

# В преддверии возрождения постоянного тока.

## Часть 1

*Ветеранам электроэнергетики, молодым электроэнергетикам и электронщикам, зрителям будущего блокбастера «Война токов» Тимура Бекмамбетова, поклонникам Никола Тесла и городу Кронштадту посвящается.*

**В статье рассматривается эволюция электроэнергетических систем постоянного тока.**

**Олег Зотин**

o\_zotfin@mail.ru

### Экскурс в начало «войны токов»

*Ибо надлежит быть и разномыслиям между вами, дабы открылись между вами искусные.*

**1Кор.11:19**

Облик второй промышленной революции (Second Industrial Revolution, SIR), коренным образом изменившей мир в конце XIX в., во многом определен стремительным развитием электрификации с широким внедрением индивидуального электропривода и электрического освещения. Индивидуальный электропривод заменил на производстве старый трансмиссионный способ передачи механической энергии от общей паровой машины, а электрический свет — пожароопасное и вредное для здоровья газовое освещение. И если до этого первые достижения электротехники произвели революцию в средствах связи (системы телеграфа П. М. Шиллинга, С. Морзе, Ж. Бодо) и сигнализации (в том числе на железных дорогах), то электротехнические изобретения 1880–1900 гг. внесли огромный вклад прежде всего в развитие поточного (конвейерного) производства. Так, Генри Форд утверждал: «Массовое производство было бы невозможно без электричества, потому что именно оно обеспечило эффективную работу множества станков и другого оборудования на конвейерах». Совершенно очевидно, что Форд в первую очередь имел в виду применение электродвигателей и светильников.

В западном полушарии принято считать, что в этот период развития электротехники конкурировали два типа систем электрогенерации, электроснабжения и электропотребления:

- системы на постоянном токе (Direct Current, DC);
- системы на переменном токе (Alternating Current, AC).

Обычно эти направления связывают с именами известных американских изобретателей

и предпринимателей: DC — с Томасом Эдисоном, AC — с Джорджем Вестингаузом и Никола Тесла.

Весьма важным стало то, что первые же проекты электрификации как в Европе (С. Ферранти, Ф. А. Пироцкий, Д. А. Лачинов, М. Депре и др.), так и в Северной Америке (Т. Эдисон, Д. Вестингауз, В. Стенли и др.) привели к выводу об экономической целесообразности производства электроэнергии на больших тепловых и гидроэлектростанциях. Как правило, такие крупные энергообъекты не могут располагаться вблизи потребителя по экономическим, географическим, а иногда и по экологическим соображениям. Именно в это время впервые возникла потребность в эффективной передаче электроэнергии на большие расстояния и собственно в линиях электропередачи (ЛЭП).

Несколько позднее появилась концепция электрической сети с несколькими электростанциями, и в России была создана одна из первых в мире энергосистема с двумя электростанциями разного типа (гидро- и тепловая) — Пятигорская система (М. А. Шателен, Г. О. Графтио, Е. Н. Кутейников, С. М. Фридман), которая продемонстрировала следующие дополнительные преимущества:

- повышенная надежность электроснабжения;
- увеличенная живучесть при авариях;
- непрерывность энергоснабжения в периоды ремонта элементов сетей и оборудования на отдельных станциях;
- уменьшение резервных запасов топлива на тепловых электростанциях;
- более эффективное использование энергоресурсов, в том числе за счет возможности выравнивания графиков нагрузки.

В результате во главе угла стоял вопрос создания протяженных электросетей с эффективной передачей энергии на большие расстояния. Д. А. Лачинов в своей статье «Электромеханическая работа» первым указал

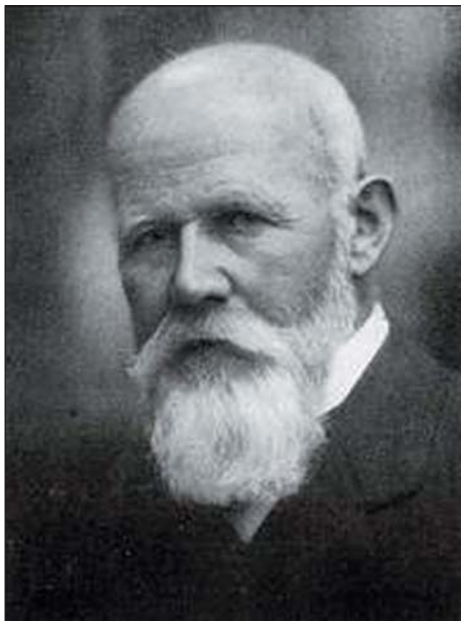


Рис. 1. Рене Тюри

на то, что при увеличении длины линии электропередачи для сохранения КПД необходимо увеличивать напряжение пропорционально корню квадратному от ее сопротивления. Таким образом, исключительно важным было найти экономичный способ повышения напряжения для передачи, поскольку получение высокого (более нескольких киловольт) напряжения непосредственно на электрогенераторах становится невыгодным из-за чрезмерно высоких требований к изоляции. В конце линии передачи требуется произвести обратное преобразование — понизить напряжение до уровня, обеспечивающего безопасное энергопотребление.

В рамках технологии постоянного тока того времени относительно простые решения этой задачи типа биполярной трехпроводной системы передачи (Т. Эдисон и Дж. Гопкинсон, 1882 г.) или более сложной пятипроводной системы (В. Сименс) позволяли уменьшить потери в линии передачи и довести длину эффективной передачи до 1,2–2 км. Это вполне подходило для небольших проектов электрификации с близко расположенными к потребителю электростанциями малой и средней мощности. Задача передачи электроэнергии постоянного тока на большие расстояния была решена французским инженером Рене Тюри (рис. 1) путем последовательного включения ряда электрогенераторов на стороне передачи и, соответственно, ряда электромашинных преобразователей на стороне приема. Начиная с конца 1880-х годов несколько систем Тюри были созданы в Англии, Италии, Венгрии, Швейцарии, Франции и России.

Освоенный в это же время в рамках технологии переменного тока способ трансформаторного преобразования переменного напряжения оказался существенно проще и дешевле. И, тем не менее, ряд систем Тюри оставался в эксплуатации вплоть до 1930-х годов.

В технологиях переменного тока шла своя конкурентная борьба одно-, двух- и трехфазных систем. Простая однофазная система,

по ряду причин, оказалась несостоятельной, в том числе из-за малой эффективности и высокой стоимости одного из основных потребителей электроэнергии — электродвигателей, как однофазных синхронных (С. Ферранти и др.), так и однофазных коллекторных асинхронных (Р. Рихтер и др.). В результате в «финальном раунде» в борьбе сошлись двухфазная система, предложенная Никола Тесла, и трехфазная система Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, который работал в это время в германской компании AEG (рис. 2).

Важнейшим аргументом в пользу трехфазной системы явились изобретенные Доливо-Добровольским связанные трехпроводные линии электропередачи (экономившие до 25% металла проводов в сравнении с четырехпроводными двухфазными), а также эффективные трехфазные генераторы с распределенной обмоткой.



Рис. 2. Михаил Осипович Доливо-Добровольский

Таким образом, по двум компонентам (электрогенерация и передача) трехфазная система превзошла как двухфазную систему, так и систему постоянного тока. По третьей компоненте (рациональному потреблению электроэнергии), ввиду инвариантности ламп накаливания к виду питающего напряжения, все зависело от эффективности второго важнейшего типа полезной нагрузки — электродвигателя. Именно поэтому невозможно переоценить изобретение Доливо-Добровольским в конце 1880-х годов двух типов асинхронных трехфазных электродвигателей — с фазным ротором и с короткозамкнутым ротором типа «беличья клетка». Применение барабанной распределенной обмотки статора дало этим двигателям дополнительное преимущество и сделало их прототипами всех последующих разработок в этой области. В следующем его предложении — асинхронном электродвигателе с ротором в виде двойной «беличьей клетки» (1893 г.) —

удалось существенно улучшить пусковые характеристики. Эти электродвигатели существенно превосходили по основным характеристикам двухфазные асинхронные двигатели Тесла и, в отличие от двигателей постоянного тока, не имели коллектора, который снижал надежность и повышал стоимость. Весьма важным стало также изобретение Доливо-Добровольским трехстержневого трехфазного трансформатора (1891 г.), заменившего три отдельных однофазных.

Этот период развития электротехники получил у ряда журналистов название «война токов» (War of Currents). Впрочем, автору больше нравится название «героический период».

### Решающие битвы «героического периода» электротехники

*Всякая война, каков бы ни был ее исход, непременно таит в себе зародыш следующей войны, потому что всякое насилие нарушает чье-нибудь право. Берта фон Зуттнер. Долой оружие.*

Поворотным пунктом «героического периода» развития электротехники в Европе стала международная электротехническая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне, на которой М. О. Доливо-Добровольский совместно с Чарльзом Брауном (фирма Oerlikon) (рис. 3) впервые в мире продемонстрировали эффективную трехфазную энергосистему с линейным напряжением 15 кВ (40 Гц). Система обеспечивала передачу мощности 220 кВт от гидроэлектростанции на р. Неккар в Лауфене на расстоянии 170 км с рекордным для того времени коэффициентом полезного действия, превышающим 75%.

Лауфенская энергосистема питала искусственный водопад (с крупнейшим на тот момент в мире асинхронным электродвигателем в 74 кВт) и около 1000 электрических ламп. Созданная в невиданно короткий срок — всего за год, она послужила прообразом для электрификации в XX в. В дальнейшем для систем электроснабжения в Европе была принята частота 50 Гц.



Рис. 3. Чарльз Браун



Рис. 4. Чарльз Протеус Штейнмец

В Северной Америке аналогичное по масштабам событие произошло двумя годами позже, на Чикагской международной выставке. Контракт на ее энергоснабжение был выигран фирмой Д. Вестингауза, которая продвигала концепцию двухфазного электроснабжения по системе Теслы. Только после образования компании General Electric идеология трехфазных сетей электроснабжения получила серьезное развитие в Северной Америке, наибольший вклад в которое внес американский ученый германского происхождения Чарльз Протеус Штейнмец (рис. 4). Стандартной же частотой для Северной Америки были выбраны 60 Гц.

Весьма важным событием в России стала электрификация трехфазным током крупнейшего в Европе Новороссийского элеватора, проведенная под руководством выдающегося инженера А. Н. Щенсновича (рис. 5) как раз в год Чикагской выставки. Для элеватора в мастерских Владикавказской железной дороги по чертежам швейцарской фирмы Brown, Boveri & Cie было изготовлено четыре трехфазных генератора по 0,3 МВт и 83 асинхронных электродвигателя мощностью от 3,5 до 15 кВт. Была построена самая крупная по тем временам тепловая электростанция мощностью 1,2 МВт с паровыми котлами системы великого русского инженера В. Г. Шухова (рис. 6). Часть мощности использовалась для освещения территории элеватора. Через элеватор до 1913 г. обеспечивалось около 3/4 экспорта российского зерна.

Несмотря на, казалось бы, очевидные преимущества трехфазной системы, довольно долго продолжался период относительно мирного сосуществования систем различных типов, включая одно-, двух-, трехфазные и системы постоянного тока, иногда даже в рамках одного района энергоснабжения. К примеру, та же Лауфенская система, как это ни покажется теперь странным, питала лампы накаливания Франкфуртской выставки от генератора постоянного тока, который вращался трехфазным электродвигателем.

Постепенно трехфазная система завоевала почти весь мир, полностью вытеснив двухфазную и оставив однофазное электроснабжение для маломощных нагрузок в сетях конечного потребителя, а также после определенного преобразования того же трехфазного напряжения для части электрифицированных железных дорог. Тем не менее DC-технологии сохранили свои позиции в тех областях применения, где у постоянного тока были существенные преимущества и не требовалась передача на большие расстояния. К примеру, сети постоянного тока находятся вне конкуренции при обеспечении бесперебойной работы оборудования от аккумуляторов и в ряде автономных систем электроснабжения. Постоянный ток повсеместно применяется на транспорте — от мотоциклов и автомобилей до самолетов и космических аппаратов, в электроэнергетике — сети напряжения «собственных нужд» на подстанциях, в телекоммуникации — сети телефонных станций, в аварийном освещении различных объектов, в военной технике и т. п. При необходимости регулирования скорости электроприводов также широко применяются сети постоянного тока (включая, например, все виды городского наземного электротранспорта и метро).



Рис. 5. Александр Николаевич Щенснович

Ряд промышленных производств также базируются в основном на DC-технологиях. Это относится к предприятиям, использующим электротермические и электрохимические методы получения черных и цветных металлов из расплавов и растворов, включая выплавку стали в дуговых электропечах и электролиз алюминия. Поскольку эти производства являются одними из самых энергоемких, они традиционно размещаются вблизи больших тепловых и гидроэлектростанций.

Свою последнюю работу «О пределах возможности передачи энергии на расстояние переменным током» М. О. Доливо-Добровольский написал в Швейцарии по окончании Первой мировой войны. В ней

он убедительно показал, что применимость переменных токов для передачи электроэнергии на дальние расстояния ограничивается влиянием реактивностей линий электропередачи. Именно в этой работе он гениально предсказал появление эффективных технологий преобразования постоянного напряжения, которые станут основой для трансконтинентальной передачи электроэнергии и для электроснабжения по кабельным линиям.

#### Некоторые аспекты возрождения технологий постоянного тока

##### *A la guerre comme à la guerre (французская поговорка).*

Прошло более 100 лет со времени окончания основных сражений «войны токов», и вот совсем недавно, в 2007 г., состоялась официальная церемония ее завершения при ликвидации компанией Consolidated Edison последней линии электроснабжения постоянного тока в Нью-Йорке с отключением нескольких ретропотребителей. И, тем не менее, несмотря на объявленную победу переменного тока, мы наблюдаем развитие технологий и продвижение проектов на постоянном токе в ряде областей. Кратко остановимся на некоторых из них, а также рассмотрим ряд общих вопросов.

#### Высоковольтные (HVDC) и сверхвысоковольтные (UHVDC) линии электропередачи постоянного тока

Возможность реализации «завещания» Доливо-Добровольского появилась после создания мощных высоковольтных ртутных вентилях в стеклянном (В. П. Вологдин, 1921 г.) и в металлическом корпусе (В. К. Крапивин, 1924 г.), а затем газотронов (1930 г.) и тиратронов дугового разряда (1933 г.). На нескольких экспериментальных и промышленных ЛЭП постоянного тока (табл. 1 и рис. 7)



Рис. 6. Владимир Григорьевич Шухов

Таблица 1. Первые ЛЭП постоянного тока в Европе

| Линия HVDC                   | Длина, км | Мощность, МВт | Напряжение, кВ    | Год ввода     | Тип                 | Примечание                  |
|------------------------------|-----------|---------------|-------------------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| Дессау–Берлин (Elbe-Projekt) | 115       | 60            | ±200              | Начата в 1943 | Кабельная подземная | Не завершена. AEG и Siemens |
| Кашира–Москва                | 100       | 30            | 200, монофазная   | 1950          | Кабельная           | На базе проекта Эльба       |
| о. Готланд–Швеция            | 98        | 20            | 100, однополюсная | 1954          | Кабельная подводная | ASEA                        |
| Донбасс–Волгоград            | 475       | 750 (проект)  | ±400 (проект)     | 1962          | Воздушная           | Эксплуатируется при ±100 кВ |

был получен бесценный опыт, и они послужили толчком для разработки будущих проектов. А вот проект самой дальней в мире линии UHVDC Экибастуз–Центр, с потенциальной пропускной способностью в 6000 МВт, начатый еще в 1970-х годах, к сожалению, так и не был завершён в полном объеме.

Качественный скачок в создании линий HVDC и UHVDC произошел после разработки высоковольтных тиристорных, несколько позже, IGBT, позволивших создавать более эффективные статические преобразователи.

Тем не менее стоимость современных преобразовательных подстанций на постоянном токе существенно превосходит стоимость подстанций на переменном токе. В то же время собственно линия постоянного тока стоит дешевле, чем линия переменного тока, — из-за меньшего количества проводов, изоляторов, линейной арматуры, более легких опор и отсутствия устройств векторного и скалярного регулирования (компенсации) реактивной мощности (УРРМ). В отечественной энергетике УРРМ считаются основной частью гибких систем передачи переменного тока (Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS). К УРРМ относятся конденсаторные батареи, шунтирующие реакторы, фильтры высших гармоник, статические тиристорные компенсаторы и пр.

Необходимо также учитывать, что в ЛЭП на переменном напряжении (HVAC) более интенсивно образуется коронный разряд, чем на HVDC ЛЭП. Потери от коронного разряда могут составлять при плохих погодных условиях (дождь, мокрый снег, изморозь, гололед, иней) до 40% от потерь на нагрев проводов. Применение проводов большего диаметра (т. н. «расширенных»), а также «расщепление»

фаз (В. Ф. Миткевич) уменьшают потери на коронный разряд, однако несколько увеличивают стоимость ЛЭП.

Суммарная стоимость современной воздушной линии UHVDC (вместе с подстанциями) при дальностях передачи 500–1200 км близка к стоимости линии HVAC, что проиллюстрировано на рис. 8. На дальности же около 2000 км стоимость линии напряжением ±600 кВ при передаваемой мощности 4000 МВт существенно ниже стоимости линии HVAC (в ≈1,4 раза, или более чем на \$600 млн). Длина DC и AC ЛЭП одинаковой стоимости для линии 4000 МВт UHV в настоящее время составляет около 900 км, а линии 1000 МВт HV — около 600 км (по материалам ассоциации FOSG).

Очевидно, что линии UHVDC наиболее актуальны для стран, имеющих большие расстояния между местами потребления и производства электроэнергии (между промышленными центрами и угольными бассейнами, большими реками), что характерно для таких стран, как Бразилия, Россия, Индия, Китай и ЮАР (т. е. для стран БРИКС). Расстояние от великих рек, стекающих с горных массивов и являющихся крупнейшими в мире возобновляемыми источниками энергии, до больших промышленных центров и мегаполисов доходит в странах БРИКС до 2000 км и даже более. Для Бразилии — это расстояние от Анд до городов на побережье Атлантики, для России — от Южно-Сибирских гор до европейской части страны, для Индии — от Гималаев до побережья Индийского океана,

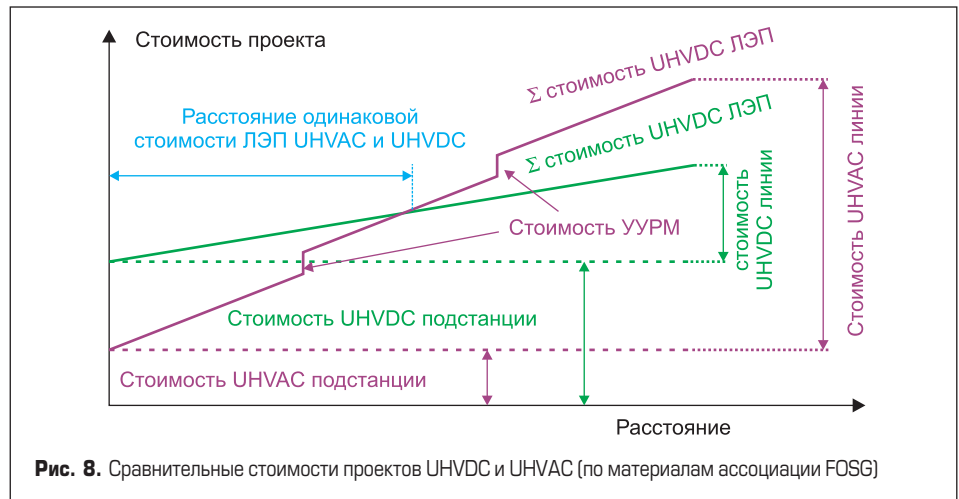


Рис. 8. Сравнительные стоимости проектов UHVDC и HVAC (по материалам ассоциации FOSG)



Рис. 7. Опора HVDC ЛЭП Донбасс–Волгоград

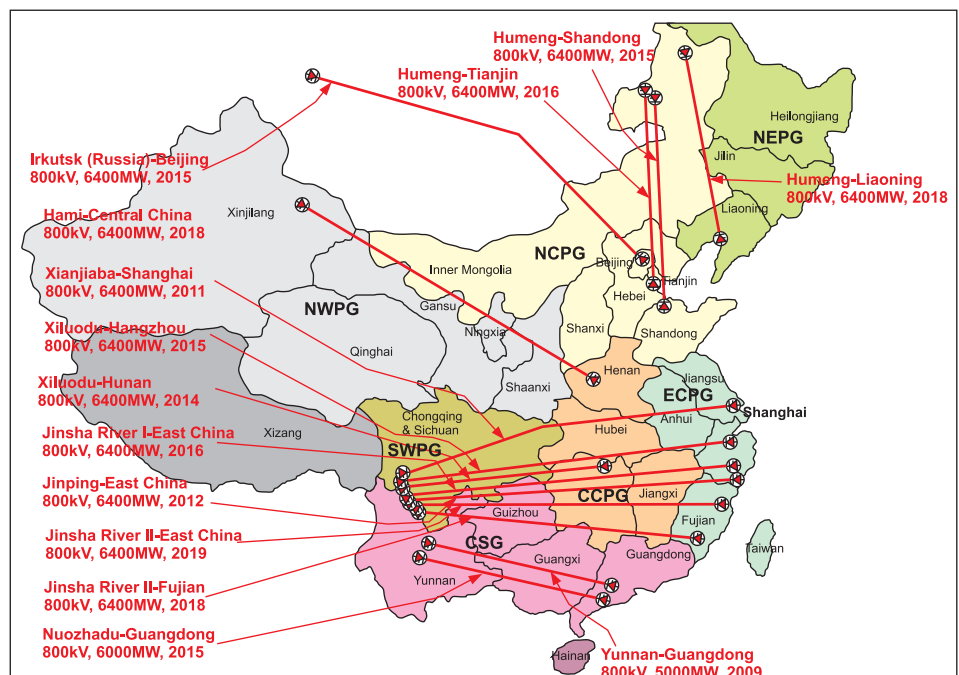


Рис. 9. UHVDC в Китае

для Китая — от Тибета до Тихоокеанского побережья, для ЮАР — от верховьев великой африканской реки Конго до крупных городов. Кроме этого, необходимо отметить, что ЮАР, самое развитое государство Африки, имеет энергетику, 80% которой в настоящее время базируется на использовании угля.

В Китае действует программа по строительству 14 линий UHVDC  $\pm 800$  кВ до 2019 г. (рис. 9). По этой программе уже введена в эксплуатацию ЛЭП мощностью 6400 МВт от тибетской ГЭС Сянцзяба до Шанхая длиной около 2000 км. Самой длинной (более 2500 км) в этой программе предстоит стать линии Иркутск–Пекин.

Аналогичные проекты предлагаются в Бразилии (Belo Monte и Rio Madeira), Индии (Chicken Neck), ЮАР (WestCor).

Разрабатываются элементы и более высоковольтных UHVDC ЛЭП напряжением 1100 кВ, мощностью до 10 000 МВт (ABB), что актуально для расстояний до 3000 км. В частности, разработан и испытан высоковольтный трансформатор для работы в составе преобразователя постоянного тока. Впервые (в конце 2012 г.) создан высоковольтный мощный быстродействующий HVDC-выключатель, внедрение которого повысит уровень надежности HVDC-сетей, обеспечит эффективную интеграцию с источниками возобновляемой электроэнергии, позволит подключать мощные накопители, а также обеспечит создание мультитерминальных разветвленных и взаимосвязанных HVDC-сетей.

На рис. 10 представлено фото единственного в Западном полушарии пересечения двух воздушных HVDC-линий электропередачи, расположенных в Миннесоте и Северной Дакоте (США). Характеристики линий приведены в таблице 2. Опоры линии Square Butte находятся на фото слева, линии CU — справа. Линия CU известна тем, что вызвала в свое время мощную волну протестов фермеров западной Миннесоты, по чьим землям она прокладывалась.

Что же касается кабельных линий, то в них преимущество постоянного тока проявляется уже на дальностях порядка нескольких десятков километров ввиду уменьшенных потерь электроэнергии и меньших требований к изоляции. При одинаковой стоимости кабелей мощность, передаваемая по линии постоянного тока, превышает мощность линии переменного тока приблизительно втрое. Именно поэтому кабельные DC-линии так часто применяются для преодоления больших водных преград. По всему миру построены многие десятки таких линий, в том числе с использованием новых технологий HVDC Light (ABB) и HVDC Plus (Siemens) с напряжением до  $\pm 320$  кВ и диапазоном мощностей 30–330 МВт.

Только энергосистема Дании, по данным агентства «РуданЭнерго», получает до 30% электроэнергии по подводным и подземным кабельным сетям за счет энергии ветра, в основном от офшорных ветроэлектростанций в Северном море.

В 2008 г. введена в эксплуатацию самая длинная в мире подводная кабельная система NorNed, соединяющая Норвегию и Нидерланды. Длина кабеля 580 км, мощ-

Таблица 2. Характеристики линий HVDC в Северной Дакоте

| Линия HVDC   | Длина, км | Мощность, МВт | Напряжение, кВ | Год ввода | Тип линии             | Тип инверторов | Фирма |
|--------------|-----------|---------------|----------------|-----------|-----------------------|----------------|-------|
| Square Butte | 749       | 500           | $\pm 250$      | 1977      | Воздушная 1 пр./полюс | Тиристорные    | GE    |
| CU           | 710       | 1000          | $\pm 400$      | 1979      | Воздушная 2 пр./полюс | Тиристорные    | ASEA  |

ность — 700 МВт, напряжение  $\pm 450$  кВ. Планируется реализация аналогичных и даже более масштабных проектов, в том числе EuroAsia Interconnector (Греция–Кипр–Израиль) длиной 1000 км, мощностью 2000 МВт; Atlantic Wind Connection (США) 560 км, 7000 МВт; Shetland (Великобритания) — 320 км, 600 МВт; NordBalt (Литва–Швеция) — 450 км, 700 МВт и ряда других.

Необходимо отметить, что технология HVDC применяется также с целью передачи электроэнергии между независимыми (несинхронными) сетями переменного напряжения. Для этого на специальных подстанциях, называемых вставками постоянного тока (ВПТ) осуществляется преобразование из одного переменного напряжения HVAC в другое через промежуточное постоянное напряжение.

В 1981 г. была введена в эксплуатацию крупнейшая в России и в мире Выборгская ВПТ 400 кВ для обеспечения передачи электроэнергии в Финляндию. В ее состав входят четыре блока комплектных выпрямительно-преобразовательных устройств суммарной мощностью 1400 МВт. На подстанции впервые в мире осуществлено горячее резервирование выпрямительно-преобразовательных устройств по схеме «два из трех», которое позволяет не прерывать энергоснабжение при возникновении одиночных неисправностей и при проведении обслуживания. При модернизации подстанции в 2011 г. (Научно-исследовательский институт постоянного тока, НИИПТ, Санкт-Петербург) была реализована возможность двусторонней передачи электроэнергии.

В настоящее время группа компаний «КЭР» при участии НИИПТ разрабатывает проект линии HVDC  $\pm 300$  кВ мощностью 1000 МВт для филиала ОАО «ФСК ЕЭС» — МЭС Северо-Запада. Линия пройдет от второй очереди Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС-2) до Выборгской подстанции и будет включать в себя 41 км кабельного участка по дну Финского залива. Выпрямительная

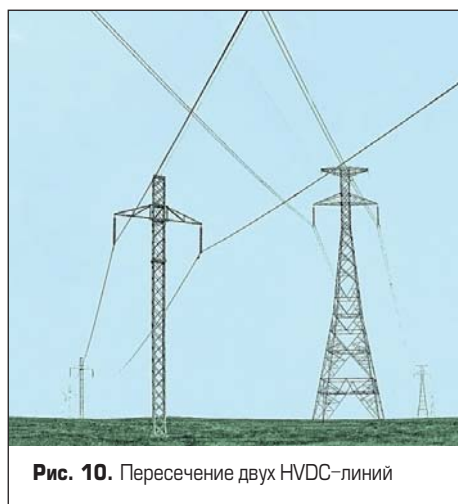


Рис. 10. Пересечение двух HVDC-линий

подстанция будет располагаться вблизи ЛАЭС-2, а инверторная войдет в состав реконструируемого преобразовательного комплекса Выборгской подстанции. Традиционная воздушная ЛЭП такой же мощности по «обычному» маршруту вокруг города была бы длиннее на ~150 км и имела бы зону отчуждения по оценке автора на ~600 га больше. Увеличение связности сетей Северо-Западного федерального округа позволит также повысить надежность энергоснабжения Санкт-Петербурга за счет замыкания кольца энергосети.

В рамках Организации Черноморского экономического сотрудничества рассматривался также вопрос сооружения линии электропередачи постоянного тока 2000 МВт Россия–Турция с прокладкой кабеля по дну Черного моря.

Для человечества в целом, а в большей степени для северных стран весьма важной является защита электросетей от электромагнитного воздействия солнечных бурь. Вопросу влияния космической погоды на системы коммуникаций и электросети был посвящен междисциплинарный доклад Королевской инженерной академии Великобритании. В докладе, в частности, описаны последствия аномального коронального выброса на Солнце в 1859 г. (т. н. шторм Каррингтона). Этот выброс считается самым мощным из зафиксированных в «электрическую» эпоху. Он вызвал геомагнитную бурю с многочисленными отказами единственного на то время электрического оборудования — телеграфного. Как выяснилось в процессе дальнейших наблюдений, такие аномальные явления на Солнце не так уж и редки, например 05.03.2013 был зафиксирован корональный выброс в сторону Марса, по энергии близкий к выбросу 1859 г. По оценке специалистов, попадание импульсов такой мощности в зону магнитосферы Земли происходит примерно раз в 250–500 лет. Нельзя исключать и более редкие воздействия еще больших импульсов. Так, исследования аномальных отложений изотопа углерода-14 в древних японских кедрах позволило выдвинуть предположение, что в 774 г. н. э. Земля подвергалась воздействию космического излучения, превосходившего примерно в 20 раз мощность бури 1859 г.

Недавняя геомагнитная буря 1989 г., существенно меньшей (в сравнении со штормом Каррингтона) мощности, привела к отказам энергосетей в Квебеке (Канада) с выходом из строя силовых трансформаторов. Частота возникновения геомагнитных бурь такой мощности — примерно раз в 50 лет.

В отличие от воздушных линий, кабельные подземные и подводные принципиально более устойчивы к внешним электромагнитным воздействиям. Ввиду этого важным является вопрос устойчивости выпрямительно-преобразовательных устройств на подстанциях. Решение этого вопроса позволит создать

энергосистемы, устойчивые к космическому излучению. Аналогичные задачи успешно решаются при защите электроники космических аппаратов от воздействия космических лучей. Актуальными становятся оценка угрозы таких событий, разработка норм на эти воздействия, создание испытательного оборудования. Решая аналогичную задачу по защите энергетического оборудования от ударов молний, Ч. Штейнмец в 1921 г. разработал генератор импульсов высокого напряжения мощностью 1 млн лошадиных сил, имитирующий разряды атмосферного электричества.

Чисто теоретически можно представить такую энергосистему, которая не только была бы надежно защищена от такого проявления солнечной активности, но и смогла бы ее утилизировать. Однако такие предположения относятся уже к футуристическому прогнозированию, которым автор не занимается.

#### **«Гибридные» (AC+DC) линии, Supergrid и DigitalGrid**

Сопряжение линий электропередачи переменного напряжения с DC-линиями и DC-вставками повышают их устойчивость, надежность, пропускную способность и позволяют ограничить зону влияния повреждения (например, короткого замыкания). Одним из примеров таких проектов служит концепция «Суперлинии» (Supernode). Она предусматривает прокладку параллельно с существующей AC-линией «дублирующей» DC-линии, которая позволяет, например, повысить ее живучесть при возникновении разного рода аварий, например обрыва или короткого замыкания одной из фаз.

Существуют также предложения по «реформатированию» имеющихся трехпроводных линий на передачу постоянного тока, при этом третий «лишний» провод периодически подключается то к одному, то к другому полюсу напряжения (т. н. трехполярная система). Это позволяет повысить надежность электропитания и увеличить мощность, передаваемую линией, на 80% путем модернизации преобразовательной подстанции без изменения конструкции ЛЭП.

В НИИПТ разработано инновационное предложение по созданию интеллектуальной

электрической сети с элементами постоянного тока для повышения управляемости в энергосистемах мегаполисов (Н. Г. Лозинова). Для Москвы предложено применение многомодульной вставки постоянного тока (МВПТ) для обеспечения ограничения токов короткого замыкания и организации централизованного управления перетоками мощности. Аналогичное предложение существует для энергосистемы Санкт-Петербурга.

Для объединения энергосистем Сибири и Дальнего Востока Федеральная сетевая компания запланировала ввод двух ВПТ: «Могоча» и «Хани», которые позволят покрыть дефицит электроэнергии в Забайкалье и повысить надежность снабжения потребителей, включая РЖД. Такое решение более надежно, чем вариант с синхронизацией двух энергосистем, и требует существенно меньших затрат, чем вариант строительства дополнительной линии 500 кВ.

В целях повышения энергетической безопасности Европы предложен проект создания «Сверхсети» (Supergrid), обеспечивающей объединение в общей сети традиционных и возобновляемых источников энергии, включая ветроэлектростанции (в Северном море и Атлантике) и будущие солнечные электростанции (на юге Европы и севере Африки — проект Desertec). Для компенсации нестабильности мощности возобновляемых источников энергии предполагается использование гидроаккумулирующих и гидроэлектростанций (в т. ч. в Альпах, на Пиренеях и в Норвегии). В Supergrid предполагается объединение существующих HVAC- и HVDC-сетей, планируется прокладка по дну Средиземного и Северного морей нескольких HVDC-линий. Разрабатываются мероприятия по повышению стабильности сети и предотвращению инцидентов, аналогичных рассинхронизации национальной сети Великобритании (National Grid) в мае 2008 г.

В Японии в последнее время получила развитие концепция «цифровой сети» («Digital Grid»), во многом аналогичная европейской Supergrid. Большое влияние на содержание концепции оказала авария на АЭС Фукусима, после которой был провозглашен курс на замену в течение ближайших 20–30 лет атомных

электростанций на станции возобновляемой энергетики. Одним из таких проектов к 2020 г. должна стать крупнейшая в мире плавучая ветроэлектростанция из 143 ветрогенераторов суммарной мощностью около 1000 МВт, которая должна соединиться с берегом подводной HVDC-системой. В то же время считается, что ввод в Японии большого количества солнечных и ветроэлектростанций общей мощностью порядка 50 000 МВт с необходимостью оперативного демпфирования нестабильности генерации вызовет сложности в управлении и уменьшит запас стабильности в единой энергосистеме. Кроме этого необходимо учитывать, что, несмотря на то, что суммарная мощность гидроаккумулирующих станций в Японии составляет 25 500 МВт (около 1/4 от мировой), ее придется существенно увеличивать, ибо именно этот ресурс наиболее эффективен для демпфирования колебаний в генерации мощности возобновляемых источников энергии. Консорциум Digital Grid (DGC) анонсировал концепцию, предполагающую сегментирование существующей энергосистемы Японии на независимые и несинхронизованные друг с другом фрагменты, соединенные вставками постоянного тока. Заметим, что в действительности уже существует сегментирование японских сетей на фрагменты с разными частотами (50 и 60 Гц). Аналогичный проект гибридной сети GRID-2030 существует для энергосистемы Северной Америки.

Планируемые проекты модернизации структур энергосистем в исторической перспективе, в свете вышесказанного, представляются, с одной стороны, паллиативной компенсирующей терапией трехфазных систем, а с другой стороны — пробными шагами в генеральном направлении: постепенном переходе к интеллектуальным сетям постоянного тока (Direct Current Smart Grid, DCSG). А таким сетям не потребуется синхронизировать источники, ввиду чего в них практически не будет проблем нестабильности, повысится также и их энергоэффективность.

*В следующем номере журнала мы продолжим рассматривать различные аспекты развивающихся DC-технологий и попытаемся сделать из этого надлежащие выводы.*