О ПРИМЕНЕНИИ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ РОССИИ

АВТОРЫ:

А.В. АНТОНОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В.К. ФОКИН,
К.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Е.В. ТУЗЛУКОВА,
К.Т.Н.,
АО «ИНСТИТУТ ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»

Благодаря широкому применению устройств продольной емкостной компенсации (в том числе и при X_c = 50% $X_л$), в зарубежных энергосистемах Европы, Америки и Азии накоплен большой опыт эксплуатации как нерегулируемых, так и регулируемых (управляемых) емкостных компенсаторов, и определены оптимальные параметры этих устройств.

Ключевые слова: емкостная компенсация; высоковольтные сети переменного тока напряжением 400 кВ; модули напряжений по концам линии; угол по электропередаче; векторные диаграммы напряжений; демпфирование электромеханических колебаний.

Устройства продольной емкостной компенсации применяются для компенсации падения напряжения на индуктивном сопротивлении линий высокого и сверхвысокого напряжения и способствуют повышению пропускной способности протяженных линий электропередачи

ВВЕДЕНИЕ

Установки продольной емкостной компенсации (УПК) имеют два основных назначения:

- повышение пропускной способности линий электропередачи переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения;
- перераспределение потоков активной мощности в параллельных связях высоковольтных сетей переменного тока.

Вопросы применения УПК не являются новыми: имеются многочисленные публикации на протяжении последних 60–70 лет, и накоплен определенный зарубежный опыт сооружения и эксплуатации устройств продольной компенсации, начиная с 1940-х гг.

Как правило, речь идет о компенсированной линии и (или) участке ВЛ с сосредоточенной в одной точке емкостью, включенной в рассечку линии. Поэтому при рассмотрении свойств такой линии можно воспользоваться результатами исследований, описанных в работе [1], для простейшей схемы радиальной электропередачи с УПК (X_C) с параметрами: l = 667 км, $X_л = X_1 + X_2$ = 200 Ом = 0,8 отн. ед., $b_л$ = 0, $R_л$ = 0 при базисных величинах $U_Б$ = 500 кВ, $S_Б$ = 1000 МВА, $Z_Б$ = 250 Ом, показанной на рис. 1.

При рассмотрении вопросов применения устройств продольной емкостной компенсации решаются две основные задачи: выбор степени компенсации, т.е. емкостного сопротивления $X_C = 1/\omega C_{упк}$, включенного последовательно в линию, и выбор места размещения УПК на линии.

По заданной величине X_C по формуле (1) строятся угловые характеристики линии электропередачи с УПК:

$$P = \frac{U_1 U_2}{x_1 + x_2 - x_c}\sin\delta = P_{макс}\sin\delta \qquad (1)$$

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА С УПК

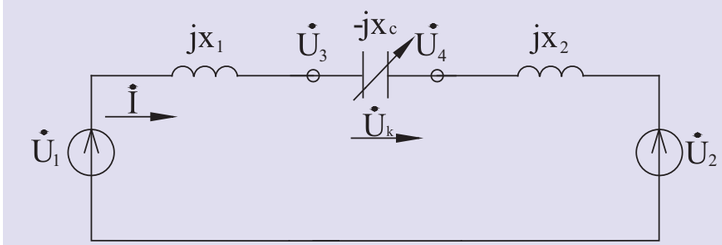


Рис. 1

УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ЕМКОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

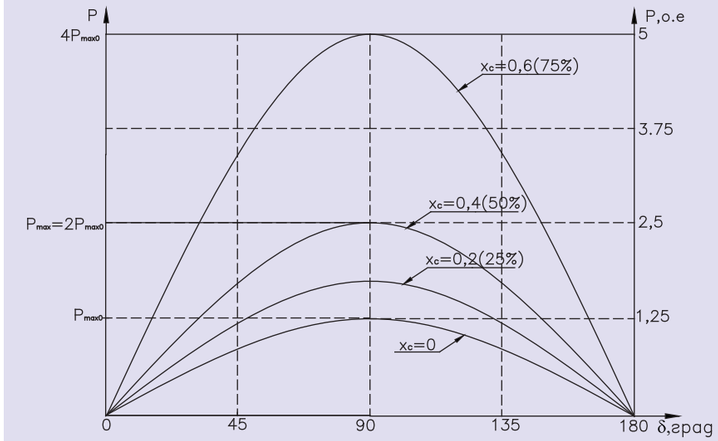


Рис. 2

где U_1, U_2 — модули напряжений по концам линии;

$X_л = X_1 + X_2$ — суммарное индуктивное сопротивлении линии;

X_C — емкостное сопротивление УПК;

δ — угол по электропередаче, характеризующий загрузку ВЛ активной мощностью, который при заданной по линии передаваемой активной мощности $P = P_л$ определяется через $\arcsin P_л/P_{макс}$.

На рис. 2 на основании этой формулы построены угловые характеристики $P_л = f(\delta)$ для электропередачи при $|\dot{U}_1|=|\dot{U}_2|=U=1$ и $X_1 + X_2 = 0,8$ для трех степеней компенсации:

75% (X_{C*}=0,6), 50% (X_{C*}=0,4) и 25% (X_{C*}=0,2). Причем результаты расчетов $P_л$, полученные по формуле (1), не зависят от места установки УПК на линии.

Однако от места установки УПК и величин емкостного сопротивления (X_C) зависят уровни напряжения на зажимах устройства U_3, U_4, т.е. на линии в точках подключения устройства, которые могут превышать допустимые значения.

Воспользовавшись формулами:

$$U_3 = \frac{\sqrt{U_1^2(x_2-x_c)^2+U_2^2x_1^2+2U_1U_2x_1(x_2-x_c)\cos\delta}}{x_1+x_2-x_c}, \quad (2)$$

$$U_4 = \frac{\sqrt{U_2^2(x_1-x_c)^2+U_1^2x_2^2+2U_1U_2x_2(x_1-x_c)\cos\delta}}{x_1+x_2-x_c}, \quad (3)$$

приведенными в работе [1], можно получить зависимость величин модулей напряжений на зажимах УПК от передаваемой по линии активной мощности (или угла δ) при различных величинах X_C и различном размещении УПК на линии.

На примере схемы (см. рис. 1) на рис. 3 показаны величины напряжений U_3, $U_4 = f(\delta)$ на зажимах УПК в зависимости от угла электропередачи при размещении УПК с 50%-ой емкостной компенсацией (УПК50%) ближе к началу линии (X_1 = 0,2; X_2 = 3X_1 = 0,6), а на рис. 4 — при различных величинах компенсирующей емкости X_C: 0,2 (25%), 0,4 (50%) и 0,6 (75%) в середине линии (X_1 = X_2).

Для принятого примера и параметров схемы рис. 1 на основании полученных результатов расчетов, отображенных зависимостями на рис. 3 и 4, можно сделать следующие выводы:

- при размещении УПК 50% (X_C = 0,5$X_л$) в середине линии (X_1 = X_2) векторы напряжения совпадают по модулю и фазе $\dot{U}_3=\dot{U}_2$ и $\dot{U}_4=\dot{U}_1$ независимо от передаваемой по линии мощности, т.е. при поддержании номинального напряжения по концам ВЛ напряжение в середине линии (на шинах УПК) также будет номинальным (см. рис. 4, зависимость X_C = 0,4 (50%));
- при смещении точки подключения УПК 50% от середины линии происходит перекос напряжений на зажимах УПК 50%: если УПК ближе к началу линии (U_1), то увеличивается напряжение U_4 и уменьшается напряжение U_3 (см. рис. 3). Если УПК 50% размещать рядом с шинами U_1, то при поддержании модуля напряжения $U_1 = U_{ном}$ = 1 напряжение на шинах УПК со стороны линии (U_4) при δ = 300 превысит 1,1$U_{ном}$, а при δ = 600 составит более 1,3$U_{ном}$. Это должно учитываться при выборе места установки УПК на линии;
- при одиночном (сосредоточенном) размещении УПК на линии не рекомендуется применять емкостную компенсацию выше 50% из-за недопустимого превышения напряжения на зажимах устройства при передаче больших мощностей. Например, для УПК 75%, размещенного в середине линии, при δ = 30° напряжения в месте подключения устройства превысят 1,25$U_{ном}$, а при δ = 60° — более 1,75$U_{ном}$ (см. рис. 4, кривая X_C = 0,6 (75%)). Если УПК сместить от середины линии, то дополнительно возрастут напряжения на шинах УПК.

ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ УПК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ПО ВЛ ПРИ 50%-НОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ СО СМЕЩЕНИЕМ УПК БЛИЖЕ К НАЧАЛУ ВЛ (X_2=3X_1)

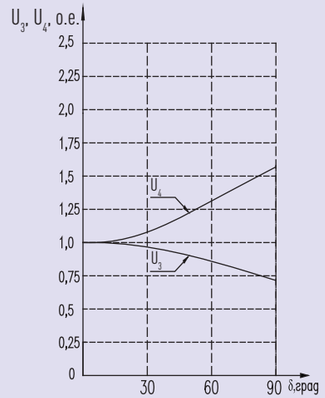


Рис. 3

ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ УПК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ПО ВЛ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТИ X_C: 0,2 (25%), 0,4 (50%) И 0,6 (75%) В СЕРЕДИНЕ ЛИНИИ (X_1 = X_2)

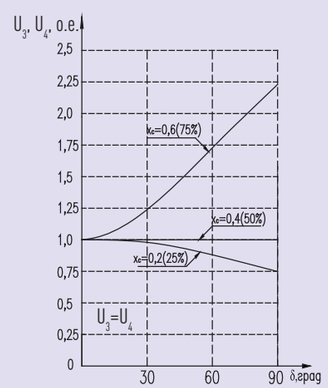


Рис. 4

Конечно, возможны небольшие отклонения от предложенных рекомендаций, но при этом должны быть выполнены все условия по ограничениям напряжений на зажимах устройств и на линии.

При выборе места размещения УПК вблизи шин подстанций с крупной электромашинной нагрузкой и генераторами станций необходимо проведение расчетов по электромагнитной устойчивости упомянутых электрических машин на выявление опасности возникновения емкостного самовозбуждения и субсинхронных колебаний и определению уровней токов короткого замыкания.

При размещениях УПК на параллельных линиях должны быть использованы рекомендации, предложенные выше для радиальных электропередач.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В ЗАРУБЕЖНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Мировой опыт применения установок продольной емкостной компенсации (УПЕК, принятая устоявшаяся аббревиатура — УПК) указывает на преимущественное использование этих устройств в сетях 400 кВ и выше [2, 7]. Объясняется это прежде всего тем, что УПК обеспечивает компенсацию падения напряжения на индуктивном сопротивлении линии, а выполнение этой функции наиболее эффективно в электрических сетях с отношением индуктивного сопротивления линии к активному сопротивлению более 15–20, т.е. в электрических стандартах России — это сети напряжением 500, 750 кВ и выше.

Особое распространение в зарубежных энергосистемах получили электропередачи сверхвысокого напряжения (400 кВ и выше) с неуправляемыми и управляемыми устройствами продольной емкостной компенсации (НУПК и УУПК) в составе так называемых гибких электропередач переменного тока. Такие электропередачи даже с использованием НУПК, тем более с применением НУПК и УУПК и устройствами управляемой параллельной компенсации, позволяют:

- существенно повысить пропускную способность электрической связи с требуемыми запасами статической и динамической устойчивости;
- обеспечить оптимальное перераспределение потоков мощности в сечениях между отдельными энергосистемами, уменьшая потери электрической энергии;
- улучшить уровни напряжения системы;
- обеспечить эффективное демпфирование электромеханических колебаний между энергосистемами;
- снизить стоимости передачи электроэнергии за счет сокращения количества параллельных линий и степени параллельной компенсации.

Гибкие неуправляемые и управляемые электропередачи с установками продольной емкостной компенсации действуют в Бразилии, США, Канаде, Швеции, Индии, Китае и др.

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ УПК

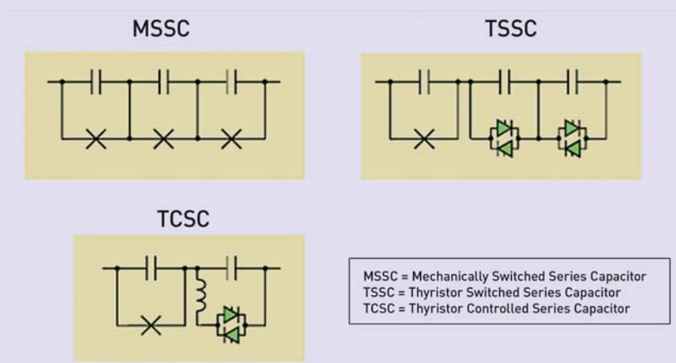


Рис. 5

Ведущими зарубежными фирмами, производящими НУПК и УУПК, являются ABB [4], Siemens [5], Alstom [6].

В зарубежных энергосистемах выбор местоположения и степени компенсации УПК производится на основе оценки экономичности и надежности работы энергосистемы. Степень компенсации обычно выбирается между 20% и 70% по отношению к индуктивному сопротивлению линии. Причем большая цифра компенсации предполагает использование на ВЛ нескольких устройств, размещенных равномерно по линии. Суммарная установленная мощность УПК находится обычно в диапазоне между 100 и 1000 МВ×А.

Последовательный компенсатор как бы уменьшает общее реактивное сопротивление линии электропередачи и как бы делает линию короче.

Последовательная компенсация в системе улучшает регулирование напряжения и баланс реактивной мощности, поскольку при ее использовании имеет место увеличение генерации реактивной мощности по мере нарастания передаваемой мощности. В этом отношении последовательный конденсатор — это саморегулирующееся устройство.

Важной особенностью последовательных конденсаторов как части системы электропередачи является их высокая надежность и собственное устройство защиты. К настоящему времени уровень надежности устройств продольной компенсации доведен до уровня надежности таких элементов, как линии, выключатели, трансформаторы и т.д.

Система защиты УПК обеспечивает, с одной стороны, быстрое и эффективное шунтирование конденсаторов в условиях, когда внешние возмущения могли бы вызвать повреждение конденсаторного оборудования, а с другой — повторное включение УПК в систему с минимальным запаздыванием после ликвидации повреждения в примыкающей сети.

ПАРАМЕТРЫ УПК И СТОИМОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Мощность, Мвар	Напряжение, кВ	$X_{упк}$, Ом	$X_{линии}$, Ом	Стоимость, MUSD
1384	500	115	230	20,5
692	500	58	116	10,3
614	400	51	102	5,8
307	400	26	52	4,9

Таблица 1

Технология выполнения устройств УПК непрерывно совершенствуется в части и самих конденсаторов, которые улучшаются по надежности, плотности мощности и потерям, и устройств защиты, систем управления и т.д.

Вложение капитала в УПК как альтернативу новой линии обычно оказывается выгоднее по следующим причинам: инвестиционная стоимость установки является только небольшой частью стоимости линии, время сооружения УПК намного короче, чем время строительства линии.

Технология УПК хорошо зарекомендовала себя как часть распределительных и основных сетей класса напряжения до 800 кВ. В настоящее время в работе или стадии строительства во всем мире находится более 100 000 МВА последовательных конденсаторов. Ведущей фирмой по их изготовлению является концерн ABB, которым на сегодняшний день установлено более 200 подобных устройств и их модификаций суммарной мощностью более 50 000 Мвар.

Возможно несколько распространенных схем включения УПК:

- УПК (НУПК, НУПК + УУПК) на одной промежуточной подстанции, желательно в середине ВЛ, с суммарной степенью компенсации не более 50%;
- УПК в виде отдельных блоков размещена равномерно по длине ВЛ или на отдельных участках протяженной электропередачи с суммарной степенью компенсации не более 70–80%;
- отдельные блоки УПК разной мощности и параметров размещаются на параллельных ВЛ, степень компенсации на связи составляет не более 50%.

Самым простым и распространенным типом установки продольной компенсации является последовательно включенная в ЛЭП емкость (стандартный УПК). В ходе усовершенствования конструкции этого устройства в направлении увеличения его управляемости было сделано несколько модификаций, представленных на рис. 5.

Первая модификация — MSSC (Mechanically Switched Series Capacitor) — это установка УПК с механически подключаемыми и отключаемыми батареями емкостей. Данное устройство допускает ступенчатое управление. Следующая модификация — TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) — это установка УПК с тиристорным подключением и отключением батарей емкостей. Управление

таким устройством осуществляется более быстро, но также ступенчато. Последней модификацией является УПК с тиристорным управлением — TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor). Такое устройство позволяет плавно регулировать реактивное сопротивление ЛЭП в достаточно широких пределах. Основными преимуществами, которые дает установка подобного устройства, являются:

- непрерывное поддержание запланированной величины компенсации;
- плавное управление перетоками мощности в сети;
- демпфирование электромеханических колебаний с частотой 0,5–2 Гц.

На сегодняшний день в литературе [5, 6] упоминается о двух промышленных установках этого типа. Первое подобное устройство было установлено в 1997 г. на подстанции Stöde в Швеции на линии 400 кВ, а второе — в 1999 г. в Бразилии на межсистемной связи напряжением 500 кВ между Северной и Южной энергосистемами в районе подстанции Imperatriz.

Ниже приводятся три характерных примера (ставших классическими) использования УПК:

1. УПК в энергосистеме Швеции. Система передачи между Северной и Южной Швецией напряжением 420 кВ включает восемь линий с восемью УПК общей установленной мощностью 4800 МВА. Степень компенсации для каждой из УПК выбрана таким образом, чтобы распределение активной мощности между линиями 420 кВ и работающей параллельно сетью 245 кВ было наиболее благоприятным. При этом за счет лишь снижения потерь относительно некомпенсированного случая затраты на последовательные конденсаторы окупаются уже через несколько лет. Кроме того, применение УПК позволяет повысить динамическую устойчивость электропередачи за счет поддержания напряжения во время и после больших возмущений в энергосистеме.

ВЛ 500 КВ СЕВЕР–ЮГ В БРАЗИЛИИ

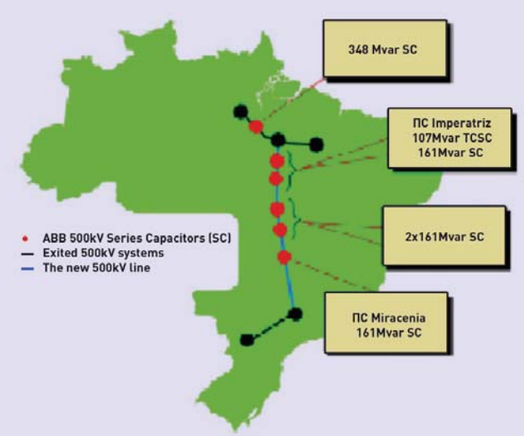


Рис. 6

Выбранная степень компенсации находится между 30% и 70% для индивидуальных батарей. С этой компенсацией достигнута устойчивая передача более чем 7000 МВт по восьми параллельным линиям. Это означает, что линии загружены примерно до двойной натуральной мощности. Без последовательной компенсации потребовалось бы построить пять дополнительных линий, чтобы передать ту же самую мощность, что было бы хуже не только с инвестиционной точки зрения, но и по условиям экологии и необходимости освоения новой трассы.

В целом опыт эксплуатации таких УПК — весьма положительный. Конденсаторные подстанции необслуживаемые, осмотр и обслуживание выполняются планомерно при посещении персоналом.

2. Протяженная система электропередачи 500 кВ в Аргентине. При разработке системы электропередачи El-Chocon-Ezeiza протяженностью 1038 км (311 Ом) и пропускной способностью 1650 МВт был принят вариант с двумя параллельными линиями электропередачи 500 кВ с 40%-й последовательной компенсацией (X_C = 125 Ом) в серединах линий против трех ВЛ без УПК.

3. Схема бразильской ВЛ 500 кВ протяженностью более 1000 км. Эта схема приведена на рис. 6. Схема снабжена шестью УПК установленной мощностью около 1100 МВ×А, пять из которых фиксированные, они обозначены на рисунке аббревиатурой SC (Series Capacitor), и один тиристорно-управляемый TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).

TCSC решает задачу демпфирования низкочастотных колебаний

мощности между энергосистемами. Ключевым фактором TCSC является его зона регулирования. Она измеряется величиной, на которую может быть увеличено реактивное сопротивление последовательного конденсатора. В данном случае зона регулирования может варьироваться непрерывно, обеспечивая при этом степень компенсации линии от 5% до 15%.

Тиристорный вентиль, установленный на платформе, имеет водяное охлаждение, в нем использованы светоуправляемые тиристоры. Номинальный ток вентиля составляет 1500 А, при этом допускается двукратная перегрузка в течение 10 с. Кроме того, в связи с тем, что на вентиль возложены также защитные функции, к нему предъявляется требование пропускать токи повреждения до 40 кА в течение приблизительно 60 мс, которых достаточно для включения шунтирующего выключателя.

Некоторые параметры конденсаторных батарей, индуктивных сопротивлений линий, на которых установлены УПК, стоимостные показатели обычных и тиристорно-управляемых УПК по данным проекта Baltic Ring приведены в табл. 1.

Как следует из таблицы 1, удельная стоимость обычных УПК составляет порядка 17 долл./квар.

Если принять удельное индуктивное сопротивление ВЛ 500 кВ равным 0,3 Ом/км, то длины линий для условий из первых двух строк табл. 1 составят соответственно 766 км и 387 км. Понятно, что в первом случае потребуется установка не менее двух УПК, во втором случае достаточно иметь одно устройство с размещением в середине ВЛ.

Из зарубежных источников следует, что при выборе параметров каждой УПК осуществляется индивидуальный подход, и делается специальный заказ. Но задачу выбора параметров и состава УПК можно упростить, применив модульный принцип построения устройства емкостной компенсации, например, использовать модули УПК с емкостным сопротивлением 10 Ом и мощностью модуля (для трех фаз) 120 МВА.

НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ НУПК И УУПК, ВЫПУСКАЕМЫЕ ФИРМОЙ ABB

Название параметра	Нерегулируемый УПК (НУПК)	Регулируемая часть (УУПК)
Номинальное напряжение	400 кВ	400 кВ
Номинальный ток	1550 А	1550 А
Ток перегрузки, 30 мин	2093 А	2093 А
Ток перегрузки, 10 мин	2325 А	2325 А
Емкостное сопротивление	54,7 Ом	6,83 А
Установленная мощность	394 Мвар	71 Мвар
Степень компенсации	40%	5–15%

Таблица 2

В этом случае первую установку (см. табл. 1) можно было бы построить, применив 11–12 модулей, а вторую — 6 модулей.

Используя модули с тиристорными выключателями, можно создать ступенчато-регулируемое УПК. В первом устройстве ступень регулирования составит 50/12 = 4%, во втором — 50/6 = 8%. Этого достаточно для осуществления демпфирования электромеханических колебаний генераторов и ведения установившегося режима работы электропередачи.

Определенный интерес представляют некоторые данные по УПК, представленные фирмой ABB и приведенные в табл. 2.

По данным фирмы ABB, удельная стоимость УУПК с использованием запираемых тиристоров превышает удельную стоимость НУПК более чем в три раза.

В настоящее время в мире эксплуатируется более полутора десятков УПК. Неполный перечень мест их установки, согласно данным из работы [7], приведен в табл. 3, где использованы следующие сокращения: НУПК — неуправляемая часть УПК, УУПК — управляемая часть УПК, ССР — субсинхронный резонанс.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ РОССИИ

В нашей стране проблеме применения УПК уделяется весьма скромное внимание: в 1960-е гг. были созданы две неуправляемые установки (средней мощностью 400–600 МВА) на ПС 500 кВ Тыреть (на электропередаче 500кВ между Иркутской и Красноярской энергосистемами) и на ПС 500 кВ Арзамас (ВЛ 500 кВ Волжская ГЭС — Москва). После сооружения и ввода в эксплуатацию атомных электростанций в Европейской части России последняя оказалась неэффективной и была в 1970-е гг. демонтирована.

Оживление работ по применению УПК, в том числе НУПК + УУПК, произошло в начале 2000-х гг.: сначала в докладе Координационного Совета «РАО ЕЭС России» в 2004 г. по проблемам создания FACTS (ГЭПТ) в ЕНЭС России [8] были сделаны предложения по применению УПК 220 кВ 50 Мвар в Архангельской области, УПК 500 кВ на связях 500 кВ ОЭС Урала, Средней Волги, Центра, УПК 500 кВ на линиях электропередачи 500 кВ Тюменская ЭС — ОЭС Урала.

МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ УПК

Год ввода	Место установки	Конфигурация	Параметры оборудования	Назначение
1992	США	НУПК и УУПК	230 кВ, 2×165 Мвар (в том числе УУПК(р) 45 Мвар), 1000 А	Увеличение пропускной способности сети, подавление ССР
1993	США	Шесть УУПК	500 кВ, 208 Мвар, 2900 А	Пилотная система для демонстрации управления перетоками мощности, подавления ССР, повышения устойчивости и проверки работы при КЗ
1997	Швеция	НУПК и УУПК	400 кВ, 493 Мвар (в том числе 148 Мвар УУПК), 1500 А	Подавление ССР
1999	Бразилия		500 кВ, 107 Мвар, 1500 А	Демпфирование электромеханических колебаний
2002	Китай	Две НУПК, одна УУПК	500 кВ, УУПК 55 Мвар; НУПК 350 Мвар, 2000 А	Демпфирование электромеханических колебаний
2004	Бразилия		500 кВ, 107 Мвар, 1500 А	Демпфирование электромеханических колебаний
2004	Китай	УУПК	220 кВ, 87 Мвар, 1100 А	Демпфирование электромеханических колебаний, повышение пропускной способности сети
2004	Индия	Две НУПК, две УУПК	400 кВ, 394 Мвар НУПК и 71 Мвар УУПК, 1550 А	Демпфирование электромеханических колебаний
2006	Индия	Две НУПК, две УУПК	420 кВ, 716 Мвар НУПК и 107 Мвар УУПК	Демпфирование электромеханических колебаний
2006	Индия	Две НУПК, две УУПК	420 кВ, 743 Мвар НУПК и 112 Мвар УУПК	Демпфирование электромеханических колебаний
2009	Китай	УУПК	500 кВ, 326 Мвар, 2330 А	Демпфирование электромеханических колебаний

Таблица 3

Затем, в 2005–2010 гг., ОАО ВНИИЭ и ОАО «Институт Энергосетьпроект» обосновали предложения по применению устройств ГЭПТ, в том числе УПК, на других объектах.

Все основные предложения по применению УПК в российских электрических сетях 500 кВ за период 2000–2012 гг. приведены в табл. 4.

По большинству упомянутых предложений сделана технико-экономическая оценка, и по некоторым из них подготовлены технико-экономические обоснования, показаны технический эффект и экономическая целесообразность.

Из табл. 4 следует, что при полной реализации предложенных устройств суммарная мощность УПК могла бы составить почти 5200 Мвар.

В 2005–2007 гг. ОАО ВНИИЭ и ОАО «Институт Энергосетьпроект» обосновали предложения по применению устройств гибкой передачи переменного тока (ГЭПТ) на связях 500 кВ ОЭС Урала — Средней Волги — Центра, структурная схема которой приведена на рис. 7. Было предложено использовать УПК 50% на ВЛ 500 кВ Бугульма — Бекетово (390 МВА у шин ПС 500 кВ Бекетово), УПК 50% на ВЛ 500 кВ Воткинская ГЭС — Вятка — Звезда — Костромская ГРЭС (490 МВА у шин 500 кВ ПС Вятка) и СТК ± 200 МВА (или СТАТКОМ) на ПС 500 кВ Бекетово и Вятка, что позволило бы на 300–400 МВт увеличить пропускную способность этого сечения в обоих направлениях. Но данные работы не получили развития.

Несколько позже в этом регионе были сооружены новые ВЛ мощностью 500 кВ Удмуртская — Помары и Газовая — Красноармейская, что сделало неактуальным применения УПК на ВЛ мощностью 500 кВ Бекетово — Бугульма. Но вот вопрос

применения УПК на длинной связи 500 кВ Воткинская ГЭС — Вятка — Звезда — ОРУ Костромская АЭС остается открытым.

ОАО «Институт Энергосетьпроект» было сделано предложение об использовании УПК (30–50%) на ВЛ 500 кВ в схеме выдачи мощности Богучанской ГЭС, но в итоге более целесообразным посчитали сооружение третьей линии электропередачи 500 кВ.

В Тюменской энергосистеме предлагались установки УПК 180 Мвар на ВЛ мощностью 500 кВ Пыть Ях — Демьянская и УПК 140 Мвар на ВЛ мощностью 500 кВ Пыть Ях — Нелымский для усиления связи Тюменской ЭС и ОЭС Урала.

Проведенные в 2006–2009 гг. научно-исследовательские работы по применению НУПК + УУПК на ВЛ мощностью 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС — Новокузнецкая, Саяно-Шушенская ГЭС — Кузбасская с установкой НУПК 30% (2×410 МВА) и УУПК 20% (2×270 МВА) на ПС 500 кВ Шерегеш (Таштагол) показали эффективность использования УПК как в части снижения «запертой» мощности Саяно-Шушенской ГЭС на 500–600 МВт, так и повышения устойчивости работы гидрогенераторов при возмущениях в системе.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ УПК В ЕЭС РОССИИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ (ПО МАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЙ 2004–2010 ГГ. ОАО ВНИИЭ И ОАО «ИНСТИТУТ ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»)

Энергосистемы	Название связи	Напряжение ВЛ, кВ	Длина ВЛ, км	ХВЛ, Ом	X_c, Ом 50%	Мощность УПК, МВА
ОЭС Средней Волги, Центра	Бугульма-Бекетово	500	205	61,5	31	390
	Воткинская ГЭС — Вятка	500	350	105	53	200
	Вятка — Звезда	500	290	87	44	150
	Звезда — Костромская ГРЭС	500	225	67,5	34	150
ОЭС Западной Сибири, Урала	Пыть Ях — Демьянская	500	180	54	27	180
	Пыть Ях — Нелымская	500	140	42	21	140
ОЭС Сибири	Саяно-Шушенская ГЭС — Новокузнецкая	500	450	138	69	410
	Саяно-Шушенская ГЭС — Кузбасская	500	450	138	69	410
ОЭС Сибири, Урала	Восход — Ишим	500	250	76	38	460
	Ишим — Курган	500	310	96	48	580
ОЭС Востока	Приморская ГРЭС — Чугуевка	500	296	89	44,5	534
	Приморская ГРЭС — Дальневосточная	500	353	106	53	638

Таблица 4

Результаты этих работ частично отражены в статьях В.К. Фокина и др. [9, 10]. Схематично фрагмент сети данного региона показан на рис. 8.

Для окончательного решения проблемы «запертой» мощности необходимо было рассмотреть вопросы взаимодействия Саяно-Шушенской ГЭС и ближайших тепловых электростанций. Однако катастрофа на ГЭС в августе 2009 г., после которой вряд ли можно рассчитывать на полноценное восстановление и, тем более, на полную загрузку станции до 6000–6400 МВт, перечеркнула все благие намерения. Хотя работы, в том числе и проектные, по применению УПК на ВЛ мощностью 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС — Новокузнецкая, Саяно-Шушенская ГЭС — Кузбасская продолжались до 2012 г., правда, с непонятным предложением по преобразованию пункта размещения УПК Шерегеш в промежуточную подстанцию ПС 500 кВ Шерегеш с мощным необоснованным трансформаторным отбором, что окончательно погубило идею о продольной емкостной компенсации на упомянутых протяженных ВЛ 500 кВ (l = 450 км) и закрыло все вопросы о целесообразности применения УПК на указанных линиях.

Но поскольку указанные ВЛ 500 кВ — весьма протяженные (более 300 км), возможны недопустимые превышения напряжений в средней части ВЛ при малых загрузках этих линий. Поэтому, видимо, в будущем будет уместно рассмотреть применение средств поперечной компенсации (СТК или УШР) с отбором небольшой мощности для нужд курортного поселка Шерегеш.

Предложения по применению УПК на ВЛ 500 кВ Приморская ГРЭС — Чугуевка (296 км) и Приморская ГРЭС — Дальневосточная (353 км) представляются преждевременными, поскольку эти линии одноцепные, и применение УПК уместно рассмотреть при проектировании и создании вторых цепей.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМООБРАЗУЮЩИХ СВЯЗЕЙ 500 КВ ОЭС УРАЛА — СРЕДНЕЙ ВОЛГИ — ЦЕНТРА В 2010 Г. (ФРАГМЕНТ)

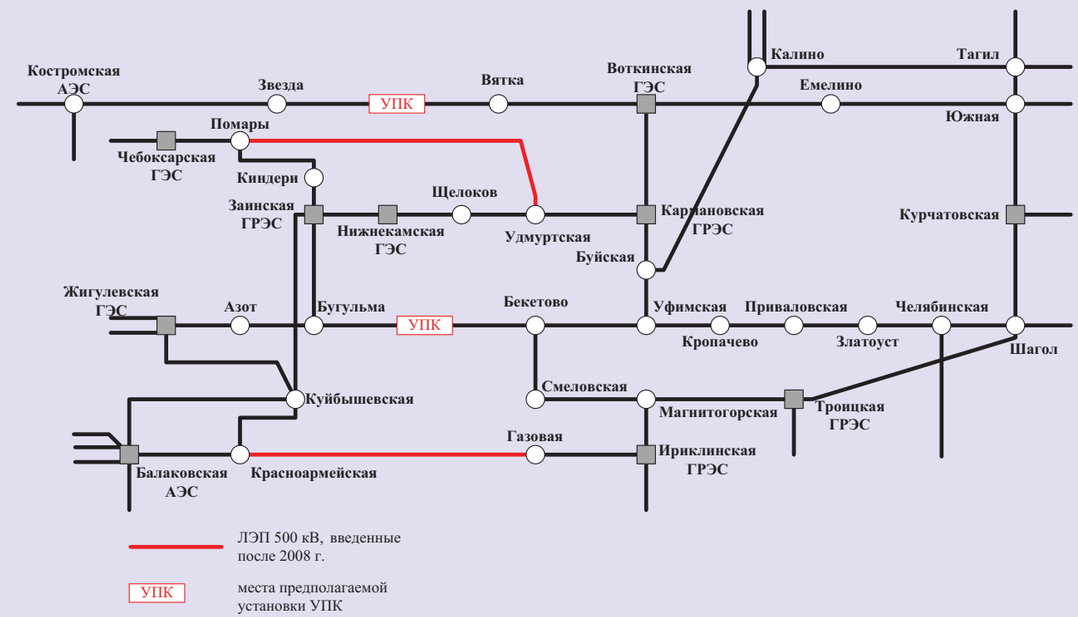


Рис. 7

В 2012 г. от АО «СО ЕЭС» поступило предложение об использовании 50%-й емкостной компенсации на сооружаемой в то время ВЛ 500 кВ Восход — Витязь (Ишим) — Курган с целью снижения потоков активной мощности между ОЭС Сибири и ОЭС Урала по ВЛ 500 кВ через территорию Казахстана для уменьшения платы за транзит российской электроэнергии. Структурная схема сети 500 кВ этого региона показана на рис. 9.

В июле 2015 г. линия Восход — Витязь — Курган введена в эксплуатацию, но какие-либо активные действия по повышению ее эффективности в части шунтирования потока активной мощности через сети Казахстана не ведутся, хотя обоснованные АО «НТЦ ФСК ЕЭС» и АО «Институт Энергосетьпроект» предложения по применению УПК 50% на участках ВЛ 500 кВ Восход — Витязь и Витязь — Курган имеются. Следует заметить, что применение продольной емкостной компенсации на ВЛ 500 кВ Восход — Витязь — Курган и ввод в эксплуатацию строящейся ВЛ 500 кВ Нижневартовск — Томск позволят усилить связь между ОЭС Сибири и ОЭС Урала.

Можно пойти дальше по пути умощнения связи ОЭС Урала — ОЭС Сибири за счет дополнительного применения УПК 50% на ВЛ 500 кВ Барабинская — Восход и Курган — Козырево, но для этого необходимо проведение специальных исследований.

Выше (см. табл. 4) на линиях электропередачи предполагалась в основном установка нерегулируемых компенсирующих устройств (НУПК), но с возможностью ступенчатых переключений либо с помощью выключателей (по зарубежной терминологии MSSC, Mechanically Switched Series Capacitor), либо с помощью тиристоров (TSSC, Thyristor Switched Series Capacitor), как это показано на рис. 6. Причем первые устройства могут быть коммутируемыми, что используется при ведении установившегося режима работы электропередачи, а вторые, до-

статочно быстродействующие, могут, помимо переключений, участвовать в демпфировании электромеханических колебаний.

Быстродействующее компенсирующее устройство с плавным регулированием продольной емкости по типу TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) рассматривалось для двухцепной электропередачи Саяно-Шушенская ГЭС — Новокузнецкая, Саяно-Шушенская ГЭС — Кузбасская, но не было реализовано по указанным выше причинам.

АО «НТЦ ФСК ЕЭС» предлагается универсальная блочно-модульная конструкция установки продольной емкостной компенсации с использованием как тиристорных, так и обычных выключателей.

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ УПК В РОССИИ

В настоящее время в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» разработана универсальная блочно-модульная конструкция управляемого устройства продольной емкостной компенсации (УУПК).

Регулирование УУПК осуществляется ступенчато, путем шунтирования конденсаторной батареи блока тиристорным ключом. Суммарное сопротивление (мощность) определяется путем последовательно-параллельного соединения единичных блоков. УПК включается последовательно в линию электропередачи.

В состав УУПК входят: модули УПК; защитные аппараты от перенапряжений; датчики тока защит; система управления, регулирования и защиты.

В состав единичного блока управляемой части УПК входят: высоковольтный тиристорный вентиль; батарея конденсаторов; реактор тиристорно-реакторной группы; система охлаждения и комплектующие для подключения системы охлаждения к тиристорным вентилям блока УПК; шкаф управления.

На рис. 10 представлена электрическая схема подключения УУПК, состоящего из трех модулей, а на рис. 11 — основные элементы модуля УПК.

ФРАГМЕНТ СЕТИ 110–500 КВ РЕГИОНА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

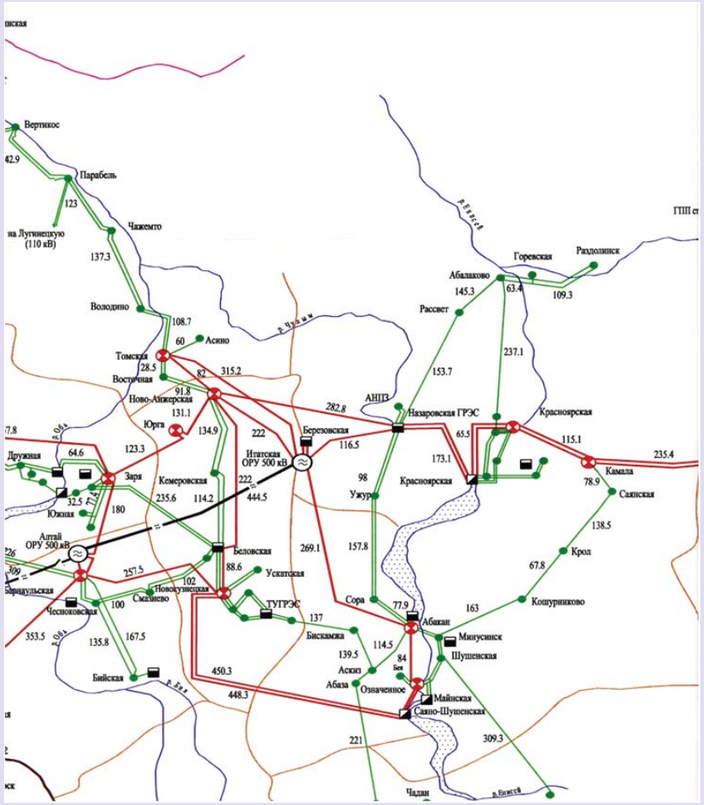


Рис. 8

КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЯ УПК

Конструктивно модуль УПК выполнен в виде изолированной от земли платформы, установленной на изоляторах 500 кВ. Несущая часть платформы выполнена из двутавровых балок. Пространство под платформой заполнено стяжками из изоляторов, которые играют роль ребер жесткости. Габариты платформы равны 8 м × 12,5 м. На платформе расположены батарея конденсаторов с батареей ОПН,

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СЕТИ 500 КВ МЕЖДУ ОЭС УРАЛА И СИБИРИ 2015 Г.

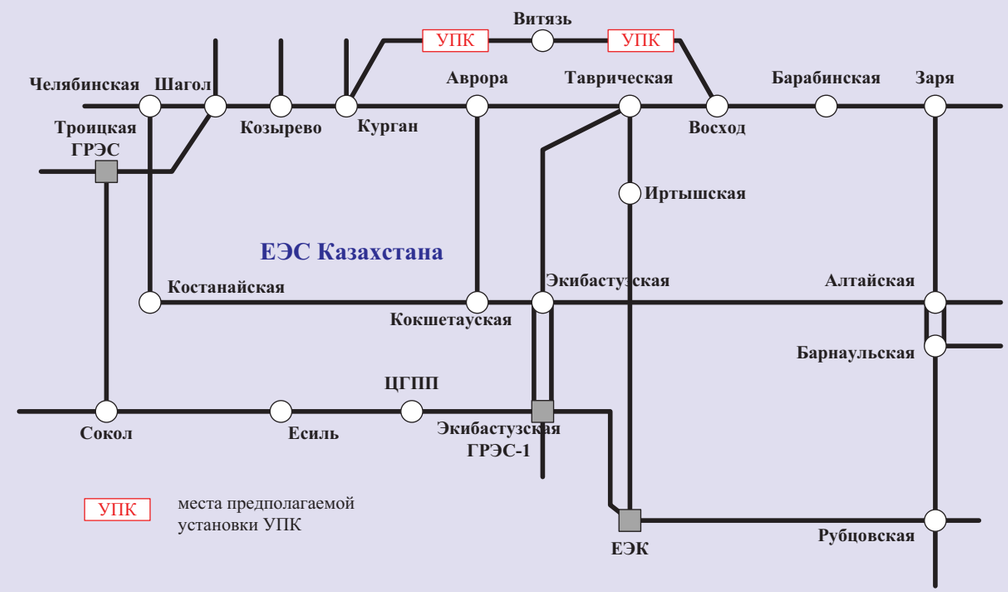


Рис. 9

батарея резисторов, токоограничивающий реактор и контейнер фазы ВТВ. Расположение оборудования на платформе показано на рис. 12.

Ниже приводятся краткие описания с фотографиями основных силовых элементов регулируемых модулей УУПК: высоковольтного тиристорного вентиля (ВТВ), конденсаторной батареи (КБП), индуктивного реактора (РТОС), а также краткие описания вспомогательных блоков: системы охлаждения ВТВ (СО ВТВ) и шкафа управления модулем УПК (ШУ).

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ТИРИСТОРНЫЙ ВЕНТИЛЬ

Высоковольтный вентиль ВТСВВП-2000/20 УХЛ 4.2 предназначен для шунтирования конденсаторной батареи модуля УПК.

СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ УУПК

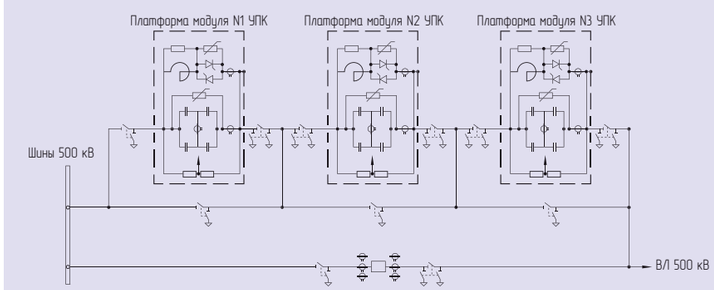
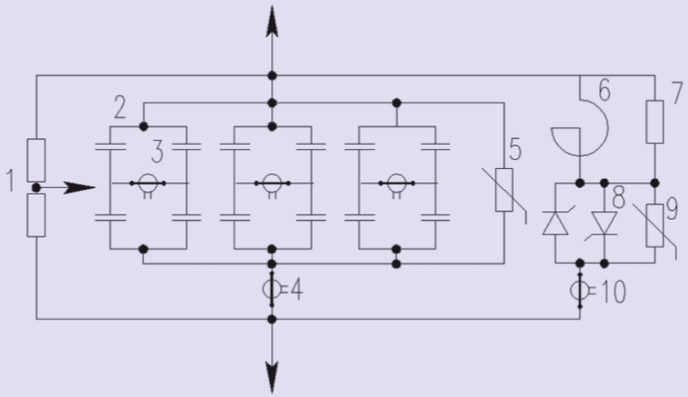


Рис. 10

Конструктивно высоковольтный вентиль выполнен в виде двух тиристорных сборок по 10 тиристорных ячеек в каждой и насыщающегося дросселя для ограничения скорости нарастания тока через тиристоры.

Каждая тиристорная ячейка содержит два тиристора, включенных встречно-параллельно, и блоки управления тиристорами. Охлаждение тиристоров — жидкостное с принудительной циркуляцией жидкости.

СХЕМА МОДУЛЯ УУПК



(1) делитель напряжения; (2) конденсаторная батарея (КБ) сопротивлением 10 Ом (состоит из трех блоков); (3) трансформатор тока небалансной защиты; (4) трансформатор тока КБ; (5) ограничитель перенапряжения КБ; (6) токоограничивающий реактор; (7) демпфирующий резистор; (8) высоковольтный вентиль (ВТВ); (9) ограничитель перенапряжения ВТВ; (10) трансформатор тока вентиля

Рис. 11

РАСПОЛОЖЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ УПК НА ПЛАТФОРМЕ

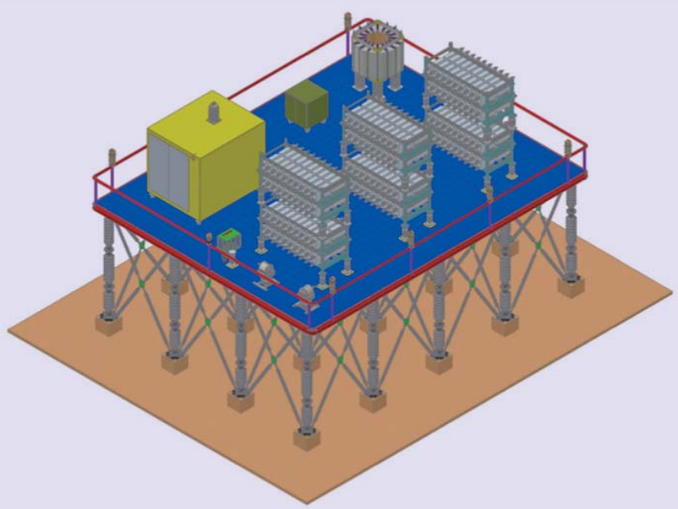


Рис. 12

Основные параметры вентиля таковы: номинальный ток вентиля — 2000 А; наибольший рабочий ток — 2200 А; напряжение на закрытом вентиле — 20 кВ.

На рис. 13 представлен высоковольтный вентиль ВТСВВП-2000/20 УХЛ 4.2.

КОНДЕНСАТОРНАЯ БАТАРЕЯ

Конденсаторная батарея КБПКО-20-40000 УХЛ1 изготовлена в соответствии с доработанной конструкторской документацией МЦВА.673851.003. Конденсаторная батарея состоит из трех блоков, включенных параллельно. Каждый блок содержит 64 конденсатора типа КЭПП–6,0–300, 20 УХЛ1, соединенных параллельно и последовательно по схеме с трансформатором тока небалансной защиты в диагонали.

Номинальные параметры конденсаторной батареи таковы: емкость — 318 мкФ; напряжение — 24 кВ; установленная мощность — 57,6 Мвар; номинальная мощность — 40 Мвар.

На рис. 14 представлен блок конденсаторной батареи КБПКО-20-40000 УХЛ1.

РЕАКТОР ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНОЙ ГРУППЫ

Токоограничивающий реактор РТОС-20-2000-0,95-УХЛ1 изготовлен в соответствии с доработанной конструкторской документацией МЦВА.672361.003 и предназначен для ограничения тока, протекающего через тиристорный вентиль при шунтировании конденсаторной батареи.

В состав реактора входят: обмотка реактора; опорные изоляторы на соответствующий класс напряжения; элементы крепежа из немагнитного металла для подключения реактора.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЕНТИЛЬ ВТСВВП-2000/20 УХЛ 4.2

Рис. 13

Обмотка выполнена из обмоточного алюминиевого многожильного провода с теплостойкой изоляцией типа ПАЭРТ-300 (ТУ 16.К80-02-88), класс нагревостойкости провода — F (155 °С), сечение провода — 300 мм^2, обмотка реактора слоевая цилиндрическая.

Номинальные параметры реактора таковы: индуктивность — 3 мГн; номинальный ток — 2000 А; класс изоляции — 20 кВ; ударный ток — 10 000 А.

На рис. 15 показан внешний вид реактора РТОС-20-2000-0,95-УХЛ.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ БЛОКА УПК

Система охлаждения тиристорных вентилей блока УПК изготовлена в соответствии с техническим заданием на выполнение работ, а также с учетом выбранных параметров единичного блока и блочно-модульной конструкции УПК.

Оборудование состоит из насосной установки УН 25-2-7 и охладителя АВОА 210.16.6к-ПМ2.

ИЗ «МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ FACTS В ЕНЭС РОССИИ» (СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ, ПАО «ФСК ЕЭС»)

3.2 Виды устройств FACTS.

Все устройства FACTS делятся на статические и электромашинные системы.

К статическим относятся:

- управляемые шунтирующие реакторы (УШР), реализованные по принципу магнитного усилителя (УШРП) или трансформаторного типа (УШРТ или реактор-трансформатор) с тиристорным управлением;
- реакторы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ);
- статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК), состоящие из одной или нескольких тиристорно-реакторных групп и набора фильтро-компенсирующих цепей;
- синхронные статические компенсаторы реактивной мощности типа СТАТКОМ на базе преобразователя напряжения с параллельным подключением к сети;
- синхронные статические продольные компенсаторы реактивной мощности на базе преобразователя напряжения (ССПК);
- объединенный регулятор перетока мощности на основе преобразователей напряжения параллельного и последовательного включения, объединенных по цепям постоянного тока (ОРПМ);
- управляемые тиристорами устройства продольной емкостной компенсации (УУПК).

ИЗ «РУКОВОДЯЩИХ УКАЗАНИЙ ПО ВЫБОРУ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И РЕГУЛИРУЕМЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110–1150 КВ» (УТВЕРЖДЕНЫ РАО «ЕЭС РОССИИ» 4.04.97)

2. НАЗНАЧЕНИЕ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И РЕГУЛИРУЕМЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110–1150 кВ

2.1. Средства компенсации реактивной мощности и регулируемые трансформаторы в электрических сетях 110–1150 кВ предназначаются для поддержания уровней напряжения в пределах, рекомендуемых ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», а также действующими Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей с целью обеспечения нормируемых сроков службы оборудования, снижения влияния напряженности электрического поля на окружающую среду вблизи линий электропередачи 330–1150 кВ, снижения электромагнитных и акустических помех от короны на проводах ВЛ и ОРУ подстанций, улучшения условий работы коммутационной аппаратуры. Средства компенсации реактивной мощности могут применяться также для: поддержания реактивной мощности генераторов в допустимых пределах; снижения потерь мощности в электрических сетях энергосистем; повышения пропускной способности линии электропередачи по условиям статической и динамической устойчивости; повышения устойчивости нагрузки и предотвращения «лавины напряжения».

Параметры системы охлаждения таковы: суммарные отводимые потери — 160 кВт; номинальный расход охлаждающей жидкости — 220 л/мин.; температура охлаждающей жидкости на входе вентиля — (+5...+40 °С); температура охлаждающей жидкости на выходе вентиля — не более +50 °С; максимально допустимое избыточное давление на входе вентиля — не более 2,1; удельное электрическое сопротивление охлаждающей жидкости — не более 0,67 мкСм/см; масса вентиля — не более 400 кг; габаритные размеры вентиля — 2370 × 1352 × 1210 мм.

ШКАФ УПРАВЛЕНИЯ

Шкаф управления ШУ ВТСВВП-2000/20 УХЛ 4.2 изготовлен в соответствии с техническим заданием на выполнение работ и конструкторской документацией МЦВА.421444.031. Он обеспечивает управление, контроль и защиту одной фазы тиристорно-реакторной цепи УУПК.

Компоновка шкафа управления (ШУ) представляет собой конструкцию, в которой объединены блоки и модули, обеспечивающие: запуск тиристоров прямого и обратного направлений ВТВ; контроль исправности тиристорных ячеек вентилей, подачу предупредительного сигнала и команды на шунтирование УУПК при исчерпывании избыточности тиристорных ячеек тиристорного вентиля; контроль исправности блоков управления (драйверов) тиристорных ячеек вентилей, подачу предупредительного сигнала; контроль исправности собственного оборудования ШУ, подачу предупредительного сигнала.

ШУ имеет оптические связи с высоковольтным оборудованием и электрические связи с системой управления и релейной защитой и автоматики (СУРЗА).

Альтернативным, более дешевым вариантом ступенчатого УПК является блочно-модульный вариант коммутируемого УПК с использованием элегазовых или других выключателей, устанавливаемых на изолированной платформе (см. выше рис. 12) вместо тиристорного оборудования (с системой охлаждения) и индуктивного реактора. Управление выключателями модулей УПК осуществляется от шкафа управления с земли по оптико-волоконным каналам.

ВЫВОДЫ

1. Компенсация падения напряжения на индуктивном сопротивлении высоковольтной добротной линии с помощью последовательно включенных конденсаторов (УПК) является эффективным средством повышения пропускной способности длинных линий электропередачи и перераспределения потоков мощностей в разветвленных высоковольтных сетях переменного тока.
2. Использование УПК с 50%-й емкостной компенсацией в серединах протяженных электропередач позволяет, помимо повышения пропускной способности ВЛ, обеспечить поддержание напряжения в точках подключения конденсаторов, т.е. в серединах линий.
3. Благодаря широкому применению УПК, в том числе при X_C = 50%$X_л$, в зарубежных энергосистемах Европы, Америки и Азии накоплен большой опыт эксплуатации как нерегулируемых (НУПК), так и регулируемых (управляемых) (УУПК) емкостных компенсаторов, и определены оптимальные параметры этих устройств.
4. В нашей стране, к сожалению, имеется единичное использование нерегулируемого УПК на связи 500 кВ Иркутской и Красноярской энергосистем (ПП 500 кВ Тыреть). В то же время выполнен большой объем работ по выбору мест установки, мощности и типа УПК на протяженных линиях электропередачи различных энергосистем ЕНЭС России. Нам необходимо активизировать работы по внедрению УПК на указанных в статье линиях.
5. АО «НТЦ ФСК ЕЭС» предложена универсальная блочно-модульная конструкция УПК с тиристорным управлением и с коммутацией обычными выключателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Г. Шакарян, В.К. Фокин, А.П. Лихачев. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач // Электричество. 2013. № 12. С. 2–13.
2. N. Christl, R. Hedin, K. Sadek, P. Lutzelberger, P.E. Krause, S.M. McKenna, A.H. Montoya, D. Torgerson. Advanced Series Compensation (ASC) With Thyristor Controlled Impedance. CIGRE, Publication 14/3738-05, Paris, 1992.
3. C.R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, H. Ambriz-Perez. A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 15. № 1. February 2000. P. 58–64.
4. www.abb.com/facts. TCSC. Thyristor Controlled Series Compensation.
5. www.siemens.com/energy/facts. Discover the Word of FACTS Technology.
6. www.grid.alstom.com/contactcenter.
7. Performance Evaluation and Applications Review of Existing Thyristor Control Series Capacitor Devices — TCSC. WG B4.49. CIGRE Publication. October 2013.
8. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока. Доклад Координационному Совету РАО ЕЭС. ОАО «ВНИИЭ», ОАО «Институт Энергосетьпроект», ОАО «НИИПТ», ГУП «ВЭИ». М., 2004.
9. В.К. Фокин. Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС — Новокузнецкая, Кузбасская // Энергия единой сети/ 2013. № 2 (7). С. 66–73.
10. В.К. Фокин, Л.К. Филатова. Электропередачи переменного тока и их применение в ЕНЭС России // Энергия единой сети. 2013. № 3 (8). С. 26–37.

БЛОК КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ КБПКО-20-40000 УХЛ1

Рис. 14

РЕАКТОР ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНОЙ ГРУППЫ РТОС-20-2000-0,95-УХЛ

Рис. 15