

Передача энергии при сверхвысоком напряжении

Альтернативные способы передачи больших объёмов электроэнергии на дальние расстояния – линии постоянного тока с напряжением 800 кВ и переменного тока с напряжением 1000 кВ.

Гуннар Асплунд

При устойчивом росте потребления энергии в мире всё более значительная её часть извлекается из источников, находящихся далеко от места потребления. Соответственно всё более важной становится проблема транспортирования энергии на значительные расстояния.

Нефть часто перевозится супертанкерами, а газ перекачивается по трубам. Для угля обычной является перевозка по железной дороге, зачастую требующая проведения дорогостоящих работ по усилению верхнего строения пути. Экономичнее было бы вы-

рабатывать электрическую энергию поблизости от мест добычи угля и затем передавать её потребителям. Поскольку извлекать энергию из возобновляемых источников (воды, солнца, ветра) можно только в определённых местах, передаче энергии на расстояния нет альтернативы.

Таким образом, передача электрической энергии приобретает всё большую важность. В предлагаемой статье рассматриваются недавние достижения в области передачи больших количеств электрической энергии.



С появлением протяженных линий электропередачи ведущее положение в их технологии сразу занял переменный ток. Преимущества переменного тока известны – он позволяет применять трансформаторы для повышения напряжения, что делает передачу электроэнергии экономичной. Генераторы как переменного, так и постоянного тока вырабатывают электрическую энергию при относительно низком напряжении. Если в таком виде передавать её на большие расстояния, большие и непростительно дорогостоящие потери неизбежны.

Технология с использованием переменного тока весьма гибкая, что удобно при соединении в надёжную энергосистему отдельных электрических сетей, расположенных в разных районах. На заре электротехники преобладающим был вопрос надёжности энергоснабжения, а задача передачи больших количеств энергии на большие расстояния не была приоритетной, поскольку электрическая энергия вырабатывалась относительно близко от потребителей.

Чтобы сделать переменный ток более удобным для передачи больших количеств электрической энергии, в качестве типового технического решения была принята продольная компенсация реактивной мощности в электрических линиях. Это решение оказалось успешным при прямой передаче энергии из одной точки в другую, но в разветвлённых электрических сетях оно обычно не применяется из-за непредсказуемости величины нагрузки.

В своём развитии системы переменного тока прошли период неуклонного повышения напряжения в линиях электропередачи. При малом потреблении электроэнергии напряжение также может быть низким. Как правило, удвоение напряжения в линии в 4 раза увеличивает её пропускную способность. Соответственно эволюция энергосистем во многих странах пошла по пути появления в этих системах линий со всё более высокими уровнями напряжения.

До начала нефтяного кризиса в начале 1970-х гг. в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) происходил почти экспоненциальный рост энергопотребления. Под влиянием этого кризиса были приостановлены планы перехода к напряжениям 800, 1000 и даже 1200 кВ.

Тридцать лет назад пропускная способность ЛЭП в основном со-

■ Пропускная способность ЛЭП переменного тока падает с ростом протяжённости линии. График построен для линии напряжением 1000 кВ с максимальным уровнем компенсации реактивной мощности 70 % и углом сдвига фаз между напряжениями на концах линии 30 градусов.

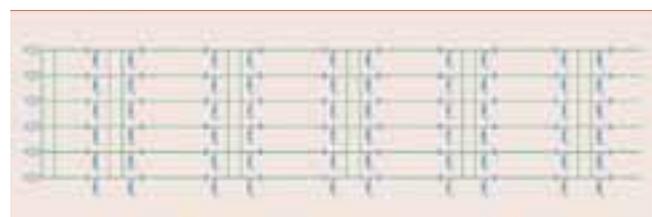


ответствовала потребностям в электроэнергии. В связи с ростом энергопотребления ситуация изменилась. Появились генерирующие мощности в новых местах (например, там, где электрические сети развиты недостаточно, сооружаются ветровые энергоцентры). Отмена регулирования выработки электроэнергии привела к росту продаж именно той энергии, которая передаётся на значительное расстояние, а это в свою очередь предъявляет жёсткие требования к системе передачи энергии.

Эволюция энергосистем во многих странах пошла по пути появления в этих системах линий со всё более высокими уровнями напряжения.

В развивающихся странах ситуация совершенно другая, больше напоминающая ситуацию 1950–60-х гг. в странах нынешней ОЭСР. Однако темпы развития значительно выше, особенно в Индии и Китае. За последние тридцать лет достигнуты большие успехи в технологии, поэтому применяемые технические решения не обязательно повторяют ранее достигнутое в странах-членах ОЭСР.

■ Шесть параллельных ЛЭП из шести секций каждая, имеющие продольную и поперечную компенсацию. Такая совокупность линий сохраняет способность передавать энергию при выходе из строя отдельных компонентов.



В развивающихся странах для новых энергосистем принят переменный ток, как это было ранее в других странах, где он до сих пор ещё применяется в ряде случаев при передаче энергии от удалённых электростанций.

Передача переменного тока на большие расстояния

Перед строительством ЛЭП большой протяжённости необходимо продумать, как обеспечить стабильность её работы и устойчивость к различным перегрузкам, например, в результате ударов молний. Критерием разработки является выполнение условия $N-i$, где $i=1$ ¹⁾. Это означает, что наибольшая мощность, которая может быть потеряна при сохранении стабильности

работы энергосистемы в аварийном случае, равна мощности самого крупного генератора в энергосистеме или наибольшей пропускной способности её линий. Если от какой-то удалённой электростанции мощность передаётся по одной-единственной линии, то энергосистема на переменном токе должна выдержать потерю всей этой мощности (т. е. как бы потерю целой электростанции). Если мощность, которая должна быть передана, больше, она должна передаваться по нескольким параллельным линиям, которые через каждые 300–400 км должны быть соединены друг с другом для повышения надёжности передачи.

ЛЭП переменного тока имеют достаточно высокую гарантированную пропускную способность, если их протяжённость невелика. Пропускная способность зависит от напряжения и нагревостойкости проводников линии. Протяжённые ЛЭП имеют более высокое полное сопротивление, что снижает их пропускную способность. Уравнение передачи активной мощности имеет вид:

$$P = U_1 \cdot U_2 \cdot \sin(\delta) / X,$$

где P – активная мощность, U_1 и U_2 – напряжения на концах ЛЭП, δ – угол сдвига фаз между напряжениями на концах ЛЭП, X – полное сопротивление линии.

¹⁾ Критерий « $N-i$ » определяет число элементов, выход из строя которых допускается перед тем, как система теряет способность нормально функционировать. Применительно к электрическим сетям N – это общее число основных компонентов электрической сети (генераторов, подстанций, линий), а i – это число основных компонентов, одновременный выход из строя которых ещё не приводит к потере стабильности.

Эффективные энергосистемы

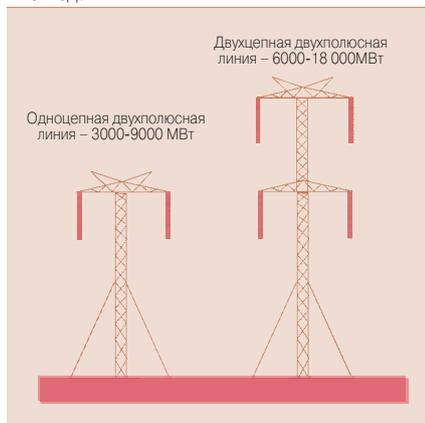
С увеличением длины линии растёт и её полное сопротивление, поэтому для поддержания уровня передаваемой мощности при заданном значении напряжения в линии следует увеличивать величину угла δ . На практике это возможно до величины не более 30 градусов – далее возникают проблемы с динамической устойчивостью линии. Поэтому следует уменьшать полное сопротивление путём продольной компенсации его реактивной составляющей, что может быть сделано без особых сложностей до уровня компенсации примерно 70%. При большей компенсации надёжность системы передачи энергии снижается (рис. 1).

Если нагрузка ЛЭП меньше величины т. н. натуральной мощности линии, в ней генерируется реактивная мощность, что при отсутствии поперечной компенсации может привести к резкому повышению напряжения. Если нагрузка линии превышает значение натуральной мощности, линия начинает потреблять реактивную мощность, что проявляется в чрезмерном снижении напряжения. С точки зрения надёжности ЛЭП переменного тока должна быть разбита на секции, в каждой из которых должны быть и продольная, и поперечная компенсация, кроме того, секции параллельных линий должны быть соединены друг с другом (рис. 2). Тогда передача полной мощности обеспечена во всех случаях.

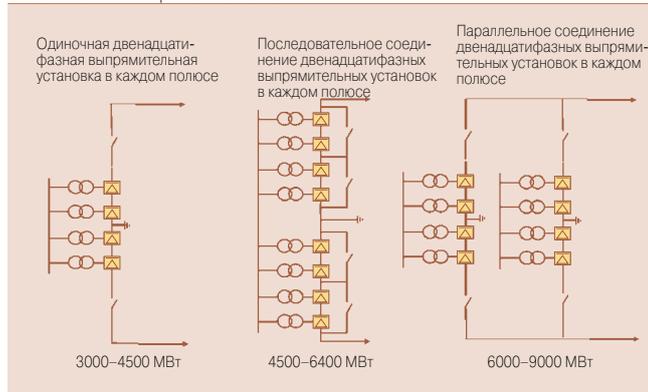
Технические сложности

Передача переменного тока при напряжениях 1000 кВ и 1200 кВ носит в основном опытный характер и за исключением отдельных случаев кратковременного коммерческого использования ши-

4 Мощность, передаваемую по линии постоянного тока с напряжением 800 кВ, можно поднять до 18 000 МВт, не увеличивая полосу отвода.



3 Возможные конфигурации выпрямительных подстанций для ЛЭП постоянного тока с напряжением 800 кВ.



рокого применения пока не нашла²⁾. Существует ряд сложностей, связанных со строительством таких линий и необходимостью разработки для них нового оборудования: силовых и измерительных трансформаторов, автоматических выключателей, продольных и поперечных компенсаторов, разрядников, разъединителей и заземлителей.

В области управления и защиты линии при таких напряжениях действуют особые требования. Так, при коротком замыкании на землю одной фазы сложность состоит в том, как устранить такое замыкание без размыкания разъединителей во всех трёх фазах – ведь по цепи короткого замыкания потечёт большой ёмкостный ток, генерируемый в неповреждённых фазах. Ограничить такой ток можно было бы с помощью настраиваемых реакторов, сводящих к минимуму наведённые токи.

Передача переменного тока при напряжении 800 кВ уже нашла коммерческое применение, а оборудование для таких систем вполне до-

ступно. Что касается оборудования на напряжение 1000 кВ, то весь его ассортимент в настоящее время разрабатывается.

Передача постоянного тока при напряжении 800 кВ

Некоторые системные аспекты

Передача постоянного тока включает в себя преобразование переменного тока в постоянный на выпрямительной подстанции, передачу энергии по двухполюсной линии и обратное преобразование постоянного тока в переменный на инверторной подстанции.

Тридцать лет назад пропущенная способность электрических линий в основном соответствовала потребностям в электроэнергии. В связи с ростом энергопотребления ситуация изменилась.

С системной точки зрения технология передачи энергии на постоянном токе проще именно в случае передачи на большие расстояния. И выпрямительная, и инверторная подстанции допускают быстродействующее управление током и напряжением и поэтому удобны для управления потоком энергии. Если передаётся только постоянный ток, то угол сдвига фаз между напряжения-

5 Перед тем как рекомендовать напряжение 800 кВ постоянного тока для коммерческого использования, требуется провести разнообразные испытания высоковольтного оборудования. На этом рисунке показаны трансформатор (а), высоковольтный трансформаторный ввод (б) и высоковольтный ввод в помещение подстанции (в заголовке статьи на с. 22) во время испытаний в Людвики (Швеция).



²⁾ ЛЭП переменного тока с напряжением 1200 кВ действовала между Россией и Казахстаном с 1989 по 1996. Прекращение её коммерческой эксплуатации было следствием развала СССР.

ми на концах линии передачи значения не имеет. Фактически питающиеся от линии постоянного тока распределительные сети переменного тока могут быть даже не синхронизированы по частоте с генераторами, так как линия постоянного тока от частоты никак не зависит.

Короткие замыкания в линиях постоянного тока или в инверторных подстанциях вызывают повышение частоты на стороне генератора и понижение на стороне нагрузки, если только неповреждённый полюсный проводник ЛЭП не имеет достаточной стойкости к перегрузкам, а параллельные линии постоянного тока не смогут принять на себя увеличение нагрузки. Если повреждение может носить постоянный характер, следует предусмотреть схему аварийного отключения генераторов для поддержания стабильности частоты в неповрежденной части сети. В данном случае вся проблема сводится к синхронизации параллельной работы линий переменного тока, особенно если их пропускная способность гораздо ниже, чем у линии постоянного тока – при слишком большом асинхронизме такие линии могут аварийно отключаться.

Конфигурации систем постоянного тока
Для передачи постоянного тока при напряжении 800 кВ возможны различные схемы преобразования переменного тока в постоянный (рис. 3). Возможные конфигурации ЛЭП показаны на рис. 4.

Технические сложности

На сегодняшний день наибольшее напряжение эксплуатируемой ЛЭП постоянного тока составляет 600 кВ. Проект Итайри был реализован более 20 лет назад: это двухцепная ЛЭП с рабочим напряжением ±600 кВ, передающая мощность 6300 МВт на расстояние 800 км. Передача энергии при напряжении 800 кВ требует разработки трансформаторов, высоковольтных трансформа-

торных вводов, высоковольтных вводов в помещении подстанции, тиристорных вентилей, разрядников, делителей напряжения, фильтрующих конденсаторов, а также опорных изоляторов.

Технические достижения

В течение ряда лет компанией АББ велись исследования и разработки в рассматриваемой области. В результате этого разработано, изготовлено и испытано всё оборудование, которому предстоит работать под напряжением 800 кВ. Ниже описываются некоторые его образцы.

Прототип трансформатора

Был изготовлен упрощённый прототип трансформатора, но со всеми элементами изоляции, которую должен иметь трансформатор преобразовательной подстанции (рис. 5а). Первоначальное испытание прототипа включало в себя:

- проверку электрической прочности изоляции на постоянном токе при напряжении 1250 кВ;
- проверку электрической прочности изоляции на переменном токе при напряжении 900 кВ.

Испытание прототипа прошло успешно.

Высоковольтный трансформаторный ввод

Был изготовлен прототип высоковольтного трансформаторного ввода для 6-фазной выпрямительной установки (рис. 5б). Прототип был подвергнут всем типовым и контрольным испытаниям, в том числе:

- проверке электрической прочности изоляции на постоянном токе при напряжении 1450 кВ;
- проверке электрической прочности изоляции на переменном токе при напряжении 1050 кВ.

Высоковольтный ввод в помещение подстанции

Конструкция этого ввода основана на хорошо зарекомендовавшем себя решении, не так давно использованном в установках на напряжении

500 кВ. Помимо обеспечения электрических характеристик, сложность представляла 18-метровая механическая конструкция ввода (см. рисунок в заголовке статьи на с. 22). Тем не менее, все электрические, механические и контрольные испытания прошли успешно. Сейсмостойкость ввода была проверена расчётным путём. После окончательной сборки высоковольтный ввод установлен в испытательную цепь под напряжением 800 кВ, при этом электрическая прочность изоляции проверялась под напряжениями:

- постоянного тока – 1250 кВ;
- переменного тока – 910 кВ.

Отмена регулирования выработки электроэнергии привела к росту продаж именно той энергии, которая передаётся на значительное расстояние, а это в свою очередь предъявляет жёсткие требования к системе передачи энергии.

Установка для длительных испытаний

Чтобы окончательно убедиться в осуществимости найденных технических решений, была сооружена стационарная установка для длительных испытаний. И вот уже более полугода всё разработанное оборудование испытывается под напряжением 855 кВ (рис. 6).

Конструкция подстанции

При разработке оборудования для передачи мощности 6000 МВт постоянного тока при напряжении 800 кВ было очень важно способности

6 Испытание электрической прочности изоляции на стенде с испытательным напряжением 800 кВ на предприятии STRI, Людвика (Швеция)



Вставка 1 Способность комбинированной системы электропередачи переменного и постоянного тока сохранять стабильность работы при выходах из строя соединительной линии постоянного тока при способе 1 (рис. 11а) – с мощной линией переменного тока.

	Число параллельных линий напряжением 500 кВ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число вышедших из строя преобразователей	1	да								
	2	да								
	3	нет	да							
	4	нет	нет	нет	нет	да	да	да	да	да
	5	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да	да	да
	6	нет								
	7	нет								
	8	нет								

Эффективные энергосистемы

требование о том, что выход из строя одного критического компонента оборудования приводит к потере лишь части мощности. На рис. 7 и 8 изображена преобразовательная подстанция с четырьмя силовыми выпрямительными блоками, которые можно соединить одним из следующих способов:

- по два последовательно соединённых блока на каждый из двух полюсов;
- по два параллельно соединённых блока на каждый из двух полюсов.

Успешный результат

По результатам всей описанной выше работы вынесено заключение, что напряжение 800 кВ постоянного тока может использоваться для коммерческого применения.

Сравнение систем передачи переменного и постоянного тока

Затраты

На рис. 10 показаны полные затраты на передачу мощности 12 000 МВт на расстояние 2000 км на переменном и на постоянном токе. При пере-

даче постоянного тока при напряжении 800 кВ величина затрат минимальна с выраженным оптимумом при уровне потерь в линии 5–6%.

Преимущества и недостатки системы переменного тока

Главное преимущество переменного тока – гибкость в подключении нагрузок и генераторов на всём протяжении маршрута передачи электроэнергии. Это особенно ценно, если такой маршрут пролегает по густонаселённым регионам, а выработка энергии производится во многих местах вдоль этого маршрута.

Одним из недостатков системы переменного тока является её стоимость. В приведённом выше примере маршрут получился бы довольно дорогим, поскольку вдоль него пришлось бы создавать всю энергетическую инфраструктуру.

Другим недостатком системы переменного тока является потребность в отводе больших площадей земли под ЛЭП, поскольку на переменном токе не удаётся полностью использовать пропускную способность линий, определяемую из предельно

допустимого нагрева проводов, особенно на линиях большой протяжённости, и приходится строить параллельные линии.

Преимущества и недостатки системы постоянного тока

Главное преимущество системы передачи постоянного тока высокого напряжения – низкая стоимость передачи очень большой мощности на очень большое расстояние.

Главное преимущество переменного тока – гибкость в подключении нагрузок и генераторов на всём протяжении маршрута передачи электроэнергии.

Второе огромное преимущество заключается в малой величине потерь (например, всего около 5% при передаче энергии на расстояние свыше 2000 км). Третье, не менее значительное преимущество – меньшая потребность в отводе земель по причине меньшего количества линий. Выше приводился пример передачи мощности 12 000 МВт, для которой требуется восемь линий переменного тока при напряжении 800 кВ или всего две (!) линии постоянного тока при таком же напряжении.

Главный же недостаток линий постоянного тока – практическая невозможность устройства ответвления от ЛЭП на всём её протяжении, поскольку сооружение преобразовательной подстанции на ответвлении обходится достаточно дорого (хотя технически это возможно и иногда делается).

Сочетание обеих систем

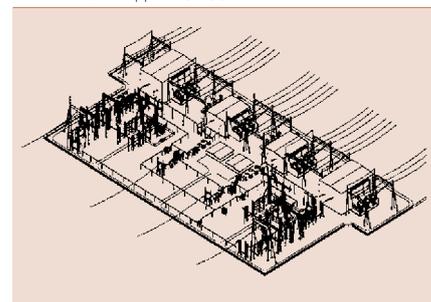
Выше отмечалось, что при передаче постоянного тока сооружение ответвлений от линии обходится дорого. А вот сочетание мощной высоковольтной линии постоянного тока с параллельной сетью переменного тока более низкого напряжения могло бы стать оптимальным решением, объединяющим низкую стоимость и высокую



7 Преобразовательная подстанция с четырьмя силовыми блоками для ЛЭП постоянного тока – такая конфигурация выбрана для сведения к минимуму последствий выхода из строя отдельных компонентов.



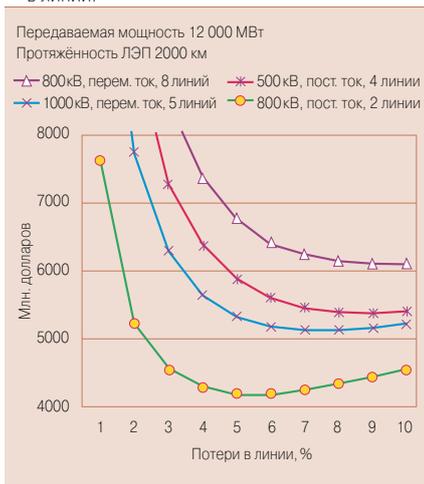
8 Преобразовательная подстанция для линий постоянного тока с двумя последовательно соединёнными преобразовательными установками на каждый полюс.



9 Подстанция, схема которой приведена на рис. 8, глазами художника.

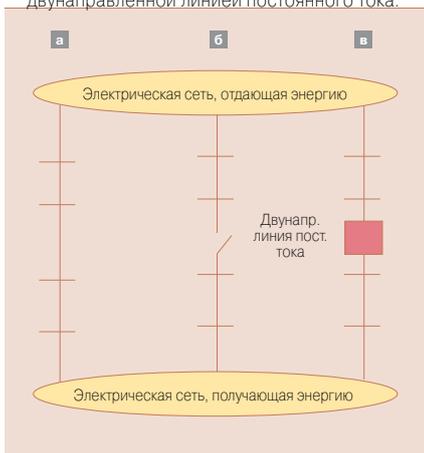


10 Затраты на подстанции, ЛЭП и на компенсацию потерь в зависимости от величины потерь в линии.



11 Три способа сочетания систем переменного и постоянного тока для соединения двух электрических сетей:

- а Мощная линия переменного тока поддерживает линию постоянного тока.
- б Две отдельные системы переменного тока.
- в Две системы переменного тока соединены двунаправленной линией постоянного тока.



гибкость при энергоснабжении потребителей вдоль маршрута передачи энергии.

Такое оптимальное решение связано с некоторыми техническими проблемами. Возмущения, возникшие в линии постоянного тока, во многих случаях могут привести к аварийным отключениям линий переменного тока, так как углы сдвига фаз становятся слишком велики. Эту проблему можно решить различными способами, показанными на рис. 11.

Способ 1 (рис. 11а)

Линия переменного тока делается достаточно мощной для того, чтобы без отключений выдерживать возмущения в линии постоянного тока.

В качестве иллюстрации рассмотрим такой пример. Предположим, что имеется двухцепная ЛЭП постоянного тока, передающая мощность 12 000 МВт на расстояние свыше 2000 км с четырьмя группами преобразователей на каждую цепь. Предположим также, что система передачи постоянного тока допускает временную перегрузку 50% при аварийном отключении одной или более групп преобразователей. Предположим, наконец, что имеется проложенная параллельно ЛЭП переменного тока с напряжением 500 кВ, которая способна принять на себя всю ту мощность, которую линия постоянного тока окажется не в состоянии передать. Результаты показаны в таблице Вставки 1 на с. 25.

Из таблицы видно, что система сохраняет динамическую стабильность после отключения нескольких групп преобразователей в цепи постоянного тока. Мощность каждой такой группы 1500 МВт. Конечный эффект зависит также от нагрузки на линии переменного тока перед аварией (в примере этот уровень принят равным 34%).

Способ 2 (рис. 11б)

При этом способе две сети переменного тока работают асинхронно, каждая питает половину

всех потребителей в зоне данного маршрута. Проблема стабильности работы в данном случае отсутствует вообще.

Способ 3 (рис. 11в)

Этот способ напоминает предыдущий (рис. 11б), но добавляется двунаправленная линия постоянного тока, на каждом конце которой есть выпрямительная и инверторная подстанция. В этом случае никакая синхронизация систем переменного тока не требуется. В качестве линии постоянного тока возможно применение специального преобразовательного оборудования (HVDC Light), которое стабилизирует напряжения и позволяет увеличить передачу мощности по линиям переменного тока.

Заключение

При передаче больших объёмов электроэнергии на расстояния более 500–1000 км наиболее оптимальным вариантом по цене-эффективности является ЛЭП постоянного тока с напряжением 800 кВ, при этом самым большим недостатком такого варианта является чрезмерно высокая стоимость устройства ответвлений от магистральной ЛЭП. Сочетание двух систем, в котором передача больших электрических мощностей производится по линии постоянного тока, а потребители по маршруту передачи питаются от параллельной линии переменного тока, представляется наиболее гибким и эффективным по затратам решением. При этом более удобным было бы покрыть густонаселённые районы с существующими сетями напряжений 400 или 500 кВ сетью переменного тока напряжением 1000 кВ.

Гуннар Асплунд

ABB Power Technologies, Power Systems DC
Людвика, Швеция
gunnar.asplund@se.abb.com