ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖСИСТЕМНЫХ И МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫХ ТРАНЗИТОВ

АВТОРЫ:

ШАКАРЯН Ю.Г.,
Д.Т.Н.,
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.,
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
АН МОЛДОВЫ

БЫКОВА Е.В.,
К.Т.Н.,
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
АН МОЛДОВЫ

СУСЛОВ В.М.
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
АН МОЛДОВЫ

БОБЫЛЕВА Н.В.
ОАО «ИНСТИТУТ
«ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»

УТЦ Н.Н.
ОАО «ИНСТИТУТ
«ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»

В настоящее время большое значение придается созданию межсистемных и межгосударственных транзитов мощности. Данная задача решается с помощью воздушных и кабельных линий электропередачи.

При сооружении ВЛ должны быть обеспечены:
– заданная пропускная способность;
– управляемость электропередачи (регулирование режимных параметров, величины и направления потоков мощности);
– выполнение требований по экологическим параметрам;
– минимально возможное отчуждение земельных угодий под строительство;
– минимально возможные капитальные вложения при строительстве электропередачи;
– минимальные эксплуатационные затраты.

Традиционные конструкции линий электропередачи по целому ряду показателей не в полной мере отвечают указанным требованиям. Например, увеличить пропускную способность линий электропередачи традиционной конструкции можно либо путем перехода на более высокие классы напряжения, либо применяя устройства продольной компенсации. Однако это сопряжено со значительными капитальными вложениями.

Весьма актуальна задача поиска и разработки новых альтернативных способов транспорта электроэнергии, формирования межсистемных и межгосударственных транзитов.

К настоящему времени отечественными и зарубежными научно-исследовательскими и проектными организациями создан большой научный и практический задел, касающийся линий электропередачи переменного тока нового типа, обладающих по сравнению с ВЛ традиционной конструкции того же класса напряжения существенно более высокими техническими и экономическими показателями: увеличенной пропускной способностью, улучшенными регулировочными характеристиками и уменьшенным воздействием на окружающую среду [1].

ВЛ нового поколения предусматривают:

– создание компактированных конструкций линий с ненарушением минимально допустимых в соответствии с ПУЭ [8] расстояний между фазами;
– выбор оптимальной конструкции расщепленной фазы;
– создание компактных конструкций линии с минимально допустимыми расстояниями между фазами;
– применение междуфазных изоляционных элементов, обеспечивающих механическую устойчивость линии при воздействии неблагоприятных климатических факторов.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основными параметрами, определяющими характеристики линий электропередачи, являются:

– напряжение (U);
– ток (I);
– частота (f);
– угловая частота ($\omega = 2\pi f$);
– сечение и геометрические параметры проводов (s – сечение, r – радиус проводов), механические параметры;
– количество проводов в расщепленных фазах (n);
– радиус расщепления (r_p);
– конфигурация расположения проводов в расщепленных фазах;
– расстояние между фазами ($D_{ср}$);
– удельное активное сопротивление проводов (r_0);
– удельная индуктивность фаз (L_o);
– удельное индуктивное сопротивление фаз (x_0);
– удельная емкость фаз (C_o);
– удельная емкостная проводимость фаз (b_0);
– волновое сопротивление линии ($Z_в$);
– напряженность электрического поля на поверхности проводов (E);
– напряженность начала короны (E_o);

ИНФОРМАЦИЯ

КОМПАКТНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Разработка новых эффективных средств передачи электроэнергии на большие расстояния и управление режимами энергосистем являются актуальными проблемами развития современной электроэнергетики.

В настоящее время наблюдается резкое увеличение потребления электрической энергии как в промышленной, так и в социальной сферах, что требует увеличения пропускной способности и управляемости линий электропередачи. Для реализации указанных целей следует рассматривать управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности, которые представляют собой комплекс технических решений, предусматривающих применение одноцепных и многоцепных компактных ВЛ, принципов управления и современных средств регулирования с включением в них устройств, изменяющих сопротивления элементов сети.

ОДНОЦЕПНАЯ КОМПАКТНАЯ ВЛ 220 КВ

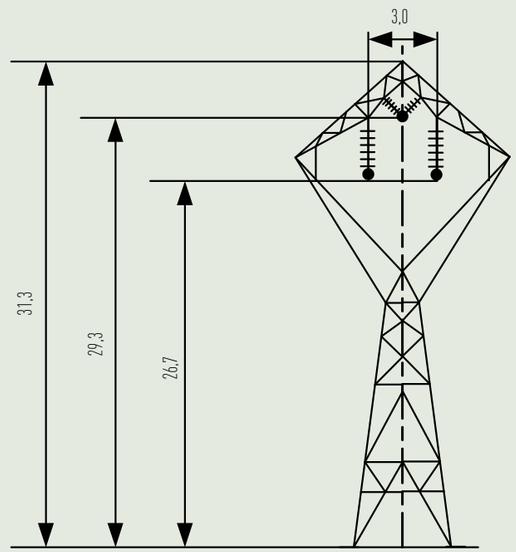

Рис. 1

- напряженность магнитного поля фазы (H);
- диэлектрическая постоянная (ε_0);
- магнитная постоянная (μ_0);
- электрический заряд на поверхности провода (q_i);
- скорость распространения электромагнитной волны (v).

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обычно при выборе тех или иных вариантов ВЛ исходят в первую очередь из заданной величины максимальной передаваемой мощности и дальности передачи. В общем виде величина максимальной передаваемой мощности $P_м$ определяется выражением [1]:

$$P_M = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{Z_в \sin\alpha_0 l}\sin\delta, \qquad (1)$$

где $\mathring{U}_1$, $\mathring{U}_2$ – векторы напряжения, приложенного в начале линии и в ее конце соответственно;

δ – угол сдвига векторов напряжений начала и конца линии;

$Z_в$ – волновое сопротивление линии (Ом), определяемое по формуле:

$$Z_в = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}, \qquad (2)$$

где $x_0 = \omega L_0$ – удельное индуктивное сопротивление проводов фаз, Ом/км;

$b_0 = \omega C_0$ – удельная емкостная проводимость проводов фаз, См/км;

r_0 – удельное активное сопротивление проводов фаз, Ом/км;

g_0 – активная поперечная проводимость проводов фаз, См/км, определяемая выражением:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{кор.сг}}{U^2_{ном}},$$

где $\Delta P_{кор.\,сг}$ – среднегодовые потери на корону;

$\alpha_0 l$ – волновая длина линии (электрических градусов). Здесь l – длина линии, км; α_0 – коэффициент изменения фазы, эл. град./км, определяемый по формуле:

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

При фиксированных значениях напряжения линии, ее длины и волнового сопротивления максимальная величина мощности ($P_м$) достигается при sin δ = 1, т. е. когда разность углов между векторами напряжений $\mathring{U}_1$ и $\mathring{U}_2$ достигает 90°. В данном случае выражение (1) примет вид:

$$P_M = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{Z_в \sin\alpha_0 l}. \qquad (4)$$

При волновой длине ВЛ, равной 90 эл. град., sin α_0 = 1, и при равенстве модулей напряжений $\mathring{U}_1$ и $\mathring{U}_2$ выражение (4), которое является выражением натуральной мощности линии, принимает вид

$$P_M = \frac{U^2}{Z_в} = P_{нат}. \qquad (5)$$

Если передаваемая мощность равна величине ее натуральной мощности, то уровень напряжения вдоль линии сохраняется практически постоянным.

Приведенное выражение величины натуральной мощности может быть использовано как для одноцепных, так и двухцепных и многоцепных ВЛ, а также в общем случае для многофазных многопроводных линий электропередачи, в зависимости от задаваемых первичных параметров.

Как следует из выражения (5), увеличение натуральной мощности линии возможно только за счет уменьшения волнового сопротивления. Последнее может быть достигнуто путем уменьшения удельного индуктивного сопротивления линии (x_0) и соответствующего увеличения удельной емкостной проводимости (b_0), как это следует из выражения (2).

Индуктивное сопротивление многоцепной многопроводной линии определяется геометрическими параметрами линии и векторными соотношениями токов, протекающих по рассматриваемым фазам, тросам и по «земляному» проводу [3].

Для самого общего случая многопроводной (многофазной) линии электропередачи выражение индуктивности проводов (фаз) имеет следующий вид:

$$\dot{L}_i = \frac{\mu_0}{2\pi}\left\{\frac{1}{4n} + \frac{\sum_{m=1}^{n}\dot{I}_m \ln\frac{r_{iэ}}{d_{im}}}{\dot{I}_i} - \frac{\dot{k}_з\sum_{m=1}^{n}\dot{I}_m \ln\frac{r_{iэ}}{D_з}}{\dot{I}_i} - \frac{\sum_{p=1}^{n}\dot{k}_{TP_p}\sum_{m=1}^{n}\dot{I}_m \ln\frac{r_{iэ}}{d_{iTP_p}}}{\dot{I}_i}\right\}, \qquad (6)$$

где $\dot{L}_i$ – индуктивность i-го провода (фазы); $\dot{I}_i$ – вектор токов в i-м проводе (фазе); $\dot{I}_m$ – вектор тока в m-м проводе (фазе); $r_{iэ}$ – радиус эквивалентного i-го провода (фазы); d_{im} – расстояние от i-го до m-го провода (фазы); $k_з$ – доля тока, протекающего по обратному «земляному» проводу; $D_з$ – глубина залегания эквивалентного «земляного» провода; k_{TP} – доля тока, протекающего по тросам; d_{iTP} – расстояние от провода (фазы) i до троса; n – число проводов в расщепленной фазе.

Из выражения (6) при различных условиях могут быть получены выражения индуктивности проводов (фаз) линий различных типов: одноцепных, двухцепных, многоцепных, многофазных с произвольными системами токов и параметрами проводов (фаз).

РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ФАЗАМИ ВЛ

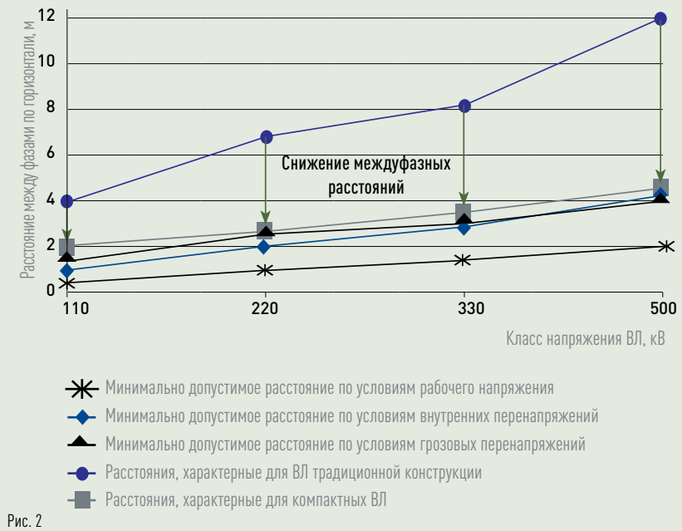

Рис. 2

Приведенное выражение (5) величины натуральной мощности линии электропередачи является общепринятым и широко используется в практике расчетов.

В ряде работ приведены иные выражения для определения величины натуральной мощности линии, учитывающие большее число параметров, на которые можно воздействовать для увеличения натуральной мощности линии.
В работе [4] натуральная мощность трехфазной линии электропередачи определяется следующим образом:

$$P_H = \frac{nr\,E_{доп}U_ф}{20K_H}, \qquad (7)$$

где n и r – число и радиус составляющих расщепленной фазы; $E_{доп}$ – допустимая величина напряженности электрического поля на поверхности проводов; $U_ф$ – фазное напряжение; K_H – коэффициент неравномерности распределения напряженности электрического поля на поверхности проводов фазы.

Выражение (7) показывает, что величина натуральной мощности линии электропередачи прямо пропорциональна числу проводов, их радиусу, напряжению линии и допустимой величине напряженности электрического поля на поверхности проводов.

Варьируя значения указанных параметров, можно обеспечить любую величину натуральной мощности линии.

При заданной допустимой величине напряженности электрического поля ($E_{доп}$) согласно [4] может быть определен допустимый суммарный электрический заряд линии по условию ограничения коронного разряда:

$$q_{доп} = \frac{2\pi\varepsilon_0 nr\,E_{доп}}{K_H}. \qquad (8)$$

ОПОРА УСВЛ 220 КВ ТИПА «ЧАЙКА»

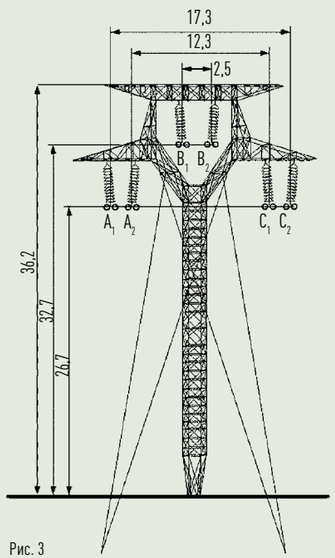

Рис. 3

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ ОПОРА УСВЛ 500 КВ ТИПА «ЧАЙКА»

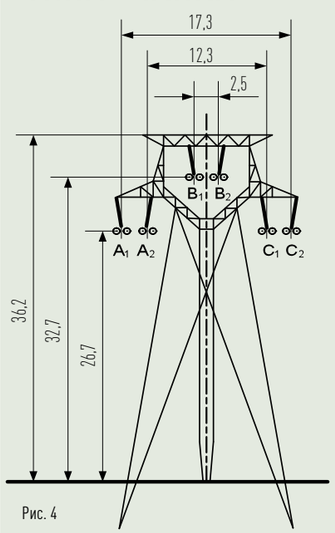

Рис. 4

Весьма удобным и наглядным выражением для натуральной мощности является выражение, приведенное в работе [5]:

$$P_H = \nu U_\phi \sum_{i=1}^{n} q_i \cos(\gamma_i - \alpha_i), \quad (9)$$

где ν – скорость распространения электромагнитной волны; $U_ф$ – фазное напряжение; q_i – заряд i-го провода; γ_i и α_i – угловые сдвиги напряжения $\dot{U}_i$ и тока $\dot{I}_i$ соответственно. Приведенное выражение наглядно демонстрирует зависимость натуральной мощности многопроводной (многофазной) линии от значений электрических зарядов, которые могут быть созданы на проводах фаз линии.

Отметим, что (9) позволяет выбрать конфигурацию расположения фаз и их конструкции, обеспечивающие максимальные значения мощности ($P_н$), и провести сравнение различных конструкций ВЛ.

ОДНОЦЕПНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ВЛ

Для трехфазных одноцепных ВЛ при условии симметричных и равных по модулю протекающих по фазам токов при частоте f = 50 Гц погонные параметры определяются следующими общеизвестными выражениями [5]:

$$r_ф^t = \frac{r_o^t}{n};$$

$$X_0 = 0{,}1445 \cdot \lg\frac{D_{сг}}{r_э} + \frac{0{,}0157}{n}; \quad (10)$$

$$g_0 = \frac{\Delta P_{кор\ сг}}{U^2},$$

где $r_ф^t$ и r_o^t – удельное погонное активное сопротивление фазы и провода соответственно при заданной температуре воздуха, $D_{сг}$ – среднегеометрическое расстояние между фазами ВЛ; $r_э$ – эквивалентный радиус расщепленной фазы.

Из выражений (10) следует, что уменьшить удельное индуктивное сопротивление, увеличить удельную емкостную проводимость, а следовательно, снизить величину волнового сопротивления и увеличить величину натуральной мощности ВЛ можно за счет увеличения эквивалентного радиуса расщепления фаз ($r_э$) и уменьшения среднегеометрического расстояния между фазами ($D_{сг}$), вплоть до допустимой в соответствии с ПУЭ величины. Последнее означает сооружение линии в виде компактной с предельно сближенными между собой фазами. Обеспечить возможность такого сближения фаз можно при условии вынесения за пределы междуфазных промежутков всех заземленных элементов опоры. Это первый шаг по созданию компактных одноцепных трехфазных ВЛ. Благодаря этому по сравнению с ВЛ традиционного исполнения можно увеличить натуральную мощность компактной ВЛ в 1,3–1,5 раза. Один из вариантов возможного исполнения одноцепной компактной ВЛ 220 кВ показан на рис. 1.

Аналогичным образом могут быть выполнены одноцепные компактные ВЛ и других классов напряжения.

Анализ и расчеты показали, что значения минимально допустимого расстояния между сближенными фазами с учетом разрядных характеристик изоляционных промежутков «фаза-фаза» при максимальных рабочих напряжениях, грозовых и коммутационных перенапряжениях могут быть приняты равными 0,35–0,5 от величины междуфазных расстояний ($D_{сг}$), принимаемых на ВЛ традиционной конструкции (рис. 2).

Отметим, что при сближении фаз в компактных ВЛ должно соблюдаться условие: максимальная напряженность электрического поля (E_m) на поверхности проводов не должна превышать величину напряженности поля начала возникновения короны (E_0), должно соблюдаться требование $E_m \leqslant 0{,}9\ E_0$. Степень компактизации ВЛ (сближения фаз) определяет основные характеристики линии – волновое сопротивление и натуральную мощность. Ниже приведены формулы для расчета среднегеометрического расстояния фаз компактных ВЛ ($D_{сг}$) и волнового сопротивления ($Z_в$):

$$D_{сг} = e^{\left(\ln r_э + \sqrt{\frac{2}{3}}\frac{U}{E_{\max} n r} K_H\right)}, \quad (11)$$

$$Z_в = 60 \ln\frac{D_{сг}}{r_э}, \quad (12)$$

где $r_э$ – эквивалентный радиус расщепленной фазы:

$$r_э = \sqrt[n]{n r r_p^{n-1}}, \quad (13)$$

здесь n – число проводов и их радиус r; r_p – радиус расщепления фазы, U – номинальное напряжение линии; $K_н$ – коэффициент неравномерности распределения заряда по поверхности составляющего провода расщепленной фазы:

$$K_H = 1 + \frac{(n-1)r}{r_p}. \quad (14)$$

Выражения (11) и (12) могут быть использованы при разработках вариантов одноцепных компактных ВЛ.

Особо следует отметить, что принципы регулирования параметров режимов одноцепных компактных ВЛ практически не отличаются от принципов регулирования параметров традиционных ВЛ. У компактных ВЛ, по сравнению с ВЛ традиционного типа, увеличена зарядная емкость и, соответственно, зарядная мощность. В связи с этим мощность шунтирующих реакторов должна быть увеличена.

Уровень напряженности электрического поля для компактной одноцепной ВЛ вблизи поверхности земли ниже, чем у традиционных ВЛ такого же класса напряжения, при этом компактная ВЛ требует меньшую полосу отчуждения земельных угодий.

ДВУХЦЕПНЫЕ И МНОГОЦЕПНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЛ

Выбор междуфазных расстояний для двухцепных и многоцепных компактных ВЛ осуществляется так же, как и для одноцепных ВЛ.

Многоцепная компактная ВЛ – это расположение на одной опоре двух и более одноцепных компактных ВЛ. Варианты расположения компактных цепей на одной опоре могут быть различными – с горизонтальным, треугольным и произвольным расположением фаз. Следует отметить, что параметры каждой компактной ВЛ не зависят от параметров других компактных ВЛ, а пропускная способность электропередачи в целом определяется суммой пропускной способности различных цепей ВЛ. Однако при создании многоцепных компактных ВЛ более целесообразно применение управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (УСВЛ).

УПРАВЛЯЕМЫЕ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИЕСЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ (УСВЛ)

Управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи переменного тока (УСВЛ) могут быть выполнены в воздушном или кабельном вариантах. На первых этапах разработок обычно рассматриваются двухцепные воздушные УСВЛ.

Физическая сущность двухцепных УСВЛ [5] состоит в том, что у них попарно сближены фазы разных цепей на расстояние, минимально допустимое по электрической прочности воздушных промежутков «фаза-фаза». Благодаря этому возникает сильное взаимное электромагнитное влияние цепей друг на друга. Если до сближения фаз разных цепей параметры фаз цепей (индуктивное сопротивление, емкостная проводимость, волновое сопротивление) определялись собственными значе-

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ ПОРТАЛЬНАЯ ОПОРА ДЛЯ ДВУХЦЕПНОЙ УСВЛ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 КВ

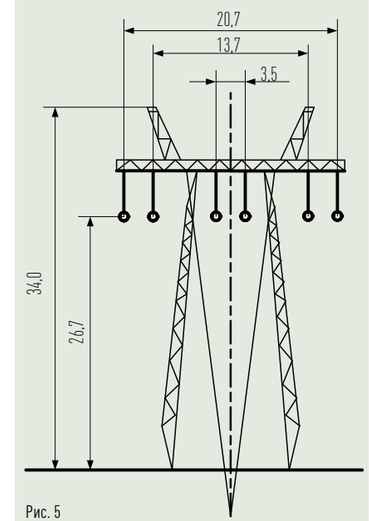

Рис. 5

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХЦЕПНОЙ УСВЛ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 КВ (С ПРОВОДАМИ 6 х АС 240/39, $d_{пр}$ = 24 ММ)

Наименование параметров	Единицы измерения	УСВЛ, в целом	На одну цепь	Удельное на фазу
Напряжение	кВ	500	500	289
Количество фаз		6	6	1
Активное сопротивление фазы ($r_ф$)	Ом/км	0,0099	0,0198	0,0198
Радиус расщепления фазы	м	0,4	0,4	0,4
Расстояние между сближенными фазами	м	4,0		
Расположение фаз	Горизонтальное			
Удельное индуктивное сопротивление фаз (x_o):				
при θ = 0°	Ом/км	0,1797 (0,181)	0,3594	0,3594
при θ = 120°	Ом/км	0,0947 (0,097)	0,189	0,189
при θ = 180°	Ом/км	0,0818 (0,0839)	0,1636	0,1636
Удельная емкостная проводимость фаз ($в_o$):				
при θ = 0°	См/км·10^{-6}	6,68 (6,59)	3,34	3,34
при θ = 120°	См/км·10^{-6}	11,789 (11,5)	5,89	5,89
при θ = 180°	См/км·10^{-6}	13,49 (13,14)	6,745	6,745
Волновое сопротивление фаз ($Z_в$):				
при θ = 0°	Ом/км	164 (166)	328	328
при θ = 120°	Ом/км	89,75 (91,9)	179,5	179,5
при θ = 180°	Ом/км	77,9 (80)	155,8	155,8
Натуральная мощность, ($P_н$)				
при θ = 0°	МВт	1522 (1504)	761	
при θ = 120°	МВт	2779 (2714)	1389	
при θ = 180°	МВт	3197 (3117)	1598,5	
Удельная зарядная мощность (Q_c)				
при θ = 0°	Мвар/км	1,674	0,837	0,279
при θ = 120°	Мвар/км	2,946	1,473	0,491
при θ = 180°	Мвар/км	3,378	1,689	0,563

Таблица 1

ниями (x_0, b_0, $Z_В$), то после сближения создаются взаимные составляющие, а именно: $\dot{X}_{ОМ}$, $\dot{b}_{ОМ}$, $\dot{Z}_{ВМ}$, – и результирующие параметры фаз принимают новые эквивалентные значения:

$$X_{0Э} = X_0 + X_{0Me^{j\theta}}. \qquad (15)$$

Величины взаимных составляющих могут составлять 25–30% (в зависимости от степени сближения цепей) от собственных значений указанных параметров, а их знак зависит от углового сдвига (θ) между приложенными к фазам цепей трехфазными системами векторов напряжений и протекающих токов.

При θ = 0° каждая из фаз линии будет обладать параметрами:

$$X_{OЭ} = X_O + X_{OM};$$
$$b_{OЭ} = b_O - b_{OM}; \qquad (16)$$
$$Z_B = Z_B + Z_{BM}.$$

При θ = 180° параметры фаз будут иметь следующие значения:

$$X_{OЭ} = X_O - X_{OM};$$
$$b_{OЭ} = b_O + b_{OM}; \qquad (17)$$
$$Z_B = Z_B - Z_{BM}.$$

При углах сдвига θ в диапазоне θ = 0÷180° эквивалентные значения параметров принимают промежуточные значения.

При расстояниях между сближенными фазами, равных (0,25÷0,3) от $D_{ср}$, где $D_{ср}$ – расстояния между фазами, принимаемые на практике для традиционных ВЛ (того же класса напряжения), в УСВЛ в случае угла сдвига θ = 180° снижение волнового сопротивления фаз достигает 30–40% по сравнению с исходными значениями (до сближения) при минимальном индуктивном сопротивлении и максимальной емкостной проводимости. Это обеспечивает увеличение на 30–40% значения натуральной мощности линии, а соответственно, и ее пропускной способности. Режим с θ = 180° необходим при максимальной передаваемой мощности (P_m). При уменьшении передаваемой мощности целесообразно уменьшать угол (θ), а при холостом ходе линии – устанавливать значение θ = 0°. При этом фазы линии обладают минимальной удельной зарядной мощностью $Q_o = U^2 \cdot b_{оэ}$, что позволяет поддержать заданный уровень напряжения вдоль линии при минимальных величинах мощности шунтирующих реакторов.

Значения угловых сдвигов между системами векторов напряжений цепей могут быть фиксированными (0°, 120°, 180°) или регулируемыми. Угловой сдвиг между системами векторов напряжений цепей может быть создан с помощью:

- соответствующих схем присоединения фаз к шинам подстанций (фиксированный 0° и 120°);
- применения трансформаторов с соответственно разными группами соединения (фиксированный 180°);
- фазорегулирующих устройств трансформаторного или автотрансформаторного типов (регулируемый угловой сдвиг в пределах 0 ÷ 180° или в меньших пределах).

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

Цепи двухцепных и многоцепных УСВЛ конструктивно располагаются либо на общих опорах, либо фазы монтируются на отдельных опо-

ИНФОРМАЦИЯ

УПРАВЛЯЕМЫЕ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИЕСЯ ВЛ

Управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ) позволяют в процессе изменения величины передаваемой по линии мощности осуществлять регулирование параметров электрического и магнитного поля фаз и цепей, благодаря чему обеспечивается управление эквивалентными параметрами ВЛ. Регулирование параметров ВЛ целесообразно осуществлять для обеспечения заданных режимов как линии, так и энергосистемы в целом. Данное регулирование осуществляется путем изменения угла сдвига системы векторов напряжений одной цепи по отношению к системе векторов напряжений другой цепи (θ) в пределах θ = (0÷180°) с помощью фазоповоротных устройств (ФПУ, ФРТ), установленных в местах присоединения ВЛ к подстанциям. Применение ФПУ на УСВЛ совместно с другими устройствами FACTS обеспечивает заданные параметры ВЛ, высокую управляемость электрических сетей и позволяет достичь существенной экономии капитальных и эксплуатационных затрат по энергосистеме в целом, по сравнению с вариантами традиционных решений.

СХЕМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ И РАССМАТРИВАЕМЫХ НА ПЕРСПЕКТИВУ ВЛ 220, 500 КВ В РЕГИОНЕ МЕЖДУ ОЭС СИБИРИ И ОЭС ВОСТОКА

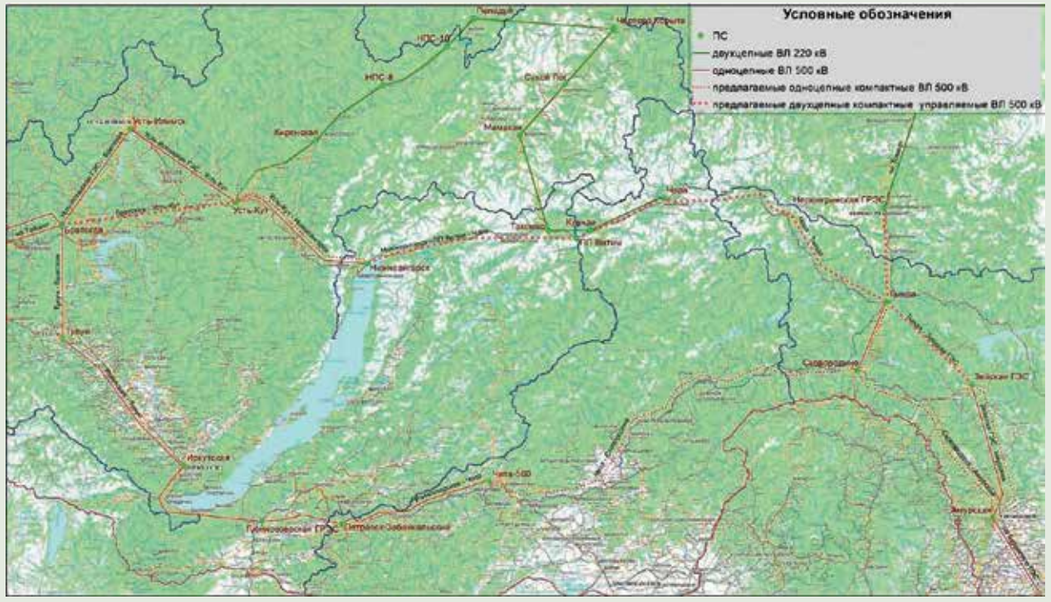

Рис. 6

рах. Сближенные фазы в пролетах фиксируются относительно друг друга с помощью изоляционных элементов – стяжек или изоляционных распорок, которые практически снимают проблему «пляски» и вибрации проводов линии.

На данный момент выполнены проектные работы по ряду вариантов компактных ВЛ 220 кВ (рис. 3) и проведены исследования и принципиальные проработки вариантов УСВЛ 500 кВ (рис. 4, 5). Выполнены разработки перспективных вариантов возможного развития энергосистем с использованием УСВЛ различных классов напряжения. Состояние работ в области УСВЛ таково, что уже в настоящее время может ставиться вопрос о создании двухцепных УСВЛ различных классов напряжения для работы в сложных электроэнергетических системах.

Северо-Западное отделение ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект» разработали по исходным данным Института энергетики АН Молдовы двухстоечную портальную металлическую опору (рис. 5). Характерной особенностью разработанной конструкции является то, что у нее предусмотрено попарное расположение фаз разных цепей, расстояние между которыми принято минимально допустимым с учетом ограничений по диэлектрической прочности воздушных промежутков «фаза-фаза» при наибольшем рабочем напряжении и при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений. Для варианта УСВЛ 500 кВ с горизонтальным расположением фаз расстояние между сближенными фазами на опоре принято равным 5,5 м.

В каждом пролете на расстоянии от опор ¼ длины пролета должны быть установлены изоляционные элементы (стяжки или распорки), с помощью которых расстояние между сближенными фазами в пролете устанавливается равным 4,0 м, что выше минимально допустимого по ПУЭ.

Рассмотрены три варианта УСВЛ 500 кВ. Для первого – каждая фаза является расщепленной на шесть составляющих с проводом АС 240/56, радиус расщепления принят равным r_p = 0,5 м. Для второго – из шести составляющих с проводом

АС 240/39 с радиусом расщепления r_p = 0,4 м. Для третьего – из шести составляющих с проводом АС 300/39 с радиусом расщепления r_p = 0,34 м. Выбор проводов и конструкции расщепленной фазы УСВЛ 500 кВ осуществлен с учетом условия $E_m \leqslant 0{,}9\ E_0$.

Для выбранной конструкции промежуточной портальной опоры (рис. 5) и принятых геометрических расстояний были рассчитаны параметры двухцепной УСВЛ 500 кВ. Их значения для варианта УСВЛ 500 кВ с проводами 6 х АС 240/39 приведены в таблице 1.

В скобках приведены данные для УСВЛ 500 кВ с проводами в фазах 6 х АС 240/56, $d_{пр}$ = 22,4 мм, радиус расщепления r_p = 0,4 м; активное сопротивление провода r_0 = 0,1218 Ом/км.

Приведенные в таблице 1 данные являются исходными для составления расчетных схем замещения для выполнения расчетов режимов УСВЛ.

РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ КОМПАКТНЫХ ВЛ

На ВЛ напряжением 220 кВ и выше могут быть применены схемы с пофазным управлением. Это позволяет по-новому подойти к организации ремонтных работ на ВЛ.

Как известно, на традиционных ВЛ ремонтные работы выполняются при отключении ВЛ или под напряжением. Приемы и регламенты проведения ремонтных работ на обычных ВЛ достаточно хорошо освоены [7, 8], и часть из них может быть использована для организации ремонтных работ на компактных ВЛ и УСВЛ, а для некоторых видов ремонтных работ должны быть разработаны специальные приемы.

При отключенном состоянии компактных ВЛ и УСВЛ все виды ремонтных работ могут проводиться таким же образом, как и на традиционных ВЛ, за исключением работ, связанных с ремонтом междуфазовых изоляционных распорок или стягивающих фазы изоляционных элементов, а также на проводах фаз и токоведущих элементах.

При отключенном состоянии компактных ВЛ, УСВЛ использование специальных передвижных подвесных тележек позволяет проводить любые работы по замене и ремонту междуфазовых изоляционных элементов, а также арматуры расщепленных фаз, каждой в отдельности. В случае применения на компактных ВЛ и УСВЛ стягивающих междуфазных элементов для их замены или ремонта требуется предварительная фиксация расстояния между сближенными фазами с помощью натяжных приспособлений (например, фиксирующих стержневых элементов или мерных линеек, канатов и др.). По завершении работ монтажные приспособления снимаются. Передвигаясь на подвесной тележке вдоль пролета ВЛ, исполнитель аналогичным образом выполняет ремонт или замену следующей междуфазовой изоляционной конструкции.

Выполнение других видов ремонтных работ, связанных с работами на опорах и линейной подвесной изоляции, на компактных ВЛ и УСВЛ осуществляется аналогично работам, проводимым при ремонтах традиционных ВЛ.

Что касается ремонтных работ под напряжением, то организация работ на компактных ВЛ и УСВЛ существенно отличается от таковой на традиционных ВЛ. Последнее обусловлено необходимостью бесперебойного электроснабжения потребителей, питаемых по данной ВЛ или УСВЛ. Следует отметить, что при нахождении компактных ВЛ или УСВЛ под напряжением сходными ремонтными работами с обычными ВЛ будут только те, которые могут быть выполнены без приближения к токоведущим частям менее, чем установлено нормативными документами.

Выполнение работ под напряжением на фазах и других токоведущих частях на компактных ВЛ и УСВЛ недопустимо, если расстояния между сближенными фазами или другими токоведущими элементами, находящимися под разными потенциалами, меньше допустимого, регламентируемого нормативными документами. С учетом этого на одноцепных ВЛ при предельной их компактизации выполнение ремонтных работ под напряжением может оказаться недопустимым. Причем на двухцепных компактных ВЛ потребуется полное отключение одной из цепей, на которой необходимо выполнение ремонтных работ на токоведущих частях.

Существенные преимущества при организации ремонтных работ под напряжением имеют УСВЛ. Эти преимущества достигаются за счет того, что в УСВЛ попарно сближенными являются фазы, принадлежащие разным цепям. Для УСВЛ предусматриваются как минимум два режима работы: при $\theta = 0°$ или $\theta = 120°$. В первом случае сближенные фазы будут иметь одинаковые напряжения (по модулю и фазе), а во втором случае между ними будет линейное напряжение.

При $\theta = 0°$ пара сближенных фаз может рассматриваться как одна фаза с глубоким расщеплением. Так как расстояния от одной пары фаз ВЛ до других пар и до заземленных элементов опор в УСВЛ выдерживаются так же, как и на обычных ВЛ, то ремонт под напряжением возможен с использованием всех приемов и процедур, применяемых при выполнении ремонтных работ

на обычных ВЛ с глубоко расщепленными фазами. В этом случае отключения УСВЛ не потребуется.

При применении пофазного управления на двухцепных УСВЛ при необходимости могут быть отключены только две сближенные фазы (одна пара фаз, принадлежащих разным цепям). Причем ремонтные работы на отключенных фазах могут проводиться, как на отключенной ВЛ (разумеется, при соблюдении мер предосторожности, так как остальные четыре фазы УСВЛ будут в работе). Остающиеся в работе две пары сближенных фаз обеспечат четырехфазный режим УСВЛ. Например, если при θ = 120° будет отключена пара фаз (A_1 и B_2), то остальные две пары фаз могут иметь фазировку: B_1 и C_2, C_1 и A_2, что обеспечит полноценное трехфазное питание шин приемных подстанций.

Эти преимущества двухцепных УСВЛ необходимо принимать во внимание при комплексных технико-экономических обоснованиях выбора того или иного типа ВЛ нового поколения.

ВАРИАНТЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ ОЭС СИБИРИ И ОЭС ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

На рис. 6 показана возможность применения компактных управляемых ВЛ 220, 500 кВ для объединения ОЭС Сибири и ОЭС Востока на параллельную работу.

В настоящее время планируется сооружение двухцепной ВЛ 220 кВ «Пеледуй» – «Чертово Корыто» – «Сухой Лог» – «Мамакан», которая замкнет двухцепную шунтирующую связь 220 кВ между узлами 220/500 кВ «Усть-Кут» (с запада) и 220/500 кВ «Чара» (с востока). Вся шунтирующая связь 220 кВ состоит из следующих участков: ПС 500/220 «Усть-Кут» – ПС 220 «Киренская» – ПС 220 НПС-8 – ПС 220 НПС-10 – ПС 220 «Пеледуй» – ПС 20 «Чертово Корыто» – ПС 220 «Сухой Лог» – ПС 220 «Мамакан» – ПС 220 «Таксим» – ПС 220 «Куанда» – ПС 220/500 «Чара». Соответственно, связь 500 кВ «Нижнеангарск» – ПП «Витим» – «Чара» замыкает узлы 500 кВ: с запада на восток – ПС 500 «Усть-Кут» – ПС 500 «Нижнеангарск» – ПС 500 ПП «Витим» – ПС 500/220 «Чара». ПС 500 кВ «Усть-Кут» связана с основной сетью 500 кВ Сибирской энергосистемы. ПС 500/220 кВ «Чара» находится вблизи границы с энергосистемой Дальнего Востока, однако связи по ВЛ 500 кВ с энергосистемой Дальнего Востока пока нет.

При введении в эксплуатацию ВЛ 500 кВ «Нижнеангарск» – ПП «Витим» – «Чара» создаются предпосылки дальнейшего развития сети 500 кВ от ПС 500 кВ «Чара» до ПС 500 кВ Зейская ГЭС и объединения на параллельную работу ОЭС Сибири и ОЭС Востока.

В настоящее время в ОЭС Востока существует одноцепная ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – «Амурская» (двухцепный участок Бурейская ГЭС – «Хабаровская») – «Хехцир-2» – Приморская ГРЭС – (две цепи 500 кВ: одна – Приморская ГРЭС – «Дальневосточная», вторая – «Приморская» – «Чугуевка»).

Подстанция «Приморская» связана также ВЛ 500 кВ с ПС 500 кВ «Владивосток».

Схемами перспективного развития сетей 500 кВ в ОЭС Востока предусматривается дополнительное строительство второй цепи 500 кВ Зейская ГЭС – «Амурская» – Бурейская ГЭС, и, таким образом, на всем протяжении до Владивостока будет создана связь 500 кВ по двухцепным ВЛ 500 кВ.

Целесообразно обеспечить связь ОЭС Сибири и ОЭС Востока по крайней мере по двухцепной ВЛ 500 кВ. Возможными вариантами такой связи по ВЛ 500 кВ могут быть следующие схемы:

ВАРИАНТ 1

Строительство одноцепной компактной ВЛ 500 кВ «Чара» – НПС-20 – Зейская ГЭС. Таким образом будет обеспечена связь ОЭС Сибири и ОЭС Востока по ВЛ 500 кВ «Усть-Кут» – «Нижнеангарск» – ПП «Витим» – «Чара» (НПС-20) – Зейская ГЭС. Эту связь можно назвать северной. Второй цепью 500 кВ могла бы стать новая ВЛ 500 кВ «Читинская» – «Сковородино» – Зейская ГЭС. Эту связь 500 кВ «Читинская» – «Сковородино» – Зейская ГЭС можно было бы назвать южной.

ВАРИАНТ 2

Строительство двухцепной компактной ВЛ 500 кВ на всем протяжении от ПС «Нижнеангарская» – ПП «Витим» – «Чара» – НПС-20 – Зейская ГЭС. В этом варианте целесообразно рассмотреть строительство дополнительной одноцепной ВЛ 500 кВ «Нижнеангарск» – «Братская». Двухцепная компактная ВЛ 500 кВ «Нижнеангарская» – ПП «Витим» – «Чара» – НПС-2 – Зейская ГЭС в данном варианте может быть выполнена в виде двухцепной УСВЛ 500 кВ, обеспечивающей пропускную способность на уровне 3000–3500 МВт. При этом может предусматриваться и строительство южной связи 500 кВ, как указано в варианте 1. Реализация данного варианта позволит обеспечить пропускную способность сечения 500 кВ ОЭС Сибири – ОЭС Востока на уровне 4000–4500 МВт.

В обоих вариантах важную роль для электроснабжения потребителей, расположенных в регионе между ОЭС Сибири и ОЭС Востока, будут

играть ВЛ 220 кВ, часть из которых уже построена, а часть планируется на перспективу. Сооружаемые в настоящее время вставки постоянного тока на подстанциях «Могоча» и «Хани» будут эффективны для регулирования потоков мощности по ВЛ 220 кВ при их параллельной работе совместно с сетью 500 кВ.

Рассматриваемые решения применения вариантов компактных управляемых ВЛ 500 кВ повышенной пропускной способности совместно с ВЛ 220 кВ позволят соединить на синхронную работу ОЭС Сибири и ОЭС Востока и создать возможности осуществления направленных и обменных потоков мощности между данными объединенными энергосистемами на уровне не менее 4500–5000 МВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные к настоящему времени технические и проектные разработки, а также уже накопленный положительный опыт позволяют сделать вывод о технической и экономической целесообразности и реальности практического применения ВЛ нового поколения – управляемых компактных ВЛ с фазорегулирующими устройствами для увеличения пропускной способности и управления потоками мощности в электроэнергетических системах.

Результаты исследований управляемых двухцепных самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (УСВЛ) напряжением 500 кВ свидетельствуют о том, что они обладают целым рядом технических преимуществ по сравнению с двумя одноцепными ВЛ 500 кВ, и в первую очередь значительно большей пропускной способностью, управляемостью и улучшенными технико-экономическими показателями. К настоящему времени проведены научные исследования, проектные разработки и экспериментальные работы, которые позволяют осуществлять проектирование и строительство электропередач нового типа и использовать их для развития электроэнергетических систем и формирования эффективных межсистемных и межгосударственных транзитов мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шакарян Ю. Г., Тимашова Л. В., Карева С. Н., Постолатий В. М., Быкова Е. В., Суслов В. М. Технические аспекты создания компактных управляемых ВЛ 220 и 500 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение, 2012, № 3. – С. 106–111.
2. Веников В. А. Дальние электропередачи. – Госэнергоиздат, 1960. – 311 с.
3. Постолатий В. М., Радченко Н. П. Индуктивность многоцепных линий электропередачи // Известия АНМ, 1979, № 1. – С. 55–63.
4. Александров Г. Н. Пропускная способность воздушных линий электропередачи с расщепленными проводами / Линии электропередачи повышенной пропускной способности, АН Молдовы. – Кишинев, Штиинца, 1982. – С. 24–33.
5. Постолатий В. М. Технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи и целесообразность применения их для формирования системообразующей сети Единой энергетической системы СССР / Известия Академии наук СССР, Энергетика и транспорт. – Москва, 1989. – С. 54–64.
6. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с., илл.
7. Барг И. Г., Эдельман В. И. Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 247 с.
8. Справочник «Библия электрика»: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. – 6-е и 7-е изд., все действующие разделы. – Новосибирск: Из-во Сиб. унив., 2011. – 688 с., ил.

ИНФОРМАЦИЯ

ПРЕИМУЩЕСТВА КОМПАКТНЫХ ВЛ

Применение компактных воздушных линий позволяет добиться экономии капитальных вложений при строительстве ВЛ на 1 МВт натуральной мощности до 37% для ВЛ 220 кВ и до 33% для ВЛ 500 кВ.

Сокращение площадей земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии, составляет до 36% для ВЛ 220 кВ и до 42% для ВЛ 500 кВ в расчете на 1 МВт натуральной мощности.

Применение компактных ВЛ в сочетании с устройствами FACTS по сравнению с ВЛ традиционной конструкции позволяет осуществлять принудительное перераспределение потоков активной и реактивной мощности, повысить эффективность использования устройств регулирования реактивной мощности, снизить суммарные потери электроэнергии в энергосистеме, повысить механическую устойчивость ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов, обеспечить управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях, уменьшить суммарную мощность и стоимость устройств регулирования мощности и напряжения и т. д.