
ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

**Об экономическом преимуществе сверхпроводящих
линий электропередачи**

© 2020 г. А.П. Вавилов, Г.Ю. Трофимов

А.П. Вавилов,

Институт финансовых исследований, Москва; e-mail: secretary@ifs.ru

Г.Ю. Трофимов,

Институт финансовых исследований, Москва; e-mail: g.trofimov@ifs.ru

Поступила в редакцию 14.11.2019

Авторы признательны А.Б. Поманскому и С.В. Самойленкову за полезные замечания.

Аннотация. В статье предлагается сравнительный анализ эффективности обычных и сверхпроводящих энергосетей на основе теоретической модели рынка электроэнергии. Рассматривается конкурентный рынок, основанный на сетевом взаимодействии производителей и потребителей. В простейшем случае энергосеть включает два узла, соединенных одной линией электропередачи. Показано, что использование технологии сверхпроводимости дает выигрыш благодаря принципу экономии от масштаба. Данный принцип действует для сверхпроводящих линий по той причине, что их функционирование требует фиксированных затрат энергии на охлаждение провода, причем величина таких затрат практически не зависит от нагрузки на кабель. Основную роль здесь играют два фактора: отсутствие потерь энергии из-за сопротивления при передаче и возможность увеличения максимальной нагрузки на линию в разы по сравнению с обычными ЛЭП. Для обычных линий действует принцип убывающей отдачи, поскольку потери энергии в них растут нелинейно с увеличением нагрузки. С помощью простой модели мы демонстрируем, что сверхпроводящая линия обеспечивает более высокий интегральный эффект по сравнению с обычной линией при больших объемах передачи энергии.

Ключевые слова: энергосеть, узловая цена, нагрузка на линию, потери энергии, фиксированные затраты.

Классификация JEL: L94, Q40.

DOI: 10.31857/S042473880010520-1

1. ВВЕДЕНИЕ

Явление сверхпроводимости было открыто более ста лет назад, однако лишь в последние годы мировая энергетика оказалась на пороге технологического прорыва, связанного с этим явлением. Благодаря исследованиям и разработкам в области высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) появились принципиально новые возможности повышения эффективности электроэнергетики. Данное направление технического прогресса совпало по времени с революционными сдвигами, обусловленными переходом на возобновляемые источники энергии и развитием цифровых технологий. Все эти изменения в совокупности уже оказывают очень существенное влияние на структуру энергетики и развитие рынка электроэнергии.

Одно из главных преимуществ линий электропередачи (ЛЭП) со сверхпроводимостью заключается в сокращении технологических потерь энергии. Они весьма ощутимы для России и составляют 11–12% объемов генерации. Для стран Запада такие потери в среднем в 1,5–2 раза ниже, но они также имеют значение. Основной причиной технологических потерь в энергосетях является диссипация энергии из-за сопротивления в металлических проводах. Помимо этого, электроэнергия теряется при передаче в связи с преобразованием напряжения генерации в высоковольтное напряжение ЛЭП и обратно — в среднее и низкое напряжение распределительных сетей.

Для высокотемпературных сверхпроводящих линий потери энергии из-за сопротивления практически отсутствуют, и поэтому нет необходимости использовать трансформаторные подстанции для изменения напряжения. Линии со сверхпроводимостью могут обеспечивать гораздо более высокую максимальную нагрузку: ВТСП-кабель способен передавать на порядок большую мощность, чем обычный высоковольтный кабель такого же размера. По этой причине сверхпроводящие линии

являются более компактными по сравнению с обычными воздушными и кабельными ЛЭП аналогичной мощности. В будущем это может дать значительную экономию земельных ресурсов, так как для прокладки высоковольтной воздушной ЛЭП требуется отведение прилегающей территории шириной более 200 метров, что практически невозможно в условиях плотной городской застройки. Использование сверхпроводящих кабельных линий позволяет гибко наращивать мощности энергообеспечения по мере развития жилых районов. Немаловажно, что для таких линий отсутствует электромагнитное излучение в окружающее пространство, наносящее вред здоровью людей. Кроме того, применение ВТСП-оборудования, в первую очередь ограничителей токов короткого замыкания, позволяет повысить надежность, безопасность и качество электроснабжения населения¹.

Начиная с 2006 г. в некоторых странах (США, Германия, Россия, Китай, Южная Корея, Япония) реализуются пилотные проекты по строительству сверхпроводящих линий электропередачи. Пока они применяются в основном в системах распределения электроэнергии внутри крупных городов. В 2020 г. в Санкт-Петербурге планируется ввести в строй сверхпроводящую линию постоянного тока длиной 2,5 км. Она будет самой большой в мире по протяженности, с передаваемой мощностью 50 МВт, и должна соединить две городские подстанции. В Москве запланирована прокладка ВТСП-кабеля в районе Сколково, и уже начал действовать ВТСП-ограничитель тока на подстанции «Мневники». Анализ экономической эффективности по этим и другим проектам подтверждает, что использование сверхпроводимости не только повышает надежность и качество городских энергосетей, но и дает экономию капитальных затрат (в некоторых случаях в несколько раз).

Но, несмотря на то что практические выгоды от использования сверхпроводимости в энергетике уже воплощаются в реальность, основной потенциал ВТСП-технологий еще не начал реализовываться. Мы имеем в виду строительство новых магистральных ВТСП-линий большой мощности и протяженности. В основе эффективности таких крупномасштабных проектов лежит *принцип экономии от увеличения масштаба*. Для функционирования сверхпроводящих линий требуются непрерывные фиксированные затраты энергии на охлаждение провода, причем величина таких затрат практически не зависит от нагрузки на кабель. При этом экономия от масштаба достигается благодаря отсутствию потерь энергии из-за сопротивления при передаче и возможности увеличить в несколько раз максимальную нагрузку на линию по сравнению с обычными ЛЭП. В последнем же случае действует *принцип убывающей отдачи*, поскольку для обычных сетей потери энергии из-за сопротивления нелинейно растут с увеличением нагрузки и поскольку данное увеличение ограничено допустимыми физическими возможностями металлических проводов.

В статье (Thomas et al., 2016) рассматривались показатели сравнительной эффективности для магистральных высоковольтных линий, проектируемых для перспективного развития энергосистемы Германии. Сравнивались потери энергии из-за сопротивления для обычных линий с постоянным током и фиксированные затраты для сверхпроводящих линий. В этой работе ключевую роль играло предположение о фиксированных затратах энергии на охлаждение ВТСП-кабеля, не зависящих от уровня нагрузки. Как показал количественный анализ, ВТСП-линии имеют преимущество при больших объемах передаваемой энергии, т.е. при высокой максимально допустимой мощности линии порядка нескольких гигаватт и существенном уровне нагрузки на линию (более 25% при допустимой мощности 4 ГВт). Для выполнения данных условий требуется стабильная генерация энергии и устойчивый спрос, характерный для мегаполисов или крупных конгломератов.

В нашей статье предлагается сравнительный анализ свойств обычных и сверхпроводящих энергосетей на основе теоретической модели рынка электроэнергии. Будет показано, что различие этих сетей проявляется не только и не столько в количественном сопоставлении потерь энергии, сколько в принципиальных особенностях технологий, основанных на возрастающей или убывающей отдаче от масштаба. Такие особенности отражаются в сравнительной эффективности

¹ ВТСП-технологии: низкотемпературная сверхпроводимость применяется уже несколько десятилетий в некоторых областях науки и техники (например, в магниторезонансных томографах и ускорителях частиц). При этом для поддержания температур, близких к абсолютному нулю, в качестве криогена используется жидкий гелий. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в 1986 г. привело к появлению сверхпроводящих материалов с критической температурой (при которой теряется свойство сверхпроводимости) выше точки кипения жидкого азота – 196 °С. Это позволило заменить дорогой гелий дешевым жидким азотом и снизить на порядок затраты на поддержание свойства сверхпроводимости. Разработки ВТСП-лент второго поколения, выполняющих функцию проводника тока, находят применение в широком диапазоне областей (железнодорожный транспорт, самолетостроение, атомная энергетика, медицинское оборудование, металлургия и др.), открывая, в частности, коммерческие перспективы для развития энергосетей на основе сверхпроводимости.

сверхпроводящих и обычных энергосетей, а также в том влиянии, которое новые технологии могут оказать на функционирование рынка электроэнергии.

В модели мы рассматриваем рынок электроэнергии, основанный на сетевом взаимодействии производителей и потребителей. В простейшем случае сеть включает два узла, соединенных одной линией. Задача централизованного управления энергосистемой заключается в выборе оптимальных объемов генерации и потоков электроэнергии. Целевой функцией задачи является интегральный экономический эффект, представленный суммой ренты потребителей и прибылей от генерации и поставки электроэнергии. Заметим, что задача выбора оптимальных потоков в энергосети, вообще говоря, отличается от моделей торговых потоков из-за специфики генерации и передачи электроэнергии.

Для целей сравнительного анализа обычных и сверхпроводящих линий нам необходимо прежде всего дать адекватное формальное описание фактора сопротивления для линии электропередачи. Данному аспекту не уделялось должного внимания: в экономических моделях энергосетей обычно предполагается, что сопротивление незначительно и им можно пренебречь. Лишь в немногих работах (например, (Bohn et al., 1984; Chao, Pek, 1996; Li, 2015)) рассматривались задачи управления энергосистемой в экономической постановке с учетом потерь передаваемой электроэнергии из-за сопротивления. Для нас важно сопоставить обычные и сверхпроводящие линии, поэтому необходимо так или иначе учесть в модели фактор сопротивления для обычных линий.

Мы проводим сравнительный анализ для оптимального решения задачи управления энергосистемой, которое в теории реализуется с помощью рынка совершенной конкуренции. При этом не учитываются эффекты локальной монополии генератора или оператора сети, но это тема отдельного исследования. Наш анализ нацелен не столько на описание существующих реалий, сколько на выявление потенциальных возможностей новых технологий в идеальных условиях совершенного рынка.

С помощью простой статической модели мы показываем, как интегральный экономический эффект от генерации и поставки электроэнергии формируется и распределяется между участниками сетевого взаимодействия. Это происходит по-разному для обычной и сверхпроводящей ЛЭП, поскольку в первом случае убывающая отдача приносит рентный доход владельцу линии, тогда как во втором случае такая возможность отсутствует, что дает выигрыш потребителям. Мы демонстрируем, что сравнение интегральных эффектов для рассматриваемых технологий передачи электроэнергии сводится к сопоставлению удельных потерь энергии из-за сопротивления и удельных фиксированных затрат на обеспечение сверхпроводимости. Сопоставление потерь и затрат показывает, что сверхпроводящая линия имеет преимущество перед обычной при больших объемах передачи энергии.

2. МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассмотрим простейший случай энергосети с двумя узлами и одной линией, представленной на рис. 1. Электроэнергия генерируется производителями и продается в узле 0, затем передается по обычной (не сверхпроводящей) линии в узел 1, где покупается конечными потребителями. Модели с двухузловой энергосетью анализировались в ряде работ по экономике электроэнергетики, например в статье (Joskow, Tirole, 2001). В этих работах, как и в нашей статье, под узлом понимается локальный рынок электроэнергии, тогда как в электротехнике узел определяется как место соединения трех и более ветвей электрической цепи (Данилов, 2013, с. 32).

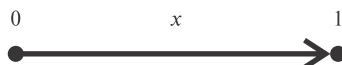


Рис. 1. Энергосеть с двумя узлами

Производимая электроэнергия передается для потребления в объеме x и частично теряется из-за сопротивления в проводах и выделения тепловой энергии. Мы предполагаем, что потери энергии являются функцией от объема передачи $l(x)$. Таким образом, величина генерации равна сумме передаваемой энергии и сетевых потерь, $x + l(x)$.

Модель централизованного управления энергосистемой формулируется в виде задачи максимизации интегрального экономического эффекта производства, передачи и потребления электроэнергии:

$$\mathcal{E} = \max_x \left[u(x) - c(x + l(x)) \right] \quad (1)$$

с учетом ограничения на допустимую мощность линии:

$$x \leq \bar{x}. \quad (2)$$

Целевая функция (1) представляет собой полезность энергопотребления $u(x)$ в стоимостном выражении за вычетом затрат на генерацию $c(x + l(x))$, где $c = \text{const}$ обозначает предельные затраты генерации. Функция полезности $u(x)$ является возрастающей и вогнутой, а функция потерь $l(x)$ — возрастающей и выпуклой. Ограничение (2) отражает максимально допустимую нагрузку на линию $\bar{x}$, которая определяется, например, предельным уровнем повышения температуры провода.

При определенных условиях (Bohn et al., 1984, p. 374) потери при передаче электроэнергии могут быть представлены квадратичной функцией от объема передаваемой энергии

$$l(x) = Rx^2, \quad (3)$$

где R — величина сопротивления линии. Заметим, что в теоретических и прикладных экономических моделях нередко используется предположение о квадратичной функции потерь или производственных издержек. Как правило, данное предположение принимается ради удобства анализа, так как обеспечивает линейный вид функций предложения. В нашей модели квадратичная функция потерь (3) вытекает из физических соотношений. Вывод этого уравнения см. в Приложении, п. А, для линии с постоянным током (строго говоря, параметр R равен отношению сопротивления к квадрату напряжения на линии, но в нашей модели напряжение нормализовано к 1). Вывод формулы (3) для линии с переменным током можно найти в статье (Bohn et al., 1984, p. 374).

С учетом (3) функция Лагранжа для оптимизационной задачи (1)–(2) имеет вид

$$L = u(x) - c(x + Rx^2) - \mu(x - \bar{x}), \quad (4)$$

где μ — множитель Лагранжа для ограничения (2), который удовлетворяет условиям дополняющей нежесткости: $\mu = 0$, если $x < \bar{x}$ (режим *свободной линии*); $\mu \geq 0$, если $x = \bar{x}$ (режим *ограничения на линию*). Ниже мы рассмотрим каждый из этих режимов.

Дифференцируя функцию Лагранжа (4) по x , получаем условие оптимальности первого порядка

$$u'(x) = c + 2Rcx + \mu. \quad (5)$$

Предельная полезность энергопотребления должна равняться сумме предельных затрат генерации c , предельных потерь в сети, $l'(x) = 2Rcx$, и оценки сетевого ограничения μ .

Мы будем использовать квадратичную функцию полезности, которая применяется в исследованиях по экономике электроэнергетики:

$$u(x) = \alpha x - Bx^2, \quad (6)$$

где α — резервационная цена, соответствующая предельной полезности при нулевом потреблении, $\alpha = u'(0)$; B — параметр, отражающий снижение предельной полезности с увеличением потребления. Возможна иная интерпретация квадратичной полезности (αx — отдача от энергопотребления, Bx^2 — потери в стоимостном выражении из-за сопротивления в энергопотребляющем оборудовании). Для функции полезности (6) предполагается, что резервационная цена (или показатель отдачи от энергопотребления) превосходит предельные издержки генерации, $\alpha > c$.

2.1. Оптимум как конкурентное равновесие

Теоретически оптимальная программа производства и передачи электроэнергии может быть реализована через конкурентный рынок. Допустим, что электроэнергия продается в узле 1 по рыночной цене p , а каждый потребитель выбирает уровень потребления y , обеспечивающий максимум потребительской ренты

$$\psi = \max_y [u(y) - py]. \quad (7)$$

Конкурентная сетевая компания максимизирует прибыль от передачи и реализации электроэнергии, учитывая потери

$$\pi = \max_x [px - c(x + Rx^2)] \quad (8)$$

при ограничении (2). Сетевая компания покупает электроэнергию у конкурентных генераторов в узле 0 в объеме $x + Rx^2$ по цене, равной предельным издержкам генерации c .

Равновесная цена вычисляется из условия первого порядка для задачи потребителя (7)

$$p = u'(y) \quad (9)$$

и баланса спроса и предложения на рынке электроэнергии

$$y = x. \quad (10)$$

При этом из условия первого порядка для задачи сетевой компании (8) следует, что

$$p = c + 2cRx + \mu. \quad (11)$$

Таким образом, равновесная цена электроэнергии на конкурентном рынке обеспечивает выполнение условия оптимальности (5), т.е. покрывает издержки генерации и передачи с учетом сетевого ограничения на мощность.

Из выражения (11) получаем линейную функцию предложения энергии

$$x = (p - c - \mu) / 2cR. \quad (12)$$

Предложение пропорционально ценовому дифференциалу $p - c - \mu$ и обратно пропорционально стоимостным потерям из-за сопротивления cR . Цена электроэнергии в узле 1 равна p , тогда как $c + \mu$ — это полные предельные издержки производства и передачи энергии без учета потерь.

2.2. Режим свободной линии

Предположим, что ограничение на допустимую передачу энергии (2) не является связывающим, т.е. $x < \bar{x}$, откуда следует, что $\mu = 0$. На рис. 2 представлены выигрыши и потери участников для этого случая. На горизонтальной оси отложены объемы предложения или спроса, на вертикальной — цены и предельные издержки. Линия cE соответствует предельным издержкам генерации и передачи электроэнергии, $c + 2cRx$. Функция обратного спроса, $p(y) = u'(y)$, изображена на рис. 2 в виде прямой линии αy_0 , которая соответствует квадратичной функции полезности (6):

$$p(y) = \alpha - 2By. \quad (13)$$

Точка $y_0 = \alpha / 2B$ на горизонтальной оси показывает спрос при нулевой цене. Точка $E = (x^*, p^*)$ соответствует равновесному уровню потребления и цены на электроэнергию. Величина прямых потерь энергии в стоимостном выражении, $cl(x) = cR(x^*)^2$, представлена треугольником l . Кроме того, существуют так называемые безвозвратные потери, возникающие из-за снижения объемов генерации и изображенные в виде треугольника EMN . Они аналогичны безвозвратным потерям, возникающим из-за различных искажений рынка (the deadweight losses).

Интегральный экономический эффект $\mathcal{E}$ представлен на рис. 2 треугольником αEc , который включает треугольник потребительской ренты ψ и треугольник π^b прибыли сетевой компании от реализации электроэнергии, $\pi = \pi^b$. По сути эта прибыль представляет ренту за пользование сетью,

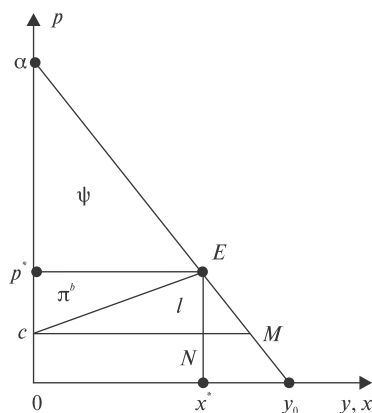


Рис. 2. Выигрыши и потери в режиме свободной линии

которую мы условимся называть *базовой рентой*. Она возникает благодаря потерям при передаче электроэнергии, что кажется, на первый взгляд, парадоксальным. Однако это всего лишь свойство рентного дохода, обусловленного убывающей отдачей (ренты Рикардо).

2.3. Режим ограничения на линию

Теперь рассмотрим случай, когда ограничение на допустимую нагрузку линии (2) является связывающим и оценка этого ограничения неотрицательна, $\mu \geq 0$. Тогда цена на электроэнергию устанавливается из условия

$$\bar{p} = u'(\bar{x}), \quad (14)$$

а оценка ограничения (2) находится из условия (11):

$$\mu = \bar{p} - c - 2cR\bar{x}. \quad (15)$$

При связывающем сетевом ограничении в дополнение к базовой ренте возникает доход, который мы будем называть *конгестивной рентой* (congestion rent). Данная рента вычисляется как произведение оценки сетевой нагрузки на величину передаваемой энергии, $\pi^c = \mu\bar{x}$, и представляет собой вознаграждение за ограниченность мощности сети. Прибыль сетевой компании от реализации электроэнергии в режиме ограничения на линию является суммой базовой и конгестивной рент, $\pi = \pi^b + \pi^c$.

На рис. 3 показано равновесное состояние $\bar{E} = (\bar{x}, \bar{p})$ и распределение доходов сторон в этом режиме, т.е. при $\bar{x} < x^*$. Как и на рис. 2, α, y_0 отражает линию обратного спроса, линия cK — предельные издержки генерации и передачи электроэнергии, $c + 2cRx$. Суммарный экономический эффект $\bar{E}$ представлен четырехугольником $\alpha\bar{E}Kc$, который включает потребительскую ренту (треугольник ψ), базовую ренту (треугольник π^b), а также конгестивную ренту (прямоугольник π^c). Безвозвратным потерям соответствует треугольник $\bar{E}MN$, который больше треугольника EMN на рис. 2. Увеличение безвозвратных потерь вызвано связывающим ограничением на величину генерации, поскольку $\bar{x} < x^*$.

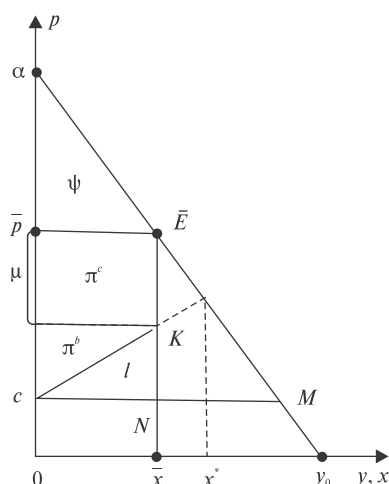


Рис. 3. Выигрыши и потери в режиме ограничения на линию

2.4. Решение для линейного спроса

Рассмотрим решение исходной задачи (1)–(2) для квадратичной функции полезности (6). В Приложении, п. Б, показано, что в режиме свободной линии оптимальная цена рассчитывается как

$$p^* = \frac{cR}{cR+B}\alpha + \frac{B}{cR+B}c. \quad (16)$$

Она является комбинацией резервационной цены α и предельных издержек генерации c . Чем больше сопротивление линии, тем больше вес α и тем ближе цена электроэнергии к уровню резервационной цены.

Мы также показываем (см. Приложение, п. Б), что оптимальное производство энергии в режиме свободной линии равно

$$x^* = (\alpha - c) / 2(cR + B). \quad (17)$$

Из рис. 2 видно, что прибыль равна стоимости потерь энергии (площади треугольников π^b и l одинаковы), т.е. $\pi^b = cR(x^*)^2$. Нетрудно убедиться, что потребительская рента составляет $\psi = B(x^*)^2$, откуда получается суммарный экономический эффект

$$\mathcal{E} = \pi^b + \psi = (cR + B)(x^*)^2. \quad (18)$$

В режиме ограничения на линию предложение энергии равно $\bar{x}$, а оптимальная цена определяется как

$$\bar{p} = \alpha - 2B\bar{x}, \quad (19)$$

что следует из (14). Возвращаясь к рис. 3, можно показать, что потребительская рента равна $\psi = B\bar{x}^2$, базовая рента — $\pi^b = cR\bar{x}^2$, а конгестивная рента, с учетом (15), (19), — $\pi^c = \mu\bar{x} = (\bar{p} - c - 2cR\bar{x})\bar{x} = (\alpha - c)\bar{x} - 2(cR + B)\bar{x}^2$, откуда следует

$$\bar{\mathcal{E}} = \psi + \pi^b + \pi^c = (\alpha - c)\bar{x} - (cR + B)\bar{x}^2. \quad (20)$$

Данная формула может быть получена непосредственно путем подстановки $x = \bar{x}$ в целевую функцию (1).

3. МОДЕЛЬ ЛИНИИ СО СВЕРХПРОВОДИМОСТЬЮ

Рассмотрим передающую линию с двумя узлами, изображенную на рис. 1, в условиях сверхпроводимости. В данном случае можно принять, что сопротивление равно нулю, $R = 0$, т.е. отсутствуют потери от передачи электроэнергии, $l(x) \equiv 0$. Но при этом необходимы фиксированные затраты энергии F на обеспечение функционирования сверхпроводящей линии.

Задача максимизации интегрального экономического эффекта имеет вид

$$\mathcal{E}_s = \max_x [u(x) - c(x + F)] \quad (21)$$

с учетом ограничения на нагрузку линии:

$$x \leq \bar{x}_s, \quad (22)$$

где $\bar{x}_s$ — максимально допустимая (критическая) мощность сверхпроводящей линии. Индекс s используется для обозначения оптимальных решений задачи (21)–(22). Ограничение на нагрузку линии (22) аналогично условию (2) в исходной задаче, но имеет иную физическую природу. Если в обычном проводнике ограничение на нагрузку линии связано с допустимой величиной повышения температуры электропровода, то в сверхпроводнике такое ограничение определяется критическим уровнем передаваемого тока. Превышение этого уровня вызывает потерю сверхпроводимости.

3.1. Двухчастный тариф и конгестивная рента

Рассмотрим задачу производства и передачи энергии для сверхпроводимости (21)–(22) и запишем условие первого порядка, аналогичное (5): $u'(x) = c + \mu_s$, где μ_s — оценка ограничения на нагрузку сверхпроводящей линии. В режиме свободной линии $\mu_s = 0$, и равновесная цена $p_s^* = u'(x_s^*)$ равна издержкам генерации

$$p_s^* = c. \quad (23)$$

Однако такая цена не покрывает фиксированных затрат cF . Теоретически, чтобы обеспечить безубыточность производства при возрастающей отдаче от масштаба, необходимо использовать

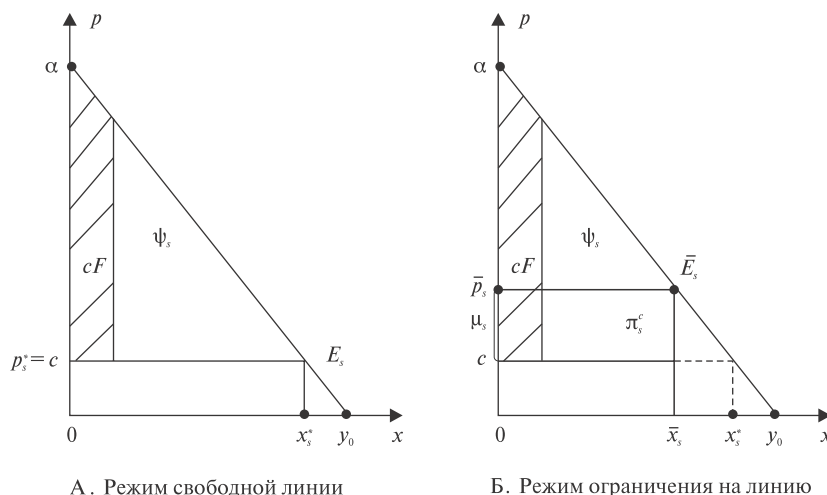


Рис. 4. Выигрыши и затраты для сверхпроводимости

двухчастный тариф (cF, c) , который включает фиксированный платеж и цену электроэнергии на уровне предельных издержек.

На рис. 4А показано состояние равновесия $E_s = (x_s^*, p_s^*)$ с двухчастным тарифом в условиях сверхпроводимости в режиме свободной линии. Объем генерации x_s^* соответствует значению цены на уровне предельных издержек (23), и для квадратичной полезности этот объем равен

$$x_s^* = (\alpha - c) / 2B, \quad (24)$$

что получается из (17) при $R = 0$. В таком случае базовая рента равна нулю, $\pi_s^b = 0$. Это значит, что фиксированная часть тарифа cF должна выплачиваться за счет части потребительской ренты, изображенной на рис. 4А в виде заштрихованного четырехугольника площадью cF .

Поскольку в условиях сверхпроводимости прямые потери энергии отсутствуют, а цена равняется предельным издержкам генерации, то отсутствуют также и безвозвратные потери. Интегральный экономический эффект равен потребительской ренте за вычетом фиксированных затрат

$$\mathcal{E}_s = \psi_s - cF = B(x_s^*)^2 - cF, \quad (25)$$

что следует из (18) при $\pi_s^b = 0$. Интегральный эффект будет неотрицательным, если $B(x_s^*)^2 \geq cF$ или, с учетом (24), $\alpha \geq c + 2\sqrt{cFB}$. Иными словами, сверхпроводящая линия экономически эффективна, если фиксированные затраты cF не слишком велики.

Если же ограничение на нагрузку линии (22) является связывающим и $\mu_s \geq 0$, то оптимальная цена равна

$$p_s = c + \mu_s. \quad (26)$$

При этом возникает конгестивная рента, изображенная прямоугольником π_s^c на рис. 4Б, демонстрирующем состояние равновесия $\bar{E}_s = (\bar{x}_s, \bar{p}_s)$ в режиме ограничения на линию. В данном случае фиксированные сетевые расходы могут финансироваться сторонами совместно как за счет ренты потребителя, так и за счет конгестивной ренты. Такую возможность иллюстрирует заштрихованный четырехугольник на рис. 4Б.

Вопрос о финансировании фиксированных затрат имеет для нас в большей мере теоретическое значение. В реальности доля таких затрат может быть достаточно мала. Например, для проектируемых ВТСП-линий сверхвысокой мощности порядка 4–10 ГВт затраты энергии на поддержание системы охлаждения составляют не более 1–2% объема передаваемой энергии. Это следует из расчетов, приведенных в статье (Thomas et al., 2016). По-видимому, в данном случае отпадает практическая необходимость в использовании двухчастного тарифа на электроэнергию, и тем более в софинансировании фиксированных затрат.

Для квадратичной полезности (6) равновесная цена в режиме ограничения на линию вычисляется аналогично (19):

$$\bar{p}_s = \alpha - 2B\bar{x}_s. \quad (27)$$

Так как в условиях сверхпроводимости базовая рента равна нулю, прибыль от реализации электроэнергии совпадает с конгестивной рентой, $\pi_s = \pi_s^c$. Для квадратичной полезности потребительская рента равна $\psi_s = B\bar{x}_s^2$, а конгестивная рента выражается, с учетом (26), (27), как $\pi_s^c = \mu_s \bar{x}_s = (\alpha - c)\bar{x}_s - 2B\bar{x}_s^2$, откуда получается интегральный экономический эффект

$$\bar{\mathcal{E}}_s = \psi_s + \pi_s^c - cF = (\alpha - c)\bar{x}_s - B\bar{x}_s^2 - cF. \quad (28)$$

Как и выше, это выражение можно проверить непосредственно путем подстановки $x = \bar{x}_s$ в целевую функцию (21).

3.2. Экономический эффект сверхпроводимости

Сравним показатели интегрального экономического эффекта для двух технологий передачи энергии. Речь идет о статических показателях эффекта, относящихся к текущим производственным результатам и не учитывающих инвестиции в создание линии. Однако приводимый ниже сравнительный анализ несложно дополнить, чтобы можно было сопоставлять приведенные стоимости проектов.

Сеть со сверхпроводимостью обеспечивает более высокий интегральный экономический эффект по сравнению с обычной сетью, если $\mathcal{E}_s > \mathcal{E}$ или $\bar{\mathcal{E}}_s > \bar{\mathcal{E}}$. Для сверхпроводящей линии отсутствуют потери энергии $l(x)$, но требуются фиксированные затраты F на функционирование линии. Можно предположить, что для сравнения экономического эффекта достаточно соотнести потери в обычной линии и фиксированные затраты в сверхпроводящей. Однако следующее утверждение показывает, что это не всегда так.

Утверждение.

1. В режиме свободной линии сверхпроводимость обеспечивает более высокий экономический эффект, $\mathcal{E}_s > \mathcal{E}$, если

$$F < l(\tilde{x}^g), \quad (29)$$

где $\tilde{x}^g = (x^* x_s^*)^{1/2}$ — среднее геометрическое нагрузки для обычной и сверхпроводящей линии.

2. В режиме ограничения на линию условие $\bar{\mathcal{E}}_s > \bar{\mathcal{E}}$ выполнено, если

$$F < l(\bar{x}) + \Delta\bar{x} (p(\tilde{x}^a) - c) / c, \quad (30)$$

где $\Delta\bar{x} = \bar{x}_s - \bar{x}$ — разность допустимых нагрузок сверхпроводящей и обычной линии, $p(\tilde{x}^a)$ — цена для предложения энергии, равного среднему арифметическому допустимых нагрузок, $\tilde{x}^a = (\bar{x}_s + \bar{x}) / 2$.

Доказательство данного утверждения приводится в Приложении, п. В. Согласно условию (29) в режиме свободной линии фиксированные затраты на обеспечение сверхпроводимости должны быть меньше потерь энергии в обычной сети. Однако потери рассчитываются для усредненного уровня нагрузки $\tilde{x}^g$, так как сопоставление потерь и затрат энергии по отдельности для x^* или x_s^* было бы некорректным. Из условия (30) следует, что для сравнения экономического эффекта в режиме ограничения на линию нужно учитывать разницу допустимых мощностей $\Delta\bar{x}$. Лишь в том случае если эти мощности равны ($\bar{x}_s = \bar{x}$), условие утверждения (30) сводится к неравенству $F < l(\bar{x})$. В данном случае достаточно сопоставить фиксированные затраты и потери соответственно для сверхпроводящей и обычной линии, чтобы сравнить экономический эффект.

Неравенство для фиксированных затрат и потерь энергии в режиме свободной линии (29) можно переписать в виде неравенства для их удельных значений, рассматривая в явном виде квадратичную функцию потерь $l(\tilde{x}^g) = R(\tilde{x}^g)^2 = R x^* x_s^*$:

$$F / x_s^* < R x^*. \quad (31)$$

Это значит, что интегральный экономический эффект для сверхпроводящей линии больше, если фиксированные затраты в долях передаваемой энергии меньше потерь.

На рис. 5 неравенство (31) отображено графически, с учетом того что оптимальные нагрузки на обычную и сверхпроводящую линии соотносятся как $x^* = B x_s^* / (cR + B)$, что следует из (17), (24). На горизонтальной оси рис. 5 отложены значения x_s^* и выделен пороговый уровень нагрузки на линию $\hat{x}_s$. Для нагрузок выше этого уровня выполнено условие (31), т.е. экономический эффект для сверхпроводящей линии больше, чем для обычной.

Следует отметить, что аналогичный график приведен, на основе содержательных соображений, в статье (Thomas et al., 2016, p. 387). Там сравнивались проекты магистральных сверхпроводящих и обычных линий с постоянным током для Германии. На графике в той статье в качестве аргумента рассматривался показатель относительного уровня нагрузки на линию, т.е. в терминах нашей модели отношение $x_s^* / \bar{x}$. Пороговый уровень нагрузки в статье (там же, p. 386) составляет 20–25% при допустимой мощности линии 4 ГВт. Такой оценке на нашем

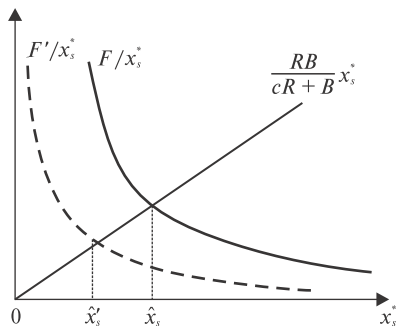


Рис. 5. Удельные потери и фиксированные затраты энергии

рис. 5 соответствует величина пороговой нагрузки $\hat{x}_s = 0,8–1,0$ ГВт, выше которой экономический эффект для сверхпроводящей линии должен быть больше, чем для обычной.

3.3. Фактор расстояния

Из полученных результатов следует, что для анализа сравнительной эффективности сверхпроводимости необходимо корректное сопоставление фиксированных затрат, обеспечивающих сверхпроводимость, и потерь энергии из-за сопротивления. Эти величины в реальности зависят от физических свойств проводников и протяженности линий. Теоретически сопротивление для обычного провода прямо пропорционально длине линии d : $R = (\rho / z)d$, где ρ — удельное сопротивление, z — площадь поперечного сечения провода. Для сверхпроводящего кабеля величина фиксированных затрат энергии F пропорциональна расстоянию, поскольку требуется равномерная подпитка энергией криогенных мощностей по всей длине линии $F = \phi d$, где ϕ — энергозатраты на единицу длины. Энергия также должна расходоваться на поддержание давления для циркуляции криогена внутри ВТСП-кабеля. Это ограничивает длину сегментов кабеля между промежуточными охлаждающими/качающими станциями, обеспечивающими работу линии большой протяженности и требующими затрат энергии (Romashov et al., 2014).

Развитие технологий криосистем для таких линий должно привести, в терминах нашей модели, к снижению параметра ϕ , тогда как возможности снижения параметра R в основном уже реализованы (в том числе за счет увеличения напряжения для снижения потерь энергии; см. уравнение (A1) в Приложении). Уменьшение параметра ϕ означает сокращение фиксированных затрат до уровня $F' < F$, как показано на рис. 5, и, как следствие, снижение пороговой нагрузки для сверхпроводящей линии до величины $\hat{x}'_3$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологии, основанные на сверхпроводимости, будут не только в полной мере востребованы энергетикой будущего, но, по всей видимости, станут играть в ней системообразующую роль. Это произойдет благодаря созданию сверхпроводящих магистральных линий электропередачи, что позволит реализовать преимущество таких линий в отдаче от масштаба. С помощью теоретической модели мы продемонстрировали это преимущество при сравнении интегральных экономических эффектов для обычной и сверхпроводящей ЛЭП.

Важно отметить, что в новом десятилетии начнется практическая реализация проектов магистральных ВТСП-линий в странах, лидирующих в данной сфере. Опубликованные в США и Великобритании исследования содержат аналогичный вывод в отношении внедрения ВТСП-линий в распределительных сетях (Eckroad, 2016; Venuturumilli et al., 2017). Сдерживающим фактором здесь является то, что существующие обычные ЛЭП были рассчитаны на десятилетия и должны окупить инвестиции в их строительство. Кроме того, должны окупаться вложения в инновационные разработки, которые способствовали появлению новых сверхмощных ЛЭП с постоянным током. Эти линии представляют собой рубеж традиционной технологии, с которой магистральные ВТСП-линии будут конкурировать и уже на данный момент сопоставимы по проектным затратам. Развитие конкурентных преимуществ будет зависеть в первую очередь от удешевления производства ВТСП-кабелей.

В данной статье мы не касались вопроса об издержках производства ВТСП-кабелей. Возрастающая отдача приводит к круговой причинности: масштаб выпуска определяется спросом, который через снижение издержек и цены товара растет с увеличением масштаба выпуска. Эффект масштаба имеет значение для производства ВТСП-ленты, являющейся самым дорогим компонентом кабелей. Расчеты показывают, что при достаточном объеме выпуска себестоимость ленты снижается до коммерчески выгодных уровней. При этом, в конечном счете, основную долю издержек в цене ленты составит стоимость сверхпроводящих материалов (Шавкин, 2009).

Еще один вопрос, который мы здесь не затрагивали, — это проблема экстерналий, которая не менее важна, чем экономический эффект. В наших моделях фигурировал чисто экономический критерий интегрального эффекта, отражающий интересы непосредственных участников сетевого взаимодействия. Однако ни генератор, ни сетевая компания, а во многих случаях и конечный потребитель энергии, не обязаны принимать во внимание негативные внешние эффекты ЛЭП на прилегающие территории, такие как изменения ландшафта, вред здоровью людей, потери земельных ресурсов и снижение стоимости недвижимости.

В этом отношении ВТСП-линии, за счет их компактности и отсутствия электромагнитного излучения, безусловно, предпочтительнее обычных высоковольтных воздушных и подземных линий, но чтобы общественные предпочтения были заявлены, необходимы два условия. Во-первых,

непосредственное участие населения прилегающих территорий в обсуждении проектов новых ЛЭП, оказывающих воздействие на окружающую среду. Во-вторых, широкая информированность всех заинтересованных сторон о преимуществах энергетики, основанной на сверхпроводимости.

ПРИЛОЖЕНИЕ

А. Потери передаваемой энергии

Из закона Джоуля—Ленца следует, что тепловая энергия, выделяемая из-за сопротивления проводника, равна $Q_{loss} = RI^2$, где I — сила тока. С учетом уравнения для передаваемой мощности $P = IU$ (где U — напряжение линии в узле 0), тепловые потери энергии равны

$$Q_{loss} = R(P/U)^2. \quad (A1)$$

Если значение U нормализовано к 1, получаем потери передаваемой энергии $Q = Pt$ за единицу времени $t=1$: $Q_{loss} = RQ^2$, что соответствует квадратичной функции потерь (3) в модели.

Б. Вывод выражений (16), (17)

Из (9), (12), (13) получаем функции спроса и предложения $y = (\alpha - p)/2B$, $x = (p - c)/2cR$ для $\mu = 0$. Условие равновесия спроса и предложения (10) дает $(cR + B)p = cR\alpha + Bc$, откуда следует (16). Подставляя p^* в функцию предложения, получаем (17).

В. Доказательство утверждения

1. Из (18), (25) имеем, что $\mathcal{E} < \mathcal{E}_s$, если $(cR + B)(x^*)^2 < B(x_s^*)^2 - cF$. Подставим в это неравенство оптимальные объемы генерации (17), (24), тогда

$$(cR + B) \left(\frac{\alpha - c}{2(cR + B)} \right)^2 < B \left(\frac{\alpha - c}{2B} \right)^2 - cF.$$

Преобразуя обе части, получаем

$$F < \frac{R(\alpha - c)^2}{4(cR + B)B} = Rx^*x_s^* = l\left((x^*x_s^*)^{1/2}\right) = l(\tilde{x}^g).$$

2. Из (20), (28) имеем, что $\bar{\mathcal{E}} < \bar{\mathcal{E}}_s$, если $(\alpha - c)\bar{x} - (cR + B)\bar{x}^2 < (\alpha - c)\bar{x}_s - B\bar{x}_s^2 - cF$. Преобразуем с учетом (27):

$$\begin{aligned} cF &< cR\bar{x}^2 + (\alpha - c)(\bar{x}_s - \bar{x}) - B(\bar{x}_s^2 - \bar{x}^2) = cl(\bar{x}) + (\alpha - c)\Delta\bar{x} - B\Delta\bar{x}(\bar{x} + \bar{x}_s) = \\ &= cl(\bar{x}) + \Delta\bar{x}(\alpha - B(\bar{x} + \bar{x}_s) - c) = cl(\bar{x}) + \Delta\bar{x}(\alpha - 2B\tilde{x}^a - c) = cl(\bar{x}) + \Delta\bar{x}(p(\tilde{x}^a) - c), \end{aligned}$$

откуда следует (30).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Данилов И.А. (2013). Общая электротехника. М.: Юрайт. [Danilov I.A. (2013). *General electrical engineering*. Moscow: Yurait (in Russian).]
- Шавкин С. (2009). Перспективы снижения стоимости ВТСП проводов второго поколения // *Сверхпроводники для энергетики, информационный бюллетень*. Т. 6. Вып. 2. С. 1–3. [Shavkin S. (2009). The perspectives of cost reduction for second-generation high temperature superconductive wires. *Superconductors in Electric Power Industry, Information Bulletin*, 6, 2, 1–3 (in Russian).]
- Bohn R., Caramanis M., Schweppe F. (1984). Optimal pricing in electrical networks in space and time. *The RAND Journal of Economics*, 15, 3, 360–376.
- Chao H.-P., Peck S. (1996). A market mechanism for electric power transmission. *Journal of Regulatory Economics*, 10, 25–59.
- Eckroad S. (2016). *Technical analysis and assessment of resilient technologies for the electric grid: Task 3 — cost and commercialization assessment and market analysis*. EPRI, Palo Alto, CA, USA.

- Joskow P., Tirole J. (2000). Transmission rights and market power on electric power networks. *The RAND Journal of Economics*, 31, 3, 450–487.
- Li N. (2015). *A market mechanism for electric distribution networks*. IEEE54th Annual Conference on Decision and Control (CDC), December 15–18, 2015, Osaka, Japan.
- Romashov M., Sytnikov V., Shakarian Y., Ivanov Y. (2014). Prospects of long-distance HTS DC power transmission systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 507, 1–4.
- Thomas H., Marian A., Chervyakov A., Stuckrad S., Rubbia K. (2016). Efficiency of superconducting transmission lines: An analysis with respect to load factor and capacity rating. *Electric Power Systems Research*, 141, 381–391.
- Venuturumilli S., Zhang Z., Zhang M., Yuan W. (2017). Superconducting cables — network feasibility study. *Western Power Distribution*. Herald Way, Pegasus Business Park, Castle Donington.

On the economic advantage of superconductive lines of power transmission

© 2020 A.P. Vavilov, G.Yu. Trofimov

A.P. Vavilov,

Institute for Financial Studies, Moscow, Russia; e-mail: secretary@ifs.ru

G.Yu. Trofimov,

Institute for Financial Studies, Moscow, Russia; e-mail: g.trofimov@ifs.ru

Received 14.11.2019

The authors are grateful to A.B. Pomanskiy and S.V. Samoilenkov for helpful remarks on the paper.

Abstract. We consider a comparative study of economic effects of power transmission lines based on traditional technology and superconductivity. A simple theoretical model of competitive energy market includes suppliers, network companies and consumers interacting within a transmission network. In the simplest case, this net consists of two nodes, connected with one transmission line. It is shown that superconductivity is beneficial due to the scale economy. This principle is valid for superconductive lines because of fixed energy inputs required for cooling the cables. The economic advantages of superconductivity are based on the absence of energy losses caused by resistance in metallic wires and on the possibility to increase the maximal load several times compared to traditional transmission lines. In contrast, traditional lines are subject to decreasing returns, because energy losses in these lines increase non-linearly with load. We demonstrate that the superconductive line ensures a higher integral return than the traditional line under large volumes of power transmission.

Keywords: transmission line, node price, load, energy losses, fixed cost.

JEL Classification: L94, Q40.

DOI: 10.31857/S042473880010520-1