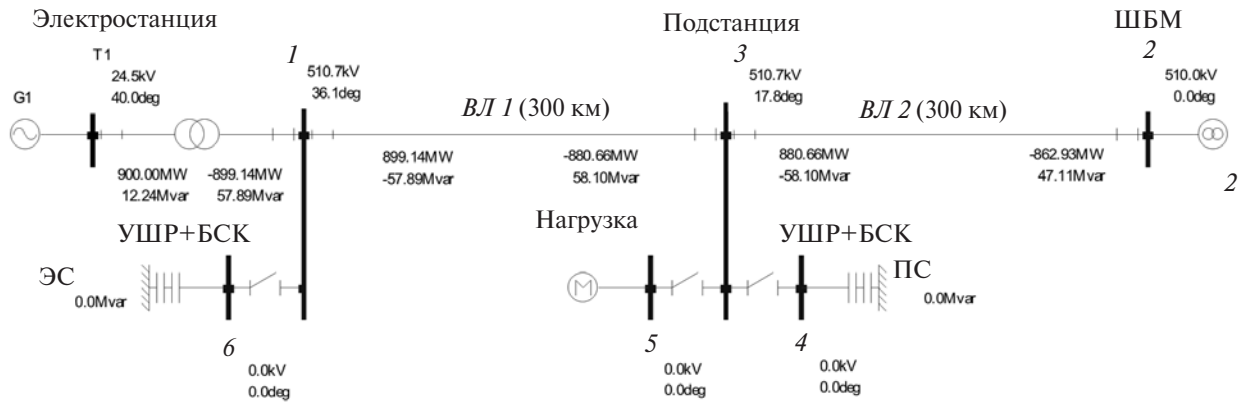


Рис. 1. Рассматриваемая ЭЭС простой структуры

(рис. 1), две линии ВЛ 1 и ВЛ 2 500 кВ (провод АС-500/64) по 300 км с компенсаторами УШР или УШР+БСК на промежуточной ПС (узел 3) или на шинах станции (узел 1), а также и при одновременной установке этих устройств в узлах 1 и 3; приёмная система (узел 2) представлена шинами бесконечной мощности ($U_2 = \text{const}$); нагрузка – изменяемая в зависимости от исследуемого режима.

При отсутствии нагрузки на ПС предел статической апериодической устойчивости рассматриваемой ЭЭС без УШР составляет 1450 МВт. Предел передаваемой мощности при наличии УШР+БСК ±180 Мвар на промежуточной ПС – 1500 МВт, при наличии УШР+БСК ±360 Мвар – 1550 МВт.

Однолинейная математическая модель УШР + БСК. Если проводить исследование электромеханических переходных процессов в диапазоне от миллисекунд до десятков секунд, то достаточно рассматривать лишь силовые элементы УШР и БСК, представленные принципиальной схемой на рис. 2,а. При данном подходе вариация быстродействия УШРТ задается его системой регулирования выбором определенных параметров передаточной функции регулятора.

Основные аналитические выражения рассматриваемой математической модели имеют следующий вид:

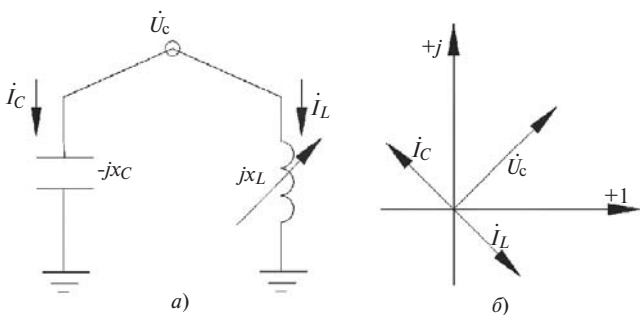


Рис. 2. Принципиальная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) устройства УШР + БСК

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{-jx_C} = jb_C;$$

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{-jx_L} = -jb_L;$$

$$Z_{\text{ушр+бск}} = jx_{\text{ушр+бск}} = \frac{-jx_C jx_L}{j(x_L - x_C)} = -j \frac{x_C x_L}{x_L - x_C};$$

$$Y_{\text{ушр+бск}} = jb_{\text{ушр+бск}} = jb_L - jb_C;$$

$$I_{\text{ушр+бск}} = \frac{U}{\pm jx_{\text{ушр+бск}}} = mj \frac{U}{x_{\text{ушр+бск}}} = mj U b_{\text{ушр+бск}};$$

$$Q_{\text{ушр+бск}} = \text{Im}(U I_{\text{ушр+бск}}) = \text{Im}(\pm j \frac{U^2}{x_{\text{ушр+бск}}}) = \pm \frac{U^2}{x_{\text{ушр+бск}}} = \pm U^2 b_{\text{ушр+бск}}.$$

К примеру, для устройства УШР + БСК симметричной мощности ±180 Мвар принцип работы математической модели представлен в табл. 1.

В соответствии с табл. 1 в модели реализуется изменение индуктивной проводимости в диапазоне $-b_L \leq b \leq 0$ при параллельно включенной в узел неизменяемой ёмкостной проводимости $b_C = b_L / 2$. Таким образом, диапазон изменения проводимости устройства УШР+БСК составляет $-b_L / 2 \leq b \leq b_C = b_L / 2$.

Модель системы регулирования устройства представлена на рис. 3.

В качестве основного регулируемого параметра режима УШР и УШР+БСК принято напряжение в узле подключения устройства. Дополнительным стабилизирующим каналом может быть сигнал по изменению частоты Df сети (в месте подключения УШР) или скольжения генератора $s = f - f_{\text{ном}}$.

Модели генератора и нагрузки. Расчеты электромеханических переходных процессов выполнены с помощью программно-вычислительного комплекса Eurostag. В рассматриваемой модели ЭЭС генера-

Таблица 1

Параметры рассматриваемого устройства	Режим работы	Параметр		
		Проводимость	Ток	Мощность
$Q_L = 2Q_C$ $b_L = 2b_C$	Емкостный $b_L = 0$	$\& Y_{\text{ушр}} = j b_{\text{ушр}} = j b_C$	$\& I_{\text{ушр}} = j U b_C$	$Q_{\text{ушр}} = - U^2 b_C < 0$ (генерация реактивной мощности в узле)
	Индуктивный $b_L = 2b_C$	$\& Y_{\text{ушр}} = j b_{\text{ушр}} = - j \frac{b_L}{2}$	$\& I_{\text{ушр}} = - j U \frac{b_L}{2}$	$Q_{\text{ушр}} = U^2 \frac{b_L}{2} > 0$ (потребление реактивной мощности в узле)

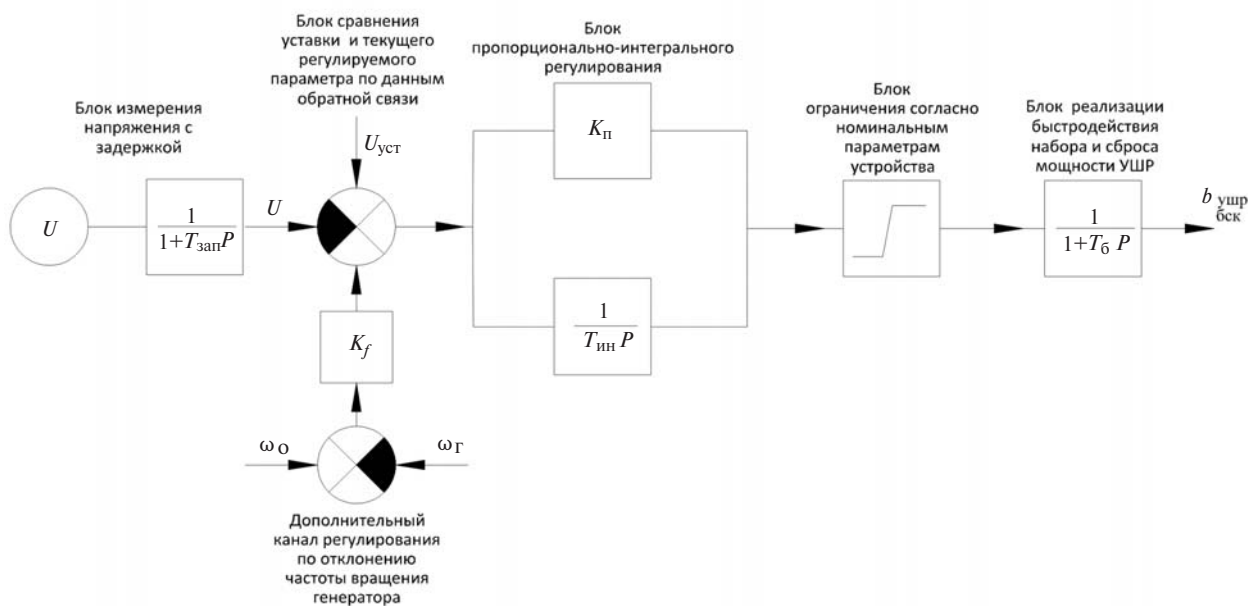


Рис. 3. Структурная схема регулятора устройства УШР или УШР+БСК

тор моделируется по уравнениям Лебедева–Жданова [7, 8] с учетом АРВ пропорционального действия (АРВ ПД) (с кратностью форсировки, равной двум) и регулятора частоты вращения турбины.

Асинхронная двигательная нагрузка представлена в соответствии с [9–11]. Механический момент торможения в модели был принят постоянным и независимым от скольжения ротора двигателя.

Влияние УШР на стабилизацию напряжения. Основным назначением УШР являются поддержание требуемого уровня напряжения в установившихся режимах и воздействие на всплески напряжений в переходных динамических процессах для стабилизации уровня напряжения.

Для выполнения первой функции по поддержанию напряжения и компенсации зарядной мощности высоковольтной линии в установившемся режиме не требуется высокого быстродействия устройства: важно иметь необходимую установленную

реактивную мощность УШР, т.е. достаточный диапазон её регулирования.

Стабилизация напряжения в динамическом режиме как вторая функция УШР – это способность компенсатора удерживать при протекании электро-механического переходного процесса напряжение на неизменном уровне или в пределах задаваемого диапазона. Здесь свойство быстродействия УШР при наличии достаточного диапазона регулирования играет главную роль.

Быстрота восстановления напряжения в узле сети во многом определяет способность УШР локализовать возмущение или ослабить его распространение в энергосистеме.

При принятом в статье подходе к моделированию УШР в электро-механическом процессе важным показателем быстродействия является постоянная времени регулирования T_p , которая является некоторой эквивалентной величиной транспорт-

ного запаздывания в контуре измеритель— регулятор— силовое устройство.

Для иллюстрации влияния компенсирующего устройства (УШР или УШР+БСК) на стабилизацию напряжения в узле 3 (рис. 1) рассматривается возмущение в виде включения в этом же узле реактивного шунта b_H соизмеримой с УШР мощностью. Индуктивным шунтом может быть реактор ШР 500 кВ мощностью 180 Мвар, а емкостным — конденсаторная батарея (КБ) аналогичной мощности. Можно имитировать ёмкостный наброс отключением на приемном конце отходящей от ПС линии 500 кВ длиной около 200–250 км.

В исходном режиме по ВЛ 500 кВ передавалась мощность, близкая по значению к натуральной $P_{\text{л}} = P_{\text{нат}} = 900$ МВт при отсутствии нагрузки на промежуточной ПС. Напряжение в узлах 1–3 установилось на уровне 510 кВ. Параметры режима электропередачи представлены на рис. 1. Располагаемая мощность УШР+БСК на промежуточной ПС (узел 3) была принята равной ± 180 Мвар. Уставка напряжения регулятора устройства составляла 510 кВ, поэтому компенсирующее устройство до возмущения работало с нулевым током на выходе.

На рис. 4 показаны осциллограммы процессов коммутации указанных нагрузок $Q_{\text{шр}}$ и $Q_{\text{кб}}$.

Без компенсирующего устройства после наброса индуктивной нагрузки возникают провал (скачок) напряжения и далее колебания его модуля с

частотой колебаний ротора эквивалентного генератора.

При $T_p = 0,03$ с УШР+БСК обеспечивает быструю стабилизацию напряжения (кривая 4 на рис. 4, а, б). Сначала благодаря пропорциональному каналу по отклонению напряжение в узле 3 восстанавливается до значения, определённого статизмом регулирования ($K_{\text{п}} = 100$), а затем за счёт действия интегрирующего канала ($T_{\text{инт}} = 0,01$ с) напряжение достигает исходного значения 510 кВ. Увеличением $K_{\text{п}}$ до 150–200 ед. и $T_{\text{инт}}$ до 0,1 с можно получить идеальную стабилизацию напряжения с длительностью провала напряжения не более 0,1, 0,15 с.

При большей постоянной времени ($T_p = 0,3$ с) и тех же настройках регулятора УШР+БСК протекание процесса будет другим: продолжительность провала напряжения составляет 0,5–0,7 с с длительными колебаниями напряжения, которые можно частично ослабить за счёт больших значений $K_{\text{п}}$ (более 100) с введением дополнительного канала регулирования по изменению частоты Df или скольжению генератора s_T .

В целом, в условии отсутствия нагрузки, существенной разницы в стабилизации напряжения в узле подключения при вариации быстродействия устройства УШР нет.

Далее рассматривается влияние быстродействия УШРТ на устойчивую работу подробной модели нагрузки.

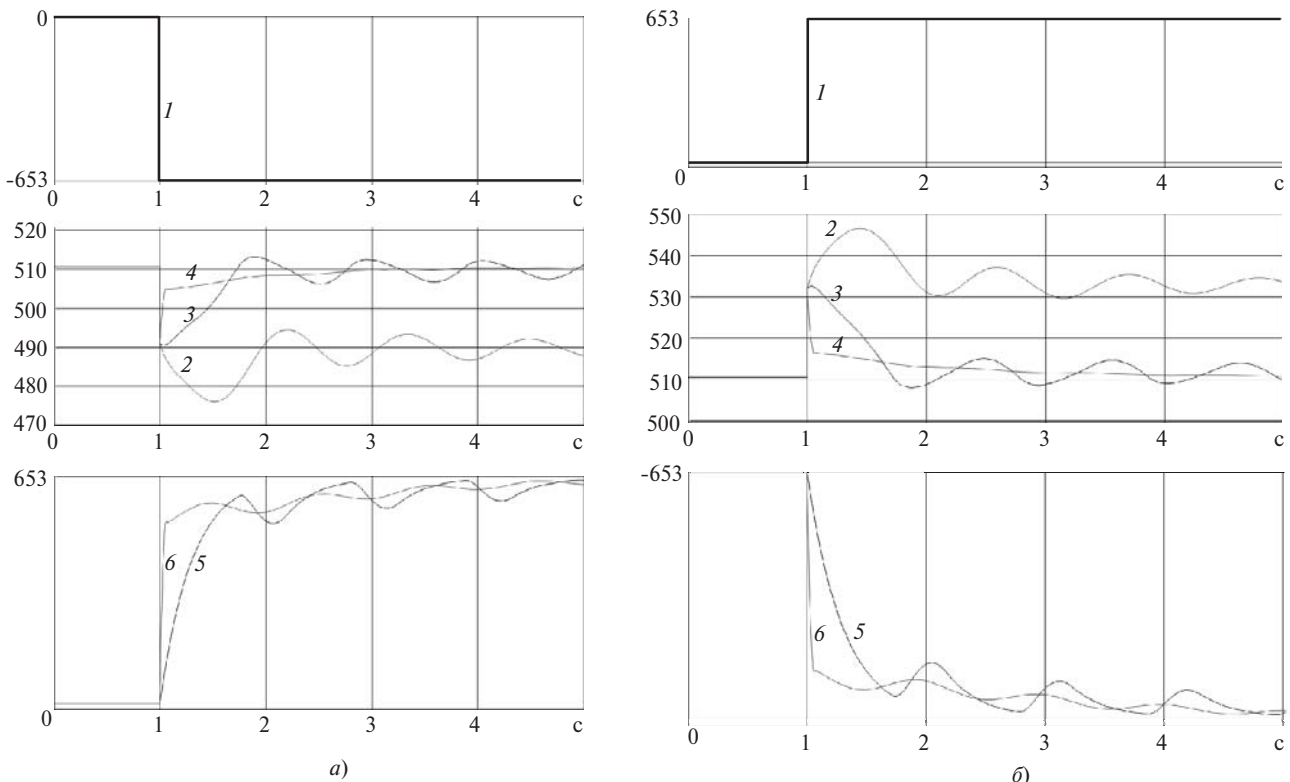


Рис. 4. Переходный процесс при включении индуктивного шунта на ПС (узел 3) –653 мкСм (а) и емкостного шунта +653 мкСм (б): 1 – возмущение; 2 – напряжение в узле при отсутствии УШР+БСК; 3 – то же при быстродействии УШР+БСК 0,3 с; 4 – то же при быстродействии УШР+БСК 0,03 с; 5 – проводимость УШР+БСК при быстродействии 0,3 с; 6 – то же при быстродействии 0,03 с

Оценка влияния УШР на устойчивость двигательной нагрузки. Исследуется устойчивость асинхронной двигательной нагрузки 2'200 МВт, включенной на ПС в узле 3 (рис. 1) через понижающий трансформатор ТЦ-630000/500/6.

Рассматривались два типа асинхронных двигателей на номинальное напряжение 6 кВ: АД1 – А4-400У-4 для привода насоса и АД2 – 4АЗМ-1600/6000-2 для привода поршневого компрессора с основными каталожными данными [9, 10], приведенными в табл. 2.

В качестве возмущения рассматривалось двухфазное КЗ на землю на шинах 500 кВ промежуточной ПС (узел 3), что моделируется включением на время $Df_{кз}$ индуктивного шунта $b_{кз} = 0,033$ См в указанном узле со снижением напряжения в нем до 150 кВ. В исходном режиме по ВЛ передавалась мощность, близкая к натуральной мощность $P_{л} = P_{нат} = 900$ МВт. В этом случае предельное время отключения представленного возмущения, при котором сохраняется устойчивая работа асинхронной нагрузки, составляет 0,09 с, при этом нормативное значение равно 0,12 с [12]. Иллюстрация переходного процесса для продолжительности времени КЗ 0,12 с представлена на рис. 5: после отключения КЗ из-за пониженного напряжения тормозится первый более «лёгкий» двигатель АД1, далее напряжение продолжает снижаться, втягивая в торможение второй АД2, и вместе с торможением (остановкой двигателей) нарушается устойчивость генераторов станции и исследуемой системы в целом.

Подавить лавину напряжения и обеспечить устойчивость асинхронной нагрузки можно своевременным включением в узле 3 конденсаторной батареи определённой мощности (рис. 6). Здесь БСК мощностью 360 Мвар включается через 0,22 с после возникновения КЗ. Это предельная задержка включения конденсаторной батареи.

На рис. 7 и 8 демонстрируется работа УШР+БСК непосредственно по факту снижения напряжения (без задержки) с быстродействием 0,3 и 0,03 с соответственно.

В первом случае при $T_p = 0,3$ с теряет устойчивость (частота вращения снижается до нуля) самый лёгкий АД1, потребляя большую реактивную мощность (рис. 7). Напряжение в узле 3 снижается до 380 кВ, при этом скольжение АД2 не достигает критического значения и он продолжает работать на пониженной частоте вращения. Видно, что устойчивая работа электростанции в представленном временном диапазоне сохраняется. Таким образом, в данном случае быстрогодействия УШР+БСК недостаточно для поддержания напряжения в рассматриваемом узле и обеспечения надежной работы нагрузки.

Что касается УШР+БСК с малой постоянной времени $T_p = 0,03$ с, то, как видно из рис. 8, устройство обеспечивает и устойчивую работу асинхронной нагрузки, не допуская развития лавины напряжения, и устойчивую работу генераторов станции, и ЭЭС в целом.

Представленный пример расчета показал, что для устойчивой работы асинхронной двигательной нагрузки существенным фактом является быстродействие того устройства (УШР+БСК), которое обеспечивает надежную работу данной нагрузки с возможностью быстрого поддержания напряжения и предотвращения возникновения лавины напряжения.

Таким образом, применение быстродействующего УШРТ 0,1–0,03 с требует технического обоснования для каждого конкретного типа нагрузки. Однако в общем случае, чем выше быстродействие устройства, тем выше надежность работы потребителя.

Таблица 2

Тип двигателя	Параметр								
	Номинальная мощность $P_{ном}$, МВт	КПД, %	$\cos \varphi$	Кратность			Момент инерции, кгж ²	Постоянная инерции T_{js} , с	Результирующая инерционность $T_{js} \cdot k_{пр}$, с
				пускового	максимального	пускового тока			
А4-400У-4 (АД1)	0,63	95,1	0,88	1,0	2,6	6,4	14	0,48	0,6
4АЗМ-1600/6000-2 (АД2)	1,6	96,6	0,89	0,9	2,0	5,2	14	0,76	1,5

* Результирующая инерционность двигателей с учётом привода учитывалась коэффициентом $k_{пр}$: для АД1 $k_{пр} = 1,25$; для АД2 $k_{пр} = 2$.

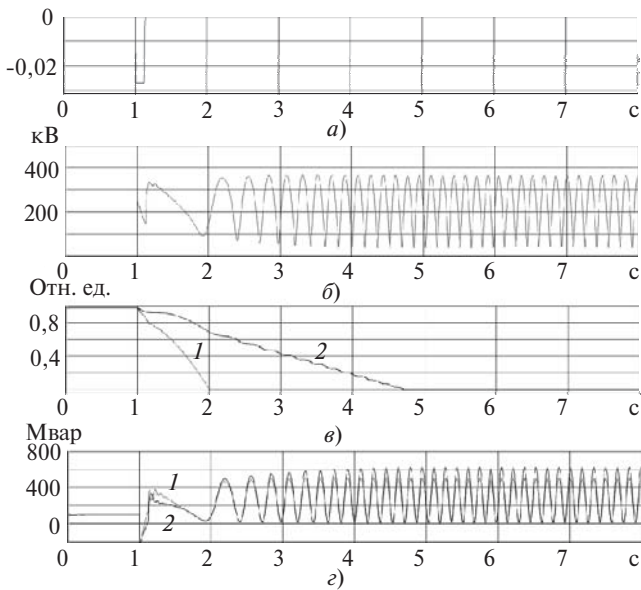


Рис. 5. Переходный процесс при отсутствии компенсирующих устройств: *а* – мощность шунта КЗ, См.; *б* – напряжение на шинах ПС (узел 3); *в* – частота вращения: 1 – АД1; 2 – АД2; *г* – реактивная мощность: 1 – АД1; 2 – АД2

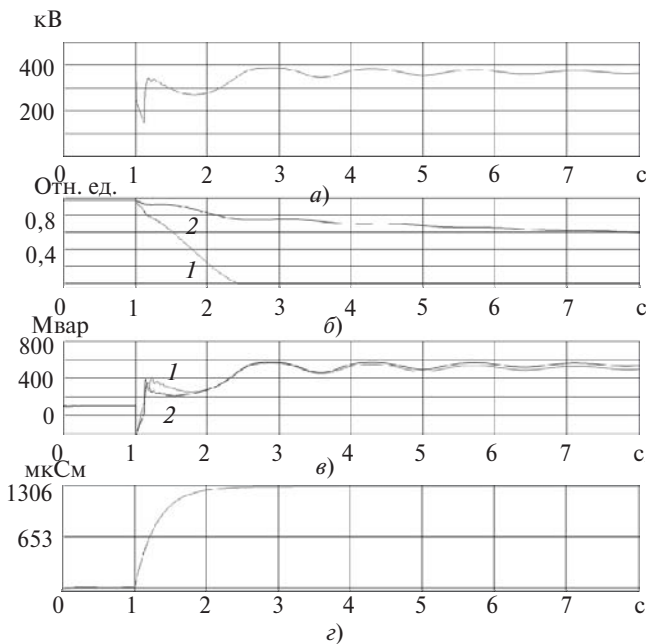


Рис. 7. «Опрокидывание» двигательной нагрузки при работе УШР+БСК с постоянной времени регулирования $T_p = 0,3$ с: *а* – напряжение на шинах ПС (узел 3); *б* – частота вращения: 1 – АД1; 2 – АД2; *в* – реактивная мощность: 1 – АД1; 2 – АД2; *г* – проводимость УШР+БСК

Оценка влияния быстродействия УШР на динамическую устойчивость генераторов в системе. Аналогично предыдущему разделу, в качестве расчётного возмущения рассматривается двухфазное КЗ на землю на шинах 500 кВ ПС (узел 3). Для чистоты эксперимента исследование проводилось при отключенной нагрузке на промежуточной ПС (узел 3). В этом случае при нормативном возмущении продолжительностью $Dt_{кз} = 0,12$ с и при отсутствии каких-либо компенсирующих устройств рас-

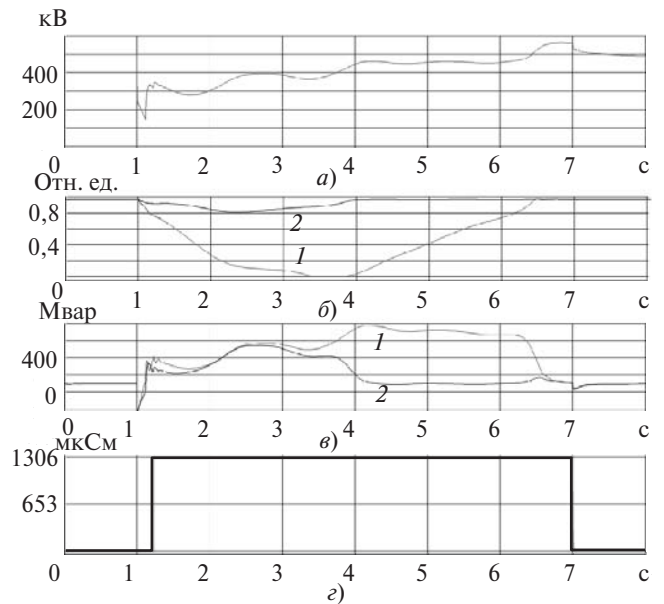


Рис. 6. Подавление лавины напряжения при включении конденсаторной батареи мощностью 360 Мвар через 0,22 с после отключения КЗ: *а* – напряжение на шинах ПС (узел 3); *б* – частота вращения: 1 – АД1; 2 – АД2; *в* – реактивная мощность: 1 – АД1; 2 – АД2; *г* – проводимость БСК

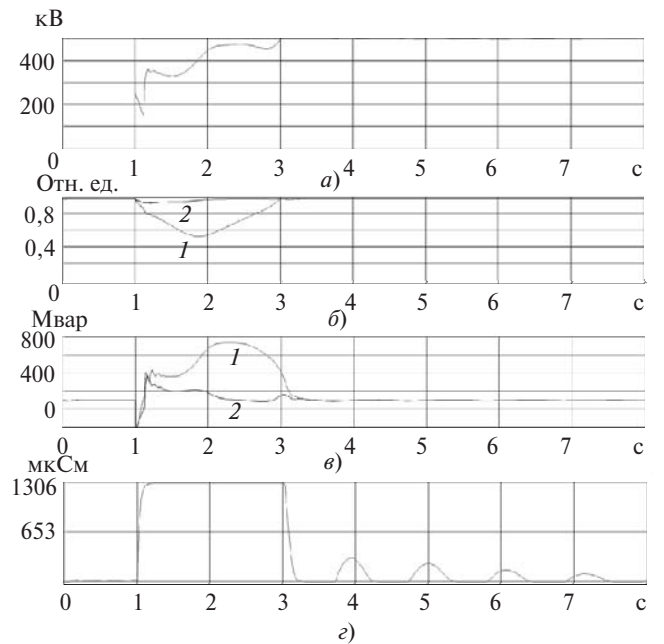


Рис. 8. Подавление лавины напряжения с помощью УШР+БСК с постоянной времени регулирования $T_p = 0,03$ с: *а* – *в* – см. подпись рис. 7

сматриваемая ЭЭС имеет предельную по динамической устойчивости передаваемую мощность $P_{пр.дин} = 1040$ МВт. Тогда при оценке динамической устойчивости ЭЭС рассматриваются два подхода:

возможность увеличения длительности КЗ сверх расчётного значения $Dt_{кз} = 0,12$ с за счет работы УШР+БСК с различным быстродействием и различной установленной мощностью при условии фиксированной предельной по динамической ус-

точивости передаваемой мощности $P_{пр.дин} = 1040$ МВт;

возможность увеличения предельной по динамической устойчивости передаваемой мощности $P_{пр.дин}$ также за счет быстрогодействия и установленной мощности УШР+БСК при фиксированном значении расчётного времени КЗ $Dt_{КЗ} = 0,12$ с.

Для рассмотрения представленных подходов воспользуемся классической «картинкой» [7], представленной на рис. 9, включающей в себя угловую характеристику электропередачи $P_{л} = f(\delta)$ и изменение угла по ВЛ во времени $\delta_{л} = f(t)$.

В физическом понимании процесса [7, 8] быстрогодействия работы устройства УШР+БСК может иметь в данном процессе непосредственное влияние. Так, на рис. 9 представлено изменение угла по ВЛ при малом (1) и высоком (2) быстродействии.

Снижение выбега ротора генератора. Об эффективности действия компенсирующего устройства при заданной длительности КЗ (в данном случае 0,12 с) и заданной передаваемой мощности по ВЛ ($P_{л} = 1045$ МВт – чуть больше предельной по динамической устойчивости мощности электропередачи) можно судить по «выбегу» ротора генератора электростанции. На рис. 10 показаны осциллограммы переходных процессов при отсутствии УШР+БСК (неустойчивый режим – кривые 1), а

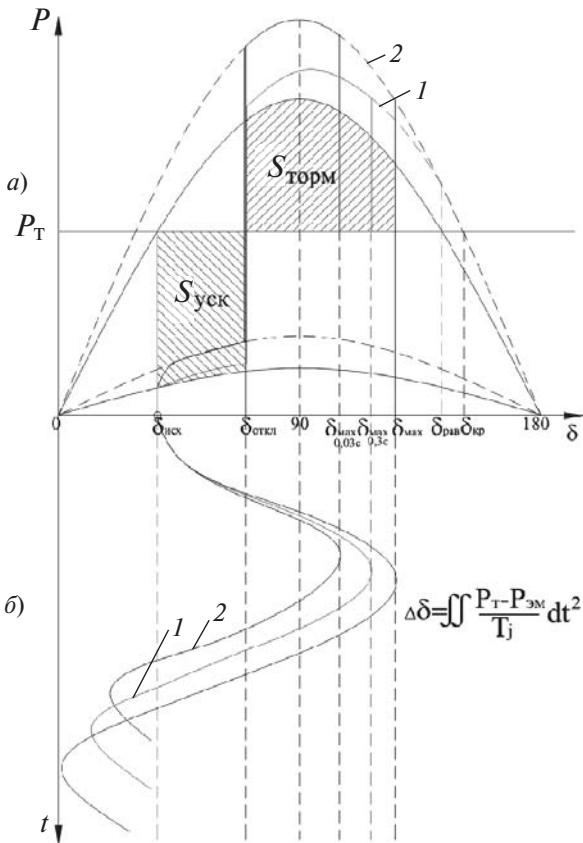


Рис. 9. Характеристики динамического перехода: а – угловые характеристики электропередачи; б – зависимость изменения угла ротора во времени

также при наличии на промежуточной ПС и на шинах электростанции УШР+БСК мощностью по ± 180 Мвар с разным временем регулирования:

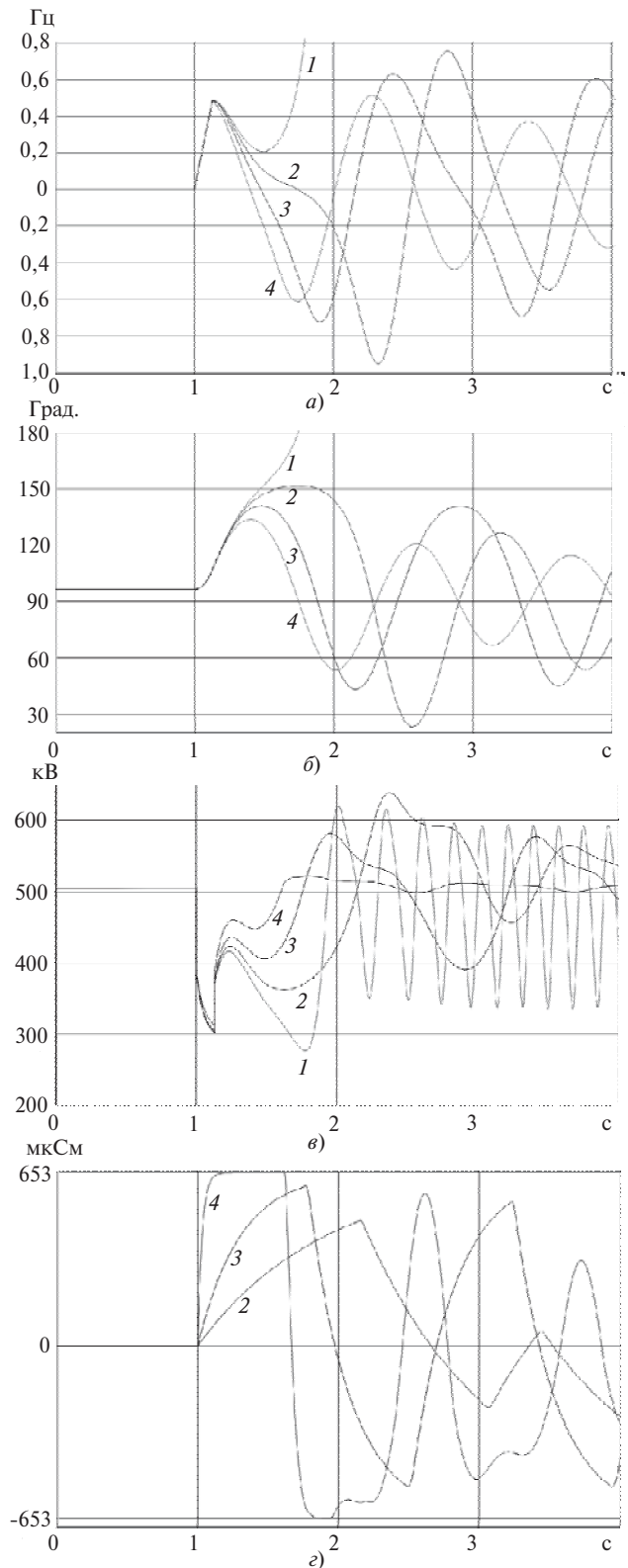


Рис. 10. Результаты исследования выбега ротора генератора: а – скольжение ($f - f_{ном}$); б – угол ротора генератора; в – напряжение на шинах ЭС (узел 1); г – проводимость УШР+БСК на шинах ЭС (узел 1): 1 – при отсутствии УШР+БСК; 2 – 4 – при быстродействии УШР+БСК 0,9 с; 0,3 с и 0,03 с соответственно

$T_p = 0,9$ с – предельное по устойчивости электропередачи быстродействие УШР (кривые 2); $T_p = 0,3$ с – кривые 3 и $T_p = 0,03$ с – кривые 4.

Как видно, УШР+БСК с малыми постоянными времени регулирования (особенно при $T_p < 0,03$ – $0,1$ с) позволяют существенно ограничить выбег ротора генератора (на 20 – 25°) благодаря обеспечению более высокого уровня напряжения в узле после отключения КЗ (рис. 10,в, кривая 4) при практически безынерционном, как это видно на рис. 10,г, кривая 4, изменении проводимости устройства.

Эффективность от быстродействия УШР+БСК $0,3$ с в 2 раза хуже, чем при $0,03$ с, и составляет всего 10 – 12° , что незначительно влияет на улучшение динамических свойств электропередачи.

Таким образом, существенное ограничение времени выбега ротора генератора посредством быстродействующих компенсаторов $0,03$ – $0,1$ с повышает запас по динамической устойчивости ЭЭС и, как будет показано далее, увеличивает предельное время отключения КЗ, увеличивает предельную по динамической устойчивости мощность электропередачи, обеспечивает достаточно быстрое затухание электромеханических колебаний после снятия возмущения.

Возможность увеличения длительности КЗ. Результаты исследования по увеличению предельного времени КЗ представлены на рис. 11.

При одном УШР+БСК на промежуточной ПС мощностью ± 180 Мвар (кривая 1) эффект от устройства незначителен: начиная с T_p^3 $0,4, 0,3$ с длительность КЗ увеличивается на $0,01$ с и дальше

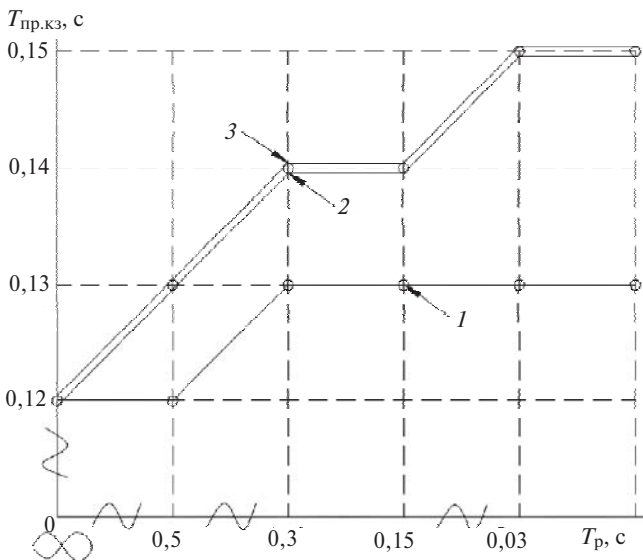


Рис. 11. Зависимость предельного времени КЗ от значения постоянной времени регулирования УШР: 1 – при наличии УШР+БСК только на промежуточной ПС; 2 – для двух компенсаторов на ВЛ: один УШР+БСК на промежуточной ПС и другой УШР+БСК на шинах электростанции; 3 – при наличии одного более мощного УШР+БСК на промежуточной ПС

остаётся неизменной ($0,13$ с) даже при безынерционном регулировании ($T_p \rightarrow 0$).

При более мощном компенсаторе на этой ПС ± 360 Мвар (кривая 3) эффект особенно заметен при $T_p \leq 0,03$ с, когда длительность предельного времени КЗ увеличивается до $D_{т.пр.кз} = 0,15$ с.

Такой же эффект увеличения длительности КЗ можно получить в случае применения двух УШРТ+БСК мощностью по ± 180 Мвар на шинах 500 кВ электростанции и промежуточной ПС (кривая 2).

В итоге, быстродействующие УШРТ $0,1$ – $0,03$ с позволяют увеличить длительность КЗ на 15 – 25% , что, в частности, позволяет снизить требования к РЗА и увеличить общий уровень устойчивости ЭЭС.

Возможность увеличения предельной по динамической устойчивости мощности электропередачи. Расчеты проводились при фиксированном возмущении (двухфазное КЗ на землю на шинах промежуточной ПС), начиная с максимальной передаваемой мощности по электропередаче при отсутствии компенсирующих устройств ($P_{пр.дин} = 1040$ МВт). И далее, в зависимости от различного быстродействия устройств УШР+БСК мощностью 180 Мвар на шинах промежуточной ПС и ЭС, а также увеличенной мощности УШР+БСК на промежуточной ПС ± 360 Мвар с дискретностью 10 МВт определялась предельная по динамической устойчивости мощность электропередачи.

На рис. 12 показана диаграмма зависимости $P_{пр.дин}$ от постоянной времени регулирования УШР.

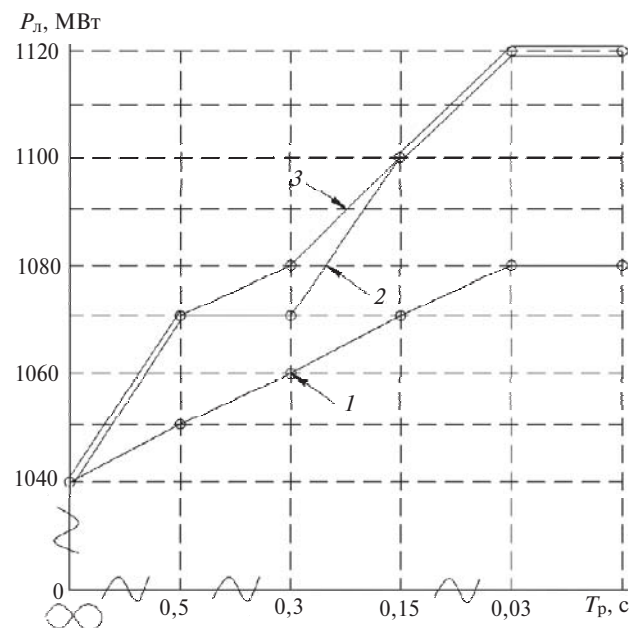


Рис. 12. Диаграмма зависимости $P_{пр.дин} = f(T_p)$ при фиксированном расчетном возмущении: 1 – при наличии УШР+БСК только на промежуточной ПС; 2 – при наличии УШР+БСК на ПС и УШР+БСК на шинах ЭС; 3 – при наличии более мощного УШР+БСК только на промежуточной ПС

Из рис. 12 видно, что при одном компенсаторе на промежуточной ПС $Q_{\text{УШР+БСК}} = \pm 180$ Мвар предел передаваемой активной мощности по ВЛ дает незначительный прирост (20–40 МВт) независимо от быстрогодействия устройств. Ощутимым преимуществом быстрогодействующего компенсатора имеет место при насыщении электропередачи данными устройствами (рис. 12, кривая 2) или при большей установленной мощности единичного устройства (рис. 12, кривая 3): так, при $T_p = 0,03$ с прирост составляет 80 МВт, а при $T_p = 0,3$ с – в 2 раза меньше.

Таким образом, использование быстрогодействующего устройства УШР+БСК 0,1–0,03 с в электропередаче позволяет передать больше активной мощности в среднем на 5–10%.

Участие УШР+БСК в демпфировании электромеханических колебаний. Длительное существование электромеханических колебаний не желательно в первую очередь из-за опасности возникновения электромеханического резонанса в системе и ряда других причин. Поэтому возникает вопрос о дополнительном использовании компенсаторов реактивной мощности в аварийных и переходных режимах для уменьшения длительности интенсивных ЭМК, обеспечивая их надежное быстрое затухание.

Компенсаторы реактивной мощности, в том числе УШР+БСК, могут демпфировать электромеханические колебания за счёт воздействия на модули напряжений в узлах их подключения. От значения напряжений зависит электрическая мощность электропередачи, представленная, в частности, угловой характеристикой $P_{\text{д}} = f(\delta)$ на рис. 9,а. Используя характеристику динамического перехода, можно объяснить физику демпфирования электромеханических колебаний, применяя метод площадей [7].

В данном случае для достижения эффекта демпфирования ЭМК наравне с основным каналом регулирования по отклонению напряжения использовался дополнительный канал по отклонению непосредственно частоты вращения ротора генератора, т.е. скольжения $s_{\text{Г}} = f - f_{\text{ном}}$.

В исходном режиме по ВЛ передавалась мощность, близкая к натуральной мощности $P_{\text{д}} = P_{\text{нат}} = 900$ МВт. В качестве возмущения рассматривалось двухфазное КЗ на землю на шинах 500 кВ промежуточной ПС (узел 3) при отсутствии отбора мощности.

На рис. 13 приведены результаты переходных процессов при отсутствии компенсаторов и при наличии УШР+БСК мощностью ± 360 Мвар.

Из осциллограммы скольжения ротора генератора видно, что эффективность компенсатора с малой постоянной времени $T_p = 0,03$ с в части демп-

фирования колебаний очевидна. Продолжительность переходного процесса уменьшается с 9 с (без УШР) до 1,5 с. Из осциллограмм проводимости видно, что реакция УШР+БСК на возмущение практически мгновенная (рис. 13,з, кривая 3), что сопровождается в первый момент повышенным напряжением (рис. 13,а, кривая 3). Диапазон регулирования устройства реализуется полностью.

При большой постоянной времени регулирования $T_p = 0,3$ с компенсатор не обрабатывает свой диапазон регулирования: управляющие воздействия запаздывают, затухание процесса затягивается (рис. 13,а–в, кривая 2).

Из анализа полученных результатов следует, что для улучшения качества переходных процессов в части демпфирования электромеханических коле-

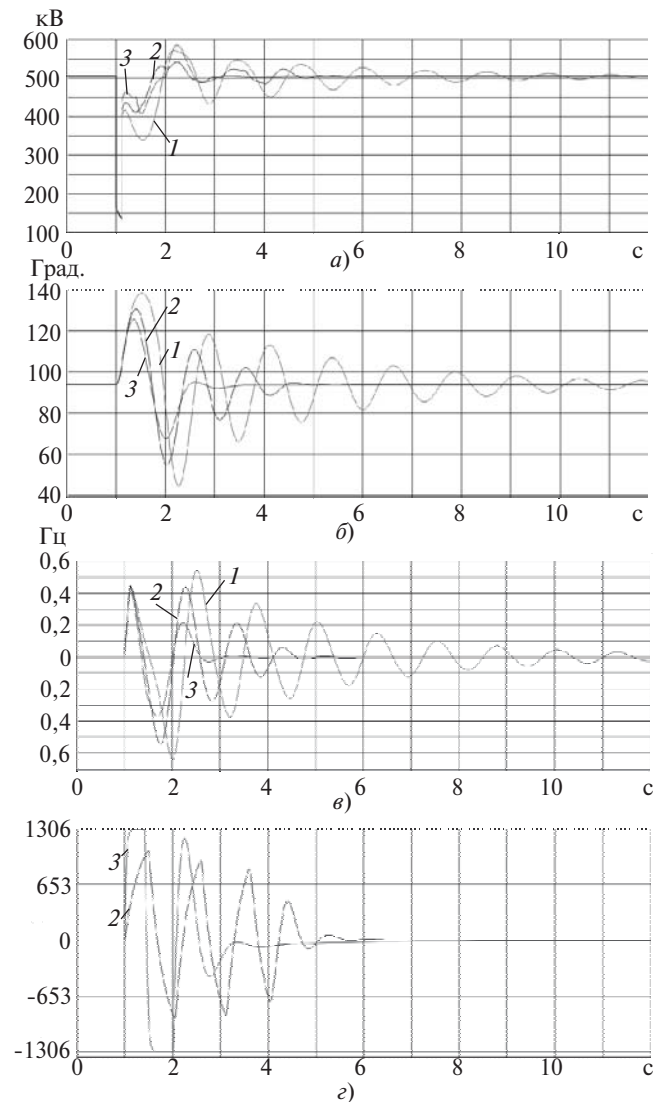


Рис. 13. Демпфирование колебаний ротора генератора с помощью УШР+БСК: а – напряжение на шинах промежуточной ПС (узел 3); б – угол ротора генератора; в – скольжение ротора генератора ($f - f_{\text{ном}}$); г – проводимость УШР+БСК: 1 – при отсутствии УШР+БСК; 2, 3 – при быстрогодействии УШР+БСК 0,3 с и 0,03 с соответственно

баний постоянная времени регулирования компенсаторов не должна превышать 0,1 с.

Выводы. 1. Участие УШРТ с высоким быстрodeйствием в электромеханических переходных процессах дает положительный эффект. Причем, чем выше быстрodeйствие (вплоть до 0,03 с), тем больше эффект. Никаких отрицательных влияний высокого быстрodeйствия УШРТ на ЭЭС в части электромеханических переходных процессов выявлено не было.

2. В части стабилизации напряжения, а также предупреждения и подавления лавины напряжения в зависимости от состава и типа нагрузки быстрodeйствующий УШРТ (0,1, 0,03 с) обеспечивает не только более высокую надежность работы потребителей, но в ряде случаев сохраняет устойчивость данной нагрузки по сравнению с медленнодействующим компенсатором 0,5, 0,2 с.

3. Быстрodeйствующие компенсаторы реактивной мощности ($T_p \approx 0,1$ с) позволяют существенно (на 20–25%) уменьшить выбег угла ротора генератора в аварийных и переходных режимах и, следовательно, увеличить запас динамической устойчивости ЭЭС. В частности, увеличить длительность отключения КЗ на 15–25% или 0,03–0,04 с сверх расчетного значения 0,12 с, увеличить предельную по динамической устойчивости мощность электропередачи на 5–10%.

4. Высокое быстрodeйствие УШРТ позволяет влиять на продолжительность электромеханических колебаний, создавая в темпе переходного процесса управляющие воздействия с работой в полном диапазоне регулирования. Получаемый эффект демпфирования в 4–6 раз сокращает длительность качаний ротора генератора.

5. Для получения существенно большего эффекта от быстрodeйствующих УШРТ мощность данного устройства должна быть намного больше мощности, полученной при ТЭО на основании расчетов установившихся режимов, в частности для наличия гарантированного регулирующего диапазона для решения задачи в аварийных режимах ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А.Н., Смоловик С.В. О быстрodeйствии управляемых шунтирующих реакторов. — Электрические станции, 2014, № 1, с. 27–30.
2. Беляев А.Н., Смоловик С.В., Чобан В.Б. Обоснование требований к быстрodeйствию управляемых шунтирующих реакторов. — Энергоэксперт, 2013, № 5, с. 48–53.
3. Беляев А.Н., Евдокунин Г.А., Смоловик С.В., Чудный В.С. О применении устройств управляемой поперечной компенса-

ции для транзитных электропередач класса 500 кВ. — Электричество, 2009, № 2, с. 2–13.

4. Александров Г.Н., Лучин В.П. Управляемые реакторы. 3-е изд. — СПб.: Изд-во «Центр подготовки кадров энергетики», 2005, 200 с.

5. Патент РФ № 2136071. Управляемый шунтирующий реактор/ Г.Н. Александров, Л.Н. Шифрин, 1998.

6. Патент РФ № 2065654. Управляемый реактор/Г.Н. Александров, Б.И. Альбертинский, Н.Т. Федотов, И.А. Шкурпат, 1996.

7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1978, 415 с.

8. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. — М.: Энергия, 1979, 456 с.

9. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. — М.: «Элекс-КМ», 2008, 248 с.

10. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. — Электричество, 1998, № 4, с. 38–42.

11. Справочник по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.Л. Файбисовича. — М.: «Изд-во НЦ ЭНАС», 2006, 352 с.

12. Методические указания по устойчивости энергосистем. — М.: «Изд-во НЦ ЭНАС», 2004, 16 с.

13. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. — М.: «Изд-во НЦ ЭНАС», 2000, 248 с.

14. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. — М.: «ТОРУС ПРЕСС», 2011, 312 с.

[07.10.14]

Авторы: Шакарян Юрий Гевондович в 1956 г. окончил факультет Ереванского политехнического института. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Режимы работы асинхронизированных генераторов в энергосистемах» в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского. Научный руководитель ОАО «НТЦ ФСК ЭЭС».

Фокин Владимир Константинович в 1970 г. окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне Научно-исследовательский университет МЭИ — НИУ «МЭИ»). В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение устойчивости электропередач и узлов нагрузки путем регулирования возбуждения синхронных машин по двум осям». Главный научный сотрудник Центра надежности и режимов работы электрических сетей ОАО «НТЦ ФСК ЭЭС».

Лихачев Андрей Петрович в 2009 г. окончил Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ». Ведущий инженер, аспирант Лаборатории моделирования, исследования и применения регулирующих устройств в электрических сетях ОАО «НТЦ ФСК ЭЭС».

About the Effect the Response Speed of Controlled Transformer-Type Shunting Reactors Has on Stabilization of Voltage and Electromechanical Transients

YU.G. SHAKARYAN, V.K. FOKIN and A.P. LIKHACHEV

Stabilization of voltage at the connection node, suppression of voltage collapse, transient stability of generators, and possibility of damping electromechanical transients are investigated taking as an example a simple electric power system (EPS) containing a controlled shunting reactor (CSR) connected directly to the high- or extrahigh-voltage network. The CSR considered in the analysis is of a transformer type, with thyristor control having time constant T_c varying in the range 0.03–0.9 s. The studied versions include a unilateral-action device with reactive power absorption and a bilateral-action device constructed on the basis of a CSR and a bank of static capacitors (SCB) (CSR + SCB), which can either absorb or generate reactive power. For considering the above-mentioned electromechanical processes, a digital single-line dynamic model of the transformer-type controlled shunting reactor (CSR + SCB) was considered with addition of parallel-connected capacitive susceptance b_{scb} .

Key words: electric network, voltage collapse, voltage stabilization, shunting reactor, transient stability, damping of electromechanical oscillations

REFERENCES

1. Belyayev A.N., Smolovik S.V. *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2014, No. 1, pp. 27–30.
2. Belyayev A.N., Smolovik S.V., Choban V.B. *Energoekspert – in Russ. (Power Expert)*, 2013, No. 5, pp. 48–53.
3. Belyayev A.N., Yevdokunin G.A., Smolovik S.V., Chudnyi V.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. pp. 2–13.
4. Aleksandrov G.N., Luchin V.P. *Upravlyayemye reaktory. 3ye izd. (Controlled Reactors. 3rd edition)*. St. Petersburg, Publ. «Centr podgotovki kadrov energetiki», 2005, 200 p.
5. Patent R.F. No. 2136071. *Upravlyayemyi shuntiruyushchii reaktor (Controlled shunt reactor)*/G.N. Aleksandrov, L.N. Shifrin, 1998.
6. Patent R.F. No. 2065654. *Upravlyayemyi reaktor (Controlled reactor)*/G.N. Aleksandrov, B.I. Al'bertinskii, N.T. Fedotov, I.A. Shkuropat, 1996.
7. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh (Transient electromechanical processes in electrical systems)*. Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1978, 414 p.
8. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem (Questions stability of electric systems)*. Moscow, Publ. Energiya, 1979, 456 p.
9. Gurevich Yu.Ye., Libova L.Ye. *Primeneniye matematicheskikh modelei elektricheskoi nagruzki v raschetakh ustoychivosti energosistem i nadezhnosti elektroobzheniya promyshlennykh potrebitel' (Application of Electric Load Mathematical Models in Calculations of Power System Stability and the Reliability of Supplying Power to Industrial Consumers)*. Moscow, Publ. «Elek-KM», 2008, 248 p.
10. Moshchinskii Yu.A., Bespalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 4, pp. 38–42.
11. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei/Pod red. D.L. Faibisovicha (Handbook for designing electrical networks/Edit. by D.L. Faibisovich)*. Moscow «Publ. NTs ENAS», 2006, 352 p.
12. *Metodicheskiye ukazaniya po ustoychivosti energosistem (Methodical guidelines on stability of power systems)*. Moscow, «Publ. NTs ENAS», 2004, 16 p.
13. Kochkin V.I., Nechayev O.P. *Primeneniye staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatii (Application of Static Reactive Power Compensators in the Electric Networks of Power Systems and Enterprises)*. Moscow, «Publ. NTs ENAS», 2000, 248 p.
14. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. *Primeneniye gibkikh (upravlyayemykh) sistem elektroperedachi peremennogo toka v energosistemakh (Application of Flexible (Controlled) AC Power Transmission Lines in Power Systems)*. Moscow, Publ. «TORUS PRESS», 2011, 312 p.

Authors: Shakaryan Yuriy Gevondovich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Scientific Director of JSC «NTC FSC EES».

Fokin Vladimir Konstantinovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Chief Scientific Researcher of the JSC «NTS FES EES».

Likhachev Andrei Petrovich (Moscow, Russia) – Leading Engineer and Ph.D. Student in the JSC «NTC FSC EES».