

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ ВАРИАНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВЛ-220 кВ

В.М. ПОСТОЛАТИЙ, Е.В. БЫКОВА, В.М. СУСЛОВ

Институт энергетики Академии наук Молдовы

Ю.Г. ШАКАРЯН, Л.В. ТИМАШОВА, С.Н. КАРЕВА

Научно-технический центр Электроэнергетики, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье описаны ВЛ нового поколения (одноцепных и двухцепных компактных, двухцепных управляемых самокомпенсирующихся). Описаны основные принципы создания, элементы конструкции и сопоставительные характеристики ВЛ нового поколения, показаны их преимущества по сравнению с ВЛ традиционного поколения. Сформулированы методические подходы к выбору ВЛ нового поколения и средств регулирования типа FACTS. Для класса напряжения 220 кВ показаны методические подходы к обоснованию и выбору вариантов ВЛ нового поколения и необходимых для них средств регулирования.

Ключевые слова: линии электропередачи нового поколения: управляемые, компактные, самокомпенсирующиеся ВЛ, устройства регулирования типа FACTS.

ABORDĂRILE METODICE LA SELECTAREA VARIANTELOR LINIILOR ELECTRICE DE TRANSPORT NOUĂ GENERAȚIE, ÎN EXEMPLU, LEA-220 kV

V.M. POSTOLATI, E.V. BÎCOVA, V.M. SUSLOV

Institutul de Energetica al Academiei de Științe a Moldovei

I.U.G. ȘACAREAN, L.V. TIMAȘOVA, S.N. CAREVA

Centrul de energie electrică tehnico-științifice, Moscova, Rusia

Rezumat. În articol este descrisă LEA de generație nouă (compactă cu un circuit și cu două circuite, cu două circuite dirijată cu autocompensare). Sunt descrise principiile de formare, elementele de construcție și caracteristicile comparative ale LEA de generație nouă, indicate prioritățile lor în comparație cu LEA generație tradițională. Sunt formulate abordările metodice la selectarea LEA generație nouă și mijloacele de reglementare de tip FACTS. Pentru clasa de tensiune 220 kV sunt indicate abordările metodice la argumentarea și selectarea variantelor LEA generație nouă și mijloacele necesare pentru ele de reglementare.

Cuvinte-cheie: linie electrică de transport generație nouă: LEA cu autocompensare, compacte, dirijate, mijloace de reglementare de tip FACTS.

METHODICAL APPROACHES TO THE CHOICE OF OPTIONS VL-220 kV NEW GENERATION

V.M. POSTOLATI, E.V. BYKOVA, V. M. SUSLOV

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

I.U.G. SHAKARYAN, L.V. TIMASHOVA, S.N. KAREVA

Scientific-Technical Center of Power Engineering, Moscow, Russia

Abstract. The Transmission Power Lines of new generation are described in the article (single- compact, double-circuit compact, double-circuit controlled self-compensating high voltage transmission power lines (CSHVL). There are showed basic principles of creation, design elements and comparative characteristics of the transmission lines of the new generation are described, the advantages of them. There are formulated methodical approaches to the choosing of a new generation of transmission lines and facilities management FACTS. Methodical approaches to the choice of options for transmission lines 220 kV and facilities management are shown as well.

Key words: transmission power lines of new generation, controlled, single- compact, double-circuit compact, double-circuit controlled self-compensating high voltage transmission power lines, the apparatus of regulation of the type FACTS.

1. Общие положения

В настоящее время наблюдается значительный рост потребления электрической энергии как в промышленной, так и в социальной сферах, что требует дальнейшего увеличения объемов выработки электроэнергии, развития электроэнергетических систем, строительства новых генерирующих источников, распределительных, транспортных и межсистемных линий электропередачи.

К электросетевым объектам и в первую очередь к линиям электропередачи (ВЛ) выдвигаются новые требования повышения эффективности их работы, снижения капитальных вложений в строительство, уменьшения эксплуатационных затрат, снижения экологического влияния на окружающую среду.

В современных условиях важнейшими задачами становятся:

- максимальное повышение пропускной способности ВЛ;
- увеличение управляемости и устойчивости энергосистем;
- создание параллельно работающих управляемых энергообъединений, с необходимостью обеспечения энергетической и экологической безопасности и уменьшения отчуждаемых под энергетические объекты земельных угодий.

Решение этих задач является частью проблемы создания активно-адаптивных электрических сетей, с целью обеспечения в реальном масштабе времени надежного и экономически оптимального функционирования электроэнергетических систем в любых (нормальных, предаварийных, аварийных и послеаварийных) режимах, а также надежного обеспечения потребителей возможно более дешевой электроэнергией заданного качества.

Для успешного решения указанных задач и достижения поставленных целей могут быть предложены управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности, которые представляют собой комплекс технических решений, предусматривающих применение одноцепных и многоцепных ВЛ нового поколения (компактных ВЛ и управляемых самокомпенсирующихся ВЛ) в сочетании с современными средствами регулирования.

Целью настоящей статьи является изложение основных методических подходов к обоснованию и выбору наиболее целесообразных вариантов воздушных линий электропередачи, их технико-экономических показателей, а также ряда существенных отличий и преимуществ по сравнению с ВЛ традиционного исполнения.

В значительной мере материал статьи относится к ВЛ нового поколения различных классов напряжения. Конкретная же иллюстрация методических подходов проведена на примере ВЛ напряжением 220 кВ.

Выполненные к настоящему времени научно-исследовательские работы [1-6] позволяют сформулировать следующие основные методические подходы к выбору ВЛ нового поколения.

Под ВЛ нового поколения подразумеваются воздушные трехфазные одноцепные и многоцепные линии электропередачи, созданные с использованием принципиально новых технических решений в части их схемно-конструктивного исполнения, компоновки средствами управления и применением нетрадиционных способов регулирования параметров режимов.

Весь комплекс новых технических решений, предусмотренных в ВЛ нового поколения, позволяет реализовать современные идеи создания интеллектуальных электроэнергетических систем (SMART-Grid) с активно-адаптивными сетями [7], обеспечивающими заданную их пропускную способность, оптимальные режимные характеристики, экономию капитальных вложений и эксплуатационных затрат, минимальное влияние на окружающую среду.

При прочих равных условиях ВЛ нового поколения способны обеспечить существенно лучшие показатели по сравнению с ВЛ традиционного типа, а именно:

- повышение пропускной способности в 1,2-1,6 раза;
- снижение капитальных вложений в расчете на единицу передаваемой мощности не менее, чем на 20-30%;
- уменьшение в 1,5-2 раза площадей земельных угодий, отчуждаемых под строительство ВЛ;
- регулирование режимов работы линии и сети во всем заданном диапазоне изменения величин передаваемой мощности (кибернетическое управление) с целью минимизации потерь и соблюдения заданных режимных параметров и ограничений;
- эффективную и быстродействующую реакцию на любые изменения ситуации в энергосистеме в нормальных и переходных режимах работы;
- управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях;
- выполнение в энергосистемах новых функций, дополняющих регулировочные действия генерирующих источников, что существенно повышает экономичность работы энергосистем в нормальных режимах, статическую и динамическую устойчивость энергосистем в переходных режимах работы.

2. Классификация ВЛ нового поколения

К категории воздушных линий электропередачи (ВЛ) нового поколения на современном этапе отнесены одноцепные и многоцепные ВЛ повышенной по сравнению с ВЛ традиционного типа пропускной способностью, оснащенные современными регулируемыми устройствами типа FACTS, отвечающими всем наперед заданным техническим и экономическим характеристикам и режимным параметрам. К ВЛ нового поколения относятся:

- компактные трехфазные одноцепные ВЛ (ОКВЛ);
- компактные многоцепные трехфазные ВЛ (МКВЛ);
- управляемые двухцепные и многоцепные самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ);
- комбинированные управляемые ВЛ, включающие компактные ВЛ (ОКВЛ и/или МКВЛ) и УСВЛ.

ВЛ нового поколения предусматривают, прежде всего, создание компактных конфигураций расположения фаз с минимально допустимыми расстояниями между ними, выбор оптимальной конструкции расщепления фаз и линейной изоляции, применения новых типов опор, позволяющих создать компактные конструкции линии с минимально допустимыми расстояниями между фазами и обеспечить совместно с междуфазными изоляционными элементами, устанавливаемыми в пролётах, механическую устойчивость линии в целом при воздействии неблагоприятных климатических факторов.

За счет сближения фаз и создания компактных конфигураций их расположения в одноцепных и многоцепных ВЛ обеспечивается улучшение электрических параметров линий и, прежде всего, повышение пропускной способности, благодаря изменению параметров электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве. Усиление параметров поля внутри линии за счет сближения фаз позволяет улучшить электрические параметры, увеличить пропускную способность, и, соответственно, технические характеристики линии, а ослабление поля во внешнем пространстве – улучшить экологические показатели ВЛ.

В управляемых самокомпенсирующихся ВЛ (УСВЛ), кроме того, предусматривается в процессе изменения величины передаваемой по линии мощности

регулирование параметров электрического и магнитного поля фаз и цепей, благодаря чему обеспечивается управление эквивалентными параметрами и характеристиками самих линий электропередачи, как элементов электрической сети, что целесообразно осуществлять в соответствии с заданными режимными требованиями. Данное регулирование осуществляется путем изменения углового сдвига (θ) между трехфазными системами векторов напряжений цепей в пределах $\theta=(0\div 180^\circ)$ с помощью фазоповоротных устройств (ФПУ, ФРТ), установленных в местах присоединения ВЛ к подстанциям.

На УСВЛ может оказаться целесообразным дискретное регулирование угла (θ) в пределах $\theta=(0-120^\circ)$. Для рассматриваемых конструкций УСВЛ регулирование угла (θ) в пределах $0\div 120(180)^\circ$ позволяет в 1,4÷1,6 раза изменять величину эквивалентных параметров ВЛ (удельных значений индуктивного сопротивления и емкостной проводимости фаз линии), а, соответственно, волнового сопротивления, значения натуральной мощности и зарядной мощности линии. Значениям угла $\theta=180^\circ(120^\circ)$ соответствуют максимальные величины емкостной проводимости, зарядной мощности, натуральной мощности и, соответственно, пропускной способности ВЛ. Указанные параметры принимают минимальные значения при переводе УСВЛ в режим при $\theta=0^\circ$, кроме индуктивного сопротивления, величина которого минимальна при $\theta=180^\circ$, а максимальна при $\theta=0^\circ$.

Столь глубокий регулировочный диапазон изменения эквивалентных параметров и технических характеристик (в 1,4÷1,6 раза) целесообразно использовать при выборе мощности фазоповоротных устройств (ФПУ, ФРТ) и других устройств типа FACTS, в частности - мощности управляемых шунтирующих реакторов (УШР) и устройств поперечной емкостной компенсации. Применение ФПУ (ФРТ) на УСВЛ совместно с указанными и другими устройствами типа FACTS обеспечивает заданные регулировочные характеристики электропередач, высокую управляемость электрических сетей и позволяет достичь при этом существенной экономии капитальных и эксплуатационных затрат по энергосистеме в целом, по сравнению с вариантами традиционных решений.

Дальнейшее изложение выполнено на примере ВЛ-220 кВ.

3. Технические характеристики наиболее представительных вариантов ВЛ-220 кВ нового поколения.

На основе анализа отечественных и зарубежных работ в области новых разработок ВЛ-220 кВ отобраны наиболее представительные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения. Конструкции опор данных вариантов показаны на рис. 1-3, а основные параметры и характеристики приведены в таблице 1.

На рис. 1-3 показаны соответственно: одноцепная компактная трехфазная ВЛ (ОКВЛ); двухцепная компактная ВЛ(ДКВЛ) и двухцепная управляемая самокомпенсирующаяся ВЛ (УСВЛ). Опора, показанная на рис. 2, применима как для двухцепной компактной ВЛ, так и для двухцепной УСВЛ.

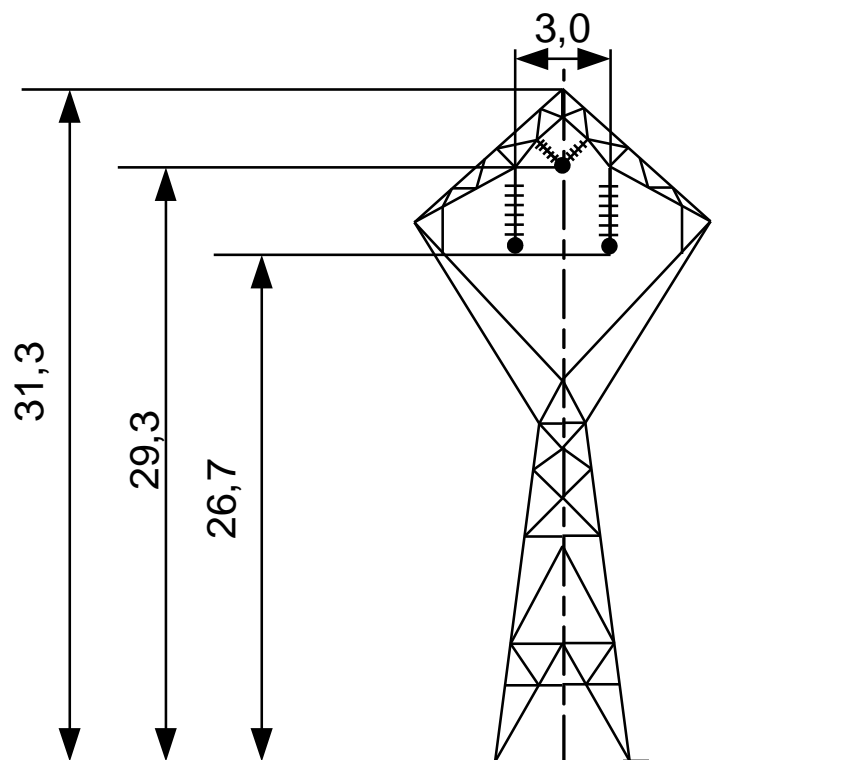


Рис. 1. Одноцепная компактная ВЛ 220 кВ

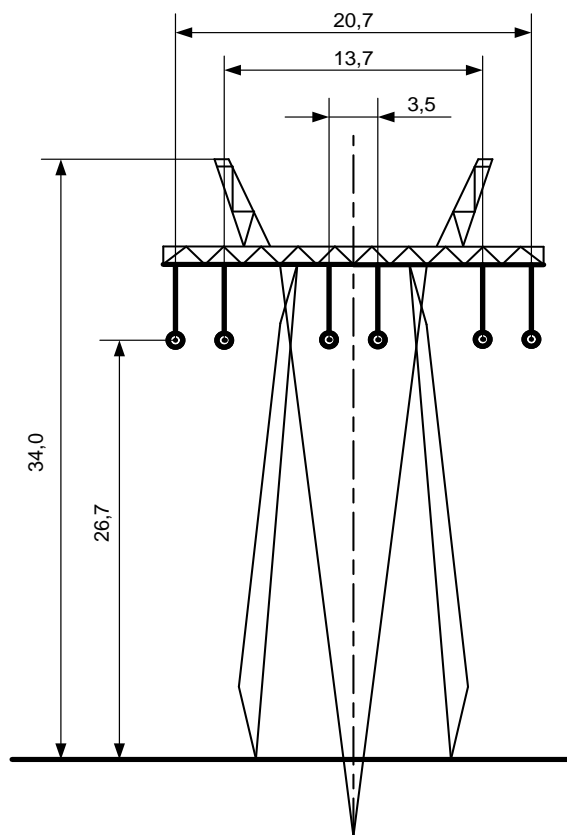


Рис. 2. Двухцепная компактная ВЛ 220 кВ

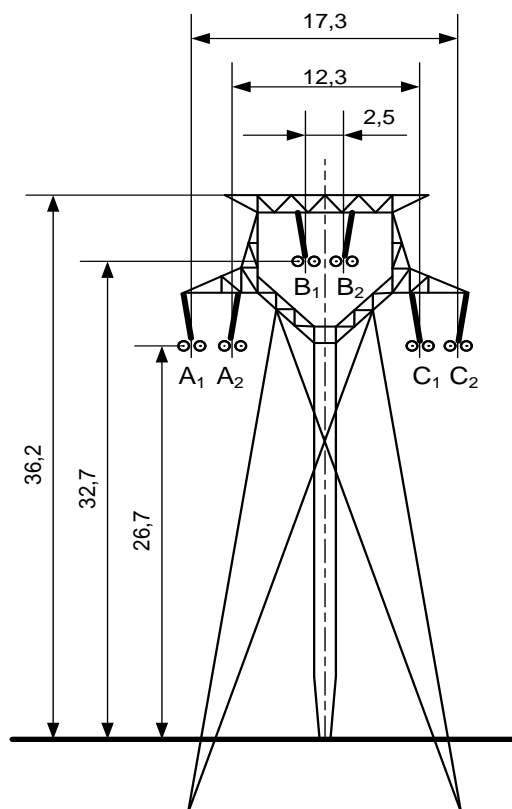


Рис. 3. Двухцепная УСВЛ 220 кВ на опорах типа «Чайка»

Таблица 1

Технические параметры ВЛ нового поколения

Тип ВЛ		Одноцепная компактная	Двухцепная компактная	Двухцепная УСВЛ	
Число цепей		1	2	2	
Марка провода		АС-300/66			
Число проводов в фазе		2			
Угол сдвига фаз θ°		0°	120°	120°	180°
Удельные параметры линии	r_0 , Ом/км	0,511	0,049	0,049	0,049
	x_0 , Ом/км	0,236	0,262	0,248	0,248
	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	4,66	4,32	4,44	4,44
Волновое сопротивление, Ом		226,4	123,7	118,9	107,8
Натуральная мощность линии в целом, МВт		277,9	509,0	529,0	583,0
Удельная зарядная мощность, МВАр/км		0,296	0,548	0,564	0,621
Ширина коридора L_k , м		43,0	60,7	57,3	
Суммарное сечение алюминиевой части проводов S_{Al} , мм ²		1731	3462		
$P_{нат}/L_k$, МВт/м		6,46	8,39	9,23	10,17
$P_{нат}/S_{Al}$, МВт/мм ²		0,161	0,147	0,153	0,168
Базовые показатели стоимости, тыс. руб./км		1650	2613,6	2578,8	
Стоимость одного километра ВЛ в расчете на 1 МВт натуральной мощности, тыс.руб./МВт		5,93	5,13	4,87	4,42

Основными электрическими параметрами ВЛ-220 кВ нового поколения, как и ВЛ традиционного типа, являются: удельное активное сопротивление, удельное индуктивное сопротивление, удельная емкостная проводимость. Указанные параметры

определяют величину натуральной мощности, которой оказалось удобно пользоваться для сопоставления различных вариантов и типов ВЛ на стадии выбора предпроектных решений.

В таблице 1 приведены упомянутые параметры и характеристики рассматриваемых вариантов ВЛ-220 кВ, а также дополнительные характеристики, которые могут приниматься во внимание при выборе вариантов ВЛ, такие, как отношение величины натуральной мощности к ширине земельной полосы отчуждения, к суммарному сечению проводов, а также удельные стоимостные показатели 1 км ВЛ и отношения удельных капитальных вложений на единицу величины натуральной мощности (тыс. руб./МВт).

На рис. 4. представлены результаты сопоставлений ВЛ-220 кВ нового поколения и ВЛ-220 кВ традиционной конструкции по величине натуральной мощности.

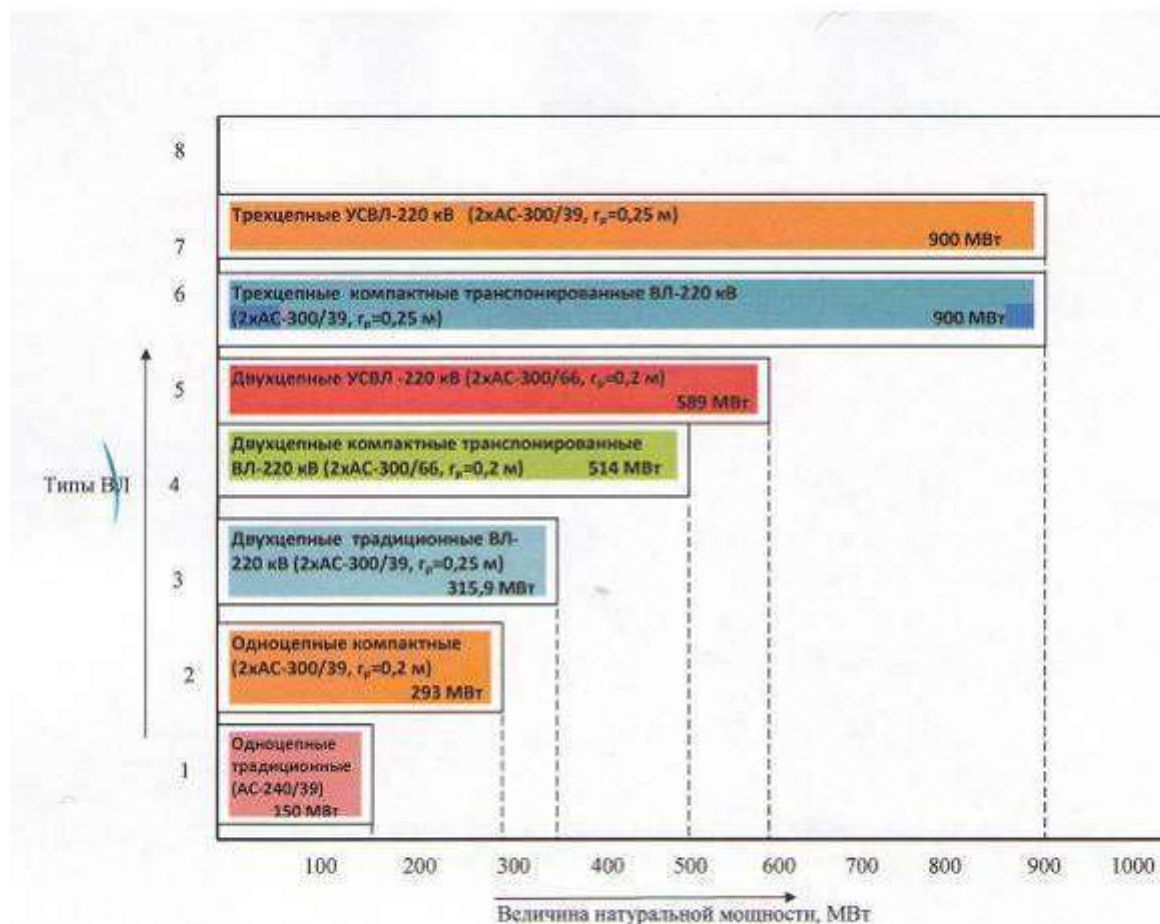


Рис. 4. Величины натуральной мощности ВЛ – 220 кВ различных типов

Приведенные данные показывают, что при принятых сопоставимых условиях ВЛ-220 кВ нового поколения по величине натуральной мощности превосходят аналогичные ВЛ-220 кВ (одноцепные и двухцепные традиционного типа) в 1,5-2 раза.

Расчетные данные свидетельствуют и о том, что двухцепные компактные ВЛ-220 кВ и двухцепные УСВЛ-220 кВ и, особенно трехцепные УСВЛ-220 кВ, по величине натуральной мощности приближаются к одноцепным трехфазным ВЛ-500 кВ обычного типа. Проведенные предварительные технико-экономические сопоставления показали, что удельные капитальные вложения, необходимые для двухцепных и трехцепных УСВЛ, не превышают величину удельной стоимости одноцепных ВЛ-500 кВ традиционной конструкции. При этом, за счет разности стоимости подстанций,

выполненных на класс напряжения 220 кВ и 500 кВ, может быть получена значительная экономия затрат, если отдать предпочтение выбору вариантов ВЛ-220 кВ нового поколения.

К настоящему времени отработаны методики и программы расчетов электрических параметров ВЛ нового поколения, их технических и технико-экономических показателей, а также экологических параметров, таких, как радиопомехи, акустические шумы, уровни напряженности электрического и магнитного поля в пространстве, окружающем ВЛ.

Представленные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения удовлетворяют всем установленным нормативам и требованиям действующих правил устройства электроустановок (ПУЭ).

4. Методические подходы к выбору средств регулирования для ВЛ нового поколения

Неотъемлемыми элементами электропередач нового поколения являются устройства регулирования, относящиеся к категории FACTS. Классификация устройств FACTS представлена на рис. 5, их общие технические характеристики и функциональные возможности даны в таблице 2, а ориентировочные стоимостные показатели – на рис. 6 (на период 2009г.).

Выбор типов устройств FACTS для ВЛ 220 кВ определяется той ролью, которая возлагается на ВЛ данного класса напряжения. ВЛ 220 кВ нового поколения могут выполнять различные функции в энергосистемах:

- служить в качестве межсистемных связей для осуществления обменных потоков мощности между автономно работающими энергосистемами;
- быть внутрисистемными линиями и осуществлять передачу заданной мощности между узлами сложно замкнутой системы;
- применяться для выдачи мощности электростанций в энергосистему;
- использоваться в качестве радиальных ВЛ для электроснабжения отдаленных крупных потребителей;
- выполнять роль глубоких вводов в крупных городах и густо населенных жилых районах.

В каждом из рассмотренных случаев применения ВЛ нового поколения необходимо учитывать конкретные требования к электропередачам того или иного класса напряжения и существующие общие технические ограничения (ограничения по допустимым отклонениям напряжения, ограничения по короне, акустическим шумам и радиопомехам, по уровню напряженности поля под ВЛ вблизи поверхности земли и др.).

Выбор тех или иных устройств FACTS, их мощности и характеристик в каждом из перечисленных основных пяти случаев применения ВЛ нового поколения определяется с учетом конкретных требований:

Например, в первом случае - применение ВЛ нового поколения в качестве межсистемных связей устройства FACTS должно обеспечить:

- увеличение пропускной способности линии до заданного уровня, если естественная пропускная способность недостаточна, что может быть достигнуто с помощью следующих типов устройств FACTS:

- УУПК – управляемые устройства продольной компенсации;
- БСК – батареи статических конденсаторов;
- СК – синхронные компенсаторы;
- СТК – статические компенсаторы;

СТАТКОМ – статические компенсаторы реактивной мощности;
 ФРТ – фазорегулирующие устройства;
 - регулирование заданного уровня напряжения в примыкающих к линии узлах, достигаемое с помощью:

СТК, СТАТКОМ, СК - при необходимости повышения напряжения в узлах; при необходимости ограничения напряжения требуется установка шунтирующих реакторов (ШР), управляемых шунтирующих реакторов (УШР), СК, СТАТКОМ, реакторных групп (ВРГ).

Во втором случае - применение ВЛ 220 кВ в качестве межсистемных связей отличается от первого тем, что, помимо устройств, указанных для первого варианта, необходима установка:

- ФРТ – фазорегулирующих устройств;
- ОРПМ – объединенных регуляторов потока мощности;
- ВПТ – вставок постоянного тока;
- УПК-ФРТ – комбинированных устройств УПК и ФРТ;
- АСК – асинхронизированных компенсаторов.

В остальных случаях применения ВЛ нового поколения необходима соответствующая комбинация устройств FACTS, перечисленных выше.

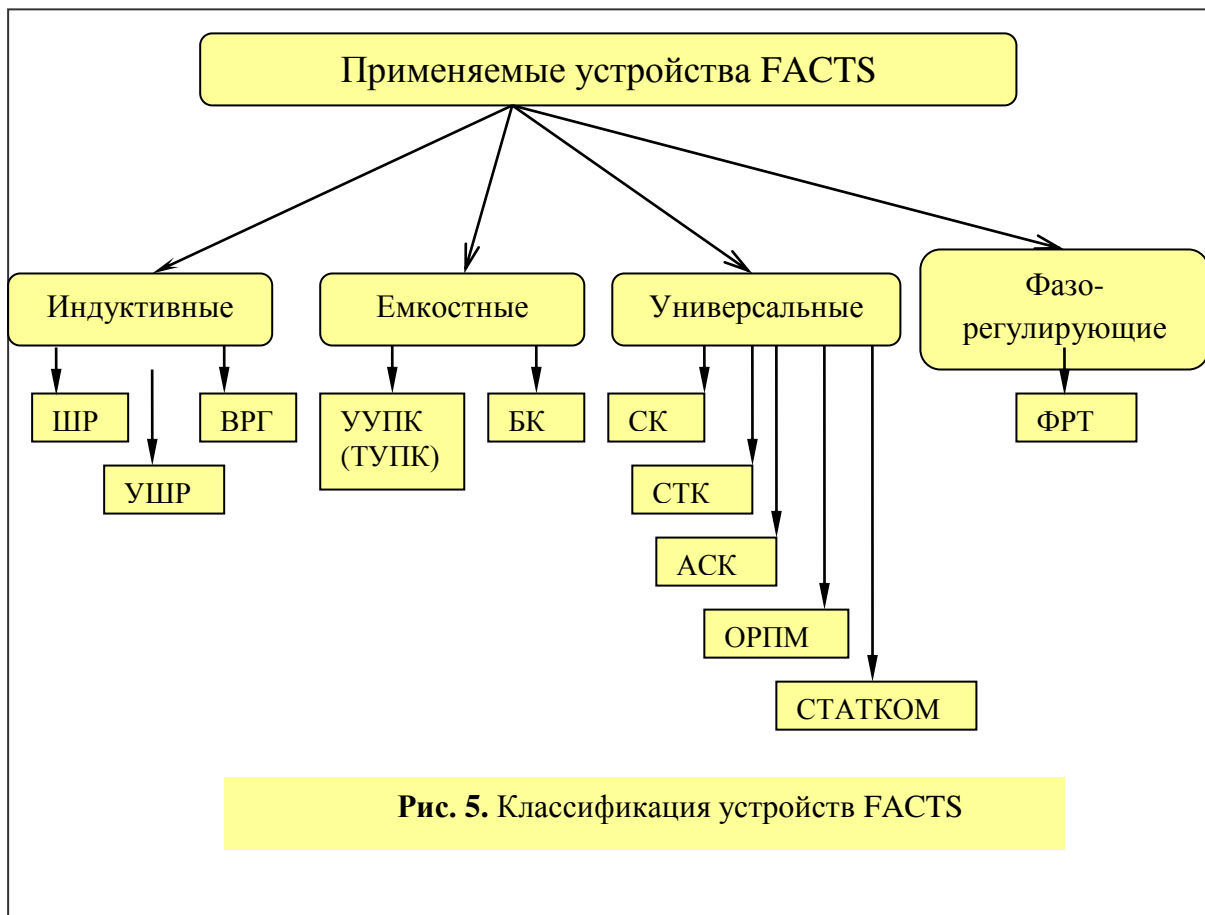


Таблица 2

Технические характеристики и области применения устройств FACTS различных типов

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
1	Шунтирующий реактор (ШР)	Нерегулируемые масляные шунтирующие реакторы	Применяется для ступенчатого регулирования реактивной мощности, снижения уровней коммутационных перенапряжений, гашения дуги в паузе ОАПВ
2	Управляемый шунтирующий реактор с подмагничиванием постоянным током (УШР)	Выполняется на основе специального трансформатора с масляным охлаждением, в составе УШР на общем сердечнике содержится сетевая обмотка реактора, компенсирующая обмотка, обмотка управления, и вне бака с УШР - тиристорное выпрямительное устройство и фильтр. Быстродействие УШР определяется степенью форсировки и расфорсировки подмагничивания постоянным током и мощности выпрямительного устройства	УШР предназначены для плавного регулирования напряжения (реактивной мощности) при мощностях, протекающих по линиям электропередачи, не превышающих натуральную, УШР могут устанавливаться как на линиях электропередачи (линейные УШР), так и на шинах подстанции, не предназначены для обеспечения требований по устойчивости. Предпочтительная область применения – распределительные сети. Возможна комбинация, когда параллельно УШР подключается конденсаторная батарея (БСК).
3	Реакторные группы, коммутируемые выключатели (ВРГ)	Ступенчато-регулируемые реакторы, подключаемые к третичной обмотке автотрансформаторов (трансформаторов) посредством вакуумных выключателей с числом коммутаций 5000 – 10000, временем включения/отключения выключателя $\Delta t = 0,02 - 0,12c$	Применяются для компенсации зарядной мощности линий электропередачи и узлах нагрузки для поддержания напряжения в требуемых пределах в установившихся режимах. ВРГ предназначены для ступенчатого регулирования напряжения (реактивной мощности) при мощностях, протекающих по линиям электропередачи, не превышающих натуральную. Предпочтительная область применения - распределительные сети. Возможны комбинации, когда параллельно ВРГ подключаются конденсаторные батареи (БСК)
4	Синхронные компенсаторы (СК)	Является комплексом, состоящим из синхронных машин и возбудителя. Имеется модификация СК с бесщеточным возбуждением. СК способны обеспечить регулирование реактивной мощности в пределах 100% выдачи и 30-50% потребления. Обладают высокой перегрузочной способностью (2-3 кратная перегрузка по току в течение 30 с)	Применяется для регулирования напряжения и повышения пределов статической и динамической устойчивости, увеличения пропускной способности электропередачи. Применим в любых электрических сетях
5	Статические тиристорные компенсаторы (СТК)	В составе СТК реактор с воздушным охлаждением и тиристорный вентиль с воздушным или водяным охлаждением, образующие тиристорные группы (ТРГ) с	Обеспечивают регулирование напряжения (реактивной мощности) при мощностях в линиях электропередачи как ниже, так и

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
		<p>плавным регулированием угла зажигания тиристоров. Параллельно с ТРГ подключена конденсаторная батарея (КБ), а иногда и фильтро-компенсирующие цепи (ФКУ). Подключается к сети ВН через третичную обмотку НН автотрансформатора или через блочный повышающий трансформатор. Минимальная величина постоянной времени регулирования реактивной мощности составляет</p> $\tau_{p\Sigma} = 0,01 - 0,02c$	<p>выше натуральной. Предназначены также для повышения устойчивости и пределов передаваемой по линиям электропередачи мощности. Предпочтительная область применения: распределительные и магистральные сети, межсистемные связи для целей глубокого регулирования реактивной мощности и обеспечения устойчивости. Не эффективны в «слабых» сетях</p>
6.	Статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения (СТАТКОМ)	<p>Состоит из преобразователя напряжения, выполненного на силовых транзисторах, обеспечивающего генерацию и потребление реактивной мощности в диапазоне $\pm 100\%$ установленной мощности устройства, без дополнительных силовых реакторов и конденсаторных батарей. Подключение к сети ВН через третичную обмотку НН автотрансформатора или через отдельный повышающий трансформатор НН/ВН</p>	<p>Применяется для динамической стабилизации напряжения, увеличения пропускной способности электропередачи, уменьшения колебаний напряжения, повышения устойчивости при электромеханических переходных процессах, улучшения демпфирования колебаний в энергосистеме. Применяется в любых электрических сетях, особенно эффективен в «слабых» сетях</p>
7.	Фазоповоротное устройство (ФПУ)	<p>Устройство, переключающее посредством выключателей или тиристорных ключей отпайки трансформатора, обеспечивающее регулирование фазы входного напряжения по отношению к выходному</p>	<p>Применяется для оптимизации в установившихся режимах потоков мощности по параллельным ЛЭП, повышения пропускной способности. Может применяться для повышения статической и динамической устойчивости энергосистем.</p>
8.	Асинхронизированные компенсаторы (АСК)	<p>Является комплексом, состоящим из асинхронизированных электрических машин переменного тока и статических преобразователей частоты. Содержит на роторе две и более обмоток возбуждения, благодаря чему обеспечивается возможность регулирования реактивной мощности в пределах $\pm 100\%$ колебания. Обеспечивается также возможность регулирования не только величины, но и фазы вектора напряжения в энергосистеме. АСК обладают высокой перегрузочной способностью (двух – трех кратная перегрузка) по току в течение 300 сек. Возможна работа с переменной частотой вращения с маховиком на валу с целью повышения пределов динамических характеристик энергосистем</p>	<p>Применяются для регулирования напряжения и повышения пределов статической и динамической устойчивости, увеличения пропускной способности электропередачи, улучшения демпфирования энергосистемы. Применяются в любых электрических сетях, особенно эффективны в «слабых» сетях</p>
9.	Батарея статических конденсаторов	<p>Устройства емкостного типа для параллельного подключения к линиям</p>	<p>Для увеличения пропускной способности линий электропередачи сверх натуральной мощности, и</p>

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
	(БСК)		регулирования уровня напряжения
10.	Управляемые устройства продольной компенсации) (УУПК, ТУПК)	Тиристорно-управляемые устройства продольной компенсации	Емкостная продольная компенсация для увеличения пропускной способности ВЛ сверх значения натуральной мощности, регулирования параметров режимов и повышения динамической устойчивости
11.	Объединенные регуляторы потока мощности (ОРПМ)	Устройства, обеспечивающие изменение фазы напряжения на выходе по отношению к входу	Позволяют осуществлять регулирование величины передаваемой по ВЛ мощности

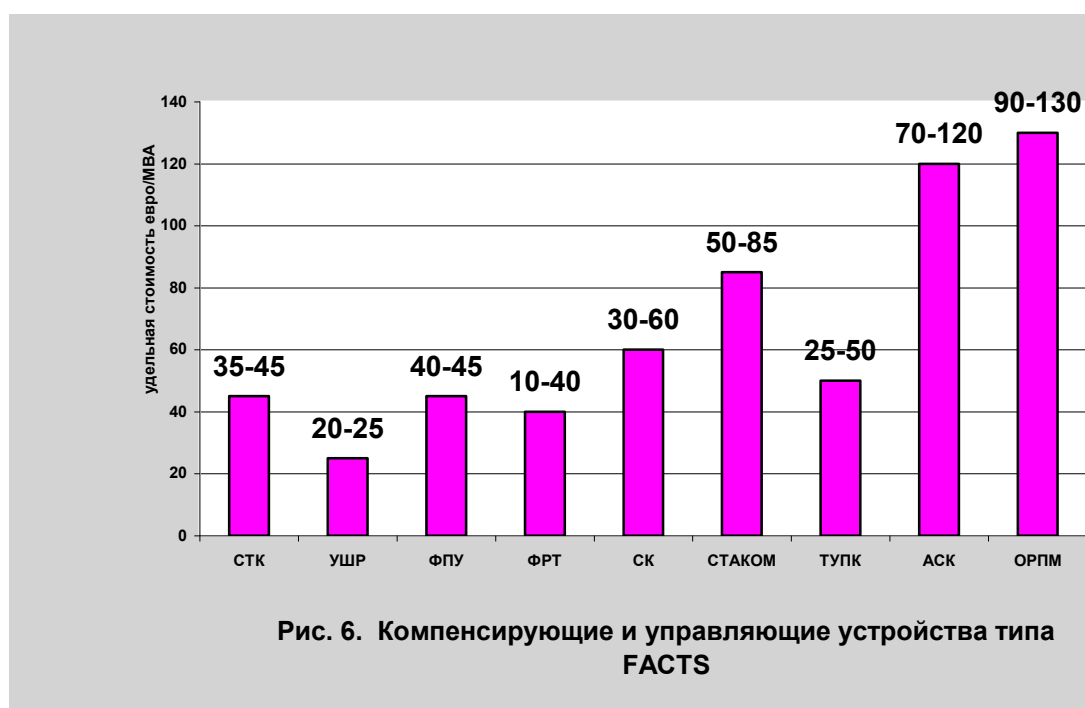


Рис. 6. Компенсирующие и управляющие устройства типа FACTS

5. Определение эффективности применения устройств типа FACTS для повышения пропускной способности ВЛ нового поколения, сверх и естественной пропускной способности.

Линии электропередачи нового поколения (компактные одноцепные, двухцепные, многоцепные, а также УСВЛ) обеспечивают при сопоставимых условиях существенно большую по сравнению с ВЛ обычного типа пропускную способность, благодаря улучшенным параметрам и увеличенной натуральной мощности линии.

Естественно полагать, что применение устройств типа FACTS на ВЛ нового поколения для дальнейшего повышения пропускной способности сверх их естественного значения, будет более эффективным, чем на ВЛ традиционных типов. Доказательством этого может служить, например, такой критерий, как коэффициент эффективности применения устройств FACTS емкостного типа для увеличения пропускной способности ВЛ различного исполнения, выраженный в виде показателя:

$$K_{K\acute{O}}^{\tilde{N}} = \frac{D_{\Sigma} - D_{I\Delta\acute{O}}}{Q_{K\acute{O}}^{\tilde{N}}},$$

где: P_{Σ} – суммарная величина передаваемой по линии мощности, достигнутая с участием устройств FACTS;

$P_{нат}$ – величина натуральной мощности линии;

$Q_{K\acute{O}}^{\tilde{N}}$ - реактивная мощность компенсирующих устройств FACTS емкостного типа.

Применяя изложенный подход и используя расчетные данные режимов одной из энергосистем, удалось оценить эффективность применения устройств типа FACTS на примере ВЛ-220 кВ различных типов для достижения одного и того же эффекта повышения их пропускной способности.

Данные для анализа эффективности применения устройств типа FACTS сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Сопоставительные данные расчета эффективности применения устройств FACTS емкостного типа для увеличения передаваемой мощности на ВЛ-220 кВ различных типов

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Типы ВЛ-220 кВ				
			Двух-цепные ВЛ-220 обычного типа	Двух-цепные компактные ВЛ-220	Двух-цепные УСВЛ-220	Трех-цепные компактные ВЛ-220	Трех-цепные компактные ВЛ-220
1.	Протяженность ВЛ	км	427	427	427	427	427
2	Количество цепей		2	2	2	3	3
3	Провода в фазах		1хАС-300	2хАС-300	2хАС-300	2хАС-300	2хАС-300
4	Величина натуральной мощности линии при U=220 кВ	МВт	240	391	448	563	563
5	Передаваемая мощность	МВт	570	570	570	570	870
6	Превышение передаваемой мощности по отношению к натуральной мощности ВЛ	МВт	330	179	122	0	307
7	Мощность компенсирующих устройств FACTS емкостного типа	МВАр	302	138	101	0	198
8	Коэффициент эффективности применения устройств FACTS емкостного типа $K_{ку}^c$	МВт/МВАр (о.е)	1,09	1,29	1,2	-	1,55

Данные, приведенные в таблице 3, показывают, что при принятых расчетных условиях коэффициент эффективности применения устройств типа FACTS для обычных ВЛ составляет 1,09 МВт/МВАр, а для ВЛ нового поколения (1,2 - 1,5) МВт/МВАр.

Для повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи нового поколения, сверх естественного значения, наиболее эффективно применение устройств FACTS емкостного типа: УУПК, БСК, СК, СТК, СТАТКОМ, АСК.

6. Технические предложения по применению управляемых линий электропередачи на базе ВЛ нового поколения

Выполненные расчеты, сопоставления полученных результатов и их анализ позволяют сформулировать ряд основных технических предложений по применению ВЛ нового поколения.

Прежде всего надо отметить, что при принятии решений о применении ВЛ новых типов следует принимать во внимание то, что они обладают повышенной пропускной способностью, благодаря чему область их целесообразного применения отличается от области применения ВЛ традиционных конструкций. Основным показателем, характеризующим сопоставляемые типы ВЛ, является величина их натуральной мощности. В качестве других, не менее важных, следует также считать такие показатели, как удельные капитальные вложения на единицу величины передаваемой мощности, удельную площадь и ширину полосы отчуждения, а также экологические параметры, и, в первую очередь, акустические шумы, радиопомехи, уровни напряженности электрического поля под ВЛ вблизи поверхности земли.

В зависимости от значений параметров ВЛ нового поколения, конкретных расчетных и режимных условий определяются требования и к устройствам FACTS, их типу и мощности.

Технические требования к управляемым ВЛ нового поколения, созданным на базе ВЛ повышенной пропускной способности, определяются той ролью, которая возлагается на ВЛ, а также расчетными условиями и ограничениями.

В зависимости от локальных или системных требований к электропередачам должен производиться и выбор устройств FACTS с учетом их технических и технологических возможностей.

При сопоставлениях и обосновании вариантов целесообразно рассматривать следующие типы ВЛ переменного тока:

- обычные трехфазные, одноцепные ВЛ (ООВЛ);
- обычные двухцепные ВЛ (ОДВЛ);
- одноцепные компактные трехфазные ВЛ (ОКВЛ);
- двухцепные компактные ВЛ с транспозицией фаз цепей, обеспечивающей между любыми соседними фазами угловой сдвиг векторов напряжений $\theta=120^\circ$ (ДКВЛ);
- двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ), работающие в режимах при различных угловых сдвигах трехфазных систем векторов напряжений цепей: при фиксированных значениях $\theta=0^\circ$, $\theta=120^\circ$, $\theta=180^\circ$; или регулируемых - $\theta=0^\circ \div 120^\circ$; $\theta=0^\circ \div 180^\circ$.
- трехцепные компактные ВЛ с транспозицией фаз цепей, обеспечивающей между любыми соседними фазами угловой сдвиг напряжений $\theta=120^\circ$ (ТКВЛ), а также трехцепные УСВЛ при $\theta=0^\circ \div 120^\circ$.

Для обеспечения требуемых параметров режимов указанных ВЛ при различных рассмотренных условиях необходимо применение в том или ином сочетании устройств FACTS, обладающих свойствами емкостной или индуктивной компенсации. Под емкостной компенсацией подразумевается возможность устройств FACTS генерировать реактивную мощность с целью покрытия недостающей зарядной мощности линии для компенсации ее потерь в линии при передаче по ней активной

мощности. Под индуктивной компенсацией понимается возможность устройств FACTS потреблять избыточную зарядную мощность линии для поддержания заданных уровней напряжений в узлах энергосистемы. Проведенные исследования позволяют на данном этапе сформулировать технические предложения по созданию и применению ВЛ различных типов и выбору для них устройств FACTS, которые по своим функциональным возможностям наиболее эффективно могут быть применены в сочетании с ВЛ повышенной пропускной способности. Устройства FACTS в своем большинстве могут быть применены в электроэнергетических системах в сочетании с ВЛ любых типов. Все устройства FACTS, носящие емкостной характер, обеспечивают дополнительную генерацию реактивной мощности и соответствующее повышение пропускной способности ВЛ сверх величины их натуральной мощности.

Применение устройств FACTS индуктивного типа, как правило, обусловлено необходимостью компенсации избыточной зарядной мощности, с целью поддержания заданных уровней напряжения при передаче по ВЛ активной мощности, величина которой ниже, чем значение натуральной мощности. Применение устройств FACTS, обладающих как емкостными, так и индуктивными техническими свойствами, должно определяться на основе конкретных расчетов режимных характеристик электропередачи, а также с учетом их стоимости. Устройства FACTS, обеспечивающие регулирование угла сдвига между системами векторов напряжений на входе и выходе, имеют свою область применения, в частности, для управления потоками мощности в замкнутых контурах энергосистемы, а также для регулирования режимов УСВЛ.

Выбор типов ВЛ в сочетании с устройствами FACTS основывается на расчетах параметров, режимных и стоимостных показателей в соответствии с заданными исходными данными и намеченной функциональной ролью электропередач.

На основании проведенного анализа функциональных признаков были сформулированы области применения ВЛ нового поколения:

1. Применение в качестве межсистемных транспортных связей, в том числе - для осуществления обменных перетоков мощности между автономно работающими энергосистемами или между узлами сложно замкнутой энергосистемы.
2. Применение в качестве внутрисистемных распределительных ВЛ.
3. Использование для выдачи мощности от удаленных электростанций. При этом эффективной может оказаться замена существующих ВЛ традиционной конструкции на ВЛ нового поколения при увеличении генерируемых мощностей.
4. Применение для электроснабжения удаленных крупных потребителей, в том числе замена существующих ВЛ традиционной конструкции на ВЛ нового поколения при увеличении потребляемой мощности и невозможности строительства дополнительных ВЛ.
5. Осуществление с помощью глубоких вводов в крупных городах и населенных пунктах.

Каждая из указанных областей применения ВЛ нового поколения различных классов напряжения имеет свои отличительные особенности, а также диапазоны передаваемых мощностей. ВЛ нового поколения во всех случаях их применения должны отвечать общим требованиям:

- удовлетворять всем нормативам по уровням напряжения вдоль ВЛ и в узлах примыкания;
- не превышать нормативные ограничения по экологическим параметрам;
- обеспечивать заданные величины пропускной способности при минимальных потерях мощности;
- обеспечивать заданные показатели надежности работы.

Специальными требованиями к ВЛ нового поколения, вытекающими из особенностей указанных областей применения ВЛ-220 кВ, могут быть:

- обеспечение заданного запаса статической и динамической устойчивости электропередачи (области 1, 3);
- создание возможностей регулирования величины передаваемой мощности, включая и изменение направления передачи мощности (области 1, 2);
- изъятие минимально возможных земельных полос отчуждения под строительство ВЛ (области 4, 5).

Указанным требованиям можно удовлетворить путем выбора тех или иных типов ВЛ нового поколения и соответствующих средств регулирования типа FACTS.

Рекомендуемыми областями применения ВЛ нового поколения напряжением 220 кВ с учетом требований по пропускной способности могут служить данные по их параметрам и величине натуральной мощности. В таблице 4 приведены величины натуральной мощности для различных типов ВЛ-220.

Таблица 4

Значение натуральной мощности ВЛ-220 кВ различных типов (при $U_{расч.}=252$ кВ)

№ п/п	Наименование типов ВЛ-220 кВ	Размерность	Величина натуральной мощности, МВт	
			на одну цепь	на линию в целом
1.	Одноцепные ВЛ-220 кВ традиционной конструкции (провода АС-330/66)	МВт	155,1	155,1
2.	Компактная одноцепная ВЛ-220 кВ (провода АС-300/66)	МВт	277,9	277,9
3.	Двухцепная ВЛ-220 кВ традиционной конструкции (провода АС-300/66)	МВт	152,3	304,6
4.	Двухцепная компактная транспонированная ВЛ-220 кВ (провода 2хАС-300/66)	МВт	254,5	509,0
5.	Двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ-220 кВ (УСВЛ-220) (провода 2хАС-300/69): при $\theta=120^\circ$ при $\theta=180^\circ$	МВт	264,5	529
		МВт	291,5	583
6.	Трехцепные компактные транспонированные ВЛ-220 кВ (провода 2хАС-300/39)	МВт	300	900
7.	Трехцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ-220 кВ (трехцепные УСВЛ-220 кВ с проводами 2хАС-300/39): при $\theta=120^\circ$	МВт	300	900

Для увеличения пропускной способности приведенных типов ВЛ-220 кВ сверх величины натуральной мощности необходимо применение устройств FACTS емкостного типа. Расчетная мощность таких устройств может быть определена с учетом полученных результатов, а именно - каждый МВАр устройств FACTS емкостного типа обеспечивает увеличение пропускной способности ВЛ-220 кВ:

- двухцепных ВЛ обычной конструкции – на 1,09 МВт/ МВАр;
- двухцепных компактных ВЛ и двухцепных УСВЛ – на 1,2÷1,3 МВт/ МВАр;
- трехцепных компактных ВЛ и трехцепных УСВЛ – на 1,3÷1,5 МВт МВАр.

Для регулирования уровня напряжения ВЛ-220 кВ при изменении величины передаваемой мощности от величины максимальной до минимальной, включая режим холостого хода, на ВЛ-220 кВ рассматриваемых типов должны быть установлены устройства FACTS индуктивного характера.

На УСВЛ-220 кВ целесообразно устанавливать, кроме указанных устройств FACTS, фазоповоротные устройства (ФПУ), что позволяет в комплексе осуществлять управление параметрами режимов электропередачи, а также выполнять управление потоками мощности в замкнутых контурах энергосистемы.

Заключение

1. Увеличение пропускной способности электрической сети за счет применения ВЛ нового поколения в сочетании с устройствами FACTS оказывается одним из наиболее экономичных средств развития электрических сетей, поскольку позволяет снизить затраты на передачу мощности и энергии за счет уменьшения удельных затрат на строительство ВЛ и более эффективного использования устройств регулирования. При этом надо учитывать дополнительный эффект за счет повышения эффективности использования проводникового материала линии и сокращения площади земельных угодий, отчуждаемых под ВЛ.

2. В качестве ВЛ нового типа рассмотрены следующие виды ВЛ:

- компактные трехфазные одноцепные ВЛ (ОКВЛ);
- компактные трехфазные двухцепные ВЛ (ДКВЛ);
- управляемые двухцепные и многоцепные самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ);
- комбинированные многоцепные управляемые ВЛ, включающие компактные ВЛ и УСВЛ.

3. Применение ВЛ нового поколения наиболее эффективно совместно с установкой современных средств регулирующих устройств типа FACTS, придающих им свойства кибернетически управляемых электропередач (гибких электропередач типа Smart grid). Использование регулирующих устройств совместно с ВЛ нового поколения повышенной пропускной способности отличается большей эффективностью, чем их применение на ВЛ традиционных конструкций.

4. Рассмотренные конкретные варианты ВЛ нового поколения напряжением 220 кВ с проводами в фазах 2хАС-300/66 характеризуются следующими основными показателями:

Одноцепные компактные ВЛ-220 кВ:

- величиной натуральной мощности ($P_{нат}$) 277 МВт;
- отношением натуральной мощности к ширине коридора ($P_{нат}/L_k$) 6,46 МВт/м;
- удельной стоимостью 1 км ВЛ в расчете на 1 МВт натуральной мощности ($K_{уд}$) 5,93 тыс.руб./км·МВт;

Двухцепные компактные ВЛ-220 кВ:

$P_{нат}=509$ МВт; $P_{нат}/L_k=8,39$ МВт/м; $K_{уд}=5,13$ тыс.руб./км·МВт;

Двухцепные управляемые (УСВЛ):

$P_{нат}=(209\div 583)$ МВт, $P_{нат}/L_k=(9,2\div 10,1)$ МВт/м; $K_{уд}=(4,8\div 4,4)$ тыс.руб./км·МВт;

Трехцепные управляемые (УСВЛ): $P_{нат}=900$ МВт.

5. По величине пропускной способности двухцепные и трехцепные компактные ВЛ и УСВЛ напряжением 220 кВ приближаются к одноцепным ВЛ-500 кВ традиционной конструкции, а поэтому могут в ряде случаев рассматриваться по отношению к ним в качестве альтернативных вариантов. Предварительные расчеты показали, что удельная стоимость одноцепной ВЛ-500 кВ и двухцепной (трехцепной) УСВЛ-220 кВ в расчете на 1 МВт/км натуральной мощности практически одинаковы.

При замене варианта одноцепной ВЛ-500 кВ традиционной конструкции двухцепной (или трехцепной) УСВЛ-220 кВ может быть достигнут значительный

экономический выигрыш за счет того, что стоимость подстанции 220 кВ более чем в 1,5 раза ниже, чем стоимость подстанции напряжением 500 кВ.

6. Приведенные методические подходы позволяют осуществлять выбор и обоснование применения электропередач нового поколения и средств регулирования на стадии проектных решений с учетом конкретных требований и расчетных условий.

Литература

1. Электропередача переменного тока/ В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин. А.с. 566288 (СССР). / Заявл. 21.03.74. № 2006496. Оpubл. В Б.И., 1977, № 27.

2. Электропередача переменного тока / Постолатий В.М., Веников В.А., Астахов Ю.Н., Чалый Г.В., Калинин Л.П. Патент США № 4001672, 1977; Патент ГДР № 116990, 1976; Патент Франции № 7508749, 1977; Патент Англии № 1488442, 1978; Патент Швеции № 75032268, 1978; Патент Канады № 10380229, 1978; Патент ФРГ № 2511928, 1979; Патент Японии № 1096176, 1982.

3. Управляемые линии электропередачи / Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый. Под ред. В.А. Веникова. – Кишинев: Штиинца, 1984. – 296 с.

4. Александров Г.Н., Евдокунин Г.А., Подпоркин Г.В. Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции. – Электричество, 1982, № 4, с. 10-17.

5. Ю.П. Рыжов. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с., ил.

6. В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. Электричество, 2010 г., №2, стр. 7-14.

7. В.В. Дорофеев. Развитие электроэнергетической системы России с использованием принципов активно – адаптивной сети. Доклады 6-й Международной конференции ТРАВЭК, Москва, 2010.

Сведения об авторах:

Постолатий Виталий Михайлович, д.х.т.н, академик АН Молдовы, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические станции, сети и системы и управление ими, управляемые, гибкие, компактные электропередачи, современные средства регулирования, энергетическая безопасность, общие вопросы энергетики.

Быкова Елена Витальевна, д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, энергетическая безопасность, моделирование процессов в энергетике.

Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, моделирование процессов в энергетике.

Шакарян Юрий Гевондович, заместитель генерального директора НТЦ «Электроэнергетика» (ВНИИЭ), г. Москва, д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: электрические станции, сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства и системы регулирования, сверхпроводящие кабельные линии электропередачи, электропривод, моделирование процессов в энергетике.

Тимашова Лариса Владимировна, начальник центра электротехнического оборудования НТЦ «Электроэнергетика» (ВНИИЭ), г. Москва. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства регулирования, электротехническое оборудование, климатология, проблемы экологии.

Карева Светлана Николаевна, инженер Центра электротехнического оборудования НТЦ «Электроэнергетика», (ВНИИЭ), г. Москва. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства регулирования, электротехническое оборудование, техника высоких напряжений.