

Эффективной электроэнергии — быть!

Технологии передачи и распределения энергии — ключ к повышению энергоэффективности

Энрике Сантакана, Тамми Зукко, Цзямынь Фэн, Юйпин Пан, Мирасу Мосави, Ле Тан

В основе свободных рынков электрической энергии лежит идея, заключающаяся в том, что потребитель должен иметь возможность приобретать электроэнергию из наиболее дешёвого, наиболее эффективного или наименее загрязняющего окружающую среду источника. Реальность пока ещё оставляет желать лучшего. Недостаточная пропускная способность электрических сетей часто вынуждает эффективно работающие предприятия энергетики ограничивать мощность, тем самым вынуждая потребителя приобретать электроэнергию из менее эффективных источников, но расположенных поближе.

Решение заключается в сочетании новых направлений передачи электрической энергии с более эффективным использованием существующих линий на основе современных технологий. Наш журнал рассказывает об этом.

Вырабатываемая электростанциями энергия подаётся конечным потребителям за сотни и тысячи километров через сеть линий передачи и распределения электрической энергии (рис. 1, 2, 3). Ключевыми компонентами этой сети являются опоры ЛЭП, провода и кабели, трансформаторы, автоматические выключатели, конденсаторы и реакторы, системы HVDC и FACTS, а также средства мониторинга, защиты и управления. Общее название сетей, передающих энергию на большие расстояния от электростанций до подстанций у населённых пунктов и работающих на высоком напряжении, — питающие сети. Распределительные сети передают энергию от подстанций к конечным потребителям, они менее связаны друг с другом и работают на более низких напряжениях, чем питающие. В целом система передачи и распределения электрической энергии проектируется так, чтобы обеспечить надёжную, безопасную и экономичную работу в условиях имеющихся нагрузок и системных ограничений.

Массовые отключения последних лет — свидетельство того, что на всех континентах системы передачи и распределения электрической энергии не имеют достаточной надёжности и возможностей по оптимизации.

Любая система передачи и распределения энергии может предназначаться для обеспечения трёх уровней обслуживания (рис. 4).

На первом уровне обеспечиваются некоторые минимальные возможности по коммутации и передаче мощности в нормальных условиях работы. Это как бы базовый уровень обслуживания. Если он не обеспечивается, экономическое развитие региона, обслуживаемого системой передачи и распределения энергии, оказывается под угрозой.

На втором повышенном уровне надёжное и безопасное обслуживание потребителей сохраняется и при выходе из строя отдельных компонентов системы. В этом случае необходимы дополнительные линии от электростанций к потребителям, т. е. более высокий уровень резервирования систем передачи и распределения электроэнергии.

Эффективные энергосистемы

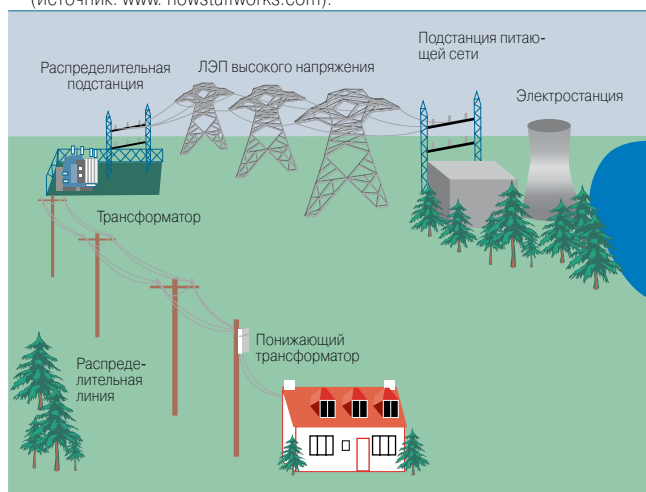
На третьем, высшем уровне возможна оптимизация разнообразных источников энергии, распределённых географически, с тем чтобы достичь максимально возможного социального и экономического развития обслуживаемого региона. Это может быть и оптимизация процессов на различных электростанциях с целью снижения выбросов парниковых газов, ведущих к глобальному потеплению, и максимальное увеличение общей экономической эффективности путём удовлетворения потребностей в энергии через приобретение её на свободном рынке. Однако такая оптимизация просто невозможна, если система передачи и распределения электроэнергии не имеет возможностей для оптимизации, выходящих за рамки требуемых при втором уровне обслуживания.

К сожалению, большинство систем передачи и распределения электрической энергии в мире достигли лишь второго уровня, а третий уровень обеспечивается ими лишь частично. Массовые отключения последних лет (см. вставку) – свидетельство того, что на всех континентах системы передачи и распределения электрической энергии не имеют достаточной надёжности и возможностей по оптимизации.

Как будет показано ниже, правильно построенная система передачи и распределения энергии улучшает энергоэффективность процесса подачи энергии потребителям.

Несовершенство системы передачи и распределения снижает энергоэффективность (на примере Северной Америки).

1 Системы передачи и распределения электрической энергии соединяют электрические станции с конечными потребителями (источник: www.howstuffworks.com).



Достаточные пропускная и нагрузочная способности – существенное предварительное условие эффективной работы энергосистемы, достигаемой за счёт оптимизации выработки энергии и минимизации потерь при её подаче потреби-

Наиболее масштабные отключения подачи электроэнергии за последние годы

Северная Америка	14 августа 2003 г.
Лондон	28 августа 2003 г.
Дания-Швеция	23 сентября 2003 г.
Италия	28 сентября 2003 г.
Греция	12 июля 2004 г.
Австралия	14 марта 2005 г.
Москва	25 мая 2005 г.
Европейское отключение	4 ноября 2006 г.
Австралия, штат Виктория	17 января 2007 г.
ЮАР	18 января 2007 г.
Колумбия	26 апреля 2007 г.

телям. Из-за значительного недофинансирования расширения электрических сетей и их модернизации, нынешняя инфраструктура передачи и распределения электрической энергии в США часто не позволяет осуществить такие меры (рис. 5).

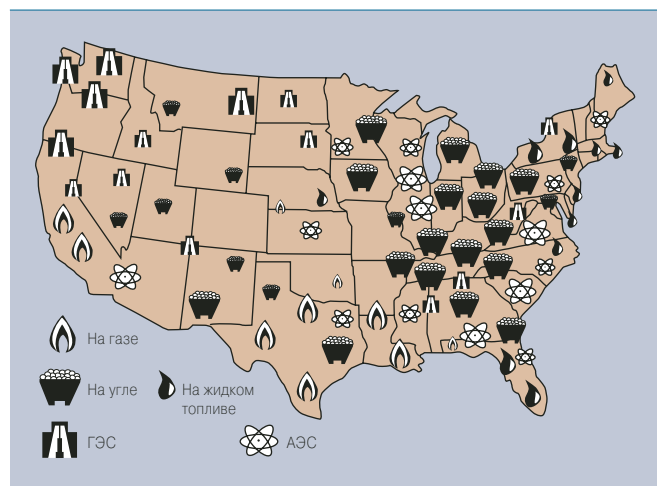
Проблема перегруженности линий электропередачи в США

Перегруженность линий электропередачи возникает в тех случаях, когда мощность, которую можно передавать по линиям или через определённое электрическое оборудование, ограничена определёнными пределами – физическими или установленными искусственно по соображениям безопасности. Покупатели электроэнергии

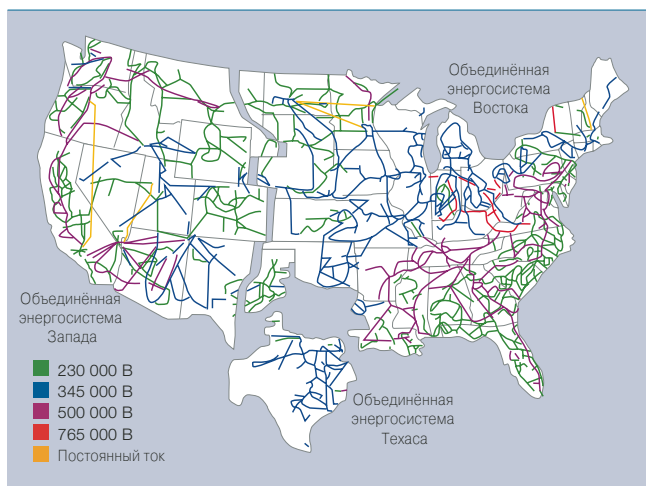
всегда выбирают наименее дорогой источник электрической энергии из числа способных передать энергию через электрические сети в нагрузку. Если существуют какие-либо ограничения при передаче энергии именно от этого источника, сетевой оператор должен подобрать альтернативный (более дорогой или менее эффективный) источник с тем, чтобы эти ограничения были соблюдены. В ходе проведённого в 2003 г. исследования была изучена работа шести независимых системных операторов в следующих регионах США: Новая Англия, Нью-Йорк, Пенсильвания – Нью-Джерси – Мэриленд, Средний Запад, Техас и Калифорния [1]. Было обнаружено, что этим шести операторам за 4 года (1999–2002) перегруженность линий обошлась примерно в 4,8 млрд. долларов. Данные рынков электроэнергии, контролируемых организациями RTO¹⁾, показывают рост издержек независимых

¹⁾ RTO (Regional Transmission Organization) – Региональная организация по передаче электрической энергии

2 Расположение электрических станций на территории США (по данным Министерства энергетики США).



3 Сеть ЛЭП на территории США (по данным Министерства энергетики США).



Эффективные энергосистемы

системных операторов, вызванных перегруженностью сетей. Более поздние исследования выявили, что в 2001–2005 гг. только обнаруженные издержки составили в регионе «Нью-Йорк» почти 1 млрд. долларов в год, а в регионе «Пенсильвания – Нью-Джерси – Мэриленд» даже более 2 млрд. долларов в год [2]. Перегруженность электрических сетей требует частых действий по снижению нагрузок на сети (рис. 6). Если потребность в электрической энергии велика, а выработка её местными станциями ограничена, сетевым операторам в некоторых регионах, возможно, придётся ограничивать подачу энергии потребителям для поддержания надёжной работы электрических сетей.

Для воздушных ЛЭП с большой пропускной способностью более эффективной оказывается передача постоянного тока высокого напряжения. Пропускная способность ЛЭП при этом в 2–5 раз выше, чем при передаче переменного тока того же напряжения.

Потери в системах передачи и распределения электрической энергии

Передача электрической энергии от её источника к нагрузке всегда сопровождается определёнными потерями. Эти потери являются по сути дополнительной нагрузкой и требуют выработки дополнительной электроэнергии, для чего, в свою очередь, нужны дополнительные ресурсы. В целом величина потерь в системах передачи и распределения энергии оценивается в 6–7,5% от всей выработанной энергии [3]. Типичной же величиной является 3,5% в системах передачи и 4,5% в системах распределения энергии. Величина потерь может меняться в широких пределах в зависимости от конфигурации сети, взаимного расположения генераторов и потребителей, способов включения генераторов в сеть, а также потребностей в электрической энергии. В частности, потери в периоды наибольших нагрузок или в сильно нагруженных электрических линиях намного больше потерь даже при умеренных нагрузках, не говоря уже о малых. Так происходит оттого, что для большинства устройств электрических сетей зависимость между потерями и токами квадратичная. В денежном

выражении суммарные потери систем передачи и распределения электроэнергии оцениваются более чем в 21 млрд. долларов (исходя из средней розничной цены на электроэнергию в США и общей величины потерь в 2005 г. [3]).

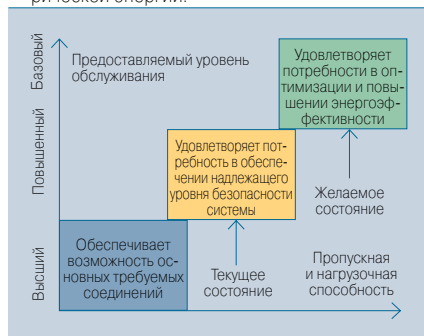
В недавнем прошлом потери в системах передачи и распределения электроэнергии в США имели тенденцию к росту, преимущественно за счёт роста продаж электроэнергии и неэффективной работы этих систем (рис. 8).

Технологии повышения эффективности работы систем передачи и распределения электроэнергии

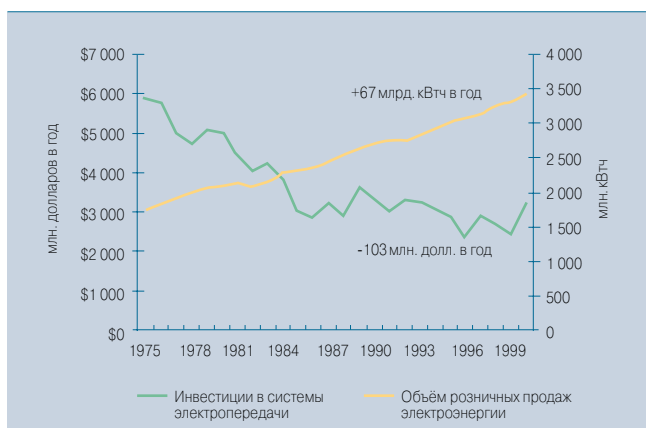
Все технологии, направленные на повышение эффективности систем передачи и распределения энергии, можно разделить на следующие три категории:

- технологии по увеличению пропускной способности линий передачи для более рационального размещения и использования генерирующих мощностей;
- технологии оптимизации конструкции и работы систем передачи и распределения для снижения общих энергопотерь;

4 Три уровня обслуживания, предоставляемого системами передачи и распределения электрической энергии.



5 Уменьшение инвестиций в системы электропередачи по мере возрастания потребности в электроэнергии (по данным Эдисоновского института).



- введение новых промышленных стандартов энергоэффективности силовых электрических аппаратов.

Увеличение пропускной способности ЛЭП для более рационального размещения и использования генерирующих мощностей

Существует три основных пути повышения пропускной способности: строительство новых ЛЭП переменного и постоянного тока, модернизация существующих ЛЭП, использование существующих ЛЭП в режимах, более близких к предельно допустимым по нагреву.

Строительство новых ЛЭП

Здесь можно идти двумя путями: строить новые линии переменного тока высокого напряжения или постоянного тока высокого напряжения. Ограничения по нагреву для ЛЭП на напряжение 230 кВ определяют пропускную способность на уровне 400 МВт, на напряжение 345 кВ – 1100 МВт, на напряжение 500 кВ – 2300 МВт и на напряжение 765 кВ – 7000 МВт. Однако, кроме ограничений по нагреву для линий переменного тока существуют ограничения на их пропускную способность по напряжению, стабильности и управлению системой передачи энергии. Обычно же пропускная способность протяженных ЛЭП переменного тока по оперируемой мощности меньше указанных значений.

Линии постоянного тока высокого напряжения

Линии постоянного тока высокого напряжения более эффективны при передаче больших объемов электрической энергии на расстояния свыше 600–1000 км по воздушным линиям (рис. 9). Пропускная способность ЛЭП при этом в 2–5 раз выше, чем при передаче переменного тока того же напряжения (рис. 7). Воздействие таких ЛЭП на окружающую среду меньше такового у ЛЭП переменного тока, поскольку требуется меньшая полоса пропускания. Линии постоянного тока уже широко применяются

для объединения энергосистем переменного тока, когда использование переменного тока в соединительной линии невозможно из-за проблем со стабильностью работы или же у соединяемых линий переменного тока разные номиналы частоты. Кроме того, постоянный ток используется в линиях, выполненных подводным силовым кабелем при длине более 50 км, где передача переменного тока нецелесо-

2) См. также «Легкие и невидимые. Подземные линии электропередачи по технологии HVDC Light», Даг Равемарк, Бо Нормарк, АББ Ревью, 4/2005 с. 25–29.

образно из-за большой ёмкости такого кабеля (для её компенсации потребовались бы промежуточные подстанции). Недавнее достижение в технике передачи постоянного тока высокого напряжения – компактный преобразователь напряжения с применением силовых полупроводниковых приборов IGBT³⁾, позволяющий повысить качество энергоснабжения по линиям переменного тока. Преобразовательные подстанции в этом случае занимают очень мало места, а передача энергии осуществляется по подземному кабелю – всё это снижает воздействие ЛЭП на окружающую среду. Как уже отмечалось выше, такая технология (под названием HVDC LightTM) открывает новые возможности по повышению качества энергоснабжения через сети переменного тока с быстродействующим и независимым управлением активной и реактивной мощностью, по обеспечению энергоснабжения в чрезвычайных обстоятельствах, а также по «черному пуску» энергосистемы.

Энергоэффективность передачи постоянного тока высокого напряжения

Потери в системах передачи постоянного тока высокого напряжения включают потери в линии и потери в преобразователях переменного тока в постоянный. Потери в оконечных преобразователях составляют примерно 1,0–1,5 % от передаваемой мощности, что совсем немного по сравнению с потерями в линии, зависящими от сопротивления проводников и тока. Поскольку реактивная мощность на постоянном токе не передаётся, то потери в линии меньше по сравнению с переменным током. Практически во всех случаях при передаче одной и той же мощности общие потери при передаче постоянного тока меньше (рис. 7).

Что мешает строительству новых ЛЭП?

Одним из препятствий строительству новых ЛЭП (независимо от рода тока в них) является спорность вопроса о том, кому нести затраты на строительство. Например, линии прокладыва-

ются в местностях, где получение каких-либо выгод от них проблематично – должны ли затраты на это нести всё общество или они целиком лягут на инвесторов и строителей линии? Такой вопрос продолжает вызывать разногласия среди политиков и в обществе.

Нагревостойкий проводник способен пропускать в 2–3 раза больший ток, нежели обычный проводник, при этом нагрузка на опоры линии не увеличивается.

Даже если предстоящее строительство ЛЭП обеспечено финансовой поддержкой, получение различных разрешений и согласований, а затем и отвод земель может оказаться трудным делом, на которое иногда уходят годы. При этом может случиться так, что, когда все вопросы решаются, изменяются требования заказчика, обстановка и т.п., следовательно потребуются дополнительные проработки.

Модернизация существующих линий

Существует три пути повышения пропускной способности существующих ЛЭП: повышение напряжения, увеличение количества и (или) сечения проводников каждой фазы, применение нагревостойких проводников. При повышении напряжения и сохранении передаваемой мощности ток в линии уменьшается. Например, повышение напряжения ЛЭП с 230 до 345 кВ увеличивает пропускную способность линии с 400 до 1100 МВт.

Усиление проводов на линии

Поскольку сопротивление проводника примерно обратно пропорционально площади его поперечного сечения, пропускную способность линии по току можно поднять усилением про-

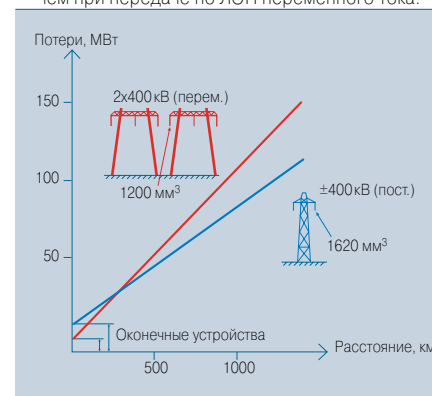
водов – заменой на проводники большего сечения или увеличением их количества. Например, пропускную способность ЛЭП на напряжение 230 кВ путём усиления проводов (увеличением их сечения, расщеплением фаз) можно поднять с 400 до 1100 МВт.

Недавние успехи в области технологии нагревостойких проводников позволяют пойти путём ослабления температурных ограничений, являющихся «узким местом» при передаче электроэнергии на короткие и средние расстояния. Нагревостойкий проводник способен пропускать в 2–3 раза больший ток, нежели обычный проводник (например усиленный алюминиево-стальной) при этом нагрузка на опоры линии не увеличивается.

В обоих описанных выше вариантах (поднятие напряжения или усиление проводников) дополнительных земель для расширения полосы отвода не требуется. Однако из-за увеличения массы проводников и изоляторов приходится усиливать или переделывать опоры ЛЭП, кроме

³⁾ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor): биполярный транзистор с изолированным затвором – силовой полупроводниковый прибор.

7 Потери энергии при передаче её на большие расстояния по ЛЭП постоянного тока меньше, чем при передаче по ЛЭП переменного тока.



8 Число случаев снижения нагрузки на ЛЭП возрастает (по данным Североамериканского совета по надёжности электроэнергетики)



9 Потери при передаче и распределении электроэнергии в США в 2001–2005 гг. (по данным Министерства энергетики США).



Эффективные энергосистемы

9 Электростанция, вырабатывающая постоянный ток высокого напряжения, который всё шире используется для передачи больших объёмов электроэнергии на значительные расстояния.



10 Оборудование FACTS повышает пропускную способность и стабильность работы ЛЭП.



того, неизбежна замена основного оборудования (трансформаторов и автоматических выключателей) на подстанциях модернизируемой линии.

Новые линии или модернизация существующих?

Решение вопроса о том, что лучше: строить новые ЛЭП или модернизировать существующие, определяется не только техническими аспектами. Выше уже говорилось, что процесс получения разрешения на строительство новой линии электропередачи занимает много лет (например, в США) и не всегда приводит к успеху. Тем не менее Министерство энергетики США в рамках Закона о политике в области энергетики подготовило два предложения, касающихся сооружения ЛЭП «в общенациональных интересах», направленные на упрощение процедуры получения таких разрешений. Это ускорит строительство новых мощных ЛЭП в районах с наибольшей перегруженностью электрических сетей.

11 Распределительные трансформаторы вносят значительный вклад в общие потери энергии при её передаче и распределении. Применение новых материалов позволяет уменьшить эти потери.



Полное использование пропускной способности ЛЭП

Во многих случаях линии электропередачи работают гораздо ниже допустимых пределов нагревостойкости проводников из-за других ограничений: по напряжению, стабильности работы и системных. Имеются несколько технологий, применяемых для улучшения использования пропускной способности ЛЭП. Для устранения тепловых ограничений, связанных с проблемами «параллельных путей» тока или «кругового потока мощности», применяется регулировка фазового сдвига между током и напряжением в линии. Компенсация последовательно включенными конденсаторами – другой распространённый способ повышения пропускной способности протяжённых ЛЭП переменного тока. Для лучшего использования воздушных линий и кабелей, а также сопрягаемого с ними оборудования (трансформаторов) может использоваться семейство устройств на базе силовой электроники, называемых устройствами FACTS (Flexible AC Transmission Systems – гибкие системы электропередачи переменного тока)⁴⁾ (рис. 10). Простейшим таким устройством является управляемая тиристорами батарея конденсаторов и реакторов (SVC), широко применяемая для быстрой компенсации реактивной мощности в критических местах энергосистемы. Другое широко распространённое устройство – батарея последовательно соединённых конденсаторов, управляемая тиристором (TCSC), которая служит для компенсации реактивной мощности и сглаживания неравномерности энергопотребления в системах энергоснабжения. Более сложное применение силовая электроника находит в устройстве, которое называется статическим синхронным компенсатором (STATCOM). Это устройство может поглощать и отдавать реактивную мощность в зависимости от колебаний напряжения в системе. Наконец, наиболее сложными устройствами на базе силовой электроники являются унифицированные контро-

леры передаваемой мощности (UPFC), которые в состоянии регулировать уровень и активной, и реактивной мощности, передаваемой по линии, тем самым быстро компенсируя изменения напряжения и управляя потоком энергии. Считается, что устройства FACTS поднимают пропускную способность ЛЭП на 20–40% – до пределов, определяемых напряжением на линии и условиями её стабильной работы.

Величина потерь может меняться в широких пределах в зависимости от конфигурации сети, расположения генераторов и потребителей, способов включения генераторов в сеть, а также от потребностей в электрической энергии.

Потенциальные преимущества строительства и эксплуатации энергосистем, не имеющих ограничений

Снижение цен на электроэнергию

Энергосистемы, в которых отсутствуют технические ограничения, позволяют подключать нагрузку к наиболее экономичным генерирующим мощностям, и тем самым повышать эффективность действия рынка электрической энергии. Работа таких энергосистем несёт в себе потенциальное преимущество, заключающееся в возможности полного использования разновременности максимумов

⁴⁾ См. также «Гибкость сети. FACTS: новейшее средство увеличения пропускной способности», Рольф Грюнбаум, Юхан Уллерюд, АББ Ревю 4/2005 с. 21–24.

нагрузок в различных регионах из-за различий в погоде или временных поясах. В результате эффективно работающие генерирующие мощности можно использовать с полной нагрузкой в течение большего времени, тем самым сокращая использование малоэффективных источников энергии.

Повышение надёжности энергосистем
Линии передачи электрической энергии, не имеющие технических ограничений, потенциально способны повысить надёжность энергосистемы в целом. При заданном уровне резервных возможностей передающие линии без технических ограничений способны передавать при чрезвычайных обстоятельствах требуемую мощность из соседних регионов (объединённых в единую энергосистему) в регион, где произошли массовые отключения потребителей электроэнергии, например, из-за одновременного выхода из строя нескольких источников энергии и линий электропередачи.

Снижение выбросов в атмосферу и выбор источника энергии

Линии передачи электрической энергии без ограничений дают возможность передавать энергию от тех генерирующих установок, которые меньше загрязняют природную среду, или же шире использовать возобновляемые источники энергии, даже если они находятся далеко от густонаселённых районов. Возможность же использовать различные виды топлива соответствует интересам национальной безопасности, поскольку позволяет больше полагаться на свои внутренние топливные ресурсы. Кроме того, возможность выбора источника энергии позволяет без особых проблем поддерживать энергетический баланс в условиях временных нехваток какого-то вида энергоресурсов.

Использование сверхпроводящих материалов для замены меди в трансформаторах могло бы значительно снизить потери в обмотках.

Снижение потерь электроэнергии при её передаче и распределении путём оптимизации энергосистемы и приёмов её эксплуатации

Ниже приводятся некоторые наиболее широко применяемые способы снижения потерь энергии при её передаче и распределении, касающиеся конструктивных и эксплуатационных аспектов и способствующие повышению эффективности.

- Усиление проводов на линиях – замена существующих проводов на провода с большим сечением или добавление параллельно подключённых проводов.

- Изменение напряжения – перевод части сети на более высокое напряжение.
- Оптимизация качества энергии путём компенсации реактивной мощности – размещение в определённых местах компенсирующих устройств с целью сведения до минимума передачи реактивной мощности по сетям.
- Передача энергии в места очень большого потребления напрямую по линиям постоянного тока.
- Выравнивание нагрузок фаз – улучшение баланса токов фаз в системах распределения электрической энергии.
- Применение явления сверхпроводимости. Некоторые материалы при сверхнизких температурах (температура жидкого азота) приобретают способность проводить электрический ток абсолютно без потерь (т.е. с нулевым сопротивлением). В настоящее время разрабатываются образцы кабелей со сверхпроводимостью при относительно высоких температурах, способных передавать в 3–5 раз более высокую мощность, чем обычные кабели с проводниками из меди. Такие кабели можно использовать вместо воздушных электрических линий там, где окружающая среда и недостаток свободного пространства исключают сооружение воздушных ЛЭП. Потери под нагрузкой в кабелях из высокотемпературных сверхпроводников будут намного ниже, чем в воздушных или кабельных линиях даже с учётом расхода энергии на охлаждение сверхпроводника. Основной поставщик сверхпроводниковых материалов заявляет, что потери в кабелях из высокотемпературных сверхпроводников всего 0,5 % от передаваемой мощности против 5–8 % у обычных кабелей. Кроме того, использование сверхпроводников вместо меди в трансформаторных обмотках также позволило бы значительно снизить потери. Так в случае трансформатора мощностью 100 МВА общие потери (в обмотках, в сердечнике и расход энергии на охлаждение) составили бы всего 65–70 % таковых для обычного трансформатора.

Другие значимые технологии и опыт разработки дают следующие пути повышения эффективности энергосистем:

- переход преимущественно на подземные линии распределения электроэнергии – это позволило бы сберечь до 80 % энергии, теряемой в распределительных системах;
- ориентация на распределительные сети постоянного тока;
- переход к сетям малой протяжённости вместо передачи энергии на большие расстояния;
- интеллектуальное автоматизированное проектирование электрических сетей;

- применение систем управления в реальном времени;
- управление нагрузкой на основе более точных измерений в сети;
- применение устройств накопления энергии.

Резерв повышения энергоэффективности непосредственно путём снижения потерь при передаче и распределении энергии оценивается более, чем в 1 % от всей поставляемой энергии. В денежном выражении это 3 миллиарда долларов в год⁵⁾.

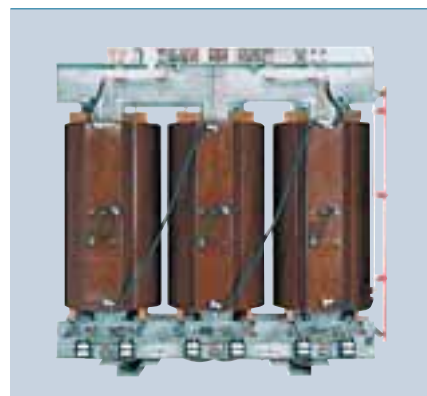
Повышение энергоэффективности силовых электрических аппаратов

Другой ключ к повышению эффективности систем передачи и распределения электроэнергии – улучшение технических характеристик силовых электрических аппаратов. Последнее могло бы быть частью программы совершенствования регулирования потребности в электрической энергии, могло бы способствовать обеспечению безопасности энергоснабжения и в конечном счёте смягчению эффекта изменения климата.

Трансформаторы

Потери в распределительных трансформаторах составляют значительную часть общих потерь в системах передачи и распределения энергии (рис. 11, 12). На основе исследования работы сетей передачи и распределения энергии региона Pacific Northwest (северо-западное тихоокеанское побережье США) было установлено, что потери в распределительных трансформаторах составляют более 30 %, в то время как в трансформаторах питающих подстанций теряется только 2 % [4]. Учитывая распространённость и большой срок службы распределительных трансформаторов, последние представляют собой значительный резерв энергосбережения. С точки зрения энергосбережения повышение эффективности распределительных трансформаторов всего на 0,1 % уже оправдано, поскольку такие трансформаторы находятся под напряжением круглосуточно.

- 12 Потери в обмотках трансформатора можно снизить за счёт выбора соответствующих материалов и геометрии обмоток.



⁵⁾ Исходя из средней розничной цены на электрическую энергию в США в 2005 г.

Эффективные энергосистемы



При использовании имеющихся на сегодня технологий потери в трансформаторах без чрезмерных затрат можно снизить как минимум на 15%.

Обычно считается, что снижению поддаются два вида потерь: потери в обмотках и потери в сердечнике. Последние часто рассматриваются как потери холостого хода, поскольку имеют место в сердечнике любого находящегося под напряжением трансформатора независимо от его нагрузки. При круглосуточной и круглогодичной работе трансформатора в течение 20–30 лет экономия от снижения потерь холостого хода получается довольно значительной. Величина же потерь в обмотках (потерь в меди) зависит от нагрузки трансформатора (рис. 13), поэтому эти потери носят название нагрузочных.

Потери холостого хода в трансформаторах можно снизить подбором магнитных свойств электротехнической стали для сердечников или оптимизацией геометрии сердечника. Например, увеличение сечения сердечника или снижение напряжения, приходящегося на один виток обмотки, снижает потери в сердечнике. Уменьшение сечения проводников обмоток также снижает потери холостого хода, поскольку при этом уменьшается длина силовых линий магнитного потока. Но вместе с тем это приводит к увеличению нагрузочных потерь. Последние можно уменьшить несколькими способами, включая и снижение сопротивления обмоток путём увеличения сечения обмоточных проводников и использование проводников из материала с меньшим удельным сопротивлением (например, меди вместо алюминия). Как правило, методы снижения потерь в обмотках приводят к снижению длины обмоточных проводников. Уменьшение сечения сердечника

и числа витков в обмотках также снижают потери в обмотках. Понятно, что наименьшие потери в обмотках будут у трансформаторов со сверхпроводящими обмотками.

Вышеизложенное показывает, что меры по снижению потерь холостого хода вызывают увеличение нагрузочных потерь и наоборот. Поэтому снижение потерь в трансформаторах – это по сути процесс оптимизации, включающий физические, технологические и экономические факторы, объединяемые с помощью той или иной формы экономического анализа жизненного цикла изделия. Чаще всего в вопросах сбыта трансформаторов имеет значение материал сердечника и обмоток, а также то, во сколько покупатель оценивает свои затраты на владение трансформатором. В этих затратах учитывается цена приобретения трансформатора и расходы на эксплуатацию трансформатора в течение его срока службы с учётом потерь.

Во многих случаях линии электропередачи работают гораздо ниже допустимых пределов нагревостойкости проводников из-за других ограничений: по напряжению, стабильности работы и системных.

Наиболее часто затраты на владение трансформатором оцениваются службами энергоснабжения в ходе его приобретения. И хотя промышленные и коммерческие потребители оплачивают свои энергопотери непосредственно «из своего кармана», к оценке затрат на владение трансформатором они относятся иронически отчасти из своей практики приобретения трансформаторов и сравнительно небольшого срока их службы.

Повышение энергоэффективности трансформаторов идёт на многих рынках отчасти благодаря инициативам и политике правительств, а также действию законов рынка. Закон США 1992 г. об энергетике обязал Министерство энергетики США провести анализ экономической выгоды от повышения энергоэффективности распределительных трансформаторов. Проведённое Окриджской Национальной Лабораторией исследование выявило, что повышение энергоэффективности вполне достижимо технически и может привести к экономии электрической энергии в 2000–2030 гг. в размере от 1 до 4 триллионов (!) киловатт-часов. [5]. В 1995 г. Агентство по защите окружающей среды приступило к реализации программы Energy Star Transformer в сотрудничестве

с коммунальными службами энергоснабжения для внедрения и поощрения применения высокоэффективных (в том числе и по цене-качеству) распределительных трансформаторов. Эта программа повышает уровень осведомлённости общества в отношении снижения выбросов парниковых газов.

Энергоэффективные распределительные трансформаторы недавно стали объектом пристального интереса во всём мире (рис. 14). Канада, Мексика и американские штаты Калифорния, Массачусетс, Нью-Йорк, Миннесота, Вермонт, Висконсин и Орегон уже приняли программы по энергоэффективности. Дальнейшая поддержка и внедрение таких программ осуществляется Консорциумом по энергетической эффективности – североамериканской некоммерческой организацией, занимающейся продвижением энергосберегающих изделий и услуг.

Хотя до настоящего времени нет общеобязательного стандарта по эффективности, уже существуют различные отраслевые стандарты, регламентирующие оценку энергоэффективности распределительных трансформаторов. Например, стандарты Национальной ассоциации изготовителей электрооборудования (National Electrical Manufacturers Association, NEMA) TP-1, 2, 3 могут добровольно соблюдаться поставщиками трансформаторов в части определения энергоэффективности и измерения энергопотребления распределительных трансформаторов. Стандарт NEMA TP-3 устанавливает правила для маркировки распределительных трансформаторов. Стандарт IEEE PC57.12.33 содержит указания по оценке величины потерь распределительных трансформаторов. Этот стандарт находится в процессе разработки и более детализирован по сравнению со стандартом NEMA TP-1.

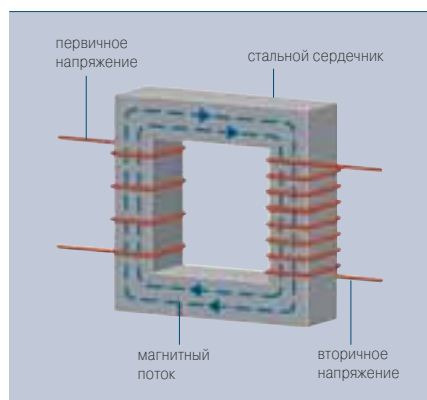
Отдел энергетической эффективности и возобновляемых энергоресурсов Министерства энергетики США недавно выпустил уведомление о порядке разработки правил, предлагаемых к внедрению, где содержатся некоторые минимальные требования по энергоэффективности маслonaполненных распределительных трансформаторов, а также сухих распределительных трансформаторов среднего напряжения. Ожидается, что новые требования по энергоэффективности коснутся 50–60% выпускаемых в настоящее время распределительных трансформаторов. В этих трансформаторах обычно применяются наименее дорогостоящие и наиболее распространённые марки электротехнической стали, известные в промышленности как М4, М5 и М6. Предлагаемое повышение энергоэффективности потребует применения более эффективных марок кремнистой стали М2 и М3 с ориентированными магнитными доменами. Более того, новые стан-

дарты требуют высокоэффективных материалов для трансформаторных сердечников, в то время как большинство сухих трансформаторов обычно выпускается с сердечниками из стали с неориентированными магнитными доменами. В результате доступность материалов для изготовления энергоэффективных трансформаторов и конечная стоимость таких трансформаторов становятся серьёзной проблемой на пути реализации энергосберегающих программ. В конечном счёте Министерство энергетики США сделает применение энергоэффективных трансформаторов обязательным, но пока многое в этом вопросе остаётся неясным. Вслед за Министерством энергетики и Ассоциация NEMA также введёт новые требования в том или ином виде в соответствии с мировой тенденцией к энергетической эффективности, которая уже набрала силу на североамериканском и европейском рынках.

Путь вперёд

В предыдущих разделах рассказано о технологиях, которые могут использоваться по отдельности или в различных сочетаниях для того, чтобы поднять эффективность систем энергоснабжения.

13 Принцип действия трансформатора (источник: Precision Graphics).



14 Трёхфазный понижающий распределительный трансформатор.



Резервы энергосбережения в мире огромны. Только в США потенциал энергосбережения за счёт снижения потерь энергии при её передаче и распределении превышает 1 % от всего объёма потребляемой электроэнергии, что по рыночным ценам составляет около 3 млрд. долларов. Кроме того, ежегодно можно сэкономить миллиарды долларов в год, если уменьшить убытки от перегруженности электрических сетей путём модернизации систем передачи и распределения электрической энергии.

Энергосистемы, в которых отсутствуют технические ограничения, позволяют подключать нагрузку к наиболее экономичным генерирующим мощностям, и тем самым повышать эффективность действия рынка электрической энергии.

Кроме того, в передаче и распределении энергии заключён стимул к оптимизации всего, что связано с выработкой электроэнергии и снижением потребления ископаемых топлив за счёт использования экологически чистых и возобновляемых источников энергии.

Ниже излагаются основные идеи перспективного плана, разработанного рабочей группой координационного комитета круглого стола по проблемам передачи и распределения электрической энергии, в состав которого входят представители ведущих коммунальных служб США и поставщики оборудования для энергосистем.

■ Для увеличения пропускной и нагрузочной способности электрических сетей и повышения уровня управления ими в целях оптимального размещения и использования генерирующих мощностей требуется вложение соответствующих средств.

- Оптимизация проектирования и эксплуатации с применением передовых технологий и передового опыта весьма существенна для энергосбережения.
- Для стимулирования снижения энергопотребления требуется введение новых промышленных стандартов на энергоэффективность силовых электрических аппаратов.

Сегодня уже имеются технологии для существенного повышения эффективности существующих в мире систем передачи и распределения электрической энергии. Применение этих технологий – не только вопрос баланса между затратами и извлекаемой долговременной выгодой, но и вопрос изменения сложившейся практики работы служб энергоснабжения, создания нормативно-правовой базы и поддержки общества. Передовые технологии, лучшие проекты и эксплуатационная практика компании АББ призваны сыграть ведущую роль в повышении эффективности энергосистем в мире.

Энрике Сантакана

ABB Inc, Power Technology Products
Норвук, штат Коннектикут, США
enrique.santacana@us.abb.com

Тамми Зукко

Strategic Marketing for Power Products and Power Systems Divisions
Роли, штат Северная Каролина, США
tammy.l.zucco@us.abb.com

Цзямынь Фэн

Юйпин Пан

Мирасу Мосави

Ле Тан

ABB Inc, Corporate Research
Роли, штат Северная Каролина, США
xiaoming.feng@us.abb.com
jiuping.pan@us.abb.com
mirrasoul.j.mousavi@us.abb.com
le.tang@us.abb.com

От авторов

Авторы хотели бы выразить благодарность «Круглому столу бизнеса» за разрешение использовать в настоящей статье материалы перспективного плана действий, разработанного рабочей группой координационного комитета «Круглого стола бизнеса» по проблемам передачи и распределения электрической энергии, в состав которого входят представители ведущих коммунальных служб США и поставщики оборудования для передачи и распределения энергии, ведущим из которых является компания АББ. Однако изложенные в статье взгляды могут не разделяться «Круглым столом».

Литература

- [1] Dyer, J., U.S. Department of Energy Transmission Bottleneck Project Report, 2003
- [2] Why Are Electricity Prices Increasing? A Report Prepared by The Brattle Group for for Edison Electric Institute (EEI), 2006
- [3] Energy Information Administration (www.eia.doe.gov)
- [4] Hammons, T.J., Kennedy, B., Lorand, R., Thigpen, S., McConnell, B.W., Rouse S., Prevost, T.A., Pruess, C., Dade, S.J., Ramanan, V.R., and Baldwin, T.L., «Future trends in energy-efficient – transformers», IEEE Power Engineering Review, pp. 5-16, July 1998.
- [5] <http://www.cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL-6847.pdf>, выложено на сайте в апреле 2007