

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Чекушин А.С.

Научный руководитель доцент Р.А. Уфа

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Многие нефтяные месторождения России находятся в отдаленных районах страны и имеют собственные энергосистемы для обеспечения электропитанием. Они могут работать в островном (автономном) режиме или могут быть подключенными к сети. Такие энергосистемы получили название MicroGrid, которые включают в себя источники электроэнергии (генерирующие объекты) и потребителей электроэнергии. Генерирующие объекты представлены комбинацией традиционных источников, работающих на дизельном топливе (дизель-генераторы) или газе (газо-поршневые двигатели), малыми гидростанциями и возобновляемыми источниками энергии (ветроустановками и солнечными станциями). Потребителями могут быть кустовые площадки, вахтовые поселки и инфраструктура месторождения. Структура сети MicroGrid может быть реализована посредством сети переменного или постоянного тока.

### Преимущества Microgrid на переменном токе:

- преобразование значения напряжения с помощью трансформатора;
- возможность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- широкий выбор электрооборудования для использования на линии;

### Главные преимущества Microgrid постоянного тока по сравнению с Microgrid переменного тока [1]:

- воздушная линия передачи постоянного тока имеет меньше проводов, чем воздушная линия переменного тока при той же передаваемой мощности;
- отсутствие скин-эффекта, что уменьшает потери мощности;
- меньшие потери на корону;
- пропускная способность линии постоянного тока не зависит от длины линии;
- линия передачи постоянного тока не потребляет реактивную мощность;
- не требуется установка средств компенсации реактивной мощности;
- высокий уровень управляемости и малое время регулирования;
- нет необходимости в выпрямительных устройствах при подключении к приемникам постоянного тока;
- благодаря передаче постоянного тока возможно обеспечить несинхронную связь между энергосистемами, в том числе работающими на разных частотах.

Существенным недостатком данных систем является использование дорогостоящих силовых управляемых ключей для коммутации постоянного тока и реализации высоковольтных выключателей [3]. Процесс коммутации постоянного тока технически более сложный, чем для переменного тока: это обусловлено разными физическими свойствами двух видов тока. Переменный ток за один период дважды проходит через ноль, что позволяет прерывать его в эти моменты с минимальной рассеиваемой энергией. Значение постоянного тока постоянно во времени, и поэтому в момент коммутации токи могут достигать значения в десятки килоампер. В частности, при срабатывании выключателя постоянного тока на 400 кВ выброс энергии может составить от 10 МДж до 100 МДж [3]. Эту энергию нужно рассеивать, поэтому необходимо использовать энергопоглотитель.

В последнее десятилетие было проведено большое количество исследований на эту тему. На сегодняшний день можно выделить два основных вида выключателей постоянного тока высокого напряжения [2]:

- механический выключатель;
- гибридный выключатель, выполненный на полупроводниках.

Для обоих видов выдвигаются следующие требования [1]:

- скорость срабатывания не должна превышать 10 мс
- двунаправленная работа
- многократность срабатывания выключателя (количество коммутаций).

Принципиальная схема механического выключателя постоянного тока высокого напряжения представлена на рис. 1.

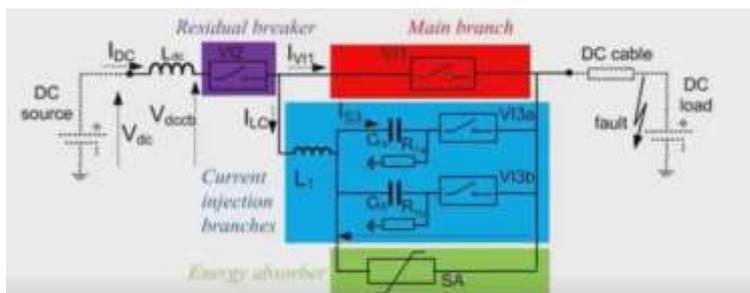


Рис. 1. Принципиальная схема механического выключателя [2]

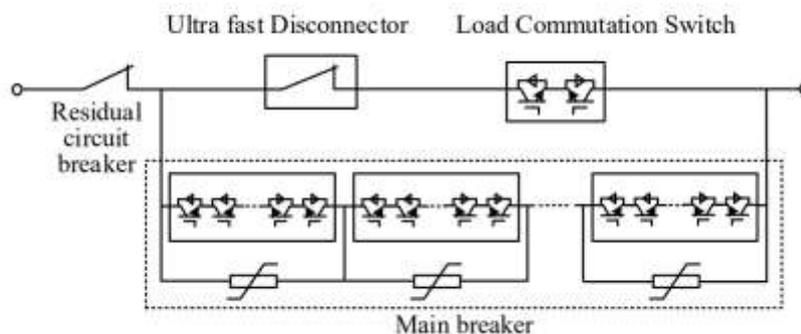
На схеме представлены: Main branch – главная ветвь; Current injection branches – ветви наведения тока; Energy absorber – поглотитель энергии; Residual breaker – выключатель тока утечки, DC source – источник постоянного тока, Ldc – катушка индуктивности для ограничения скорости роста тока, fault – авария, DC load – нагрузка.

Главная ветвь состоит из вакуумного выключателя (VI) с усовершенствованным приводным механизмом для уменьшения времени срабатывания, ветви наведения тока с предварительно заряженными конденсаторами. Ветви одинаковые, так как принимается во внимание факт того, что зарядка конденсатора может занять длительный период времени. Вторая ветвь не требуется, если рабочий цикл выключателя состоит только из одного размыкания. Резисторы необходимы для зарядки конденсаторов. Энергопоглотитель, который состоит из ограничителей перенапряжения. Выключатель тока утечки, который отключает только малые токи.

Описание работы схемы: спустя некоторое время после момента аварии (в пределах 2 мс) на главную ветвь подается сигнал отключения. Происходит замыкание контактов выключателя VI3а ветви наведения тока и ток начинает протекать через эту ветвь. Предварительно заряженный конденсатор C1а разряжается через L1, создавая резонансный контур. L1–C1а генерирует искусственную нулевую точку путем наложения колебательного тока резонансного контура и постоянного тока замыкания на выключателе VI1. В этот момент времени выключатель VI1 полностью размыкает свои контакты (примерно через 3,2 мс с момента аварии). Через несколько миллисекунд остаточная энергия поглощается энергопоглотителем и процесс прерывания тока повреждения завершается. В силу того, что напряжение на энергопоглотителях выше, чем номинальное напряжение сети в нормальном режиме, возникает ток утечки, с которым справляется выключатель тока утечки [3].

В случае срабатывания выключателя на напряжении 400 кВ ток равен нулю через 3 мс с момента аварии [3].

Принципиальная схема гибридного выключателя постоянного тока высокого напряжения, выполненного на полупроводниках представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Принципиальная схема полупроводникового выключателя [3]**

На схеме представлены: Main breaker – главный выключатель, Ultra fast disconnector – сверхбыстрый разъединитель, Load commutation switch - переключатель коммутации нагрузки, Residual breaker – выключатель тока утечки

Описание работы схемы: при нормальной работе ток протекает только через сверхбыстрый разъединитель и переключатель коммутации нагрузки, ток в цепи главного выключателя равен нулю. При возникновении короткого замыкания переключатель коммутации нагрузки блокируется для передачи тока повреждения на главный выключатель. Когда ток через сверхбыстрый разъединитель близок к нулю, разъединитель размыкает свои контакты. После этого весь ток проходит через главный выключатель, где силовые полупроводниковые ключи рассеивают энергию на энергопоглотителях. Выключатель тока утечки здесь нужен по тем же причинам что и в механическом выключателе [3].

В случае срабатывания выключателя на напряжении 400 кВ ток равен нулю через 2 мс с момента аварии.

В случае отключения одной и той же цепи на 400 кВ выключатель на полупроводниках имеет некоторые преимущества: более высокую скорость срабатывания (2 мс против 3 мс у механического выключателя), и меньшую выделяемую энергию (выделяемая энергия на поглотителе энергии составляет всего 20 МДж против 80 МДж [2]).

В ходе выполнения данной работы были проанализированы два вида высоковольтных выключателей постоянного тока. Сравнили их принципиальные схемы, описали компоненты, из которых они состоят и пояснили принципы работы двух типов выключателей. Также сравнили время их срабатывания и выделяемую энергию.

#### Литература

1. Суд В.К. HVDC and FACTS Controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах: Пер. с англ.: НП "НИИА", 2009. – 344 с., ил.
2. IEEE TV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeetv.ieee.org/ondemand/circuit-breakers-for-high-voltage-dc-networks/2348/circuit-breakers-for-high-voltage-dc-networks>
3. Liang, S. Parameter Matching and Optimization of a Hybrid Type DC SFCL Considering the Transient Characteristics of VSC-Based DC Systems [Text] / Liang S., Tang Y., Ren L., Xu Y., Shi J., Li Z., Tan X. // Energies. – 2019.