

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ

АВТОРЫ:

ШАКАРЯН Ю.Г.,
Д.Т.Н., ПРОФ.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ТИМАШОВА Л.В.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

КАРЕВА С.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ПОСТОЛАТИЙ В.М.,
Д.Т.Н.,
ЧЛЕН-КОРП.
АН РЕСПУБЛИКИ
МОЛДОВА

Достоинством компактных управляемых ВЛ является то, что они позволяют увеличить пропускную способность линий электропередачи переменного тока. Кроме того, при оснащении современными устройствами управления компактные управляемые ВЛ позволяют

обеспечить управление величиной и направлением потока мощности в соответствии с режимными требованиями энергосистемы, снижение влияние на окружающую среду благодаря сокращению полосы отчуждения и уменьшению напряженности поля в окружающем пространстве.

Ключевые слова: линии электропередачи переменного тока, сближение фаз, регулирование режимных параметров, пропускная способность, компактные управляемые ВЛ.



Растущее потребление электрической энергии требует увеличения пропускной способности и управляемости современных линий электропередачи

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется интенсивным поиском новых технологий для дальнейшего повышения эффективности передачи электроэнергии, надежности электроснабжения и улучшения экологических показателей.

Действующие в настоящее время воздушные линии электропередачи традиционных конструкций по целому ряду показателей не в полной мере отвечают современным требованиям, главным образом из-за недостаточной пропускной способности, несовершенства систем управления и ощутимого негативного экологического воздействия.

Одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы является применение компактных воздушных линий электропередачи, в том числе оснащенных устройствами управления (компактных управляемых ВЛ) [1-10].

Компактные управляемые ВЛ могут быть созданы в одноцепном, двухцепном и многоцепном исполнении. Применение одноцепных компактных ВЛ позволяет для данного класса напряжения при использовании одной и той же марки провода достичь большей пропускной способности, а использование двухцепных и многоцепных – обеспечить и управление эквивалентными параметрами линии.

Компактные ВЛ предусматривают создание конфигураций расположения фаз с минимально допустимыми расстояниями между ними, выбор оптимальной конструкции расщепления фаз, применение опор, позволяющих создать конструкции линии с минимально допустимыми расстояниями между фазами, использование междуфазных изоляционных элементов,

устанавливаемых в пролетах для обеспечения механической устойчивости линии при воздействии неблагоприятных климатических факторов. За счет сближения фаз и создания компактных конфигураций их расположения обеспечивается улучшение электрических параметров линий и, как следствие, повышение пропускной способности ВЛ.

При создании двухцепных компактных ВЛ может быть осуществлено сближение фаз разных цепей. При этом расстояние между сближенными фазами разных цепей должно приниматься не менее минимально допустимого значения при наибольших рабочих напряжениях, коммутационных и грозовых перенапряжениях в соответствии с ПУЭ-7.

В компактных управляемых ВЛ предусматривается регулирование параметров электрического и магнитного полей, благодаря чему обеспечивается управление эквивалентными параметрами ВЛ и пропускной способностью.

Сближение фаз разных цепей усиливает взаимное электромагнитное влияние цепей, которое зависит от углового сдвига (θ) между приложенными векторами напряжений одной цепи по отношению к другой. Этот эффект используется для изменения и регулирования эквивалентных параметров каждой отдельной цепи и линии в целом.

Значения угловых сдвигов между системами векторов напряжений цепей могут быть фиксированными (0° , 120° , 180°) или регулируемые. В первом случае фиксированный угловой сдвиг достигается путем использования соответствующих схем присоединения фаз к шинам подстанций (для 0° и 120°) и применения трансформаторов с разными груп-

ИНФОРМАЦИЯ

ИСТОРИЯ: ПЕРВЫЕ ОПОРЫ

Первые опоры ЛЭП, появившиеся в конце XIX века, были выполнены из дерева. Деревянные опоры до сих пор применяются там, где их использование экономически целесообразно. В 1904-06 годах в США было сооружено несколько линий с металлическими опорами, закупленными у компании Aeromotor Windmill, производившей ветряные мельницы.

Конструкция американских опор включала в себя широкое основание, составленное из стержней сравнительно малых сечений (так называемые широкобазные опоры). В 1920-30-х годах в Европе значительное распространение получили опоры немецкого типа (так называемые узкобазные). Они использовали узкие квадратные в плане стойки с основанием, помещенным на один массивный компактный фундамент. Такой подход позволял существенно сократить расходы на отчуждаемую землю.

Во второй половине XX века началось массовое производство железобетонных опор ЛЭП.

пами соединения (для 180°). Во втором случае регулируемый угловой сдвиг (0°÷180°) достигается применением фазорегулирующих устройств трансформаторного или автотрансформаторного типов.

Применение средств фазового регулирования в сочетании с управляемыми устройствами компенсации позволяет осуществлять глубокое регулирование эквивалентных параметров электропередачи в нормальных и аварийных режимах работы.

Реализация технических преимуществ компактных управляемых ВЛ позволяет (по сравнению с ВЛ традиционного исполнения) получить заметный технико-экономический эффект, выражающийся в снижении удельных затрат на электросетевое строительство, на передачу электроэнергии, а также в улучшении общесистемных показателей.

Применение в энергосистемах компактных управляемых ВЛ обеспечивает по сравнению с ВЛ традиционной конструкции:

- увеличение пропускной способности;
- обеспечение широкого диапазона регулирования основных режимных параметров;
- снижение удельных капитальных вложений в расчете на единицу передаваемой мощности;
- компактизацию конструкций линий электропередачи и сокращение площадей земельных угодий, отчуждаемых под их строительство;
- снижение экологического воздействия ВЛ на окружающую среду.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Основными параметрами ВЛ переменного тока являются:

- индуктивное и активное сопротивление;
- емкостная проводимость;
- активная проводимость;
- волновое сопротивление и волновые параметры;
- зарядная и натуральная мощность;
- поток вектора мощности;
- напряженности электрического и магнитного полей на поверхности проводов и в пространстве, окружающем линию;
- уровни акустических шумов и радиопомех.

Эти параметры находятся в зависимости от следующих факторов:

- конфигурации расположения фаз;
- сечения проводов;
- количества составляющих в расщепленных фазах;
- величин и взаимной векторной ориентации напряжений фаз.

Основной характеристикой воздушной линии электропередачи является ее пропускная способность $[P]$, т. е. наибольшая активная мощность, которая может быть передана по линии. Ее величина определяется выражением [12-13]:

$$P = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{Z_e \sin \alpha_0 l} \sin \delta \quad (1)$$

где:

\dot{U}_1, \dot{U}_2 – векторы напряжения в начале и конце линии соответственно;

δ – угол сдвига векторов напряжений начала и конца линии;
 Z_e – волновое сопротивление линии (Ом):

$$Z_e = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} \quad (2)$$

где:

$x_0 = \omega L_0$ – удельное индуктивное сопротивление проводов (фаз) линии (Ом/км);
 $b_0 = \omega C_0$ – удельная емкостная проводимость проводов (фаз) линии (Ом/км);
 r_0 – удельное активное сопротивление проводов (фаз) линии (Ом/км);
 g_0 – активная поперечная проводимость проводов (фаз) линии (Ом/км), определяемая выражением:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{кор.сг}}{U_{ном}^2}$$

где $\Delta P_{кор.сг}$ – среднегодовые потери на корону;
 L_0 – индуктивность провода;
 C_0 – электрическая емкость проводов линии;
 $\alpha_0 l$ – волновая длина линии (электрических градусов),
где l – длина линии (км), α_0 – коэффициент изменения фазы (эл. град./км):

$$\alpha_0 = \omega \sqrt{L_0 C_0} \left(1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right) \quad (3)$$

При фиксированных значениях напряжения линии, ее длины и волнового сопротивления максимальная величина мощности P_M , которую можно передать по линии, достигается при $\sin \delta = 1$, т.е. когда разность углов между векторами напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 равна 90°. В этом случае выражение (1) примет вид:

$$P_M = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{Z_e \sin \alpha_0 l} \quad (4)$$

При волновой длине $\alpha_0 l = 90$ эл. град., $\sin \alpha_0 l = 1$ и при равенстве модулей напряжений $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2|$ формула (4) упрощается:

$$P_M = \frac{U^2}{Z_e} = P_{нам} \quad (5)$$

ПРИМЕРЫ ОПОР КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ

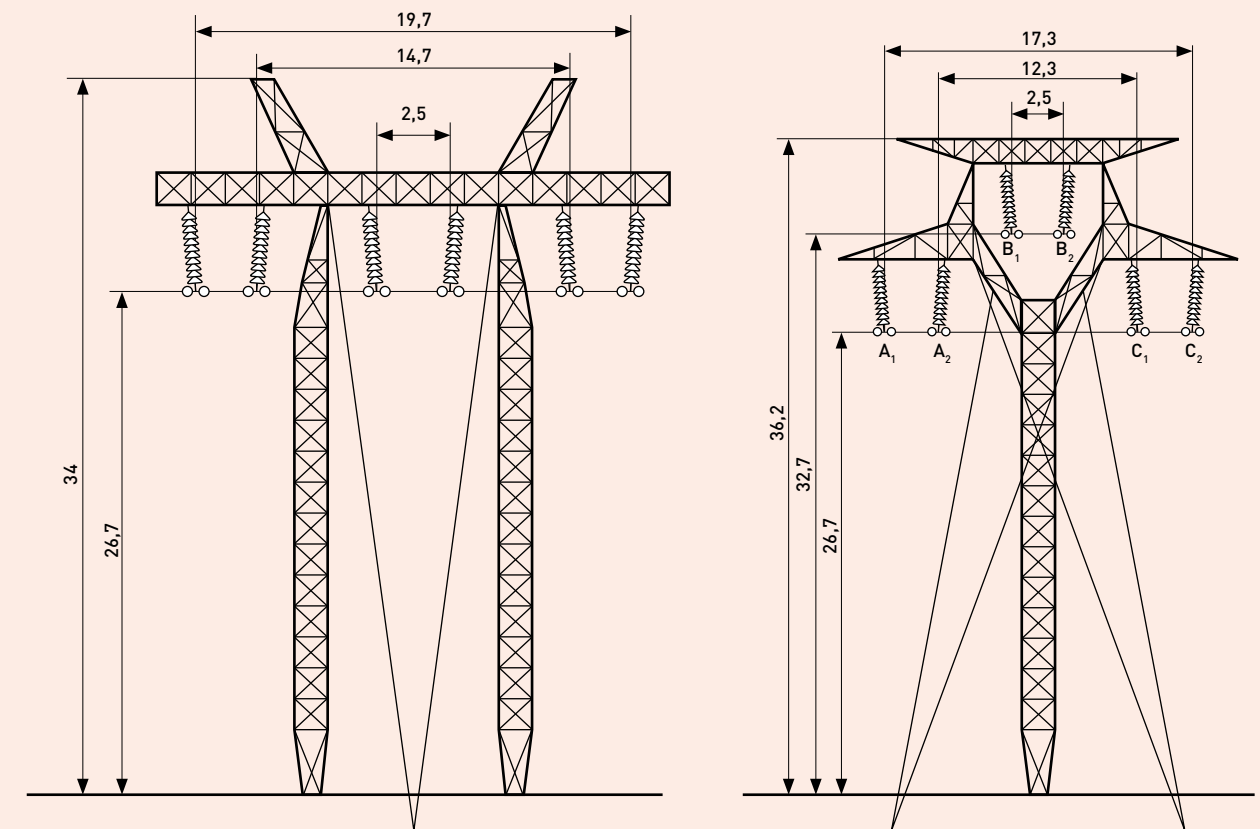


Рис. 1

Выражение (5) определяет натуральную мощность линии. Использование этого понятия удобно для анализа и сопоставления различных вариантов и типов электропередач, так как этот параметр может считаться показателем пропускной способности.

Как следует из выражения (5), увеличение натуральной мощности линии $P_{нам}$ может быть достигнуто за счет уменьшения волнового сопротивления Z_e путем снижения удельного индуктивного сопротивления линии x_0 и/или увеличения удельной емкостной проводимости b_0 в соответствии с формулой (2).

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПАКТНЫХ ВЛ

Компактные одноцепные ВЛ переменного тока отличаются от ВЛ традиционного исполнения тех же классов напряжений меньшими расстояниями между фазами до 35–50% от соответствующих расстояний, применяемых на ВЛ традиционной конструкции, измененной конфигурацией расположения и увеличенным числом составляющих расщепленной

фазы. Это приводит к изменению параметров электромагнитного поля в междупазном и окружающем линию пространстве. Усиление параметров поля внутри линии за счет сближения фаз позволяет улучшить электрические параметры, увеличить пропускную способность и, соответственно, технико-экономические параметры линии, а ослабление поля во внешнем пространстве – улучшить экологические показатели ВЛ. Электрические схемы компактных одноцепных ВЛ практически не отличаются от схем линий электропередачи традиционного исполнения. При использовании различных устройств управления может осуществляться регулирование режимных пара-

метров электропередачи в целом, параметры самих линий при этом остаются неизменными.

Компактные двухцепные ВЛ

отличаются от традиционных двухцепных воздушных линий электропередачи тем, что у них каждая цепь выполнена в виде компактной трехфазной линии аналогично описанной выше одноцепной компактной ВЛ. Регулирование режимных параметров двухцепных компактных ВЛ так же, как и одноцепных, может осуществляться с помощью устройств управления, установленных в узлах электропередачи. Собственные параметры цепей компактных двухцепных ВЛ в процессе работы остаются неизменными.

Компактные управляемые двухцепные ВЛ отличаются от традиционных двухцепных ВЛ в конструктивном, схемном и режимном отношении. Главные отличия состоят в том, что у них попарно сближены фазы разных цепей таким образом, что двухцепная ВЛ состоит из трех пар сближенных фаз (рис.1).

Между сближенными фазами на опоре должны отсутствовать заземленные конструктивные элементы опоры. Для фиксации расстояния между сближенными фазами в пролетах предусматриваются междуфазные изоляционные элементы – изоляционные распорки. Расстояние между сближенными фазами разных цепей принимается не менее минимально допустимого значения, рассчитанного с учетом максимальных рабочих напряжений, которые могут быть приложены к этим фазам, а также коммутационных и грозовых перенапряжений в соответствии с ПУЭ-7.

Сближение фаз разных цепей создает увеличенное взаимное электромагнитное влияние цепей,

СХЕМА ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОГО СДВИГА

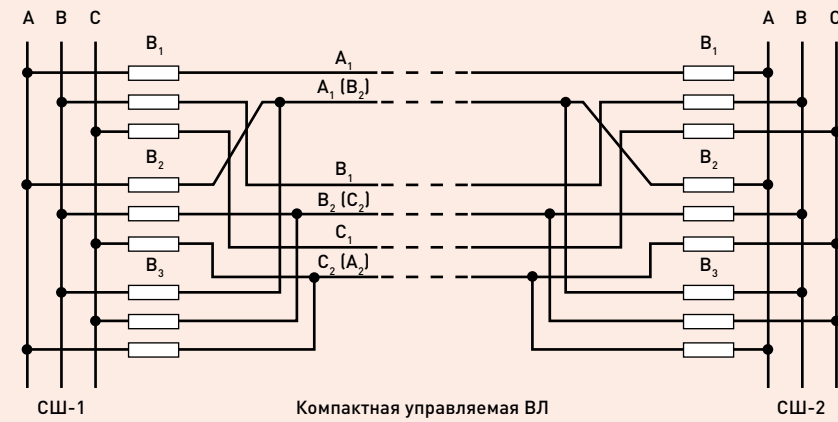


Рис. 2

СХЕМА НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОГО СДВИГА

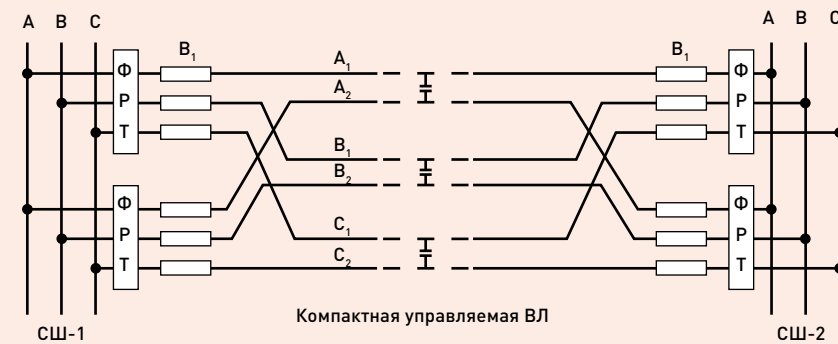


Рис. 3

величина которого зависит от углового сдвига между приложенными векторами напряжений, т. е. углового сдвига (θ) трехфазной системы векторов напряжений одной цепи по отношению к другой. Этот эффект используется для изменения и регулирования эквивалентных параметров и характеристик каждой цепи и линии в целом. Целенаправленное изменение θ обеспечивает тре-

буемую пропускную способность и режимные параметры электропередачи. В схемном отношении отличия двухцепных компактных управляемых ВЛ от других типов состоят в том, что присоединения цепей к трехфазным системам шин на отправном и приемном концах осуществляются таким образом, чтобы между векторами напряжений сближенных фаз был обеспечен определенный угловой

сдвиг (θ). Величина этого угла (θ) является изменяемой в процессе работы в пределах 0–180° или фиксированной (0°; 120°), в зависимости от требуемой величины передаваемой мощности. Угловые сдвиги систем векторов напряжений цепей могут быть созданы путем соответствующей фазировки в схемах присоединения ВЛ к шинам подстанций (рис. 2) или же с помощью установки специальных фазорегулирующих устройств трансформаторного или автотрансформаторного типов (ФРТ) (рис. 3). Компактные управляемые ВЛ (как и ВЛ других типов) могут быть дополнительно оснащены устройствами регулирования, подключаемыми как на фазное, так и на линейное напряжение.

Компактные управляемые двухцепные и многоцепные ВЛ, благодаря взаимному электромагнитному влиянию цепей, дают возможность осуществлять самокомпенсирование параметров линии, поэтому они называются управляемыми самокомпенсирующимися ВЛ (УСВЛ).

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ 220 КВ

На рис. 4. представлены результаты сопоставлений ВЛ 220 кВ традиционной конструкции и компактных (в т. ч. управляемых) по величине натуральной мощности.

Из рис. 4 видно, что компактные ВЛ 220 кВ по величине натуральной мощности превосходят ВЛ 220 кВ традиционного исполнения в 1,5–1,8 раза.

ВЕЛИЧИНЫ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ВЛ 220 КВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ



Рис. 4

Проведенные расчеты показали:

- двухцепные компактные управляемые ВЛ 220 кВ по величине натуральной мощности приближаются к одноцепным трехфазным ВЛ 500 кВ традиционного исполнения;
- удельные капитальные вложения для двухцепных компактных управляемых ВЛ 220 кВ не превышают величину удельной стоимости одноцепных ВЛ 500 кВ традиционной конструкции;
- значительная экономия затрат за счет разности стоимости регулирующего и подстанционного оборудования, выполненного на класс напряжения 220 кВ и 500 кВ, может быть получена при сооружении компактных управляемых ВЛ на напряжение 220 кВ.

Выполнены расчеты по определению параметров компактных управляемых ВЛ 220, 500 кВ. Рассмотрено более 20 вариантов конструкций с варьированием числа проводов в фазе, радиуса расщепления, междуфазных расстояний, расположения фаз по отношению друг

к другу и относительно земли. Для компактных управляемых ВЛ были рассмотрены режимы при значениях углового сдвига $\theta=0^\circ$, $\theta=120^\circ$ и $\theta=180^\circ$.

В качестве примера приведено сопоставление основных параметров двухцепных ВЛ 220 кВ компактных управляемых и традиционного исполнения. Сравнивались следующие технические показатели:

$P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_6}, \text{ MBm}$ – величина натуральной мощности;

$Q_c = U^2 b_0, \text{ MBAr}$ – величина удельной зарядной мощности;

$P_{\text{нат}}/L_k, \text{ MBm/м}$ – отношение величины натуральной мощности к ширине полосы отчуждения;

$P_{\text{нат}}/S_{\text{дл}}, \text{ MBm/мм}^2$ – отношение величины натуральной мощности к суммарному сечению проводов;

ОПОРА КОМПАКТНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ ВЛ 220 КВ ТИПА «ЧАЙКА» (А) ДВУХЦЕПНАЯ ОПОРА 220 КВ ТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ (Б)

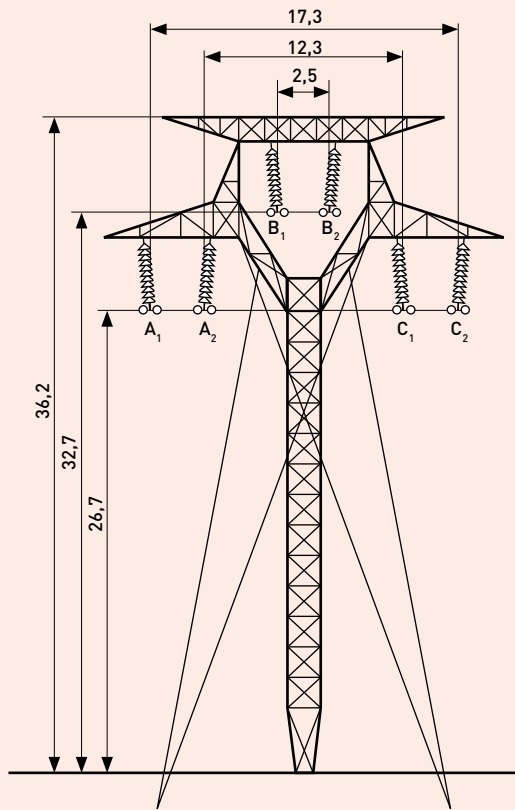


Рис. 5А

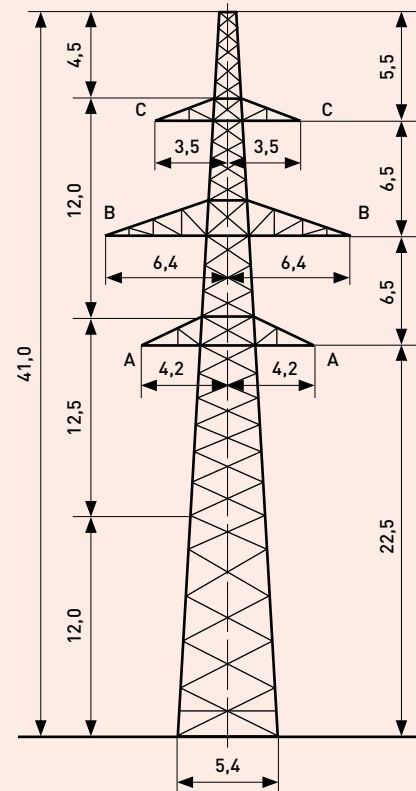


Рис. 5Б

- базовые показатели стоимости ВЛ 220 кВ на решетчатых опорах, тыс. руб./км;
- стоимость одного километра ВЛ 220 кВ в расчете на 1 МВт передаваемой натуральной мощности, тыс. руб./МВт (табл. 1).

Предлагаемая конструкция опоры компактной управляемой ВЛ 220 кВ представлена на рис. 5А, а традиционного исполнения – на рис. 5Б.

Результаты сопоставления (рис. 6–8) наглядно свидетельствуют

о преимуществах компактных управляемых ВЛ и могут служить ориентиром при выборе типов ВЛ 220 кВ для конкретного энергообъекта.

Эффективность применения компактных управляемых ВЛ рассмотрена на примере реальной двухцепной ВЛ 220 кВ.

Рассмотрены два варианта конструкции ВЛ:

- двухцепная ВЛ 220 кВ традиционной конструкции (рис. 5Б) натуральной мощностью 305 МВт, ос-

нащенная устройствами компенсации; двухцепная компактная управляемая ВЛ 220 кВ с расположением фаз типа «дельта» (рис. 5А) при значении угла сдвига фаз векторов напряжений цепей $\theta = 120^\circ$ с конструкцией фазы 2xAC-300/39, натуральной мощностью 524 МВт.

Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемой ВЛ 220 кВ применение двухцепной компактной управляемой ВЛ 220 кВ

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ 220 КВ

Вид ВЛ	ВЛ 220 кВ традиционной конструкции (рис. 5Б)		Компактная управляемая ВЛ 220 кВ (рис. 5А)	
Угол сдвига фаз, θ°	0°		120°	180°
Марка провода	АС 300/66			
Число проводов в фазе	1		2	
Волновое сопротивление, Ом	206,3	118,9	0,58*	107,8
Натуральная мощность ВЛ $P_{\text{нат}}$, МВт	304,6	529,0	1,74*	583,0
Натуральная мощность на одну цепь $P_{\text{нат}}$, МВт	152,3	264,5	1,74*	291,5
$P_{\text{нат}}/L_k$, МВт/м	5,77	9,23	1,6*	10,17
$P_{\text{нат}}/S_{Al}$, МВт/мм ²	0,176	0,153	0,87*	0,168
Базовые показатели стоимости ВЛ 220 кВ на решетчатых опорах, тыс. руб./км	2195	2578,8	1,17*	2578,8
Стоимость одного километра ВЛ 220 кВ в расчете на 1 МВт передаваемой натуральной мощности, тыс. руб./МВт	7,2	4,87	0,68*	4,42

* Отношение параметра компактной управляемой ВЛ 220 кВ к соответствующему параметру традиционной двухцепной ВЛ 220 кВ.
Таблица 1

при передаваемой мощности свыше 300 МВт по критерию минимума суммарных дисконтированных затрат является более эффективным по сравнению с вариантом сооружения двухцепной ВЛ в традиционном исполнении (рис. 9). При снижении передаваемой мощности ниже 300 МВт эффективнее становится применение двухцепных ВЛ традиционной конструкции. Уровень затрат на компенсацию потерь в энергосистеме при количестве часов использования максимума нагрузки в год, равном 5000, при применении ВЛ традиционной конструкции значительно (прибли-

зительно в 2 раза) выше, чем при применении компактной управляемой ВЛ.

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для компактных ВЛ целесообразно применение современных устройств регулирования параметров режимов, средств фазового управления (ФРУ) и продольно-поперечной компенсации.

Одним из наиболее эффективных способов регулирования является фазовое управление, позволяющее осуществить:

- регулирование потоков мощности независимо от конструкций ВЛ в сложной энергосистеме с целью поддержания заданных уровней напряжений в узлах и обеспечения режимов минимальных потерь в энергосистеме;
- перераспределение величин потоков активной мощности между параллельно соединенными

ВЕЛИЧИНА НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ 220 КВ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

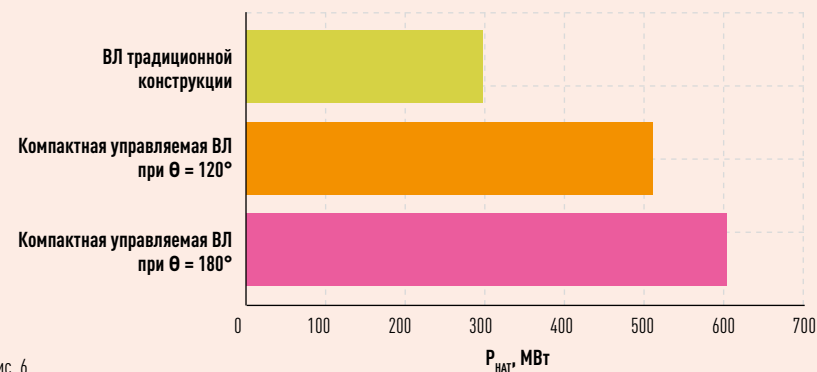


Рис. 6

ОТНОШЕНИЕ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ 220 КВ К ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

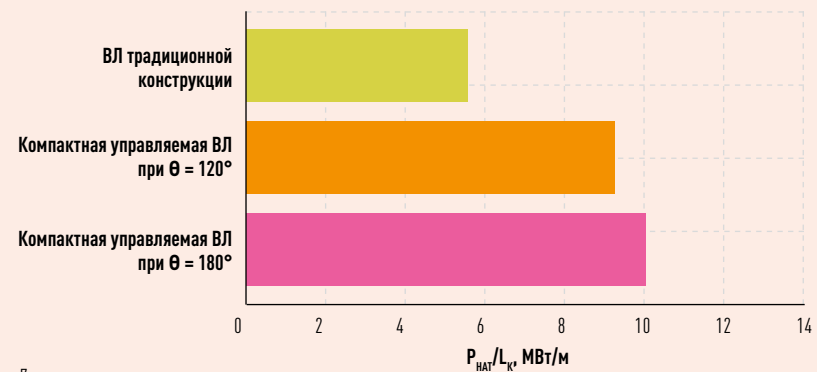


Рис. 7

ОТНОШЕНИЕ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ 220 КВ К СЕЧЕНИЮ АЛЮМИНИЕВОЙ ЧАСТИ ПРОВОДОВ

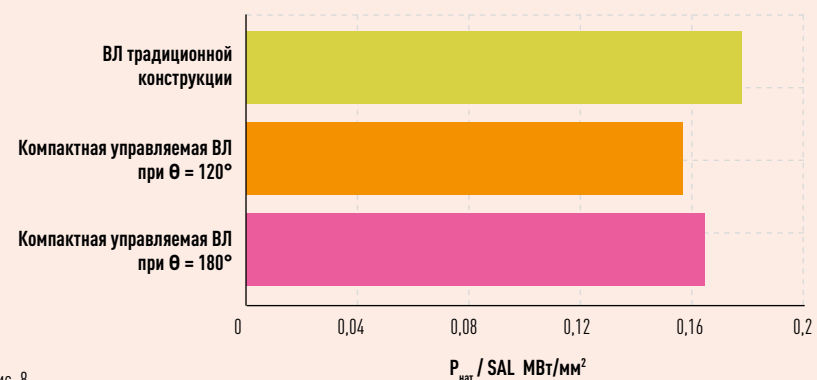


Рис. 8

линиями электропередачи одного или разного классов напряжения в сложной энергосистеме с возможностью загрузки их до оптимального по режимным условиям значения; оптимизацию режимов электрической сети; повышение статической и динамической устойчивости энергосистем; ограничение или увеличение величин передаваемой по межсистемным высоковольтным связям мощности исходя из режимных или коммерческих условий.

Для практического осуществления фазового управления в энергосистемах необходимо применение специальных регулирующих устройств трансформаторного (ФРТ) или комбинированного типа с применением различных средств и систем силовой электроники.

На ФРУ не возлагается задача увеличения пропускной способности отдельных высоковольтных линий, однако за счет соответствующей (оптимальной) загрузки всех линий в рассматриваемом сечении применение ФРУ может рассматриваться как эффективное средство повышения пропускной способности сечений энергосистем.

Ниже на примере реальной энергосистемы рассмотрена эффективность применения фазового управления величинами потоков мощности.

Для анализа были выбраны сети 500 кВ в сечении, по которому в настоящее время осуществляются обменные перетоки мощности между энергообъединениями Сибири и Урала.

Были выполнены расчеты режимов объединенной энергосистемы

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ ДВУХЦЕПНЫХ ВЛ 220 КВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

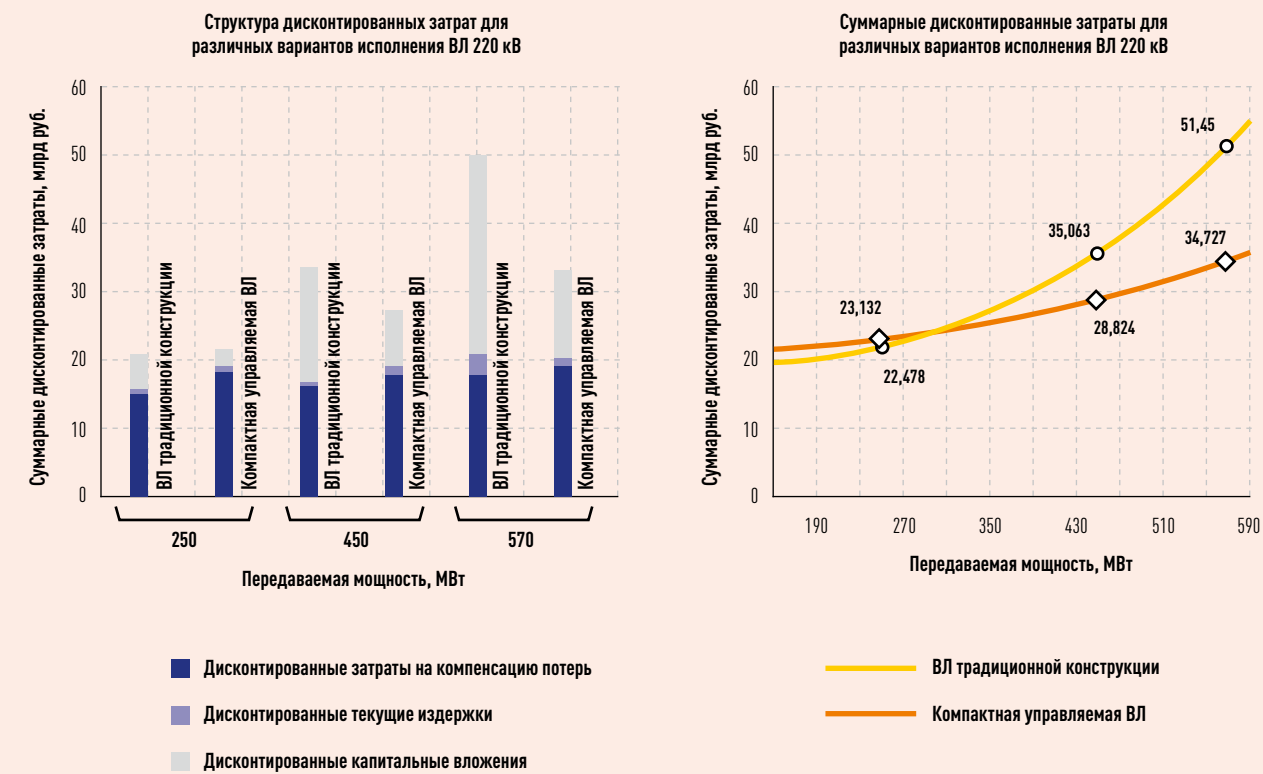


Рис. 9

с учетом перспектив развития сетей 500 кВ в регионе, в частности при введении в эксплуатацию нового транзита 500 кВ.

Были рассмотрены варианты применения одноцепной ВЛ 500 кВ в традиционном исполнении и компактной одноцепной ВЛ 500 кВ. Результаты расчетов для режима передачи максимальных потоков мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала показаны на рис. 10. Рассмотрены варианты без и с фазовым управлением (с установкой ФРУ в начале проектируемого транзита 500 кВ).

В случае применения фазового управления рассматривались ре-

жимы при изменении угла сдвига выходного напряжения относительно входного на ФРТ $\delta_{ФРТ} = \pm 60^\circ$. Режим при $\delta_{ФРТ} = 0^\circ$ соответствует отсутствию ФРТ.

Как можно видеть из рис. 10, естественное распределение потоков мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала (при $\delta_{ФРТ} = 0^\circ$) составляет 997 МВт, в том числе 352 МВт по проектируемому транзиту 500 кВ. Остальная величина мощности в размере 645 МВт передается по сетям 500 кВ ОЭС Сибири и Казахстана.

При введении с помощью ФРТ углового сдвига $\delta_{ФРТ} = \pm 60^\circ$ наблюдается сильное изменение величин пере-

даваемой мощности по рассматриваемым ветвям.

При значении угла, близком к значению $\delta_{ФРТ} = -30^\circ$, переток мощности по ВЛ 500 кВ, расположенной на территории Казахстана, становится равным 0, что может рассматриваться как режим, при котором данные ВЛ отключены, а вся мощность из ОЭС Сибири в ОЭС Урала передается по ВЛ 500 кВ, расположенным на территории России.

При этом поток мощности по проектируемому транзиту 500 кВ (при $\delta_{ФРТ} = -30^\circ$) составляет 974 МВт, что соответствует величине натуральной

ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ ПО ВЛ 500 КВ ОТ УГЛА СДВИГА ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЫХОДНОГО

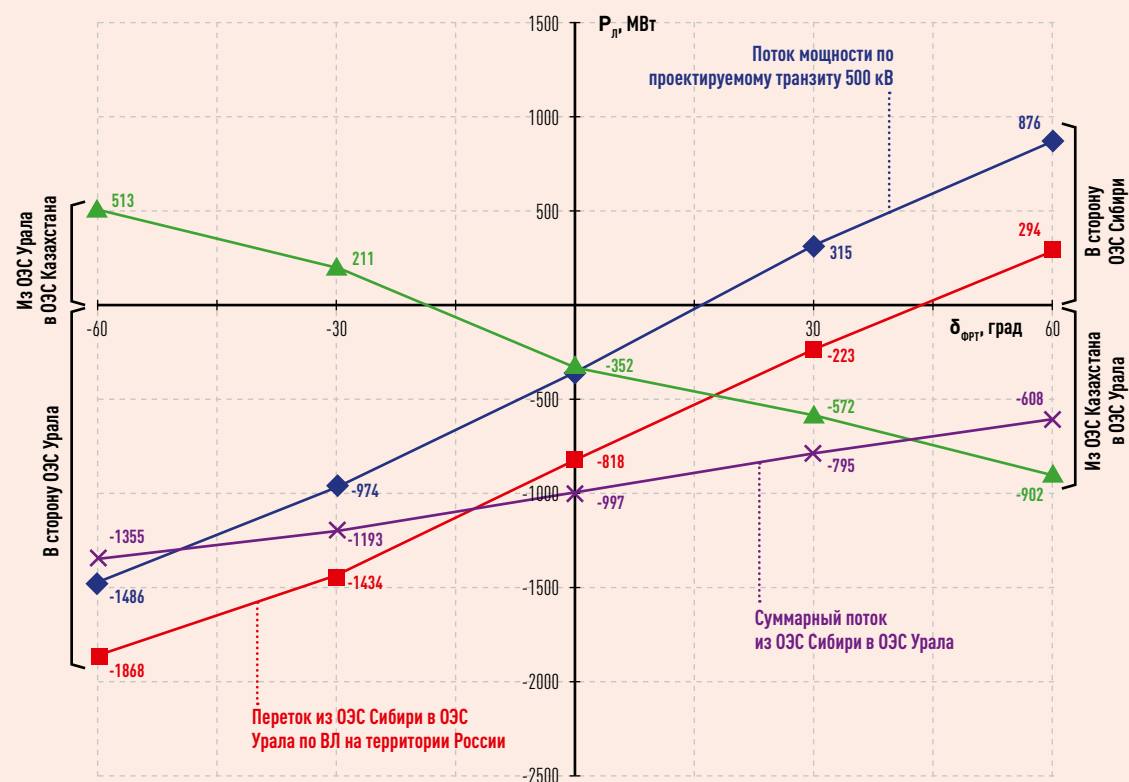


Рис. 10

мощности одноцепной ВЛ 500 кВ традиционного исполнения.

В случае дальнейшего роста передаваемой мощности (сверх 974 МВт) пропускной способности проектируемого транзита при традиционном его исполнении недостаточно. В этом случае целесообразным является применение на рассматриваемом транзите 500 кВ одноцепной компактной управляемой ВЛ, что обеспечит величину натуральной мощности, равную 1480 МВт, или же путем установки УПК соответствующей мощности при применении ВЛ 500 кВ традиционной конструкции. Загрузку данной ВЛ до 1486 МВт можно осуществить введением угла $\delta_{ФРТ} = -60^\circ$.

Эффективность фазового регулирования при изменении $\delta_{ФРТ}$ в пределах $\pm 60^\circ$ определяется системными условиями.

Следует отметить, что при $\delta_{ФРТ} = -60^\circ$ суммарный переток мощности из ОЭС Сибири в ОЭС Урала по ВЛ, расположенным на территории России, становится равным 1868 МВт (вместо 997 МВт при отсутствии фазового управления $\delta_{ФРТ} = 0^\circ$). При положительных значениях угла $\delta_{ФРТ}$ происходит уменьшение мощности, передаваемой в сторону ОЭС Урала. Так, при $\delta_{ФРТ} = +15^\circ$ ее величина становится равной 0 (рис. 10), а при $\delta_{ФРТ} = +60^\circ$ переток мощности в раз- мере 876 МВт будет происходить в обратную сторону, т. е. в сторону ОЭС Сибири.

В заключение следует отметить, что выполненные к настоящему времени технические и проектные разработки, а также накопленный опыт позволяют сделать вывод об экономической целесообразности применения компактных управляемых ВЛ, в том числе оснащенных фазорегулирующими устройствами, для увеличения пропускной способности и управления потоками мощности в соответствии с заданными режимными требованиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали целесообразность применения в ЕНЭС компактных управляемых воздушных линий электропереда-

чи, обеспечивающих повышение пропускной способности и управляемости, снижение экологического воздействия, сокращение отчуждаемых земельных угодий и капиталовложений в расчете на единицу натуральной мощности.

Пропускная способность ВЛ может быть существенно повышена за счет сближения фаз при применении изолирующих междуфазных распорок.

Наиболее эффективным способом улучшения характеристик двухцепных ВЛ является создание двухцепных компактных управляемых ВЛ, обеспечивающих за счет усиленного взаимного электромагнитного влияния цепей повышенную пропускную способность и возможность регулирования эквивалентных параметров линий электропередачи. Использование компактных управляемых ВЛ позволяет осуществлять передачу большей мощности без перехода на следующий класс напряжения. Капиталовложения в создание таких ВЛ уменьшаются за счет снижения затрат на землеотвод и подстанционное оборудование.

Увеличение пропускной способности электрической сети за счет применения компактных ВЛ, в том числе оснащенных устройствами регулирования, является одним из наиболее экономичных средств развития электрических сетей, поскольку позволяет снизить затраты на транспорт электрической энергии в расчете на единицу передаваемой мощности за счет повышения пропускной способности электрической сети, эффективного использования устройств регулирования, сокращения площадей отчуждаемых земель.

Компактные управляемые ВЛ по сравнению с ВЛ традиционной конструкции обеспечивают:

- увеличение пропускной способности в 1,2–1,8 раза;
- при передаче одинаковой мощности сокращение в 1,5–2 раза площади земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии;
- управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях;
- снижение суммарных затрат на 10–20% в расчете на единицу передаваемой мощности;
- повышение эффективности использования устройств регулирования;
- уменьшение суммарной мощности и стоимости устройств регулирования;
- повышение механической устойчивости ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электропередача переменного тока / Постолатий В.М., Веников В.А., Астахов Ю.Н., Чалый Г.В., Калинин Л.П. 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 / Астахов Ю.Н., Постолатий В.М., Комендант И.Т., Чалый Г.В. Под ред. Веникова В.А. – 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. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с., ил.
6. Постолатий В.М., Быкова Е.В. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. – Электричество, 2010, № 2, стр. 7–14.
7. Управляемые электропередачи. Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001–2007 гг. Составители: д.х.т.н., академик Постолатий В.М., д.т.н. Быкова Е.В. – Кишинев, 2007 – 234 с.
8. Постолатий В.М. Научная школа в области управляемых электропередач. Этапы исследований и библиография. Акад. наук Молдовы, Ин-т энергетики. – К.: Б.И., 2012 (Тірогр. АŞМ). – 200 с. (серия «Управляемые электропередачи», книга № 1, ISBN 978-9975-62-317-9).
9. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011, – 312 с. ил.
10. Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В., Уколов С.В., Постолатий В.М. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей. Problemele Energeticii Regionale. Акад. Наук Молдовы, Ин-т энергетики. Тірогр. АŞМ, 2011, № 3 (17), р. 3–23.
11. Дорофеев В.В. Развитие электроэнергетической системы России с использованием принципов активно-адаптивной сети. Доклады 6-й Международной конференции ТРАВЭК, Москва, 2010.
12. Веников В.А. Дальние электропередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1960 – 311 с.
13. Ботвинник М.М., Сильное регулирование возбуждения и асинхронизированные машины. Предисловие к книге Бронштейн Э.Л., Шакарян Ю.Г. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 160 с. ■