



УДК 631.308
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-2



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Уменьшение затрат на строительство и обслуживание мощных преобразовательных станций для линии электропередач постоянного тока

Татьяна Юрьевна Бростилова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
tat-krupkina@yandex.ru

Александр Евгеньевич Фокин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
f1r31993@mail.ru

Павел Андреевич Тимченко

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
tim4encko.pav@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы уменьшения затрат при строительстве преобразовательных станций, использующихся для передачи электроэнергии постоянным током.

Ключевые слова: передача электроэнергии постоянным током, биполярный транзистор с изолированным затвором, модульный многоуровневый преобразователь

Для цитирования: Бростилова Т. Ю., Фокин А. Е., Тимченко П. А. Уменьшение затрат на строительство и обслуживание мощных преобразовательных станций для линии электропередач постоянного тока // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (2). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-2

Reduction of costs for the construction and maintenance of high-power converter stations for high-voltage DC lines

Tatyana Yu. Brostilova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
tat-krupkina@yandex.ru

Alexander E. Fokin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
f1r31993@mail.ru

Pavel A. Timchenko

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
tim4encko.pav@yandex.ru

Abstract. The article considers the issue of reducing costs in the construction of converter stations used for direct current power transmission.

Keywords: direct current electric power transmission, insulated gate bipolar transistor, modular multilevel converter

For citation: Brostilova T.Yu., Fokin A.E., Timchenko P.A. Reduction of costs for the construction and maintenance of high-power converter stations for high-voltage DC lines. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(2):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-2

Введение

Для уменьшения потерь при передаче электроэнергии все чаще рассматривают метод ее передачи постоянным током (HVDC). Данный метод позволяет сократить потери за счет уменьшения реактивных потерь в линии электропередач (ЛЭП). Данное свойство особенно ценно при прокладке



кабельных линий по дну морских акваторий, так как вода имеет высокую диэлектрическую проницаемость (80), токопроводящие жилы кабеля образуют конденсатор, изоляция становится проводником переменного электрического тока. Все это делает метод HVDC перспективным.

Однако есть и ограничения, которые мешают широкому распространению передачи электроэнергии постоянным током. Главная проблема – это стоимость инверторной станции, выполняющей преобразование из постоянного тока в переменный и наоборот.

Как известно, потери в линии электропередачи переменного тока складываются из активной и реактивной составляющих, это обусловлено индуктивным и емкостным сопротивлениями линии. Реактивная составляющая мощности, проходящая по проводнику, вызывает его дополнительный нагрев, тем самым увеличивает активное сопротивление линии, уменьшая ее КПД. Ток, проходящий по проводнику с определенной частотой, также вызывает поверхностный эффект, что приводит к увеличению капитальных затрат на строительство линии электропередач. А если кабельная линия прокладывается в токопроводящей среде, к примеру по дну морских акваторий, это ведет к увеличению емкостной составляющей реактивного сопротивления.

Все вышеуказанные факторы подводят к целесообразности использования при передаче электроэнергии на дальние расстояния и в токопроводящих средах постоянного тока.

Данные линии получили широкое распространение именно при прокладке по дну морей, так, одним из примеров является энергомот на 1 ГВт при постоянном напряжении 400 кВ NEMO между Великобританией и Бельгией. Кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE) длиной 130 км проложен по дну Ламанша. Планируется также построить ряд проектов и в других странах, самым амбициозным проектом, на наш взгляд, является энергосвязь Австралия – Азия длиной 4300 км на 6 ГВт.

Но более широкому распространению метода передачи постоянным током мешает дороговизна его капитального строительства. Конечно, соотношение капитальных затрат на 1 кВт пропускаемой мощности уменьшается при увеличении длины ЛЭП и на каком-то определенном расстоянии становится более выгодным, чем классическая ЛЭП переменного тока, однако не стоит забывать и о затратах на обслуживание данной линии. И тут мы сталкиваемся с дефицитом производства компонентов для данной сети в России.

Одним из самых так называемых узких мест в данном вопросе является строительство преобразовательных станций. Преобразовательные станции в истории своего развития прошли путь от ртутно-дуговых выпрямителей до современных биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Последний является главной составной частью модульных многоуровневых преобразователей (ММС).

На рис. 1 изображена структурная схема ММС, на ней мы видим шесть плеч по одному на каждую полувольту всех трех фаз. Данный преобразователь может работать в обе стороны, т.е. как преобразовывать из постоянного тока в переменный, так и обратно. Рассмотрим теперь подробно, как устроен каждый блок в отдельности.

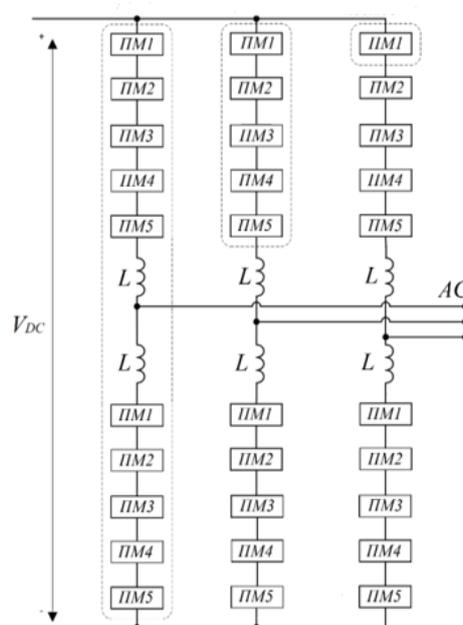


Рис. 1. Структурная схема модульного многоуровневого преобразователя



На рис. 2 изображена принципиальная схема полумостового модуля многоуровневого выпрямителя. Он состоит из двух мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), двух мощных диодов и одного конденсатора.

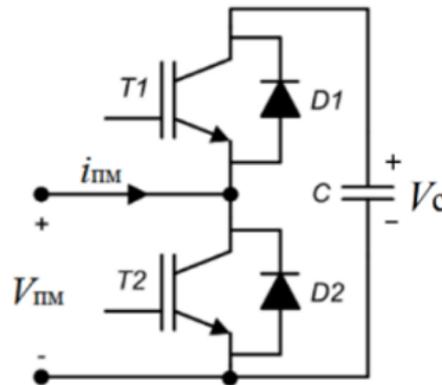


Рис. 2. Полумостовой модуль

Можно определить три возможных состояния данного модуля:

– во включенном состоянии $T1$ открыт, а $T2$ закрыт. Выходное напряжение подмодуля $V_{пм}$ равно напряжению конденсатора V_c . Конденсатор заряжается, если ток соответствует полярности и разряжается в противном случае;

– в состоянии «байпас» $T2$ открыт, а $T1$ закрыт. Выходное напряжение подмодуля $V_{пм}$ равно нулю, а напряжение на конденсаторе сохраняется, т.е. конденсатор не заряжается и не разряжается;

– в отключенном состоянии оба транзистора заперты, и ток может проходить только через диоды. Конденсатор будет заряжаться, если ток положительный, и в идеале он не может разрядиться.

Первые два состояния используются для преобразования постоянного тока в переменный, а третье, наоборот, для выпрямления.

С использованием IGBT-транзисторов схема получает определенную гибкость по сравнению со своими предшественниками, однако у данного типа транзисторов имеется и ряд недостатков:

- потери на нагрев элемента, обязательное использование охлаждения;
- паразитный ток, обусловленный временем отключения транзистора;
- высокая стоимость производства и обслуживания в процессе эксплуатации;
- неремонтопригодность.

Рассмотрим все минусы более подробно.

Для лучшей визуализации рассмотрим пример с термограммой обычного МОП-транзистора [1].

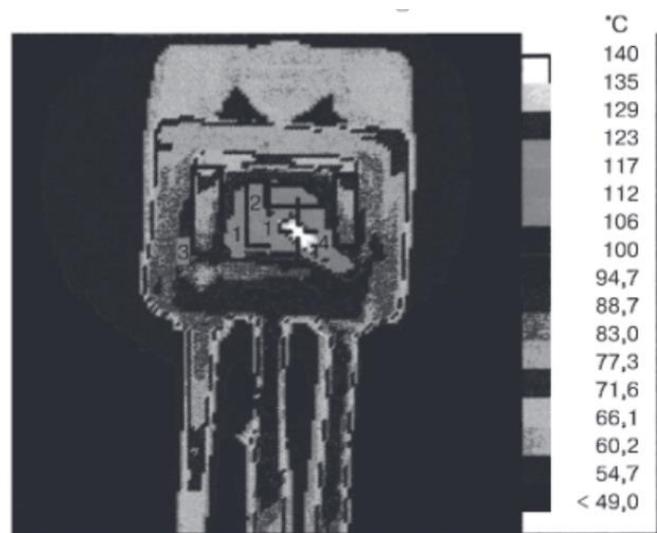


Рис. 3. Термограмма распределения температур на МОП-транзисторе, включенном с радиатором



Из этого следует, что потери на нагрев обусловлены, прежде всего, нагревом истоковых петель разварки и частым переключением $p-n$ -переходов из открытого состояния в закрытое, а, как известно, именно в момент включения и выключения выделяется наибольшее количество теплоты.

Помимо нагрева биполярный транзистор имеет и другие недостатки, а именно время его выключения намного больше времени включения. Причиной является невозможность ускорить процесс выключения созданием отрицательного базового тока, поскольку база силового транзистора недоступна. Время выключения IGBT составляет от 200 нс до 1,5 мкс. Этот эффект и вызывает паразитный ток транзистора [1].

Таблица 1

Результаты статистической обработки термограммы

| Параметр | Режим включения $V_g = 10$ В; $V_d = 3,82$ В; $I_d = 19$ А; $P = 72,58$ Вт | |
|--|---|---------|
| | Максимальная | Средняя |
| Температура, °С | | |
| Температура кристалла, T_1 | 122 | 115 |
| Температура кристаллодержателя, T_2 | 96,1 | 82 |
| Температура основания корпуса, измеренная у винта крепления, T_3 | 70,5 | 68 |
| Максимальная температура проволоки истоковых петель разварки, T_4 | 139 | – |
| Максимальная температура вывода сток непосредственно у корпуса, T_5 | 97,1 | – |
| Максимальная температура вывода исток непосредственно у корпуса, T_5 | 96,1 | – |
| Температура радиатора вблизи корпуса, T_7 | 59,1 | 57,5 |

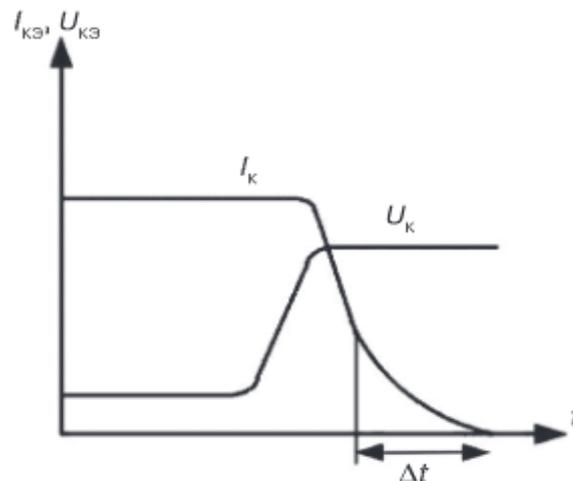


Рис. 4. Зависимость напряжения $U_{кэ}$ и тока $I_{кэ}$ при выключении IGBT

Следующий минус – высокая стоимость биполярных транзисторов. Обусловлено это сложностью производства и специфичностью оборудования. Так, станки для производства полупроводников производятся только за границей, имеются проблемы и с доставкой компонентов, из которых производят полупроводниковые приборы.

Последний недостаток – неремонтопригодность. Так, если внутри транзистора происходит тепловой пробой, вследствие недостаточного охлаждения или неправильно разработанной схемы, то транзистор больше не подлежит ремонту, а просто меняется на новый, что тоже сказывается на цене обслуживания преобразовательных станций.

Теперь разберем те мероприятия, которые могут привести к уменьшению влияния негативных факторов на стоимость использования биполярных транзисторов с изолированным затвором.

Так как нагрев транзистора происходит в двух основных местах, а именно вместо $p-n$ -перехода и проволоки истоковых петель разварки. Мы можем уменьшить их путем увеличения габаритов самого транзистора. Так, проволоку истоковых петель разварки станет возможным заменить на токопровод



большого сечения и большей площадью контакта к основанию полупроводника, изготовленный в виде металлических шин. При увеличении размера более экономически целесообразным станет и принудительное жидкостное охлаждение полупроводника, по примеру автотрансформаторов большой мощности и напряжения.

Для уменьшения тепловых потерь можно сократить число открытия и закрытия транзистора в одном цикле работы. К примеру, частотные преобразователи используют в своей схеме всего четыре биполярных транзистора, а затем прямоугольные импульсы сглаживаются с помощью индуктивно-емкостного фильтра. Поэтому можно путем расчета определить наилучшее соотношение количества модулей в инверторе для уменьшения количества суммарных переключений.

Что касается паразитного тока, если получится присоединить к базе транзистора и вовремя подводить отрицательное напряжение для его более быстрого закрытия, мы избавимся от паразитного тока. Да, конечно, надо понимать, что величина этого напряжения будет очень большой, однако при увеличении размеров полупроводникового прибора появляются возможности для его модернизации.

Положительно повлияет и увеличение мощности на единицу, а также и затраты на производство, так как для производства подойдут менее точные, а значит, и менее дорогие станки. Образуется и возможность их ремонта и стандартизации.

Заключение

1. Передача электроэнергии при помощи постоянного тока значительно расширяет возможности в эффективной электрификации нашей страны. По этой причине стоит уделять внимание и финансировать разработки в данном направлении.

2. Одной из преград в распространении данного метода является цена его капитального строительства. Главный метод снижения затрат – это укрупнение и стандартизация составных элементов преобразовательных станций.

3. Таким образом, увеличение (укрупнение) биполярного транзистора с изолированным затвором позволит улучшить технические характеристики преобразовательных станций для систем передач на постоянном токе.

Список литературы

1. Белоус А. И., Ефименко С. А., Турцевич А. С. Полупроводниковая силовая электроника. М. : Техносфера, 2013. 228 с.
2. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория и конструирование : монография. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 344 с.
3. Съянов С. Ю., Лакалина Н. Ю. Силовая и преобразовательная техника : учеб. пособие. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 108 с.

References

1. Belous A.I., Efimenko S.A., Turcevich A.S. *Poluprovodnikovaja silovaja jelektronika = Semiconductor power electronics*. Moscow: Tehnosfera, 2013:228. (In Russ.)
2. Moskatov E.A. *Silovaja jelektronika. Teorija i konstruirovanie: monografija = Power electronics. Theory and construction : monograph*. Moscow; Vologda: Infra-Inzhenerija, 2023:344. (In Russ.)
3. S"yanov S.Ju., Lakalina N.Ju. *Silovaja i preobrazovatel'naja tehnika: ucheb. posobie = Power and conversion technology : studies. stipend*. Moscow; Vologda: Infra-Inzhenerija, 2023:108. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 15.02.2024

Принята к публикации / Accepted 15.03.2024