

Безтрансформаторный СТАТКОМ 35 кВ 100 МВА на базе многоуровневого инвертора напряжения для электросетей / Transformerless STATCOM 35 kV 100 MVA based on multilevel voltage source converter for grid application

Канд. техн. наук Чуприков В.С.
АО Ансальдо-ВЭИ, Ansaldo Sistemi Industriali S.p.A

Введение

Важнейшей задачей улучшения качества электроэнергии и повышения эффективности систем ее передачи и распределения является компенсация реактивной мощности, регулирование напряжения и повышение устойчивости работы энергосистем.

Одним из наиболее распространенных устройств для решения этой задачи является статический тиристорный компенсатор (СТК). С появлением мощных высоковольтных полностью управляемых приборов типа IGBT и IGBT появилась возможность реализации нового типа устройств, называемых СТАТКОМ (статический синхронный компенсатор). По сравнению с СТК и иными традиционными компенсаторами реактивной мощности СТАТКОМ имеет ряд преимуществ, приведенных ниже.

- Имеет лучшие динамические характеристики;
- Обеспечивает возможность обеспечения полного емкостного выходного тока при низком напряжении системы, что, в свою очередь, обеспечивает более эффективную динамическую устойчивость передачи по сравнению с СТК;
- Благодаря высокой частоте переключения приборов СТАТКОМ может осуществлять активную фильтрацию гармонических токов нагрузки;
- Требуется меньше места для установки (приблизительно в два раза по сравнению с СТК);
- Имеет меньший уровень активных потерь.

Теория СТАТКОМа

СТАТКОМ представляет собой управляемый источник напряжения (УИН) с внутренним сопротивлением, практически равным нулю. Его подключение к сети производится через линейный реактор, обеспечивающий преобразование разности напряжений сети и УИН в выходной ток СТАТКОМа, т.е. превращения источника напряжения в источник тока (рис.1).

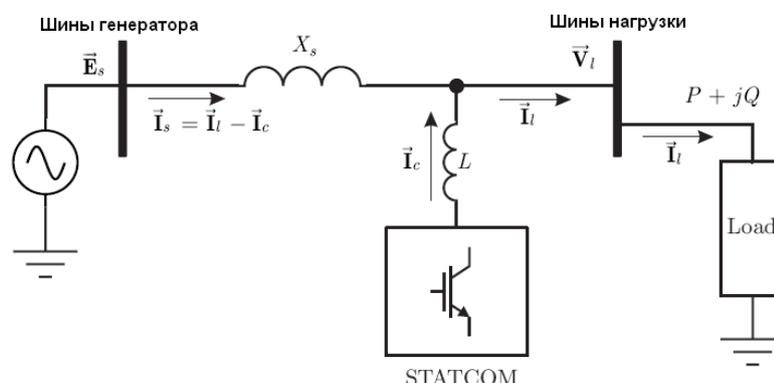


Рис. 1. Однолинейная схема подключения СТАТКОМа к сети

Векторная диаграмма напряжений, иллюстрирующая режимы работы СТАТКОМа, показана на рисунке 2. В режиме потребления реактивной мощности выходное напряжение преобразователя меньше напряжения линии и находится с ним в фазе. В режиме генерации – выходное напряжение преобразователя больше напряжения на линии и так же в фазе с ним.

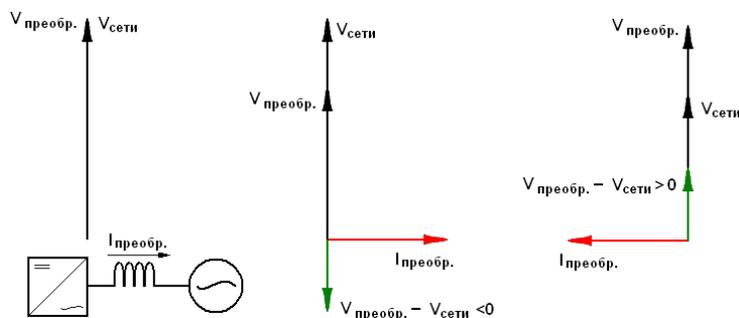


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений в различных режимах работы СТАТКОМа

При соответствующем алгоритме управления СТАТКОМ может работать в различных режимах, обеспечивающих повышение качества электроэнергии в точке его подключения. Возможна реализация режимов генерации и потребления реактивной мощности, поддержания напряжения и поддержания устойчивости электропередачи, активного фильтра для подавления гармонических составляющих токов нагрузки.

При соответствующем алгоритме управления СТАТКОМ может работать в различных режимах, обеспечивающих повышение качества электроэнергии в точке его подключения. Возможна реализация режимов генерации и потребления реактивной мощности, поддержания напряжения и поддержания устойчивости электропередачи, активного фильтра для подавления гармонических составляющих токов нагрузки.

В случае прямого (безтрансформаторного) подключения СТАТКОМа к сетям среднего класса напряжения применяются многоуровневые преобразователи. Одним из таких преобразователей является преобразователь на основе N-мостов. Важнейшим достоинством данной конфигурации является её модульность, что позволяет легко производить масштабирование СТАТКОМа при переходе к различным уровням напряжения и облегчает условия эксплуатации и обслуживания электроустановки.

На рисунке 3 показана фаза 7-ми уровневой преобразователя на базе N-моста и форма его выходного напряжения в режиме генерации реактивной мощности. Для каскадного многоуровневого инвертора полное выходное напряжение является суммой выходных напряжений отдельных модулей N-мостов. Каждое отдельное выходное напряжение получается с использованием ШИМ модуляции со сдвигом фазы коммутации для каждого моста. Особенностью данной конфигурации преобразователя является то, что при увеличении класса напряжения, а, следовательно, и числа последовательно включенных N-мостов, форма выходного напряжения все более приближается к идеальной синусоиде.

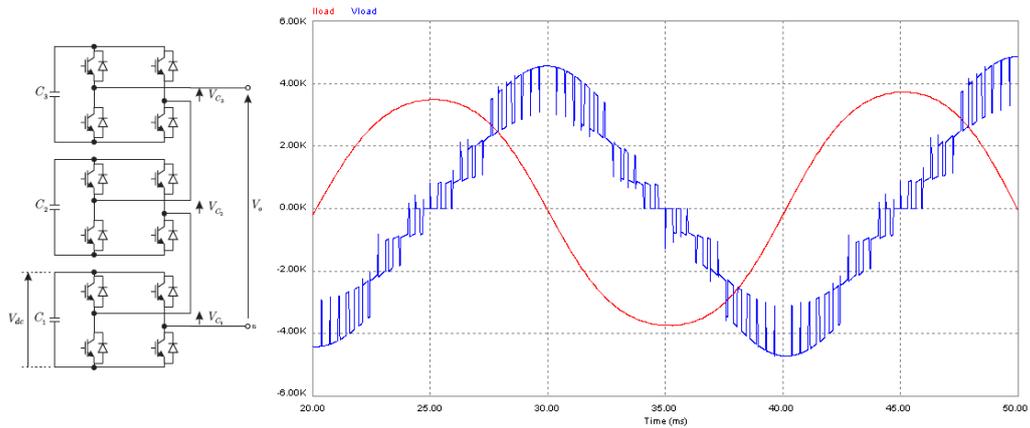


Рис. 3. Фаза 7-ми уровневго преобразователя на базе Н-моста и форма выходного напряжения в режиме генерации реактивной мощности

Преобразователь SILCOVAR TH (ML advanced)

Разработанный в компании Ansaldo Sistemi Industriali преобразователь **SILCOVAR TH (ML advanced)** представляет собой многоуровневый инвертор, каждая фаза которого состоит из последовательно соединенных Н-мостов. Основным элементом конструкции преобразователя является стандартный модульный узел НВМУ, состоящий из силового модуля и конденсаторного модуля: подбором количества модулей и соединением фаз преобразователя в звезду или треугольник можно получить устройство требуемого номинального напряжения и мощности (рис. 4).

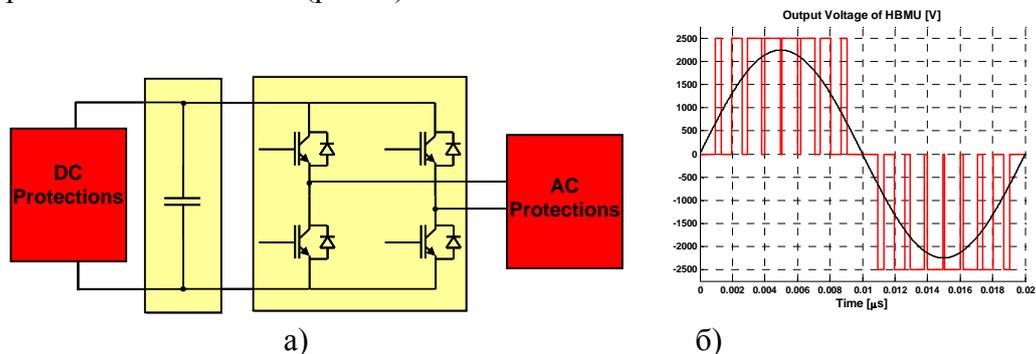


Рис. 4. Схема модуля НВМУ (а) и форма его выходного напряжения (б)



Рис. 5. Фото модуля НВМУ

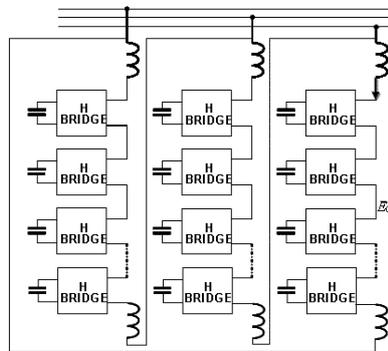
Пилотный проект

Пилотный проект преобразователей **SILCOVAR TH (ML advanced)** был реализован в 2011 г. в энергосистеме China Southern Power Grid. Установка, содержащая 2 СТАТКОМа, была смонтирована на ПС 500 кВ энергосистемы China Southern Power Grid (Китай). В таблице 1 представлены основные характеристики установки.

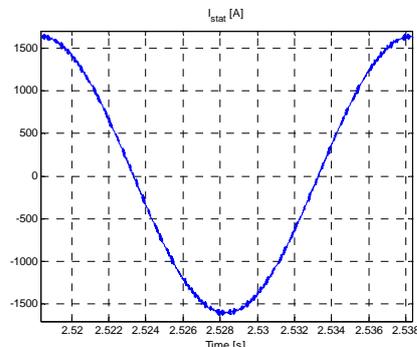
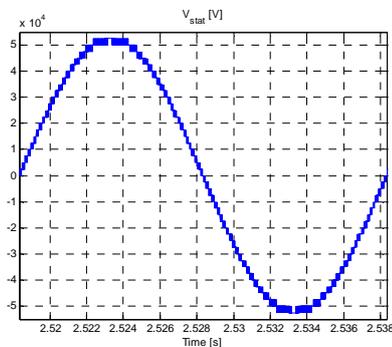
Таблица 1

Год ввода в эксплуатацию	2011
Номинальная мощность	2x100 Мвар
Максимальная мощность	2x160 Мвар в течение 10 секунд
Топология	каскадный H-мост, многоуровневый
Количество мостов для каждой фазы	24 + 2 избыточных
Соединение	Треугольник
Напряжение питающей линии	35 ± 15% кВ
Функции	регулирование напряжения в сети, гашение качаний активной мощности

Каждая фаза преобразователя содержит 26 последовательно соединенных модуля НВМУ, два из которых являются избыточными. Предусмотрено автоматическое шунтирование поврежденного модуля при его отказе. На рис.6-а приведена топология СТАТКОМа. Принцип смещенной ШИМ-модуляции обеспечивает эквивалентную частоту коммутации 10 кГц при частоте коммутации одного моста 400 Гц, что минимизирует содержание высших гармоник в выходном напряжении и токе, форма которых приведена на рис.6-б.



а)



б)

Рис. 6. Топология СТАТКОМа (а) и форма выходного тока и напряжения (б)

Фаза преобразователя, состоящая из 26 модулей НВМУ (фото на рис. 7) монтируются в виде одной конструкции и помещаются внутри одного контейнера. Там же размещается система жидкостного охлаждения. Общая система управления установлена в отдельном контейнере. Два преобразователя с фазными реакторами подключаются к сети 500 кВ через специальный трансформатор 500/35 кВ.



Рис. 7. Фото одной фазы преобразователя



Рис. 8. Общий вид установки

План размещения оборудования одного СТАТКОМа представлен на рис.9.

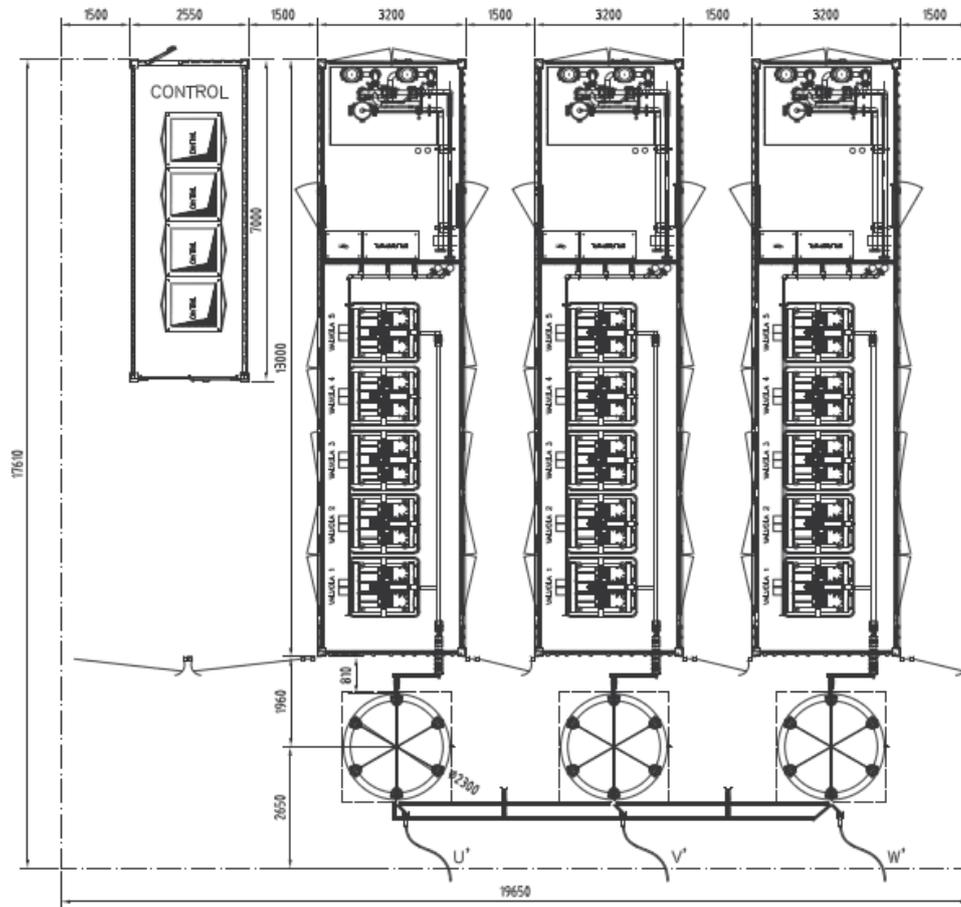


Рис. 9. План размещения оборудования

Результаты испытаний

Ниже рассмотрены наиболее интересные результаты функциональных испытаний двух СТАТКОМов при их подключении к сети 500 кВ.

Проверка быстродействия

Во время опыта уставка реактивной мощности в «Режиме постоянной реактивной мощности» изменялась скачком от -40 Мвар до +40 Мвар. На рис. 10 представлен процесс динамической реакции выходного тока СТАТКОМа на это изменение уставки. Время отклика (задержки) составило 4 мс.

Испытания при пробое одного модуля

На рис. 11 показан процесс шунтирования аварийного модуля. Когда имеет место пробой моста, специальное защитное устройство шунтирует аварийный мост и разряжает его накопительный конденсатор, после чего происходит рестарт системы с новой конфигурацией поврежденной фазы и новым режимом ШИМ-модуляции со смещением фаз коммутации с учетом снижения числа мостов. Полное восстановление работы СТАТКОМА происходит через 0,26 сек после аварии моста.

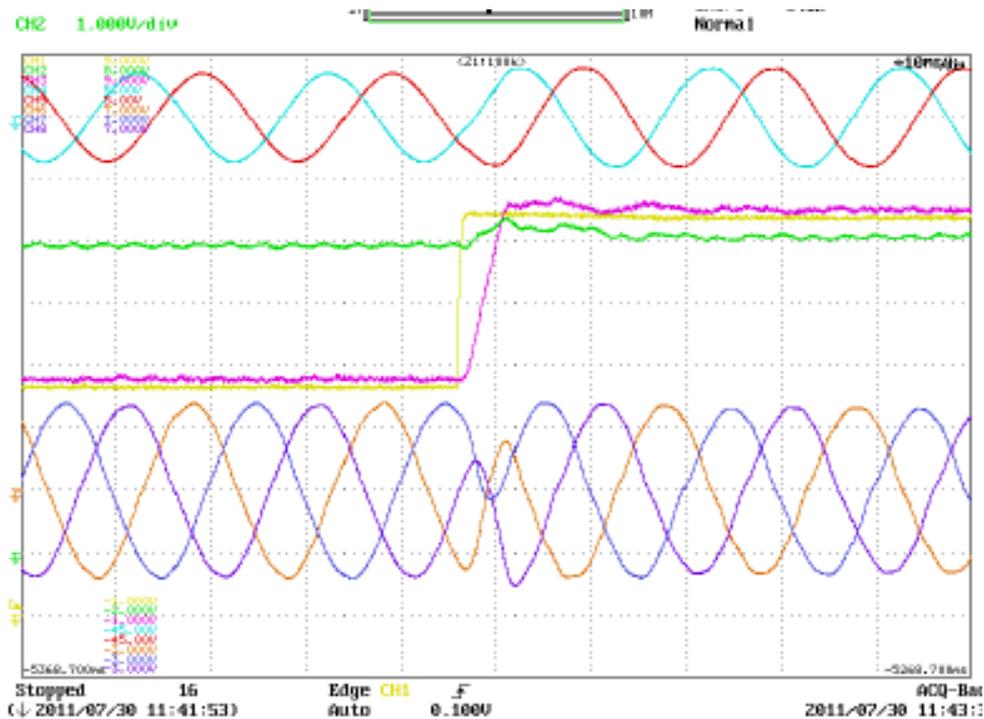


Рис.10. Динамика работы СТАТКОМА. Порядок осциллограмм сверху вниз: два линейных напряжения сети, уставка реактивной мощности и действующие значения выходного тока и напряжения сети, мгновенные значения трех фаз выходного тока

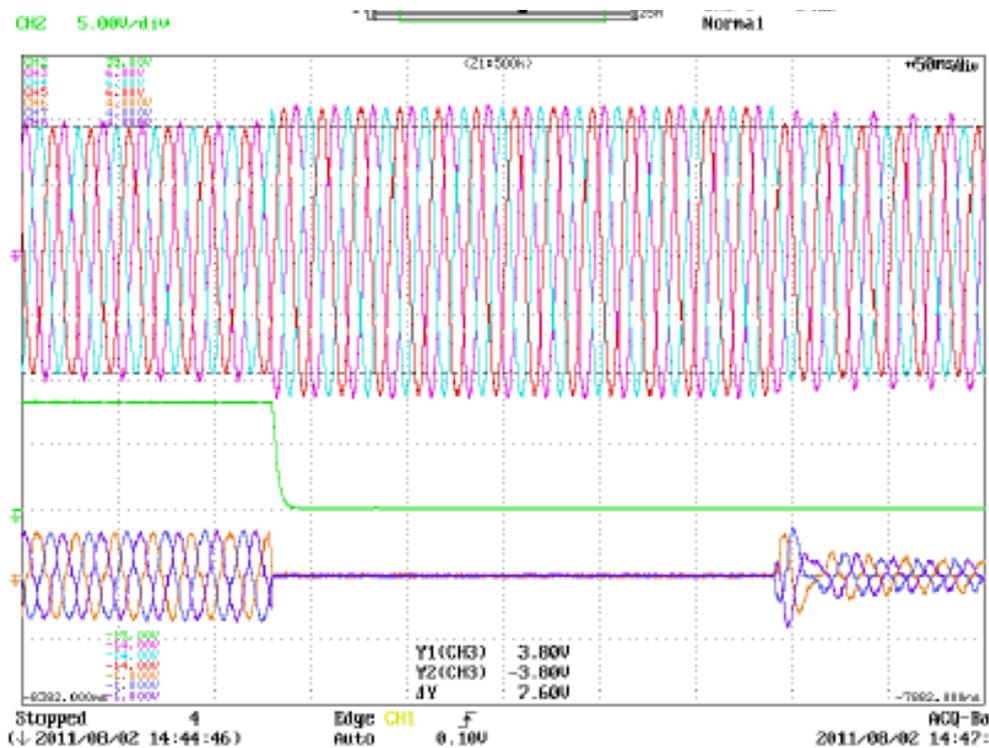


Рис. 11. Процесс шунтирования аварийного модуля. Порядок осциллограмм сверху вниз: три фазы напряжения модуляции, постоянное напряжение на поврежденном мосте, три фазы выходного тока СТАТКОМа

Испытания при полной мощности

Испытания проводились в режиме постоянной реактивной мощности, один СТАТКОМ работал в режиме выдачи реактивной мощности, другой - в режиме потребления такого же значения реактивной мощности. Цикл испытаний включал в себя работу в режиме полной мощности в течение 2 часов, изменение полярности мощности каждого преобразователя и последующая работа преобразователей с номинальной мощностью в течение еще 2 часов. Были измерены: содержание высших гармоник, активные потери и тепловые характеристики. Суммарный уровень высших гармоник (THD) до 50 порядка составил около 1,2%.

Анализ потерь

Измеренные потери в силовом оборудовании двух СТАТКОМов на стороне 35 кВ, включающем 2 преобразователя и фазные реакторы, составили 1,7 МВт при мощности каждого 100 Мвар. Общие потери в низковольтном оборудовании, включающем системы охлаждения преобразователей и кондиционирования контейнеров, потребление систем управления и защиты и т.д., составили около 390 кВт. Таким образом, суммарные потери не превысили 2,1 МВт или 1,05% от полной реактивной мощности.

Заключение

Вашему вниманию был представлен новый многоуровневый модульный преобразователь **SILCOVAR TH (ML advanced)**. С помощью этого преобразователя, созданного на основе модульной топологии, возможна реализация установок на напряжение до 35 кВ без использования трансформаторов.

По сравнению с технологией СТК, данное решение имеет ряд следующих преимуществ:

- Низкий уровень потерь
- Меньшая занимаемая площадь
- Низкий уровень электромагнитных помех
- Низкий уровень акустического шума
- Меньший градиент напряжения на полупроводниковых устройствах
- Удобство обслуживания: легкость замены неисправных устройств и узлов
- Меньшее количество силовых фильтров или их полное отсутствие
- Меньшие размеры реакторов

Функциональные испытания пилотного образца, включающего два СТАТКОМа на напряжение 35 кВ и номинальную мощность ± 100 Мвар, дали следующие результаты:

1. Быстродействие в режиме малого сигнала. Время отклика (задержки) на ступенчатое изменение уставки не превышает 4 мс;

2. Резервирование силовой части. Полное восстановление работы СТАТКОМа происходит через 0,26 сек после пробоя любого моста.

3. Высшие гармоники. Суммарный уровень высших гармоник до 50 порядка в выходном токе составил около 1,2%.

4. Потери. Суммарные потери не превысили 2,1 МВт или 1,05% от полной реактивной мощности установки.