

# ПОЛУВОЛНОВЫЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СВЕРХДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ 2–4 ТЫС. КМ

**АВТОРЫ:**

БУШУЕВ В.В.,  
Д.Т.Н.  
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИ-  
ЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ,  
МИНЭНЕРГО РФ

ЗИЛЬБЕРМАН С.М.,  
Д.Т.Н.  
ФСК ЕЭС – МЭС СИБИРИ

САМОРОДОВ Г.И.,  
Д.Т.Н.  
ФИЛИАЛ  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» –  
СИБНИИЭ

**П**роблема сверхдальнего транспорта электроэнергии существует в ряде стран мира, где требуется вы-дача мощности на расстояния 2–4 тыс. км от энергокомплексов к цен-трам нагрузки. При современном

уровне развития техники передачи электроэнергии проблема такого транспорта может быть решена по-средством электропередач сверх-высокого напряжения с помощью как постоянного, так и переменного тока.



Передача электроэнергии на сверхдальние расстояния решает проблему обеспечения дешевой электроэнергией потребителей, удаленных от центров генерации

## ПОТРЕБНОСТЬ В СВЕРХДАЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Растущий интерес к проблеме транспорта больших потоков мощности на сверхдальние расстояния 2–4 тыс. км обусловлен, в первую очередь, возможностью создания источников дешевой электроэнергии, удаленных от центров на-грузки.

Характеристики различных гидро-энергетических (ГЭК) и топливно-энергетических комплексов (ТЭК) и протяженность сверхдальних электропередач (ЭП), создание ко-

торых возможно в ближайшей либо отдаленной перспективе, показаны в таблице 1.

Объективной тенденцией раз-вития энергетики России на ближайшую и отдаленную перспективу является увеличе-ние транспорта энергетических ресурсов в европейские регионы страны из ресурсов ее азиатской части. Один из путей повышения эффективности работы ЕЭС Рос-сии заключается в привлечении неиспользуемых мощностей ГЭС Сибири в европейскую секцию ЕЭС. Кроме того, необходимо учитывать возможность экс-порта электроэнергии из России в Китай, Южную Корею и Украину, что также потребует транспорта на сверхдальние расстояния.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЭК И ТЭК

Энергетический комплекс и его мощность	Направление и дальность пере-дачи мощности
1. Центрально-Африканский ГЭК в бассейне р. Конго (свыше 50 ГВт)	Южно-Африканская Республика, 3–3,5 тыс. км
2. Западно-Бразильский ГЭК в бассейне р. Амазонки (свыше 50 ГВт)	Юго-восточная часть Бразилии, 2–2,8 тыс. км
3. Юго-Западный Китайский ГЭК в бассейне р. Янцзы (30 ГВт)	Восточный Китай, 3 тыс. км
4. ТЭК в Северо-Центральной части США на углях открытой раз-работки (100 ГВт)	Западная и восточная части США, 2–2,5 тыс. км
5. Тюменский ТЭК на газе, вклю-чая низконапорный газ отработав-ших крупных месторождений (30 ГВт)	Европейская часть России, Украи-на, 3–3,5 тыс. км
6. КАТЭК на углях открытой разработки (50 ГВт)	Европейская часть России, Се-верный и Восточный Китай, 3–3,5 тыс. км
7. Енисейский ГЭК (30 ГВт)	Европейская часть России, 3–3,5 тыс. км
8. Южно-Якутский ГЭК (10 ГВт)	Южная Корея, Китай, 2,5–3 тыс. км

Таблица 1

### ИНФОРМАЦИЯ

## СВЕРХДАЛЬНЯЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ

В 50-е гг. XX в. техника дальних электро-передач овладела расстояниями 1000 км, напряжением 500 кВ переменного тока, про-пускной способностью до 1000 МВт. Но нуж-но было передавать мощность 5–6 тыс. МВт на расстояния 2–3 тыс. км.

Было выдвинуто по-ложение о безуслов-ном преимуществе постоянного тока при осуществлении транс-порта энергии с востока страны на запад.

К моменту, когда в СибНИИЭ начались исследования в области ПЭП (полуволновая электропередача), сформировалась точка зрения, что решение проблемы сверх-дальнего транспорта электроэнергии следует осуществлять на посто-янном токе.

Исследования, про-водимые в СибНИИЭ, охватывали широкий круг вопросов методиче-ского и практическо-го характера.

Успех в исследовании сверхдальних ПЭП во многом определился вводом в эксплуатацию в 1958 г. электродина-мической модели.

ИНФОРМАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ  
В 50-60-Е ГГ.

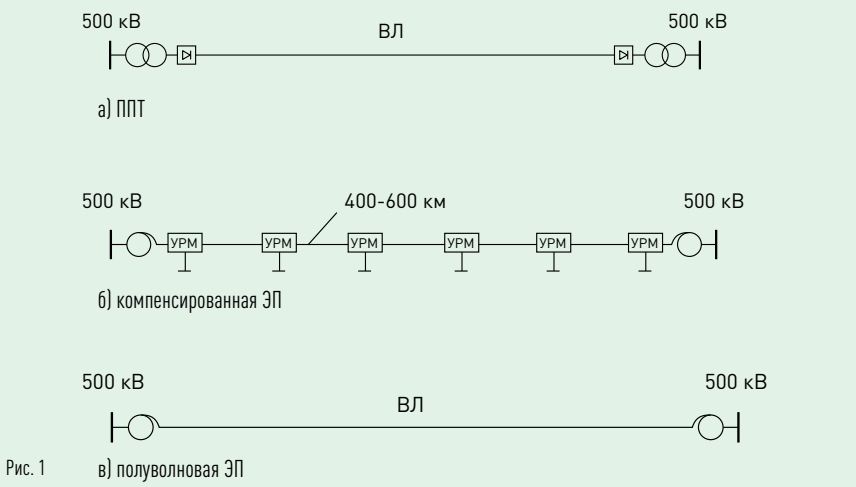
1958 г. – Успех в исследовании сверхдальних полуволновых электропередач (ПЭП), которые проводил СибНИИЭ, определен вводом в эксплуатацию в 1958 г. электродинамической модели такой передачи.

1966 г. – Технический совет Минэнерго и Государственный комитет по науке и технике (ГКНТ) в соответствии с предложением СибНИИЭ рассмотрел и утвердил техническую программу испытаний ПЭП в сетях 500 кВ ЕЭС.

1967 г. – Были проведены натурные испытания ПЭП 500 кВ Волгоград–Москва–Куйбышев–Челябинск. Сверхдальняя ЭП работала устойчиво во всем диапазоне изменения нагрузки. Управление режимами ПЭП каких-либо затруднений не вызвало. Впервые в истории развития мировой электроэнергетики удалось передать мощность свыше 1000 МВт на расстояние почти 3 тыс. км.

На этом этапе исследования, проводимые в СибНИИЭ в области сверхдальних электропередач полуволнового типа, были сосредоточены на анализе режимных характеристик.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЕРХДАЛЬНИХ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ



ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ  
РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ  
СВЕРХДАЛЬНОГО  
ТРАНСПОРТА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

При современном уровне развития техники передачи электроэнергии проблема сверхдального транспорта может быть решена с помощью ЭП сверхвысокого напряжения (как в случае с постоянным, так и переменным током).

Как известно, передача постоянного тока включает в свой состав выпрямительную и инверторную подстанции и воздушную линию (рис. 1 а), обычно биполярную. Преимущества передачи электроэнергии на постоянном токе (ППТ) заключаются в следующем:

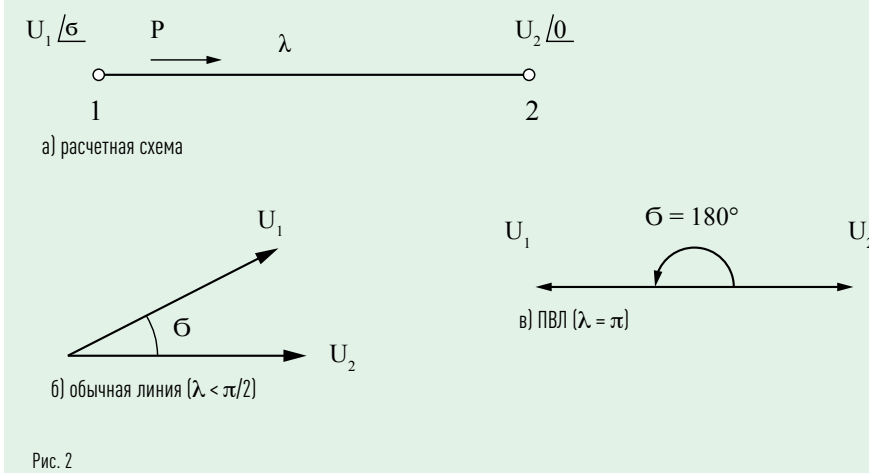
- отсутствует техническое ограничение на величину передаваемой мощности по условию устойчивости (причем независимо от расстояния);

- упрощается конструкция линии, что приводит к ее удешевлению по сравнению с трехфазными линиями переменного тока такой же пропускной способности;
- повышается надежность электропередачи за счет возможности кратковременной и длительной работы в униполярном режиме при аварийном отключении одного из полюсов.

Однако ППТ обладает и рядом недостатков: сложность структуры, низкая надежность и значительная капиталоемкость преобразовательных подстанций.

Сверхдальный транспорт электроэнергии на переменном токе возможен на основе одного из двух принципиально различных вариантов решения. Первый вариант подразумевает использование компенсированных электропередач (рис. 1 б), в состав которых входят концевые подстанции и устройства реактивной мощности (УРМ),

ФАЗОВЫЙ СДВИГ В ОБЫЧНОЙ ВЛ И ПВЛ

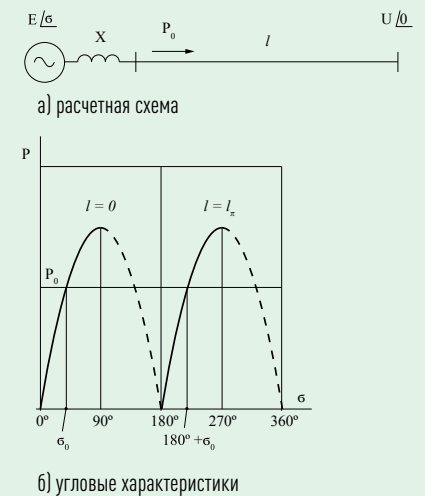


расположенные в концевых и промежуточных пунктах линии. Пропускная способность компенсированных ЭП ограничивается требованием сохранения устойчивости, и основная функция УРМ состоит именно в обеспечении условий для выполнения этого требования. С помощью УРМ можно осуществлять либо компенсацию электрической длины, либо поддержание напряжения в промежуточных точках во всем диапазоне передаваемых мощностей. Для компенсации электрической длины используются устройства продольной компенсации (УПК), устанавливаемые в промежуточных пунктах через каждые 400–600 км. Поддержание напряжения в промежуточных точках линии осуществляется с помощью управляемых УРМ, в качестве которых могут использоваться подмагничиваемые шунтирующие реакторы, подключаемые непосредственно к линии, а также статические тиристорные компенсаторы, подсоединяемые к линии с помощью трансформаторов. Пропускная способность компенсированной ЭП повышается с увеличением числа промежуточных пунктов на линии и мощности

УРМ в отдельном пункте. Существует ряд методов, позволяющих довести пропускную способность компенсированных электропередач до уровня, характерного для ППТ. В первую очередь это использование управляемых УРМ, а также компактных ВЛ. Недостатками компенсированных ЭП, предназначенных для транспорта электроэнергии на сверхдальние расстояния, являются необходимость сооружения промежуточных пунктов и большая потребность в УРМ.

Второй вариант (рис. 1 в) решения проблемы сверхдального транспорта энергии на переменном токе базируется на использовании полуволновых электропередач (ПЭП). Такие линии обладают двумя существенными преимуществами перед обычными линиями переменного тока. Они не имеют ограничений на передаваемую мощность по условию устойчивости в силу того, что их реактивное сопротивление равно нулю. Кроме того, такие линии сбалансированы по реактивной мощности, и их устойчивая работа не требует установки компенсирующих устройств [5–7].

УГЛОВЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЛИНИИ НУЛЕВОЙ  
ДЛИНЫ И ПВЛ



При частоте 50 Гц длина полуволновой линии составляет  $l_{\pi} = V_{ср}/2f \approx 3 \times 10^5 \text{ (км/с)}/50 \text{ (Гц)}/2 \approx 3 \text{ тыс. км}$ , а при 60 Гц –  $l_{\pi} \approx 2,5 \text{ тыс. км}$ . Если длина реальной линии отличается от полуволновой, то придать ей свойства полуволны можно путем включения в концевых пунктах УРМ. Последние обеспечивают настройку на полуволну, если длина линии меньше полуволновой, и компенсируют до полуволны, если длина линии значительно больше полуволны. В реальности работа линии в полуволновом режиме обеспечивается и без применения УРМ (в диапазоне длин  $l_{\pi} \pm 300 \text{ км}$ ), поскольку при длинах линии меньше полуволновой возникает настраивающий эффект концевых автотрансформаторов, составляющий около 300 км, а при длинах, превышающих полуволновую в пределах 300 км, можно обойтись без компенсирующих устройств.

ИНФОРМАЦИЯ

## ИССЛЕДОВАНИЯ В 70–80-Е ГГ.

На этом этапе исследования проводились с использованием цифровых вычислительных машин.

В 1975 г. СибНИИЭ выпустил технико-экономический доклад «Формирование ЭЭС СССР с транспортными передачами постоянного и переменного тока». В результате обсуждения этого доклада на секции электроэнергетики Научного совета ГлавНИИпроекта было принято решение о выполнении институтом «Энергосетьпроект» совместно с СибНИИЭ ТЭО транспортной электропередачи полуволнового типа для выдачи мощности Итатских ГРЭС в европейские районы страны.

В 1970–80 гг. ТЭО настроенной электропередачи напряжением 1150 кВ и передаваемой мощностью 13,5 ГВт в направлении Итат–Урал–Юг было выполнено одновременно с ТЭО ППТ напряжением ±1125 кВ такой же мощности.

Впервые в мировой практике были выполнены проекты полуволновой электропередачи напряжением 1150 кВ.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВДОЛЬ ПВЛ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ

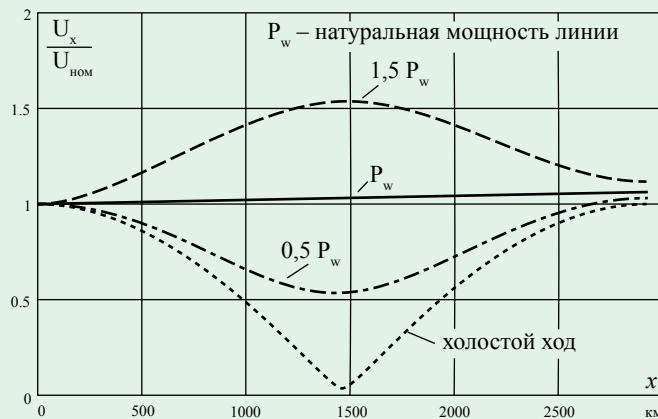


Рис. 4

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛУВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Полуволновые линии обладают рядом свойств, которые отличают их от компенсированных линий переменного тока. Отметим пять необычных свойств таких линий (по сравнению с традиционными линиями).

**Свойство 1: независимость фазового сдвига между напряжениями на концах линии от передаваемой мощности.** Если в обычных линиях фазовый сдвиг между векторами напряжений и передаваемая мощность связаны уравнением угловой характеристики (рис. 2 б), то в полуволновой линии векторы напряжений на концах линии находятся в противофазе (причем независимо от величины передаваемой мощности), то есть всегда  $\delta = 180^\circ$  (рис. 2 в).

**Свойство 2: тождественность полуволновой линии по критерию устойчивости с линией нулевой длины.** Это означает, что в случае работы станции через полуволновую линию на шарнирно-балансирующем манипуляторе (рис. 3) предельная мощность по критерию статической устойчивости определяется лишь параметрами самой станции, как и в случае линии нулевой длины.

**Свойство 3: сбалансированность по реактивной мощности во всех режимах.** Известно, что в обычной линии реактивная мощность на ее концах равна нулю лишь в режиме передачи натуральной мощности. В режимах передачи меньшей мощности линия генерирует реактивную мощность, а в режимах больше натуральной потребляет ее. В полуволновой линии при передаче любых значений активной мощности реактивная мощность в конечных точках линии полностью сбалансирована.

## ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА ПЭП 1150 КВ

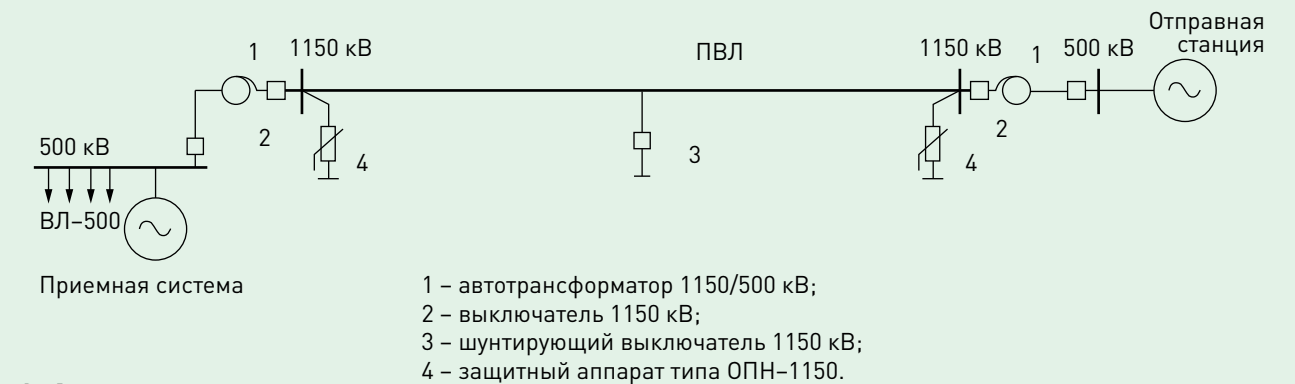


Рис. 5

**Свойство 4: прямо пропорциональная зависимость напряжения в середине линии от передаваемой мощности.** Если в обычных линиях при изменении передаваемой мощности в пределах  $(0 \div 1,5) P_w$  (где  $P_w$  – натуральная мощность линии) колебания напряжения в средней части линии составляют всего несколько процентов от номинальной величины, то в ПВЛ имеет место существенная зависимость напряжений от передаваемой мощности (рис. 4).

Как известно, повышение напряжения в средней части линии является основным фактором, ограничивающим величину пропускной способности ПЭП:

$$P_{ПЭП} \leq \frac{U_{ср. доп}}{U_{нр}} P_{w.нр},$$

где  $U_{ср. доп.}$  – допустимое напряжение в средней части линии;  $U_{нр}$  – наибольшее рабочее напряжение;  $P_{w.нр}$  – натуральная мощность линии при наибольшем рабочем напряжении.

**Свойство 5: возможность шунтирования полуволновой линии в средней точке.** Необычным свойством полуволновой линии также является то, что шунтирование ее средней точки приводит к обнулению токов на концах линии. Другими

словами, шунтирование средней точки линии эквивалентно отключению линии по концам. Это свойство оказывается очень полезным для проведения коммутаций полуволновых линий в нормальных и аварийных режимах.

Уже только перечень этих необычных свойств полуволновых линий свидетельствует о том, что решение теоретических и практических вопросов таких линий требует специального подхода. Систематические исследования электропередач полуволнового типа начались в Сибирском НИИ энергетики еще в 1956 г. Руководителем этих работ был основатель школы сибирских электроэнергетиков, д.т.н., профессор Щербаков В.К. Был проделан целый комплекс соответствующих НИР. В 1978–1980 гг. совместно с «Энергосетьпроект» было разработано технико-экономическое обоснование ПЭП Сибирь – европейская часть России напряжением 1150 кВ и передаваемой мощностью 13,5 тыс. МВт. Были разработаны экономически обоснованные и технически надежные схемы ПЭП, обоснованы технико-экономические параметры электропередач полуволнового типа, которые учитывают особенности работы таких линий в составе сложного энергообъединения.

Неоценимую роль в доказательстве работоспособности таких электропередач сыграли комплексные испытания ПЭП в 1967 г. в сети 500 кВ ЭЭС СССР, когда по полуволновой линии 500 кВ Волгоград–Москва–Челябинск длиной 2858 км успешно передавалась мощность 1050 МВт [8]. Испытания прошли под руководством объединенного диспетчерского управления. Таким образом, в настоящий момент ПЭП является хорошо проработанным объектом, полностью готовым к практическому внедрению.

На рис. 5 приведена принципиальная схема сверхдальней ЭП полуволнового типа напряжением 1150 кВ с использованием оборудования, предназначенного для дальних ЭП 1150 кВ переменного тока.

## АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ СВЕРХДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Сверхдальние ЭП, обеспечивая передачу больших потоков мощности на значительные расстояния, при аварийных отказах могут оказывать



## ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА ЧЕТЫРЕХФАЗНОЙ ЭП

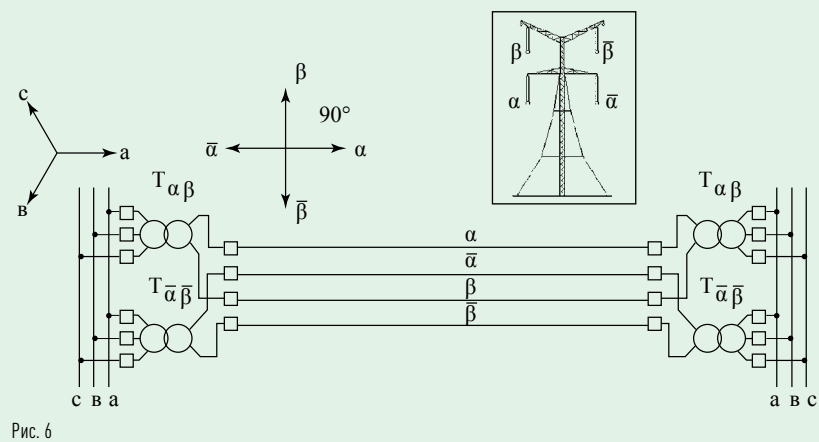


Рис. 6

заметное влияние на надежность работы приемной энергосистемы. Поэтому при транспорте электроэнергии должна быть решена и проблема надежности. Мировой опыт показывает, что сравнительно высокий уровень надежности энергосистем обеспечивается, если при их проектировании и эксплуатации выполняется критерий N-1<sup>1</sup>. Традиционным решением проблемы надежности для широко используемых в мире дальних ЭП является сооружение двухцепных секционированных линий. Однако по экономическим и экологическим соображениям для сверхдальнего транспорта электроэнергии целесообразно использовать одноцепные ЭП вместо двухцепных [9]. Такой путь допустим, если имеется техническое решение, гарантирующее одинаковый уровень надежности в этих вариантах при ликвидации однофазных повреждений, поскольку подавляющее число отказов ЭП СВН являются однофазными. И если удастся обеспечить критерий N-1 для этих случаев, то остается риск потери ЭП лишь в случае многофазных КЗ, повреждения опор и отказа подстанций. Однако риск потери всей ЭП существует и в двухцепном варианте.

Хотя экстремальные аварийные ситуации, приводящие к полному прекращению передачи электроэнергии, являются маловероятными, в любом варианте должны быть предусмотрены защитные меры и против таких ситуаций.

Если бы все однофазные КЗ были неустойчивыми, то использование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) позволило бы удовлетворить критерию N-1. Применительно к ПВЛ вопрос ликвидации однофазных повреждений приобретает особую актуальность, поскольку их число на таких линиях в несколько раз больше, чем на обычных линиях. Для ПВЛ разработаны способы, обеспечивающие необходимое снижение токов дуги подпитки и восстанавливающихся напряжений для успешного гашения дуги в бестоковую паузу. Однако доля устойчивых однофазных КЗ может достигать 30–50%. Поэтому ОАПВ не решает проблему надежности в полной мере.

Проблема ликвидации однофазных аварий (наиболее вероятных) эффективно решается с помощью внедрения двухфазных режимов. В этом случае при обнаружении однофазно-

го КЗ аварийная фаза отключается и происходит переход на работу по двухфазной схеме. Для этого необходимо лишь ввести в работу симметрирующие устройства на концах электропередачи. Обратный переход линии с двухфазного на трехфазный режим работы происходит лишь после того, как выяснена и устранена причина, приведшая к отключению фазы. Таким образом, в отличие от ОАПВ использование двухфазных режимов является действенным способом как при неустойчивых, так и устойчивых отказах фазы, а также исключает случаи включения на неустраненное повреждение. В послеаварийном двухфазном режиме может передаваться не более 70% мощности номинального режима, то есть критерий N-1 удовлетворяется не в полной мере.

Более радикально проблему надежности можно решить путем использования одноцепных ВЛ с резервной фазой. Если для обычной трехфазной линии в качестве независимого элемента для любого вида аварии рассматривается ВЛ в целом, то для ВЛ с резервной фазой при наиболее вероятных однофазных повреждениях самостоятельной единицей является отдельная фаза. В этом случае при наиболее вероятных однофазных повреждениях критерий N-1 выполняется на 100%. Такое решение позволяет: 1) существенно повысить надежность схемы в целом, так как при наиболее вероятных однофазных повреждениях вместо аварийной фазы включается резервная не более чем за 0,2–0,3 с; 2) улучшить ремонтпригодность линейной части схемы за счет возможности проведения пофазных ремонтов; 3) снизить экологическое влияние, так как уменьшается полуса отчуждения для линии.

Очевидным недостатком ЭП с резервной фазой линии является недоиспользование суммарного

## ВАРИАНТЫ СВЕРХДАЛЬНОЙ ЭП ПОЛУВОЛНОВОГО ТИПА

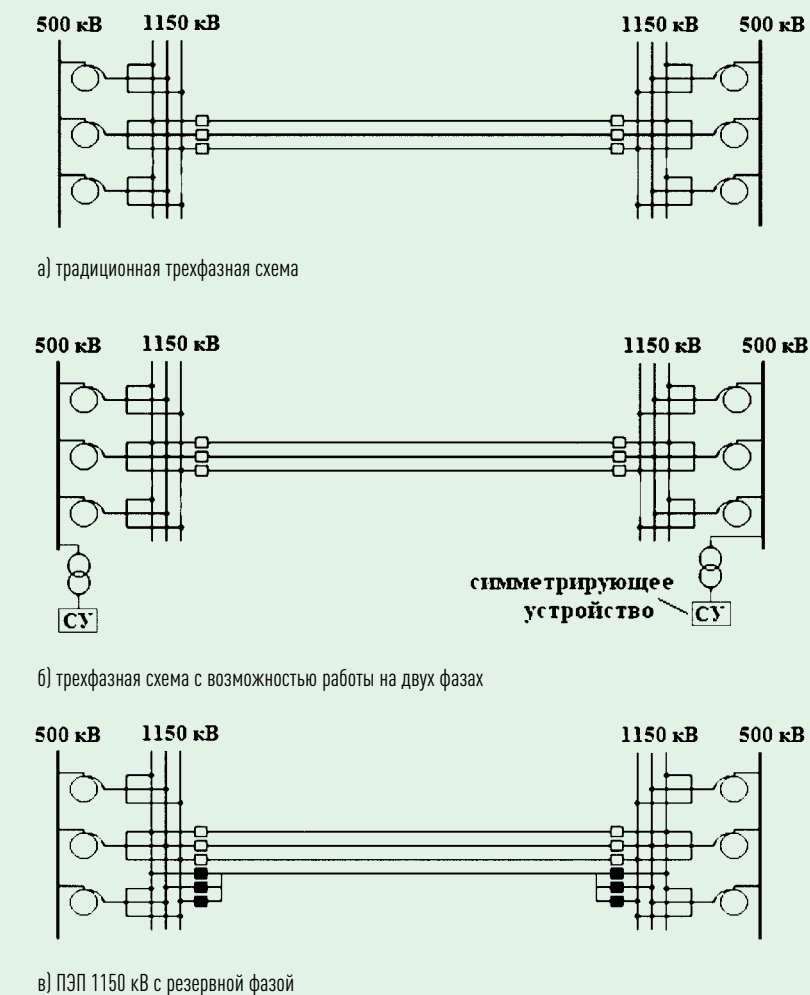


Рис. 7

сечения ВЛ в нормальном режиме, поэтому целесообразно предусматривать переоборудование со временем трехфазной ЭП с резервной фазой в четырехфазную ЭП. Переход от трехфазной ЭП с резервной фазой к четырехфазной дает увеличение пропускной способности почти в 1,5 раза. Четырехфазные ЭП (ЧЭП) представляют собой новый способ передачи электроэнергии. В основе такого подхода лежит четырехфазная уравновешенная симметричная система переменного тока с фазовым сдвигом 90° [10]. ЧЭП позволяют радикально улучшить экономические, надежность и экологические характеристики ЭП переменного тока. Основными отличительными особенностями ЧЭП являются следующие (рис. 6):

- она снабжена фазообразующими трансформаторами для преобразования трехфазной системы в четырехфазную и обратно;
- фазы четырехфазной линии располагаются на опорах так, что образуют две независимые симметричные двухфазные системы, в каждой из которых токи и напряжения находятся в противофазе, что позволяет повысить натуральную мощность линии и снизить экологическое влияние;
- при возникновении однофазных повреждений на линии предусматривается перевод ЧЭП на трехфазный режим работы с сохранением способности передавать 80–100% номинальной мощности.

Фазообразующие трансформаторы, осуществляющие также повышение напряжения на линии до необходимого уровня, являются новым

оборудованием для четырехфазной электропередачи. Все остальное оборудование в силу однофазного исполнения идентично как для трехфазных, так и для четырехфазных электропередач и отличается лишь количеством фазных элементов.

Таким образом, для решения проблемы надежности одноцепных ПЭП СВН могут быть использованы такие решения, как ОАПВ, длительные двухфазные режимы, линии с резервной фазой, а в более отдаленной перспективе – четырехфазные ЭП.

Что касается ППТ, то их надежность в значительной степени определяется выходом из строя подстанций. Поскольку ППТ позволяет длительно работать при отказе одного полюса, то в таких передачах для повышения надежности в качестве независимого элемента принимается отдельный полюс. Одноцепная двухполюсная ППТ при наиболее вероятных однополюсных отказах может в послеаварийном режиме передавать до 65% номинальной мощности. Однако этого недостаточно для удовлетворения критерию

<sup>1</sup> Критерий N-1 означает, что система должна быть способна восстановиться как по производству, так и по нагрузке в случае отключения любого крупного элемента многоэлементной группы.

## ВАРИАНТЫ СВЕРХДАЛЬНОЙ ЭП НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

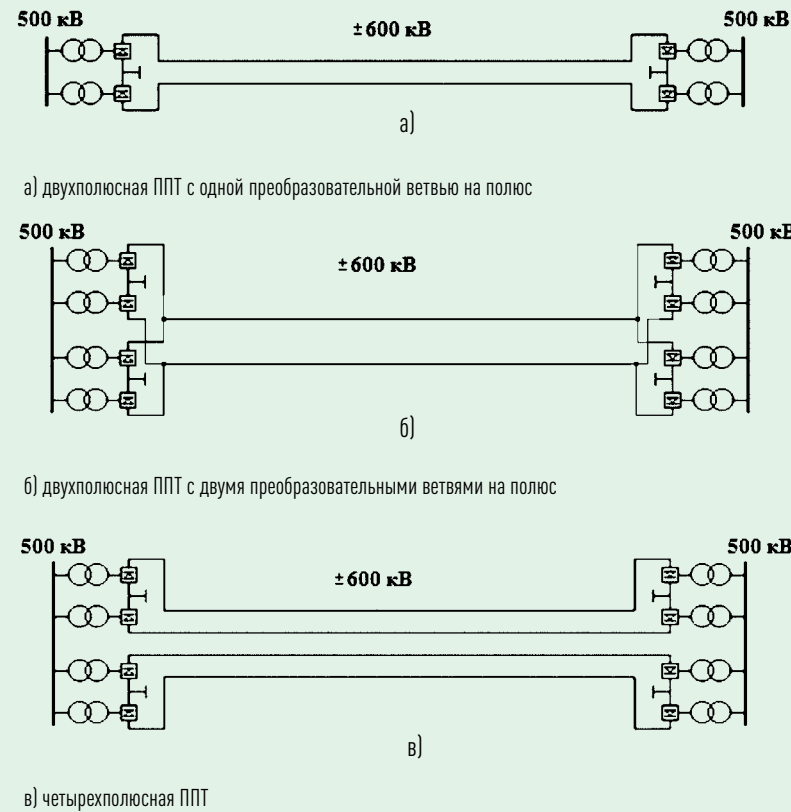


Рис. 8

N-1. Использование четырехполюсных ППТ вместо двухцепных двухполюсных, оправданное с точки зрения экономики и экологии, позволяет в послеаварийных режимах добиться выполнения критерия N-1 на 100%.

## СРАВНЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И НАДЕЖНОСТИ ПЭП И ППТ

На рис. 7 показаны схемы ПЭП на напряжении 1150 кВ для передачи 6 тыс. МВт на расстояние 3 тыс. км.

Как видно на рисунке, традиционная трехфазная схема предусматривает использование ОАПВ, которое помогает ликвидировать неустойчивые однофазные КЗ. Отметим, что схема с резервной фазой линии обеспечивает самый высокий уровень надежности.

На рис. 8 показаны варианты ППТ напряжением  $\pm 600$  кВ на 6 тыс. МВт. Двухполюсная ППТ с одной преобразовательной ветвью на полюс использует укрупненные преобразовательные блоки, что существенно снижает стоимость преобразовательных подстанций. Однако в силу низкой надежности этой схемы она, как правило, не используется. Наиболее распространенной в мире

схемой является двухполюсная ППТ с двумя преобразовательными ветвями на полюс. Как было отмечено выше, дальнейшее повышение надежности ППТ можно достичь путем применения четырехполюсных схем.

Оценка экономической эффективности обсуждаемых схем (без учета фактора надежности) показывает, что экономическое преимущество имеют варианты как на переменном токе, так и на постоянном с низким уровнем надежности. На переменном токе это традиционная схема (рис. 7 а), на постоянном токе – двухполюсная схема с одной ветвью на полюс (рис. 8 а).

Анализируя разные типы ЭП, следует учитывать характеристики надежности конкретной схемы. Низкая надежность означает дополнительные затраты, которые должна нести энергосистема из-за аварийных отказов ЭП. При оценке составляющей надежности было принято, что для всех сравниваемых ЭП должен обеспечиваться одинаковый уровень надежности энергосистемы, что может быть обеспечено за счет дополнительного резервирования генерирующих мощностей в приемной системе.

Анализ показал, что с учетом фактора надежности все варианты переменного тока по суммарным затратам оказываются практически равноценными. Для вариантов на постоянном токе требование обеспечения заданного уровня надежности приводит к незначительному различию по суммарным затратам.

Вариантом с максимальной надежностью на переменном токе является схема с резервной фазой (рис. 7 в), а на постоянном токе – четырехполюсная схема (рис. 8 в). Оба варианта обладают примерно одинаковой надежностью.

## ПРОДВИНУТЫЕ ВАРИАНТЫ СВЕРХДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

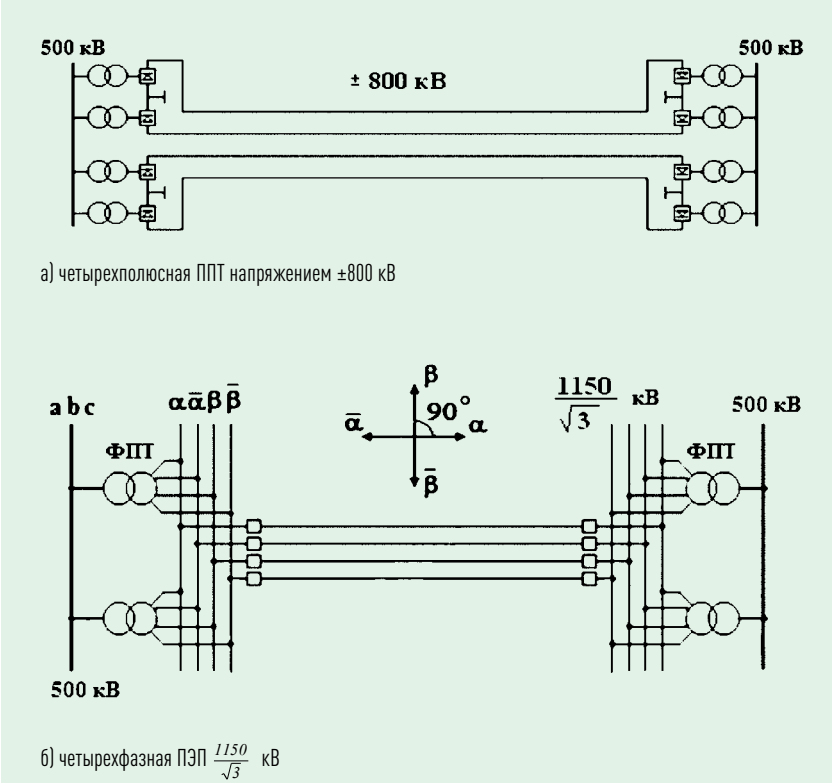


Рис. 9

Технико-экономический анализ показывает, что при равных уровнях надежности преимущество имеет вариант на переменном токе. Затраты на один кВт•ч полезно переданной электроэнергии для ПЭП 1150 кВ с резервной фазой оказываются на 30% меньше по сравнению с четырехполюсной ППТ  $\pm 600$  кВ.

Дополнительное улучшение технико-экономических показателей передач на постоянном токе можно обеспечить путем освоения следующего класса напряжения  $\pm 800$  кВ и создания ППТ пропускной способностью 8 тыс. МВт (рис. 9 а). Как показывает анализ, в этом случае удельные затраты на один кВт•ч полезно переданной электроэнергии снижаются не более чем на 10%. Это означает, что переход к более высокому классу напряжения  $\pm 800$  кВ на постоянном токе не меняет сделанного выше заключения о преимуществе полуволновой технологии передачи электроэнергии по сравнению с техникой постоянного тока.

Кроме того, следует иметь в виду возможность создания в перспективе четырехфазных ЭП, а также переоборудования трехфазных ЭП с резервной фазой в четырехфазные ЭП с доведением их пропускной способности до 8 тыс. МВт (рис. 9 б). Это позволит существенно повысить технико-экономические показатели полуволновой технологии передачи электроэнергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для решения проблемы транспорта большого количества электроэнергии на сверхдальние расстояния (2–4 тыс. км) имеется широкий спектр различных типов электропередач СВН на постоянном и переменном токе. Сверхдальние электропередачи в силу их повышенной

аварийности могут оказывать заметное влияние на надежность работы приемной энергосистемы. Поэтому при транспорте электроэнергии помимо обеспечения экономической эффективности должна быть решена и проблема надежности.

2. При создании сверхдального транспорта электроэнергии целесообразно использовать одноцепные электропередачи вместо двухцепных (по экономическим и экологическим соображениям). В этом случае требуемый уровень надежности по критерию N-1 для электропередач переменного тока обеспечивается за счет использования линий с резервной фазой, а также четырехфазных электро-

передач (в силу того, что подавляющее число отказов являются однофазными).

Что касается ППТ, то одноцепная двухполюсная электропередача при наиболее вероятных однополюсных отказах может передавать в послеаварийных режимах не более 65% номинальной мощности, что недостаточно для соответствия критерию надежности N-1. Использование четырехполюсных ППТ позволяет удовлетворить критерий N-1 на 100%.

3. Что касается проблемы передачи 6 тыс. МВт на расстояние 3 тыс. км на переменном токе напряжением 1150 кВ или постоянном токе на-



ИНФОРМАЦИЯ

## ПРОБЛЕМА СВЕРХДАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

При современном уровне развития техники передачи электроэнергии проблема сверхдального транспорта может быть решена с помощью электропередачи сверхвысокого напряжения как постоянного, так и переменного тока.

Проблема сверхдального транспорта электроэнергии на переменном токе наиболее эффективно решается путем использования полуволновых электропередач, в состав которых входят концевые подстанции и полуволновая ВЛ.

При частоте 50 Гц длина полуволны составляет приблизительно 2900 км, а при 60 Гц – 2400 км.

Если длина линии отличается от полуволновой, то придать ей свойства полуволны можно путем включения в конечных пунктах устройств реактивной мощности (УРМ), обеспечивающих настройку на полуволну. Практически работа линии в полуволновом режиме обеспечивается без применения УРМ в диапазоне длин 300 км.

пряжением  $\pm 600$  кВ, то при равных уровнях надежности заметное преимущество имеют варианты на переменном токе. Затраты на один кВт•ч полезно переданной электроэнергии для ПЭП 1150 кВ с резервной фазой оказываются на 30% меньше по сравнению с четырехполюсной ППТ  $\pm 600$  кВ.

4. Будущее сверхдальных ЭП напрямую связано с темпами развития электроэнергетики, а масштабы их использования зависят от их надежности и технико-экономических показателей. Основные направления технического прогресса в области сверхдальных ЭП переменного тока связаны с: а) использованием напряжения 1150 кВ (уже освоенного в России); б) применением полуволновой технологии передачи электроэнергии; в) разработкой оптимальных конструкций трехфазных ВЛ с резервной фазой и четырехфазных ВЛ, обеспечивающих необходимый уровень надежности согласно критерию N-1 и снижение экологического влияния; г) разработкой фазообразующих трансформаторов для четырехфазных ЭП.

Главные направления технического прогресса при решении проблемы сверхдального транспорта электроэнергии на постоянном токе связаны с: а) освоением следующего класса напряжения  $\pm 800$  кВ; б) совершенствованием преобразовательных подстанций с целью существенного снижения их удельной стоимости; в) разработкой четырехполюсных вариантов одноцепных ВЛ, удовлетворяющих критерию N-1 и снижающих экологическое влияние по сравнению с двухцепным вариантом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Praca J. C. et al. The Amazon transmission technological challenge//5th Int'l Conference on AC and DC power transmission, London, 1991.

2. Barroso L. A., Morcarquer S., Rudnick H., and Castro T. Creating harmony in South America//IEEE Power and Energy, July/August 2006, vol. 4, № 4.

3. Naidoo P., Mbuere B., Kelesitse G., Venture J., Musanda M. The Western power corridor project – The Planning for large scale hydro electric power generation and transmission across Southern Africa//IEEE PES Inaugural Africa Conference, July, 2005, Durban, South Africa.

4. Musaba L., Naidoo P., Chikova A. Southern African pool plan development//IEEE PES General meeting, July 2006, Montreal, Canada.

5. Scherbakov V., Samorodov G. An outlook on the half-wave electric transmission for energy transfer//World Electrotechnical Congress, 1977, Moscow, paper 2.07.

6. Бушуев В. В., Самородов Г. И., Путилова А. Т. Сверхдальные электропередачи полуволнового типа//Известия РАН «Энергетика», 1995, № 6.

7. Зильберман С. М., Самородов Г. И. Сверхдальные электропередачи полуволнового типа. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2010. – 327 с.

8. Вершков В. А., Нахапетян Н. Т., Ольшевский О. В., Савалов В. А., Фотин В. П., Щербakov В. К. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ ЭЭС европейской части СССР//Электричество, 1968, № 8.

9. Samorodov G., Krasilnikova T., Dikoy V., Zilberman S., Iatsenko R. Non-Conventional reliable AC transmission system for power delivery at long and very long distances//Conference proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference 2002, October 6–10, 2002, vol.2, Yokohama, Japan.

10. Samorodov G. Four-phase transmission systems and estimation of effectiveness of their applications for power transmission from the three Gorges plant to East China//Proceeding of the 1998 International Conference on Power System Technology, 98EX151.



Испытательный полигон СибНИИЭ (г. Новосибирск)

## СИБНИИЭ – 70 ЛЕТ РАБОТЫ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ

21 октября 2013 г. отмечает свой юбилей один из крупнейших научно-производственных комплексов России – Сибирский НИИ энергетики (СибНИИЭ).

Начав свою деятельность в тяжелые военные годы, институт сумел стать прочным фундаментом будущей мирной жизни.

Коллектив института внес огромный вклад в развитие энергетики на востоке нашей страны и развитие отрасли в целом. Ядром научной школы СибНИИЭ являлись и являются такие известные ученые, как Щербakov В.К., Ольшевский О.В., Лукашов Э.С., Путилова А.Т., Бушуев В.В., Вершинин Ю.Н., Шумилов Ю.Н., Левинштейн М.Л., Целебровский Ю.В., Новиков Н.Л., Каскевич Э.П., Овсянников А.Г., Лизалек Н.Н.

СибНИИЭ принадлежит ряд уникальных разработок, практических достижений и исследований. Так, в 1964 г. в институте была разработана принципиально новая

схема полуволновой электропередачи длиной 3 тыс. км и проведен успешный эксперимент по передаче электроэнергии по трассе ВЛ 500 кВ Волжская ГЭС – Центр – Поволжье – Урал. Впервые в истории мощность в 1 млн кВт была передана на такое сверхдальнее расстояние. Этот эксперимент неоднократно пытались повторить в Бразилии и Канаде, Китае и Африке, но до сих пор сибирский опыт использования настроенной на полуволну электропередачи является уникальным!

К числу важных практических достижений СибНИИЭ относятся созданное при нем опытное производство полимерных изоляторов, изделий из электроизоляционного бетона для конструкций опор и подстанций 35 кВ, электропроводящих бетеловых резисторов для ограничителей токов короткого замыкания и дистанционная диагностика поврежденных изоляторов на ВЛ с помощью тепловизионных установок. Последняя позволила в десятки раз сократить время поиска аварий и предварительного поиска ослабленных конструкций.

Творческие усилия его сотрудников сыграли большую роль в истории объединения ОЭС Сибири, ОЭС Казахстана и ОЭС Урала. Выполненный

комплекс исследований и проектных проработок надежности и живучести подобного энергообъединения является не только уникальным историческим достижением, но и базой для современного этапа возрождения Единой электроэнергетической системы России.

Сегодня мы говорим об объединении на новых экономических принципах энергосистем России, Украины, стран Восточной и Западной Европы, а в перспективе – о создании трансконтинентальной системы – единого евроазиатского энергетического объединения. В связи с этим крайне важно учитывать не только зарубежный опыт, но и свой собственный, ибо мы были и должны быть лидерами мирового инновационного развития электроэнергетики, в частности, высоковольтного электросетевого комплекса.

70-летний юбилей СибНИИЭ, ныне филиала ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ – отличный повод провести анализ опыта, который был накоплен за десятилетия в этом уникальном институте. Многие из этого опыта может и должно быть взято на вооружение в рамках новой стратегии развития электросетевого комплекса страны.