

$\rho_M = f(t)$  для меди. Значения  $\rho_{ст}$  и  $\rho_M$  задаются по исходным данным в соответствии с температурами стенки котла и обмотки индуктора.

Приведенный выше алгоритм был реализован при помощи языка ФОРТРАН на ЭВМ "Минск-32".

Расчет применим для индукционных катушек любой конфигурации.

Результаты расчета индукторов не отличаются от экспериментальных данных более, чем на 10 %. Это вполне допустимо для цепей со сталью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/ Под ред. Б.Е.Неймарка. М.—Л., 1967. — 320 с.

УДК 621.315.1.072

Г.И.СЕЛИВЕРСТОВ (БПИ)

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 330—500 кВ

Пропускная способность традиционных электропередач 330—500 кВ удовлетворяет современному уровню развития электроэнергетических систем. Конструктивно новые одноцепные линии электропередачи компактного (кабельного) типа, предложенные в [1], при увеличении в фазе числа составляющих повышают пропускную способность за счет максимально возможного сближения проводов разноименных фаз и эффективного использования поверхности и сечения проводов. Другой путь увеличения пропускной способности заключается в выполнении двухцепных самокомпенсирующихся линий электропередачи с попарно сближенными фазами разных цепей и обеспечении между ними фазового сдвига до  $180^\circ$  [2].

Увеличение пропускной способности за счет максимального использования поверхности проводов достигается также в двухцепных линиях электропередачи, сочетающих положительные свойства компактных и самокомпенсирующихся ЛЭП [3]. В таких линиях провода попарно сближенных расщепленных фаз разных цепей равномерно и поочередно расположены на отдельном замкнутом контуре (рис. 1). Однако использование этих линий с напряжением 330 кВ и выше имеет ограничение по сечению применяемых проводов. Например, для ЛЭП 330 кВ радиус составляющего расщепленной фазы (рис. 1, б), удовлетворяющий ограничению коронного разряда, должен быть не менее 2 см, для ЛЭП 500 кВ — не менее 3 см. Поэтому в электропередаче данного типа необходимо применять расщепление каждого составляющего фазы на два и более проводов (рис. 1, в—е).

В данной статье мы попытались оценить возможности линии электропередачи с двойным расщеплением фаз, обуславливающей повышение пропускной способности (натуральной мощности) и оказывающей незначительное влияние на окружающую среду.

Наибольшая пропускная способность такой электропередачи достигается

при подведении к проводам попарно сближенных фаз разных цепей напряжений, находящихся в противофазе [3].

Рассмотрим электрические параметры линий электропередачи с двойным расщеплением фаз, провода которых расположены на трех отдельных контурах, имеющих форму окружности. Оценка параметров выполнялась по мето-

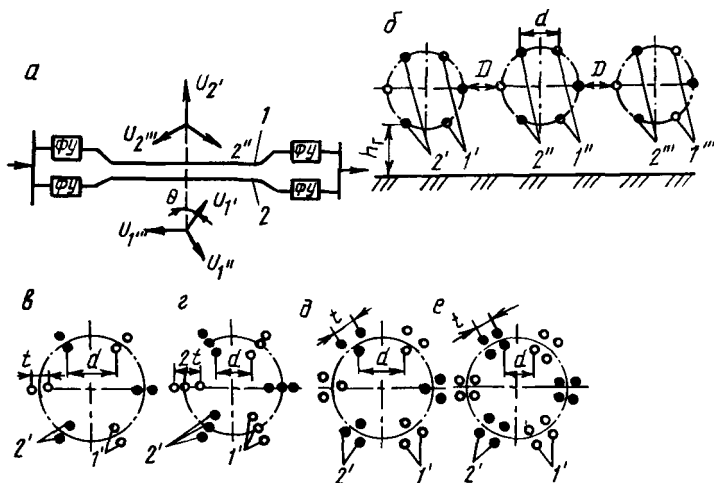


Рис. 1. Принципиальная схема (а), взаимное расположение (б) и конструкции (в-е) фаз компактной управляемой двухцепной линии электропередачи:

$1^{\circ}, 1''$ ,  $1'''$  и  $2^{\circ}, 2''$ ,  $2'''$  — провода расщепленной фазы цепи 1 и цепи 2 линии;  $t, d, D$  — расстояние между соседними проводами соответственно расщепленной фазы, фаз разных цепей в контуре и соседних контуров;  $h_r$  — габариты проводов до земли; сдвиг фаз на угол  $\theta$  между двумя трехфазными системами векторов напряжений  $\dot{U}_{1,1}, \dot{U}_{1,1'}, \dot{U}_{1,1''}$  и  $\dot{U}_{2,1}, \dot{U}_{2,1'}, \dot{U}_{2,1''}$ , приложенных к проводам расщепленных фаз 1-й и 2-й цепей, создается с помощью фазосдвигающих устройств ФУ, через которые линия электропередачи связывает передающую и приемную системы.

дике [2] с использованием ФОРТРАН-программы на ЕС ЭВМ. Определялась действительная часть выражения полной натуральной мощности 1-й и 2-й цепей

$$P_{\text{нат},1} = \text{Re}(U^2 / \dot{Z}_{3,1}); \quad P_{\text{нат},2} = \text{Re}(U^2 / \dot{Z}_{3,2}).$$

Здесь  $U$  — напряжение линии, равное напряжению цепей ( $U = U_1 = U_2$ );  $\dot{Z}_{3,1}$  и  $\dot{Z}_{3,2}$  — эквивалентное волновое сопротивление фазы соответственно 1-й и 2-й цепей, определенное (без учета активного сопротивления проводов и поперечной активной проводимости) по выражению

$$\dot{Z}_{3,1} = (\dot{L}_{3,1} / \dot{C}_{3,1})^{1/2}; \quad \dot{Z}_{3,2} = (\dot{L}_{3,2} / \dot{C}_{3,2})^{1/2},$$

где  $\dot{L}_{3,1}$  и  $\dot{C}_{3,1}$ ,  $\dot{L}_{3,2}$  и  $\dot{C}_{3,2}$  — соответственно эквивалентная индуктивность и емкость фазы 1-й и 2-й цепей.

Исследования проводились при следующих исходных условиях: число проводов в контурах ( $n_1 = n_2 = n_3$ ) и сближенных фазах ( $n = n'_1 = n'_2$ ) одинаково; трехфазные системы напряжений, приложенных к проводам каждой цепи, симметричны; транспозиция проводов в контурах и отдельных контурах, расположенных горизонтально, выполнена по полному циклу; напряженность электрического поля  $E_i$  на поверхности проводов не должна превышать значение, допустимое по условию ограничения коронного разряда. В данных условиях индуктивность и емкость фазы обеих цепей при угле  $\Theta$ , равном  $180^\circ$  и  $0^\circ$ , есть параметры вещественные, причем  $\dot{L}_{\text{э},1} = \dot{L}_{\text{э},2} = L_{\text{э}}$ , а  $\dot{C}_{\text{э},1} = \dot{C}_{\text{э},2} = C_{\text{э}}$ . При других углах параметры  $\dot{L}_{\text{э},1}$  и  $\dot{L}_{\text{э},2}$ ,  $\dot{C}_{\text{э},1}$  и  $\dot{C}_{\text{э},2}$  являются комплексными с вещественными частями, равными по значению и знаку, и мнимыми частями, равными по значению, но противоположными по знаку.

Результаты расчета электрических параметров исследуемых линий с фазовым сдвигом  $\Theta$ , равным  $180^\circ$ , и традиционных одноцепных линий (ТВЛ) с общими параметрами  $U, D, h_r$  сведены в табл. 1. Фаза традиционной линии 330 кВ расщеплена на два провода; линии 500 кВ — на три провода.

Расщепление составляющего расщепленной фазы линии 330 кВ на два провода при  $t = 20$  см (см. табл. 1) вызывает увеличение натуральной мощности на 22,5%; расщепление на три провода способствует увеличению натуральной мощности на 48,5%. В то же время конструкция фазы (рис. 1, г) наряду с высокой натуральной мощностью обладает двумя недостатками: большим сечением составляющего (ЗАС 400/22) и неравномерностью распределения зарядов по проводам составляющего. Из рассмотренных конструкций наиболее оптимальной является конструкция фазы (рис. 1, д), позволяющая по сравнению с конструкцией (рис. 1, в) повысить значение  $P_{\text{нат}}$  линии на 15% и уменьшить сечение составляющего на 11%.

Т а б л и ц а 1

Параметры линий электропередачи 330–500 кВ

Напряжение и габариты линии	Конструкция фазы	Радиус провода $r_i$ , см	Расстояние между проводами составляющего фазы $t$ , см	Электрические параметры				
				фазы	цепи	провода	линии	
				$Z_{\text{э}}$ , Ом	$P_{\text{нат}}$ , МВт	$P_i$ , МВт	$E_i$ , кВ/см	$E_{\text{э}}$ , кВ/м
$U = 330$ кВ	рис. 1, б	2,15	—	87,5	1244	138,2	21,0	0,6
$d = 2,3$ м	" 1, в	1,36	20	71,4	1525	84,7	21,6	1,3
$D = 8$ м	" 1, в	1,36	10	76,6	1421	78,9	21,1	1,0
	" 1, г	1,36	20	58,9	1848	68,4	19,9	1,4
$h_r = 7,5$ м	" 1, д	1,08	20	62,1	1753	64,9	21,3	1,3
	ТВЛ	1,08	40	301,0	361	60,2	18,2	8,1
$U = 500$ кВ	рис. 1, д	1,51	15	72,6	3443	127,5	21,0	3,2
$d = 3,7$ м	" 1, е	1,51	20	62,8	3980	110,5	17,6	3,5
$D = 8$ м	" 1, е	1,17	20	64,0	3906	108,5	21,5	3,5
$h_r = 8$ м	ТВЛ	1,17	40	263,2	950	105,6	20,8	12,1

Для линии 500 кВ расщепление составляющего на три провода марки АС 500/64 увеличивает параметр  $P_i$ , определяющий натуральную мощность единичного провода линии, на 20 % по сравнению с аналогичным показателем традиционной ВЛ. Расщепление на четыре провода повышает  $P_{\text{нат}}$  на 33 % и снижает общее сечение проводов составляющего на 44 %.

Высокая натуральная мощность исследуемых линий достигается за счет большой взаимоиндуктивной и взаимно емкостной связи между составляющими попарно сближенных фаз разных цепей. Во-первых, это проявляется в уменьшении в два раза параметра  $t$  (для увеличения взаимного влияния проводов одной фазы) по сравнению со значением  $t$  традиционных ВЛ; во-вторых, в увеличении числа проводов в составляющем (для оптимального использования поверхности и сечения проводов).

Расщепление составляющего фазы линии напряжением 330 кВ на три провода и 500 кВ на четыре по параметру  $p_i$  не дает технических преимуществ по сравнению с типовыми решениями. Исследуемые линии эффективнее по использованию единицы площади поперечного сечения их трассы. Это преимущество достигается за счет передачи по таким линиям больших потоков электрической энергии.

Исследования выявили незначительную зависимость  $P_{\text{нат}}$  от радиусов проводов  $r_i$  составляющего расщепленной фазы. Например, для конструкции фазы (рис. 1, д) линии 330 кВ увеличение параметра  $r_i$  в 1,4 раза приводит к увеличению натуральной мощности на 3,8 %. Это объясняется тем, что показатель  $r_i$  определяет собственные параметры провода (фазы) и входит под логарифм.

Выведенные закономерности характерны также для линий с любым числом составляющих в фазе. Причем, при прочих равных условиях для всех исследуемых конструкций фаз значение  $P_{\text{нат}}$  линий изменяется прямо пропорционально числу составляющих в расщепленной фазе. Это объясняется электромагнитным полем, находящимся между соседними составляющими попарно сближенных фаз, что подтверждается низкой напряженностью электрического поля  $E_3$  под проводами линии на уровне 1,8 м от земли (табл. 1). С ростом числа составляющих в фазе линий значение  $E_3$  еще больше уменьшается, снижая тем самым влияние линий на окружающую среду. Причем, значение параметра  $E_3$  при изменении угла  $\Theta$  в пределах  $180-120^\circ$  не превышает аналогичный показатель традиционных ВЛ.

Следует отметить такую важную особенность исследуемых линий, как широкий предел изменения зарядной мощности  $Q_c$  (емкости) линий при регулировании угла  $\Theta$  в диапазоне  $180-0^\circ$ . Для конструкции фазы (рис.1, д) линии 330 кВ и (рис. 1, е) линии 500 кВ  $Q_c$  уменьшается в 3,6 и 2,9 раза; при двух составляющих в фазе и тех же конструкциях (без одного составляющего в фазе) — соответственно в 2,7 и 2,3 раза. Это позволит значительно снизить мощность компенсирующих устройств, устанавливаемых на линии по условиям работы электропередачи в режиме минимальных нагрузок ( $\Theta = 0^\circ$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Г.Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности. — Электричество, 1981, № 7, с. 1–6. 2. Основные принципы создания и

технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи/Ю.Н.Астахов, В.А.Веников, В.М.Постолатий, Г.В.Чальый. — Электричество, 1977, № 12, с. 37–44. З. А.с. 945933 (СССР). Электропередача переменного тока/Г.Е.Поспелов, В.Т.Федин, М.С.Чернецкий. — Оpubл. в Б.И., 1982, № 27.

УДК 621.311.4

В.С.ЛИВШИЦ, А.И.ЛАПИДУС, канд-ты  
техн.наук, В.Ф.МЕХЕДКО (БПИ)

## ОПЫТ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК БЕЗ ПЕРЕРЫВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

На действующих предприятиях в ряде случаев возникает необходимость выполнения расчетов, основанных на знании электрических нагрузок элементов сети, например, при расчетах уровней и отклонений напряжения, компенсации реактивной мощности и т.д. Данные об электрических нагрузках, содержащиеся в проектных материалах, со временем устаревают, поэтому их необходимо периодически уточнять. Если фидер оснащен необходимыми измерительными приборами (ваттметрами, счетчиками), то измерение его нагрузок не представляет принципиальных трудностей. Если же необходимых стационарных приборов на фидере нет, то применяют переносный комплект.

Рассмотрим способ подключения комплекта приборов к фидеру напряжением 380 В в условиях круглосуточной работы, когда перерыв электроснабжения потребителей недопустим. Считаем, что фидер имеет хотя бы один амперметр, подключенный к измерительному трансформатору тока, нагрузка фаз симметричная. Условие симметрии на фидерах, питающих силовую нагрузку, обычно выполняется, позволяет проводить измерения только на одной фазе и использовать комплект с однофазными счетчиками 220 В [ 1 ].

Токовые катушки всех приборов (рис. 1) соединены последовательно и должны быть подключены к трансформатору тока. Предположим, что трансформатор установлен на фазе А, тогда катушка напряжения счетчика активной энергии должна быть подключена между фазой А и нейтральным проводом *N*, а катушка напряжения счетчика реактивной энергии (через понижающий трансформатор 380/220 В) — между фазами В и С. Токовая цепь приборов включается во вторичную обмотку трансформатора тока (ТТ) следующим образом. Зажимы Т3 и Т4 комплекта приборов подключаются к установленному на фидере амперметру А1, причем Т3 — с помощью накладного зажима (НЗ), который образует контакт с проводником, присоединенным к амперметру. Затем, включая и выключая шунтирующий выключатель (ВК), убеждаемся в надежности присоединения НЗ к А1 (по колебаниям показания А1), после этого от амперметра А1 отсоединяется провод, на который наложен НЗ. Такая последовательность операций предупреждает разрыв цепи во вторичной обмотке ТТ.

Возможны случаи, когда доступ к измерительным трансформаторам тока затруднен и неизвестна ни маркировка выводов используемого трансформато-