

Легкие и невидимые

Подземные линии электропередачи по технологии HVDC Light

Даг Раефарк, Бо Нормарк

Для передачи электроэнергии на большие расстояния на протяжении многих лет используются воздушные линии (ВЛ). Стоимость и характеристики подземных кабельных линий ранее делали их совершенно непривлекательной альтернативой.

Появление технологии HVDC Light® влечет за собой настоящий переворот. В то время как подземные кабели не подходят для построения длинных высоковольтных линий переменного тока, кардинально отличные свойства постоянного тока меняют дело.

Высокая стоимость подземной прокладки кабелей, которая долгое время была причиной непривлекательности этого метода, также утрачивает силу как аргумент. Рост внимания к неблагоприятному воздействию воздушных линий на экологию и наличие новых экономичных технологий в совокупности приводят к необходимости пересмотра подходов. Подземная прокладка кабелей становится сейчас более интересной альтернативой, чем когда-либо ранее.



Гибкость сети

Уже более века системы передачи электроэнергии строят на основе воздушных линий электропередачи (ВЛ). Основной причиной этого является ценовое преимущество перед подземными высоковольтными линиями.

Недавние исследования показывают, что затраты на прокладку подземных линий электропередачи в 5–15 раз превосходят затраты на сооружение традиционных воздушных линий. Однако результаты этого сравнительного анализа уже устарели. Следующие два фактора оказывают влияние на эту стойкую парадигму.

- Экологические ограничения ведут к повышению затрат и увеличению сроков реализации проектов ВЛ.
- Развитие технологий влечет за собой значительное удешевление подземных линий электропередачи.

Аспекты экологических ограничений

Ниже приведены несколько преимуществ подземных высоковольтных кабельных линий постоянного тока (далее – кабельная ППТ) перед высоковольтными ВЛ переменного тока.

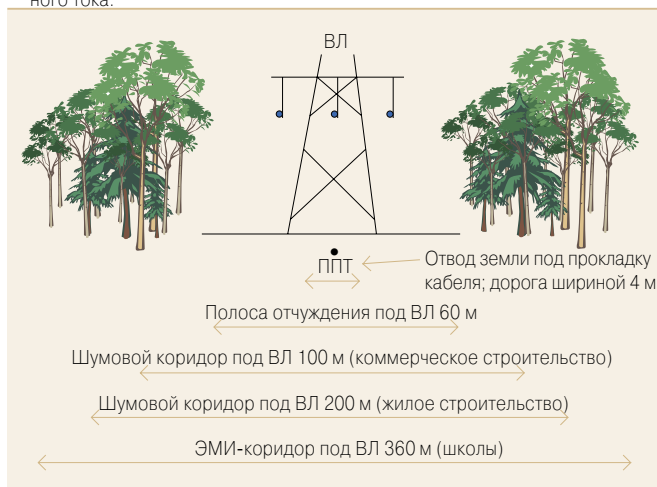
Землепользование

Сооружение кабельной ППТ требует выделения значительно меньшей площади, чем строительство ВЛ. Полоса отчуждения вдоль ВЛ 400 кВ, в которой не допускается наличие строений или высоких деревьев, может достигать в ширину 60 м (рис. 1), тогда как в случае подземного кабеля постоянного тока на поверхности земли требуется лишь прокладка над линией дороги для осмотра шириной не более 4 м. Под ВЛ переменного тока длиной 400 км необходимо занять 2400 га земли (1 га = 10000 м²). Для кабеля на постоянном токе, в то же время, требуется лишь 160 га (менее 6%).

Акустический шум

Ограничения на землепользование простираются дальше непосредственно самой полосы отчуждения. Акустический шум от коронного разряда в линиях, наиболее заметный во время тумана, когда проводники увлажнены, может ограничить строительство вблизи ВЛ. Ширина такого «шумового коридора» зависит как от местных норм, так и от конструкции линии и ее напряжения. Противодействие недовольных шумом жителей прилегающих районов создает дополнительные препятствия при получении разрешений. Подземный кабель на постоянном токе, естественно, не создает акустического шума.

1 Сопоставление ширины коридора для линий HVDC Light® и ВЛ переменного тока.



ЭМИ

Магнитные и электрические поля также могут ограничивать использование земли поблизости от ВЛ. В некоторых странах действуют строгие профилактические ограничения в отношении магнитных полей. Национальный совет по безопасности электрооборудования Швеции и Министерство жилищного строительства и экологии Дании считают безопасным уровень напряженности магнитного поля частотой 50 Гц (возникающих при работе ЛЭП) ниже 0,4 мкТл. Такая напряженность поля соответствует обычно наблюдаемым уровням в современном городе. В отличие от ли-

2 Влияние близости ВЛ на цену объектов недвижимости (Финляндия).

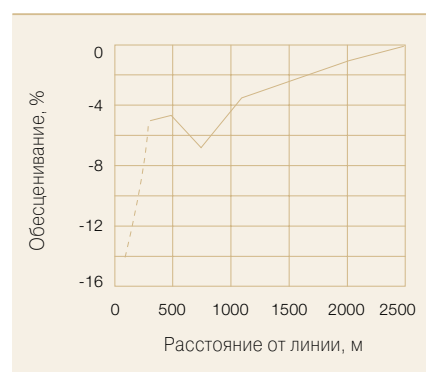


Таблица 1 Сопоставление материалоемкости.

Материал	Подземная ППТ	ВЛ переменного тока
Алюминий	3,3 кг	2,1 кг
Медь	1,4 кг	
ПВХ	2,3 кг	
Сшитый полиэтилен	6,1 кг	
Сталь		100 кг
Керамика		0,3 кг
Бетон		376,3 кг
Всего	13,1 кг	478,8 кг

нии электропередачи переменного тока, поле кабеля постоянного тока статично (не создает излучения). Применение тех же строгих норм, что и для линий переменного тока, не приведет к необходимости выделения «коридора электромагнитной безопасности» вокруг подземного кабеля постоянного тока. Напряженность поля на поверхности непосредственно над кабелем значительно меньше напряженности естественного магнитного поля Земли.

Уменьшение поглощения CO₂ в результате вырубki лесов в полосе отчуждения

Растущие леса являются преобразователями углекислого газа, поскольку деревья поглощают его из атмосферы и превращают в растительное органическое вещество. Один гектар леса может поглотить до 9,2 тонн CO₂ в год. Постройка ВЛ 400 кВ протяженностью 400 км в регионе с долей растительности лесного типа 75 % ведет к накоплению в атмосфере 16780 тонн CO₂ в год.

Технология HVDC Light® была впервые представлена в 1997 году после монтажа малой экспериментальной установки мощностью 3 МВт. С тех пор значительный прогресс в разработке кабелей и преобразователей привел к резкому уменьшению габаритных размеров и повышению эксплуатационных показателей.

Расход материалов

Материалоемкость ВЛ переменного тока выше соответствующего показателя для кабеля постоянного тока. Статистическая информация о материалоемкости на погонный метр линии электропередачи приведена в табл. 1.

При расчете расхода материалов с помощью методов оценки жизненного цикла (LCA) оказывается, что кабель постоянного тока характеризуется 64,5 кг CO₂-эквивалента на погонный метр, тогда как 1 м ВЛ переменного тока – 365,4 кг CO₂-эквивалента. Иными словами, расход материалов на кабельную линию постоянного тока наносит ущерб

экологии, составляющий лишь 17,6% от того же показателя для ВЛ переменного тока той же длины.

Эстетика. Стоимость недвижимости

Ряд исследований показывает, что стоимость недвижимости снижается по мере приближения к ВЛ. Например, проведенное в Великобритании исследование показало, что стоимость особняка на расстоянии 100 м от ВЛ на 38% ниже средней стоимости подобных объектов недвижимости. Исследование финских специалистов показывает, что снижение цены недвижимости обратно пропорционально расстоянию от ЛЭП (рис. 2).

Примем, что через каждые 500 м вдоль линии протяженностью 400 км расположены:

- один объект недвижимости на расстоянии 500 м от ВЛ (снижение стоимости на 8%),
- два объекта недвижимости на расстоянии 1000 м от ВЛ (снижение стоимости на 4%),
- три объекта недвижимости на расстоянии 2000 м от ВЛ (снижение стоимости на 2%).

Если средняя стоимость объекта составляет 150 000 долларов, совокупная потеря стоимости вдоль линии длиной 400 км составляет внушительную цифру – 25 млн. долларов.

Электрические потери

При использовании подземной ППТ HVDC Light® внутри сети переменного тока, параметры системы в целом оказываются более близкими к оптимальным, за счет чего снижаются электрические потери. Потери в ППТ компенсируются сокращением потерь в сети переменного тока, таким образом принимается, что ППТ позволяет передавать электроэнергию «без потерь». Тот факт, что параметры передающей сети, в состав которой входит ППТ, близки к оптимальным, можно объяснить двумя причинами: более высоким в среднем напряжением в сети переменного тока и меньшей величиной перепадов реактивной мощности.

Например, в сети, рассчитанной на передачу 350 МВт (с загрузкой 50%), потеря в ППТ нет, тогда как потери в линиях переменного тока доходят до 5%. Это означает, что энергетической компании при использовании ППТ ежегодно удастся сэкономить 76 650 МВт·ч и реализовать эту дополнительную мощность потребителям.

Указанная величина потерь электроэнергии¹⁾ в пересчете на количество выбросов составляет 45 990 тонн CO₂ ежегодно.

Стабильность энергосистемы

Системы ППТ не могут быть перегружены, кроме того, они обладают дополнительными преимуществами в силу возможности регулировать

потоки мощности и напряжение в них (рис. 3). Высоковольтная линия постоянного тока позволяет с высокой эффективностью гасить качания мощности, а также ограничивать или полностью подавлять каскадные возмущения в системе, в частности, при соединении двух точек в пределах одной сети переменного тока, т.е. параллельно с линиями электропередачи переменного тока. В этом случае преобразователи HVDC Light® прекрасно справляются с ролью генераторов или потребителей реактивной мощности.

Технические характеристики подземной линии электропередачи

При проектировании классических воздушных линий для передачи электроэнергии на большие расстояния предпочтительно выбирать более высокое напряжение, поскольку помимо повышения максимальной передаваемой мощности, это ведет к снижению потерь. Однако в случае передачи переменного тока с использованием подземного кабеля дело обстоит иначе. При повышении напряжения потери реактивной мощности в кабеле возрастают настолько, что технически приемлемая максимальная длина кабеля не возрастает, а сокращается. Законы физики в данном случае препятствуют созданию длинных линий переменного тока. На основе современного опыта считается, что максимальная дальность передачи электроэнергии по подземному кабелю при напряжении 345 кВ переменного тока составляет около 60 км.

Основными экологическими аспектами, по которым подземные высоковольтные кабельные линии постоянного тока превосходят высоковольтные ВЛ переменного тока, являются: землепользование, акустический шум, ЭМИ, расход материалов и стабильность энергосистемы.

HVDC Light® – новая система электропередачи, предназначенная для построения подземных линий

В основе этой технологии лежит несколько базовых:

- технология изготовления кабелей с экструдированной изоляцией,
- технология производства преобразователей,

- технология построения систем управления и защиты.

Инверторы напряжения обеспечивают меньшую нагрузку на кабель, чем обычные высоковольтные преобразователи постоянного тока, за счет чего стала возможной разработка экструдированных кабелей для ППТ. Кабель с экструдированной изоляцией обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с обычным кабелем с вязкой пропиткой, а именно:

- в конструкции такого кабеля не применяется масло,



3 Линии HVDC повышают стабильность сетей переменного тока.



4 Ассортимент систем HVDC Light®.

- Выпускается с 2000 года
- Выпускается с 2004 года
- Выпускается с 2006 года

Напряжение	500 A	1000 A	1500 A
+/- 80 кВ	90 МВт	180 МВт	280 МВт
+/- 150 кВ	170 МВт	350 МВт	500 МВт
+/- 300 кВ	350 МВт	700 МВт	1000 МВт

Сноска

¹⁾ На основе среднего показателя по странам ОЭСР – 600 кг CO₂/МВт·ч электроэнергии.

Гибкость сети

5 Строительство линии HVDC Light® «Murraylink» (Австралия).



- кабель имеет малый вес,
- кабель обладает высокой гибкостью, что упрощает монтаж,
- для сращивания кабеля применяются муфты очень простой конструкции.

Инверторы напряжения (VSC) также превосходят классические высоковольтные преобразователи постоянного тока по ряду показателей.

- Габаритные размеры таких инверторов значительно меньше. Они обычно вдвое меньше по высоте при меньшей на 25% площади основания.
- Превосходные возможности регулирования напряжения и реактивной мощности снижают риск отключения сети.
- Инверторы выступают в качестве «защитного шлюза», отсекающего возмущения и блокирующего каскадные аварии, наблюдающиеся в системах переменного тока²⁾.
- Такие устройства допускают работу в очень маломощных сетях и не требуют укрепления сети.
- Благодаря возможности «черного пуска», характерной для таких систем, сокращается период простоя после отключения.

Новые быстродействующие схемы управления и защиты позволяют в полной мере реализовать преимущества, присущие инверторам напряжения.

Краткая историческая справка о технологии HVDC Light®

Технология HVDC Light была впервые представлена на рынке в 1997 году после монтажа малой экспериментальной установки мощностью 3 МВт. С тех пор значительный прогресс в разработке кабелей и преобразователей привел к резкому уменьшению габаритных размеров и повышению эксплуатационных показателей. Из действующих

в настоящее время систем, крупнейшей является ППТ номинальной мощностью 330 МВт, работающая под напряжением ± 150 кВ. Ведется строительство системы мощностью 350 МВт. Конструкция преобразователей усовершенствована за счет применения новых схем коммутации, что позволило сократить число элементов и снизить потери в преобразователе на 60%.

В отличие от классической техники ППТ, система HVDC Light® характеризуется блочной конструкцией и широким использованием полупроводников. На рис. 4 приведены выпускаемые модули с различными комбинациями параметров.

Рост противодействия строительству воздушных линий со стороны экологов ведет как к росту затрат, так и к увеличению риска существенных задержек в реализации проекта.

Методы укладки кабеля

Большое значение в любом проекте подземной линии электропередачи имеет метод укладки кабеля. В австралийском проекте ППТ Murraylink (рис. 5, 6) укладка кабеля была с большим успехом выполнена с использованием модифицированного оборудования для укладки трубопроводов. В день удавалось проложить до 3 км кабеля. Суммарная стоимость прокладки кабельной линии протяженностью 170 км составила вполне при-

Сноска

²⁾ См. «HVDC: «межсетевой экран» для борьбы с аварийными ситуациями в высоковольтных сетях», Леннарт Карлссон, АББ Ревю 3/2005, с. 42-46.

емлемую сумму – около 10 млн. австралийских долларов (7,6 млн. долл. США). Кабели HVDC Light имеют относительно малую массу погонного метра (обычно менее 10 кг/м), благодаря чему монтаж таких кабелей напоминает прокладку оптоволоконных линий связи: применяемые для рытья траншей механизмы имеют сравнимые размеры, кабель укладывается на такую же глубину (от 1 до 1,5 м от поверхности).

Сопоставление затрат на подземную прокладку кабеля и строительство воздушных линий

Новая техника ППТ, как уже было сказано, обладает рядом уникальных характеристик, в особенности, если речь идет о повышении надежности сети. Следовательно, перед проведением строгого

Таблица 2 Перечень условий применимости ППТ

<input type="checkbox"/>	Необходимость в передаче мощности свыше 50–1000 МВт
<input type="checkbox"/>	Необходимость в точном и быстродействующем регулировании
<input type="checkbox"/>	Расстояние более 100 км
<input type="checkbox"/>	Сложности с получением разрешения на строительство ВЛ
<input type="checkbox"/>	Асинхронная работа сетей
<input type="checkbox"/>	Малая пропускная способность сети переменного тока
<input type="checkbox"/>	Риск развития динамической неустойчивости
<input type="checkbox"/>	Проблемы с обеспечением качества электроэнергии
<input type="checkbox"/>	Необходимость «черного пуска»
<input type="checkbox"/>	Необходимость обеспечения высокой степени готовности при существовании риска гроз, бурь и ураганов или сильного обледенения
<input type="checkbox"/>	Необходимость обеспечить малый объем работ по обслуживанию
<input type="checkbox"/>	Необходимость свести к минимуму занимаемую площадь
<input type="checkbox"/>	Риск низкочастотного гармонического резонанса
<input type="checkbox"/>	Необходимость в быстродействующем регулировании напряжения и реактивной мощности с целью увеличения стабильности сети

сопоставления затрат необходимо выполнить анализ потребностей. Некоторые из важнейших факторов приведены в табл. 2.

Если из перечисленных условий выполняются по меньшей мере три, вполне вероятно, что применение системы HVDC Light® окажется привлекательным решением. Однако если существуют значительные сложности с получением разрешений на строительство ВЛ, то одна лишь эта причина может оказаться достаточным аргументом в пользу системы HVDC Light®.

Далее приводится описание двух примеров, изучаемых в настоящее время.

Передача мощности 1700 МВт на расстоянии 400 км

Принимается, что в данном случае выполняется не менее пяти условий, перечисленных в табл. 2, а именно:

- необходимость в передаче мощности свыше 50–1000 МВт,
- дальность передачи составляет более 100 км,
- сложности с получением разрешения на строительство ВЛ,
- риск развития динамической неустойчивости,
- необходимость в быстродействующем регулировании напряжения и реактивной мощности с целью увеличения стабильности сети.

Результатом анализа прямых капиталовложений является следующий диапазон.

Прямые затраты на реализацию варианта HVDC Light® (включая стоимость преобразователей, кабелей и монтажных работ) составляют 275–420 млн. долларов. Разброс сумм связан, в первую

очередь, с разбросом стоимости монтажных работ и условиями местных рынков.

Разброс сумм при анализе варианта строительства ВЛ еще шире. Исследование, проведенное консультационной службой ICF в 2001 году, показало наличие огромной неравномерности цен между разными странами. Расчет прямых капиталовложений на основе этих данных дает диапазон от 130 до 440 млн. долларов за одну линию, включая стоимость подстанций и монтажных работ.

При сопоставлении двух вариантов на уровне прямых капиталовложений стоимость кабельной линии составляет от 0,6 до 3,2 стоимости строительства ВЛ. Этот результат значительно отличается от традиционного, согласно которому стоимость этих вариантов различается в 5–15 раз.

Кроме того, необходимо принять во внимание и другие факторы, такие как:

- дополнительные капиталовложения в оборудование для регулирования напряжения и реактивной мощности в случае строительства линии переменного тока,
- потери (в обоих вариантах),
- затраты на получение разрешения на строительство ВЛ,
- затраты, связанные с продолжительностью получения разрешений и строительства (для обоих вариантов),
- повышение пропускной способности существующей сети переменного тока (в случае сооружения ППТ),
- снижение ценности объектов недвижимости.

При включении в расчет всех этих факторов возрастает привлекательность альтернативы на базе

высоковольтной ППТ. Зададимся, для примера, следующими количественными показателями перечисленных факторов:

- дополнительные компенсаторы реактивной мощности: 25 млн. долл.,
- снижение ценности объектов недвижимости: 25 млн. долл.,
- выигрыш от увеличения пропускной способности существующей сети переменного тока: 50 млн. долл.

При учете этих факторов стоимость линии переменного тока возрастает до 230–450 млн. долларов при стоимости подземной ППТ 275–420 млн. долларов. Затраты на реализацию двух вариантов вполне сопоставимы и выбор наиболее предпочтительного из них будет определяться местными особенностями.

Передача мощности 2350 МВт на расстоянии 100 км

Проведение схожего расчета в этом случае дает объем прямых капиталовложений в проект кабельной ППТ от 110 до 150 млн. долларов, тогда как стоимость ВЛ переменного тока варьирует от 40 до 90 млн. долларов. Стоимость решения на базе ППТ в 1,2–3,75 раза выше стоимости ВЛ переменного тока. Учет рассмотренных выше дополнительных факторов приведет к сокращению ценовой разницы между двумя вариантами.

Выводы

Рост противодействия строительству воздушных линий со стороны экологов ведет как к росту затрат, так и к увеличению риска существенных задержек в реализации проекта. Новая технология строительства высоковольтных кабельных ППТ, HVDC Light®, делает проекты подземных кабельных линий технически и экономически жизнеспособными. Если новые капиталовложения в развитие сети обусловлены вопросами надежности электроснабжения, это служит дополнительным аргументом в пользу ППТ. Традиционные представления о том, что стоимость кабельной линии в 5–15 раз превосходит стоимость эквивалентной воздушной линии, нуждаются в пересмотре. В зависимости от местных факторов вполне реалистичной представляется ситуация, когда стоимость подземной кабельной высоковольтной линии сравняется со стоимостью обычной воздушной линии.

Даг Равемарк

ABB Corporate Research
Вестерос, Швеция
dag.ravemark@se.abb.com

Бо Нормарк

ABB Power Technologies
Цюрих, Швейцария
bo.normark@se.abb.com

6 Вентили HVDC Light® (проект Murraylink).

