

УДК 621.314

О. В. Сулова

## **Разработка, исследование и применение технологий передачи электроэнергии постоянным током в Китае**

Представлен обзор направлений научных и инженерных работ в области технологий передачи электроэнергии постоянным током в Китае. Основные направления: ППТ ультравысокого напряжения и увеличение их пропускной способности, создание мощных многоуровневых преобразователей напряжения и передач на их основе, создание законодательной и технической базы для развития сетей постоянного тока, применение сетей постоянного тока для получения электроэнергии с ветроэлектрических установок.

*Ключевые слова: передачи постоянного тока ультравысокого напряжения, передача постоянного тока на преобразователях напряжения, модульный многоуровневый преобразователь напряжения, ветроэлектрическая установка, сети постоянного тока.*

### **Введение**

За последние 15 лет Китайская энергосистема стала площадкой для внедрения новых технологий электропередач постоянного тока. Активно используются все известные преимущества постоянного тока [1] для передачи электрической мощности на дальние расстояния, через водные преграды на островные и полуостровные территории, для осуществления глубоких вводов в промышленные центры и большие города, присоединения изолированных энергосистем к единой электрической сети, осуществления несинхронного объединения энергосистем переменного тока, получение электроэнергии с ветроэлектрических установок (ВЭУ) в открытом море.

В энергосистеме Китая в генерирующих мощностях доля тепловых электростанций составляет 71,48%, гидроэлектростанций – 21,75%, ветроэлектростанций – 5,36%, атомных электростанций – 1,1%. Необходимость строительства передач электроэнергии на дальние расстояния связана с неравномерностью распределения энергоресурсов и потребления по территории страны. Две трети угольных энергоресурсов расположены в северной части страны, 80% гидроэнергетических ресурсов – в западной части. Расстояние между генерирующими мощностями и основными потребителями, расположенными в восточной части Китая, составляет от 800 до 3 000 км.

Энергосистема Китая отличается высоким ростом энергопотребления, примерно на 100 ГВт ежегодно начиная с 2006 г. По прогнозам к 2030 г. количество потребляемой электроэнергии в Китае увеличится в два раза по сравнению с текущим уровнем. На сегодняшний день пропускная способность существующих передач, связывающих электростанции, расположенные в западных и северных регионах, и центры нагрузки, расположенные на востоке, составляет 350 ГВт. К 2030 г. ее планируют увеличить до 675 ГВт.

Мощные кабельно-воздушные ППТ с применением преобразователей напряжения сооружаются с целью повышения надежности энергоснабжения мегаполисов и островных территорий Китая.

Ветроэнергетика в Китае также интенсивно развивается. Общая установленная мощность ветроэлектростанций на 2012 г. составляла 75,32 ГВт, к 2020 г. планируемая установленная мощность составит 120 ГВт. Один из способов интеграции ВЭУ в электрическую сеть – применение передач постоянного тока на преобразователях напряжения.

## 1. Развитие ППТ высокого и ультравысокого напряжения

Увеличение напряжения передач электроэнергии на дальние расстояния дает ряд положительных технико-экономических эффектов, а именно: увеличение пропускной способности, уменьшение потерь, стоимости и отчуждаемой территории. Например, стоимость единицы передаваемой мощности для ППТ напряжением  $\pm 800$  кВ составляет 72% от аналогичной стоимости для передачи напряжением  $\pm 500$  кВ. Одна воздушная передача напряжением  $\pm 800$  кВ имеет пропускную способность 6,4 ГВт, что в 2,1 раза больше пропускной способности передачи напряжением  $\pm 500$  кВ.

До 2010 г. в китайской энергосистеме передача электроэнергии на большие расстояния осуществлялась ППТ напряжением  $\pm 500$  кВ. Первый в Китае проект ППТ  $\pm 800$  кВ номинальной мощностью 6400 МВт введен в эксплуатацию в 2010 г. (табл. 1). Проект был реализован компанией АВВ при активном участии китайских исследователей и производителей (например, часть преобразовательных трансформаторов была сделана на китайских заводах).

Длина биполярной линии электропередачи от преобразовательной подстанции (ПП) Fulong (провинция Сычуань) до ПП Fengxian в Шанхае составляет 1915 км [2]. Номинальная пропускная способность передачи – 6,4 ГВт, максимальная длительно допустимая – 7 ГВт, номинальный ток – 4 кА. Полюс ВЛ ПТ состоит из шести проводов АС сечением 720 мм<sup>2</sup>. На стороне постоянного тока в пределах одной преобразовательной подстанции установлены четыре сглаживающих сухих реактора индуктивностью 4×75 мГн. Два реактора установлены в полюсах линии, два реактора – в заземляющих линиях. Преобразовательные трансформаторы однофазные двухобмоточные, мощностью 321 МВ·А и 304 МВ·А на выпрямительном и инверторном преобразователе соответственно. На каждой преобразовательной подстанции установлено 24 трансформатора, а также дополнительно четыре трансформатора, которые находятся в резерве.

Для ППТ большой мощности необходимо обеспечить повышенные надежность характеристики, так как отказ такой ППТ приводит к серьезным системным последствиям. Расчетные надежность показатели ППТ Fulong – FengXian следующие: число отказов в год на один преобразователь – не более двух; число отказов в год на один полюс – не более двух; число отказов в год двух полюсов – не более 0,05; коэффициент энергетической неготовности – не более 0,5%. Такие показатели обеспечиваются рядом факторов, а именно: выбором рациональных запасов параметров оборудования, проведением длительных испытаний оборудования в раз-

личных режимах, обеспечением абсолютно независимой работы преобразователей, применением высокопроизводительной и высоконадежной системы регулирования и защиты, обеспечением оптимального количества запасных частей, разработкой оптимальной схемы расположения оборудования преобразовательной подстанции, наличием опытного эксплуатирующего персонала и постоянное его обучение.

Таблица 1

**Действующие передачи и вставки постоянного тока в энергосистеме  
на преобразователях тока в энергосистеме Китая**

№ п/п	Название проекта	Напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина ВЛ, км	Год ввода
1	Zhoushan	-100	50	54	1987
2	Gezhouba-Nanqiao	±500	1200	1045	1990
3	Tianshengqiao-Guangzhou	±500	1800	980	2001
4	Shengsi	±50	60	66.2	2002
5	Three Gorges – Changzhou	±500	3000	860	2003
6	Guizhou-Guangdong I	±500	3000	882	2004
7	Three Gorges – Guangdong	±500	3000	940	2004
8	Lingbao I	120	360	B-to-B	2005
9	Three Gorges – Shanghai I	±500	3000	1040	2006
10	Guizhou-Guangdong II	±500	3000	1194	2007
11	Gaoling	±125	2×750	B-to-B	2008
12	Lingbao II	166,7	750	B-to-B	2009
13	Deyang-Baoj	±500	3000	534	2010
14	Hulunbuir-Liaoning	±500	3000	908	2010
15	Xiangjiaba-Shanghai (Fulong-FengXian)	±800	6400	1915	2010
16	Yunnan-Guangdong	±800	5000	1418	2010
17	Ningdong-Shandong	±660	4000	1335	2011
18	Three Gorges – Shanghai II	±500	3000	970	2011
20	Sino-Russia	±125	750	B-to-B	2012
21	Qinghai-Tibet	±400	600	1038	2012
22	Jinping-Sunan	±800	7200	2093	2012
23	Gaoling	±125	2×750	B-to-B	2012
24	Southern Hami – Zhengzhou	±800	8000	2200	2013
25	Nuozhadu-Guangdong	±800	5000	1451	2013
26	Xiluodu-Zhejiang	±800	8000	1688	2014

ППТ проходит по территориям со сложным ландшафтом и различными климатическими условиями, в том числе, с тяжелыми условиями по гололеду и сильными загрязнениями. Вдоль линии ПТ расположено три пункта наблюдения за образованием гололеда на линии, а также установлено 20 точек индивидуального мониторинга гололеда. Для ППТ предусмотрен режим «плавки гололеда» при повышенном значении выпрямленного тока. В этом режиме два двенадцатипульсных моста соединяются параллельно и функционируют при напряжении 400 кВ, при этом выпрямленный ток достигает значений 7–8 кА.

В настоящее время в Китае действуют 6 ППТ напряжением  $\pm 800$  кВ, они показывают хорошие эксплуатационные характеристики [3]. В 2015–2019 гг. планируется ввести в эксплуатацию 12 ППТ класса напряжения  $\pm 800$  кВ (табл. 2).

Таблица 2

**Строящиеся и проектируемые ППТ высокого и ультравысокого напряжения в Китае**

№ п/п	Название проекта	Напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина ВЛ, км	Год ввода
1	Northen Nami – Chongqing	$\pm 800$	8000	2223	2015
2	Ningdong–Zhejiang	$\pm 800$	8000	1900	2015
3	Ximeng–Jiangsu	$\pm 800$	8000	1690	2015
4	Gansu–Hunan	$\pm 800$	8000	2490	2015
5	Mengxi–Hubei	$\pm 800$	8000	1400	2015
6	Humeng–Shandong	$\pm 800$	8000	1600	2015
7	Zhundong–Sichuan	$\pm 1100$	11000	2600	2018
8	Zhundong – Chengdu	$\pm 1100$	11000	2600	2018
9	Zhundong – WuNan	$\pm 1100$	11000	3200	2018
10	Jinsha River II – East China	$\pm 800$	6400	1700	2016
11	Humeng–Tianjing	$\pm 800$	6400	1300	2016
12	Jinsha River II – Fujian	$\pm 800$	6400	1700	2018
13	Humeng–Liaoning	$\pm 800$	6400	1100	2018
14	Hami – C.China	$\pm 800$	6400	2000	2018
15	Jinsha River II – East China	$\pm 800$	6400	1700	2019
16	Tibet – QuanZhou	$\pm 1100$	11000	3000	2019
17	Yili – GanZhou	$\pm 1100$	11000	3800	2020

Учитывая практику успешной реализации и эксплуатации ППТ  $\pm 800$  кВ в 2010 г. Государственная электросетевая корпорация Китая приняла решение начать разработку ППТ более высокого класса напряжения  $\pm 1100$  кВ [4]. Повышение класса напряжения, дальнейшее увеличение пропускной способности позволит уменьшить

общее количество передач и коридоров для ВЛ, что важно с как с точки зрения экономики так и экологии. Разработаны промышленные образцы оборудования, включая преобразовательные трансформаторы, вводы, высоковольтный вентиль, реактор, разъединитель ПТ и т. д. [4], предложены решения по транспортировке и сборке оборудования, обеспечению процесса ремонта, предварительный проект вентильного зала, технические решения по линии электропередачи. По данным [4] потери мощности в ППТ УВН± 1100 кВ составляют 1,5 % на 1000 км.

В 2018 г. к вводу в эксплуатацию планируются три ППТ ВЛ ±1100 кВ, которые будут передавать электроэнергию от тепловых электростанций в Zhundong к потребителям, расположенным в провинции Сычуань (ChengDu и MianYang) на расстоянии 2600 км и на восточном побережье в районе WanNan на расстоянии 3200 км (рис. 1). В 2019 и 2020 гг. запланированы к вводу ППТ Tibet – QuanZhou и Yili – GanZhou, длиной 3300 и 3800 км соответственно. Номинальная пропускная способность этих ППТ составит 11 ГВт, номинальный выпрямленный ток – 5 кА.

В настоящее время Государственная электросетевая корпорация Китая ведет разработки по дальнейшему увеличению пропускной способности ППТ ± 1100 кВ до 14 ГВт при номинальном выпрямленном токе 6,364 кА. При этом будут изменены



Рис. 1. Маршруты ППТ ±1100 кВ, планируемых к вводу в эксплуатацию в 2015-2020 гг.

параметры оборудования постоянного тока – преобразовательного трансформатора, вводов на вентильной стороне, вентилях, сглаживающего реактора, разъединителя с учетом увеличенной мощности и выпрямленного тока. Планируется разработать прототипы этого оборудования.

## 2. Передачи постоянного тока на преобразователях напряжения (ППТН)

Преобразователи напряжения (ПН) характеризуются независимым управлением активной и реактивной мощностью, способностью выдавать реактивную мощность, поддерживать напряжение на стороне переменного тока, возможностью энергоснабжения слабых энергосистем и пассивных нагрузок, уменьшенным размером фильтров высших гармоник на стороне переменного тока. Основные направления использования передач постоянного тока на преобразователях напряжения (ППТН) сегодня – передача электроэнергии через водные преграды для снабжения электроэнергией островных территорий, от комплекса ветроэлектрических установок, находящихся в открытом море, связь несинхронно работающих энергосистем. Анализ ППТН и ВПТН, реализованных и находящихся в стадии сооружения, показывает тенденции развития этих объектов: увеличение мощности от десятков мегаватт в начале 2000-х гг. до 1000 МВт сегодня, уровней напряжения от 10 кВ до 500 кВ на сегодняшний день. Также меняется топология ПН: от двухуровневых схем в начале 2000-х гг. до модульных многоуровневых схем (ММС), которые применяются сегодня [5, 6], (табл. 3).

Таблица 3

Объекты ППТН в Китайской энергосистеме

Наименование	Год ввода в эксплуатацию	Число модулей в плече	Число терминалов	Напряжение, кВ	Мощность, МВт	Области применения
Nanhui	2011	50	2	±30	18	Передача электроэнергии от ВЭС
Nanao	2013	200	3	±160	200	Передача электроэнергии от ВЭС
Zhoushan	2014	250	5	±200	400	Энергоснабжение островных территорий
Xiamen	2015	400	2	±320	1000	Энергоснабжение мегаполиса
Dalian	2015	400	2	±320	1000	Энергоснабжение мегаполиса
Luoping	2016	400	2	±320	1000	Связь несинхронно работающих систем

Китайские специалисты начали исследования ПН на ММС в 2005 г., в 2010 г. закончили разработку прототипа вентиля для модульного многоуровневого ПН (ММПН), в 2011 г. ввели в эксплуатацию ППТН Nanhui, предназначенную для передачи электроэнергии с ВЭУ. Ее основные параметры: напряжение ±30 кВ, пропускная способность 18 МВт, длина подводного кабеля 8,4 км. В июле 2012 г.



были завершены проектные работы для ППТН на ММПН с параметрами  $\pm 320$  кВ, пропускной способностью 1000 МВт. В конце 2012 г. были успешно завершены работы по созданию и испытанию вентиля и системы управления вентилем для передач с такими параметрами (рис. 2). В ходе работ над этим проектом была создана гибридная (цифроаналоговая) модель реального времени, включающая физическую модель преобразователя с 401 ячейками в плече, которая позволила проверить работу всех функций системы управления, регулирования и защит передачи [6].



Рис. 2. Вентиль для ММПН  $\pm 320$  кВ 1000 МВт

Планируемая к вводу в 2015 г. ППТН Ксиамен (Xiamen) мощностью 1000 МВт, напряжением  $\pm 320$  кВ, длиной КЛ 10,7 км будет самой мощной двухтерминальной ППТ на преобразователях напряжения на сегодняшний день.

Остров Ксиамен является основным районом одноименного города в Юго-Восточной провинции Китая, к его энергоснабжению предъявляются высокие требования по надежности и качеству электроэнергии. В настоящее время электрическая сеть острова формируется линиями 220 кВ. Из-за быстрорастущего энергопотребления в ближайшей перспективе энергосистема острова окажется дефицитной. ППТН Xiamen соединит энергосистему города Ксиамен с энергосистемой его островной части и обеспечит надежное энергоснабжение потребителей острова.

ППТН с аналогичными параметрами будет соединять северную и южную (портовую) зоны энергосистемы города Далянь. Данная ППТН также сооружается с целью увеличения надежности энергоснабжения города в условиях растущего энергопотребления. Длина кабеля ПТ, проложенного по дну Даляньского залива, составит 60 км.

В настоящее время ведутся проектно-исследовательские работы в направлении дальнейшего увеличения пропускной способности ППТН. Эти работы можно разделить на три направления. Одно из направлений – разработка XLPE-кабелей с повышенным номинальным напряжением. В настоящее время кабель напряжением 500 кВ проходит стадию тестирования, промышленная реализация ожидается через 2–3 года. В течение следующих пяти лет промышленностью будет освоен кабель напряжением 600 кВ. Второе направление – разработка новой элементной базы силовой электроники с улучшенными характеристиками. Третье направление – усовершенствование схем преобразовательной части, в частности, увеличение количества модулей в плече преобразователя, последовательное соединение преобразователей и др.

### 3. Многотерминальные ППТН и сети постоянного тока

Наметилась тенденция создания многотерминальных ППТН (МППТН), объединяющих три и более преобразовательные подстанции на ММППН. Среди достоинств МППТН по сравнению с двухтерминальными ППТН отмечаются [5] меньшее количество преобразователей, лучшие стоимостные характеристики, возможность поэтапного построения МППТН путем расширения двухтерминальных передач.

В настоящее время в Китае функционируют две МППТН: трехтерминальная Nanao и пятитерминальная Zhoushan. МППТ Nanao (Нанао) (рис. 3) предназначена для передачи электроэнергии от ветроэлектрических станций, расположенных в открытом море в районе острова Нанао в энергосистему Шаньютоу на юго-восточном побережье Китая, она имеет следующие параметры: напряжение  $\pm 160$  кВ, мощность инверторной ПП 200 МВт, мощности выпрямительных ПП 150 и 50 МВт, преобразователи соединены кабельно-воздушной линией ПТ, отключение КЗ на стороне ПТ осуществляется с помощью выключателей на стороне переменного тока, КВЛ ПТ снабжена разъединителями. Потери в силовой вентильной части составили менее 1%, надежность преобразовательной части – высокая, только один силовой модуль вышел из строя за один год эксплуатации.

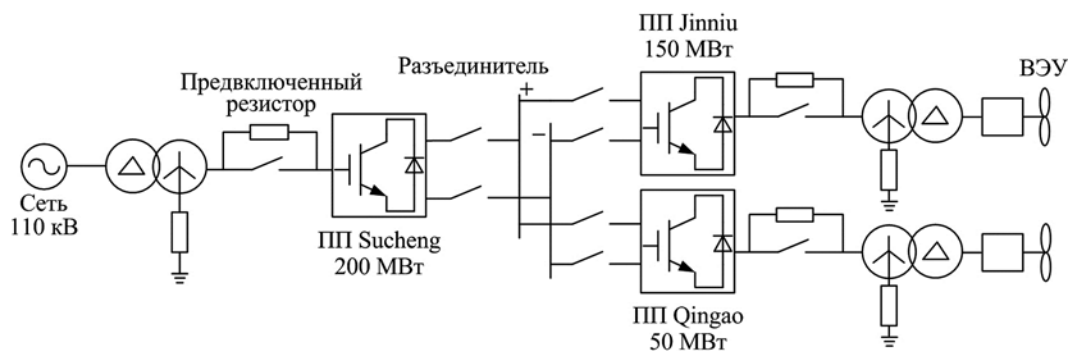


Рис. 3. Схема МППТН Nanao (Нанао)

Пятитерминальная передача Zhoushan (рис. 4) предназначена для энергоснабжения ряда островов в Восточно-Китайском море, она имеет следующие параметры: напряжение  $\pm 200$  кВ, мощности преобразовательных подстанций составляют 400/300/100/100/100 МВт.



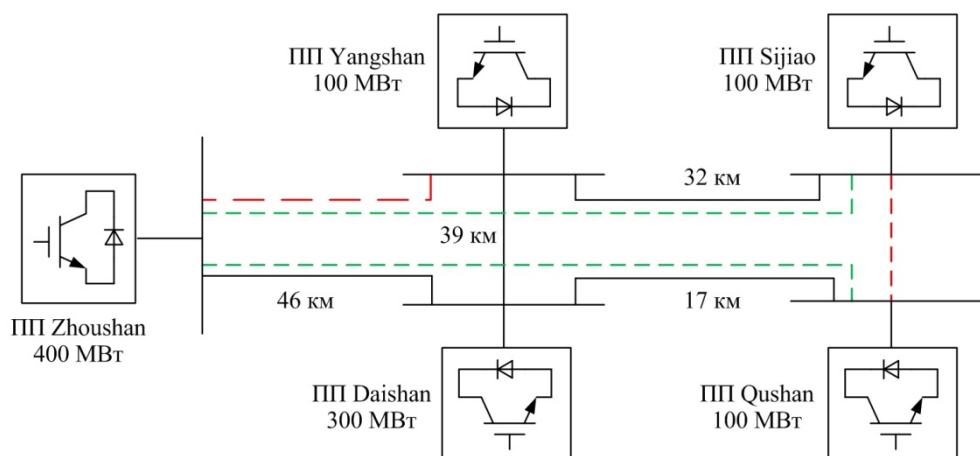


Рис. 4. Схема и основные параметры МППТН Zhoushan

В настоящее время в мировой электроэнергетике ведутся работы по созданию сложнзамкнутых сетей постоянного тока, преимуществами которых являются:

- повышенная надежность и резервирование: сеть ПТ создает несколько путей для передачи мощности, обеспечивая передачу балансового потока мощности при отключенном состоянии одного из элементов сети (принцип « $n - 1$ »);
- меньшие потери мощности по сравнению с сетями переменного тока;
- соединение между собой ВЭУ, находящихся в разных географических регионах, позволяет добиться усреднения при распределении электрической мощности, получаемой от энергии ветра.

Для внедрения сетей ПТ в широкую практическую реализацию необходимо решить ряд технических, экономических и организационных вопросов: подготовка стандартов для энергосистем постоянного тока и их оборудования, разработка программных продуктов для моделирования сетей постоянного тока, в том числе и в реальном времени, разработка алгоритмов регулирования мощности и напряжения, стратегий управления для координации работы сетей переменного и постоянного тока, алгоритмов определения места повреждения, алгоритмов противоаварийного управления, разработка высоковольтных выключателей короткого замыкания на стороне постоянного тока. Актуальна задача улучшения существующих и разработки новых схем преобразователей напряжения с лучшими стоимостными характеристиками, к.п.д., функцией отключения токов короткого замыкания на стороне постоянного тока. Необходимо также решить проблему объединения сетей постоянного тока с разными уровнями напряжения, разработки трансформаторов постоянного тока. Решения этих проблем прорабатываются во всем мире в настоящее время научно-исследовательскими институтами, производителями оборудования, операторами электроэнергетических систем, в том числе и в Китае.

В частности, китайские инженеры разработали прототип быстродействующего выключателя на стороне постоянного тока, в состав которого входит быстродействующий разъединитель, полномостовые силовые модули и разрядники [4]. Характеристики выключателя: номинальное напряжение – 220 кВ; номинальный ток 1200 А, отключаемый ток короткого замыкания 18 кА, время отключения 3 мс,

потери в нормальном режиме менее 0,01 %. Наладить серийное производство таких выключателей планируется через 2–3 года.

С целью увеличения надежности МППТН Zhoushan планируют преобразовать в сложнзамкную сеть путем добавления связей по ПТ между ПП Zhoushan и Yangshan и между ПП Sijiao и ПП Qushan (обозначены красными пунктирными линиями на рис. 4) и снабдить ее средствами отключения коротких замыканий на стороне постоянного тока. На следующей стадии модернизации запланированы связи ПТ ПП Zhoushan – ПП Sijiao, ПП Zhoushan – ПП Qushan (зеленые пунктирные линии на рис. 4).

В заключении отметим, что за последние 15 лет в Китае развилась мощная база для разработки, исследования, испытания и производства различного вида оборудования для передач и вставок постоянного тока. В настоящее время в Китае функционируют пять компаний, которые занимаются научно-исследовательскими и проектными разработками в области постоянного тока. Производственные мощности включают: завод для производства вентилялей для преобразователей различного типа, мощности которого достаточно, чтобы укомплектовывать вентилями три ППТ УВН и две ППТН в год, одиннадцать трансформаторных заводов, три завода для производства коммутационных аппаратов постоянного тока, три завода, производящих оборудование для систем управления, регулирования и защиты, три завода по производству кабелей постоянного тока, пять заводов по производству реакторов для ППТ, около пятидесяти предприятий, выпускающих провода и опоры для воздушных линий.

### **Выводы**

Создание мощных надежных, управляемых электрических сетей является стратегическим приоритетом при освоении новых источников энергии, развитии промышленности, а также оказывает большое влияние на социально-экономическое развитие регионов, рост их инфраструктурной обеспеченности.

В Китае (как и в других странах БРИКС, а также в странах Западной Европы) для этих целей широко используются технологии постоянного тока, которые доказали свою эффективность.

Россия в составе СССР с начала 1950-х годов также занимала передовые позиции в развитии технологий постоянного тока. Так как в энергосистеме России всегда существовали объективные предпосылки для развития постоянного тока, проектирование и строительство этих объектов было одним из приоритетов долгосрочной государственной политики в сфере электроэнергетики.

Силами созданного в 1945 г. Института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ) в 1950 г. была введена в эксплуатацию опытная передача Кашира–Москва. В 1962 г. с использованием отечественного оборудования была введена в эксплуатацию ППТ Волгоград – Донбасс напряжением  $\pm 400$  кВ, мощностью 720 МВт, длиной ВЛ 430 км, самая мощная на тот период времени.

В 1983 году был завершен проект и начато строительство ППТ Экибастуз – Центр напряжением  $\pm 750$  кВ, длиной ВЛ 2414 км, пропускной способностью 6 ГВт. В состав электропередачи Экибастуз – Центр входили биполярная воздушная линия и две конечные преобразовательные подстанции, одна – вблизи Экибастузских

ГРЭС, другая – в районе г. Тамбова. Для этой передачи было разработано и создано отечественное оборудование и сооружена значительная часть линии. В 1990-е годы из-за отсутствия финансирования и распада СССР ее строительство было прекращено. Указанные разработки российских ученых впоследствии активно использовались развивающимися странами, в том числе Китаем, специалисты из которого проходили стажировки в ведущих российских научно-исследовательских институтах, в том числе в НИИПТ, при создании собственных мощных дальних ППТ  $\pm 500$ ,  $\pm 600$  и  $\pm 800$  кВ, о чем уже написано выше в данной статье.

За последние два десятилетия отечественная энергетика потеряла свои позиции в плане постоянного тока, в то время как в мировой электроэнергетике в этой области произошел настоящий прорыв. За указанный период в России проведена только одна работа по внедрению объекта постоянного тока – реконструкция Выборгского ПК с целью повышения его базовой мощности, в результате которой введен в эксплуатацию новый преобразовательный блок (КВПУ-4). В ходе реконструкции объект был оснащен новой аппаратурой регулирования и защиты. В настоящее время проводятся пуско-наладочные работы вставки постоянного тока на преобразователях напряжения на ПС 220 кВ Могоча.

Сдерживает развитие ПТ в Российской Федерации отсутствие существенного роста промышленного энергопотребления в ЕЭС, изменения балансов мощности по отдельным ЭС. В этой ситуации положительный эффект может оказать государственная политика импортозамещения, которая должна привести к росту производства, а следовательно, к росту энергопотребления.

Другим фактором является отсутствие современной отечественной нормативной базы на проектирование и испытания объектов постоянного тока. Для любого такого объекта в современных условиях требуется создавать проектную документацию и уникальное оборудование заново, «с нуля». Это более затратно по времени и стоимости по сравнению с импортными аналогами и вариантами, связанными со строительством сетей переменного тока. Для преодоления этой ситуации необходимо планировать сетевое строительство таким образом, чтобы использовать очевидные преимущества применения объектов постоянного тока в ЕЭС, а в ближайшем будущем разработать и внедрить в эксплуатацию серию вставок и передач постоянного тока с использованием по возможности отечественного оборудования. Серийные российские технологии постоянного тока станут дешевыми, более надежными и адаптированными к условиям ЕЭС России и конкурентоспособными на внутреннем и внешнем рынках. Это, в свою очередь, даст импульс к развитию отечественной электротехнической промышленности.

На сегодняшний день актуальной является задача определения перспективных направлений и областей применения объектов постоянного тока внутри ЕЭС России и на ее связях с энергообъединениями других государств с учетом современных достижений в области техники постоянного тока. По результатам этой работы необходимо внести предложения по включению в программы инновационного развития и инвестиционные программы ведущих сетевых энергокомпаний ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС», ПАО «Интер РАО» на 2016–2020 гг. направлений НИОКР, проектных и технологических работ для развития и внедрения технологий постоянного тока в ЕЭС России.

**Список литературы**

1. Бальбердин Л. Л., Коцеев Л. А., Лозинова Н. Г., Мазуров М. И., Ковалев В. Д. Повышение энергоэффективности энергосистем путем применения вставок и передач постоянного тока // Электро. 2010. № 3.
2. Sun Xin, Liu Zehong, Gao Liying, Ding Yigong. Practice and Innovation in the  $\pm 800$  kV UHVDC Demonstration Project. Proceedings of the CSEE. Chin. Soc. for Elec. Eng. Vol. 29, № 22 Aug. 5, 2009.
3. Jin Yiding, LIANG Zhifeng. The Operation Statistics and Analysis of HVDC Transmission Systems in State Grid Corporation of China 2006–2012 // CIGRE Session 45. 2014. B-4-106.
4. Liu Zehong, Gao Liying, Yu Jun, Zhang Jin, Lu Licheng. Research Work of  $\pm 1100$  kV UHVDC Technology // CIGRE Session 45. 2014. B-105.
5. Сулова О.В. Современное состояние технологий электропередачи постоянным током и расширение областей их применения в мировой электроэнергетике (по материалам 45-й сессии СИГРЭ // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2014. № 2 (71).
6. Guangfu Tang, Zhiyuan He, Hui Pang. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. Volume 2, Issue 1, pp 1–15, 2014.

Сулова Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетических систем Научно-технического центра Единой энергетической системы (ОАО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: suslova@ntcees.ru