

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХУРОВНЕВОГО СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Р.А. Уфа, И.А. Разживин, В.Е. Рудник  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС

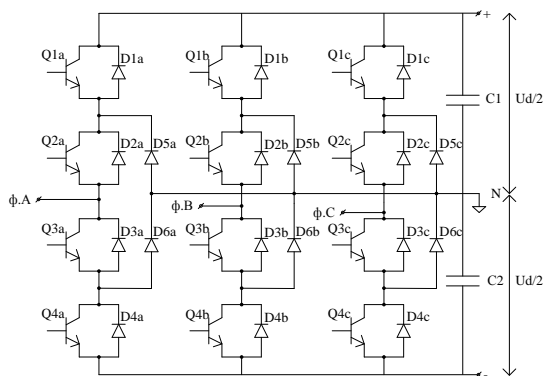
Одним из основных направлений развития и совершенствования современных электроэнергетических систем (ЭЭС) является внедрение устройств и технологий на базе силовых полупроводниковых ключей (устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) и HVDC (High Voltage Direct Current) технологий), предназначенных для повышения управляемости и пропускной способности сетей, обеспечения надёжности передачи электроэнергии. Основным элементом большинства обозначенных устройств является статический преобразователь, который реализуется в двух схемах – преобразователь тока (СПТ) и преобразователь напряжения (СПН). Схемы на базе СПН имеют ряд потенциальных преимуществ по сравнению со схемами на базе СПТ [1]:

1. Высокое быстродействие регулирования активной и реактивной мощности (полное круговое перемещение в четырех квадрантах).
2. Возможность работы в несимметричной сети, например, во время неисправности сети переменного тока или при наличии существенно несимметричных нагрузок с возможностью ее симметрирования.
3. СПН обеспечивает лучшую электромагнитную совместимость, что снижает требования к пассивным фильтрам, и возможность активной фильтрации высших гармоник.

Стоит отметить, что на сегодняшний день схемы СПН имеют меньшую пропускную способность единичной установки по сравнению со схемами СПТ, однако применение модульных многоуровневых технологий и кабелей постоянного тока, классов напряжения 320, 520 кВ, позволило увеличить пропускную способность объектов HVDC с СПН до 1 ГВт (1,4 ГВт – для вновь строящихся объектов). Благодаря указанным преимуществам схемы на базе СПН нашли более широкое применение в электроэнергетике. В настоящее время в мировых энергосистемах функционируют и строятся более 35 объектов HVDC с СПН классами напряжения от 50 до 520 кВ, в том числе первый в мире проект пятиконцевой HVDC с СПН [2].

Одной из распространённых и принятой в российской энергетике является трехуровневая схема СПН, которая реализуется согласно следующим топологиям [3]:

4. Преобразователь с фиксированной нейтралью (neutral-point-clamped, NPC), в котором каждое плечо состоит из четырех последовательно соединенных IGBT транзисторов (Insulated-Gate Bipolar Transistor) (Q1a-Q4a) с антипараллельными диодами (D1a-D4a) и двух дополнительных диодов (D5a, D6a), соединяющими промежуточные узлы схемы с нейтральной точкой (N) шины постоянного тока (рис.1).



а)

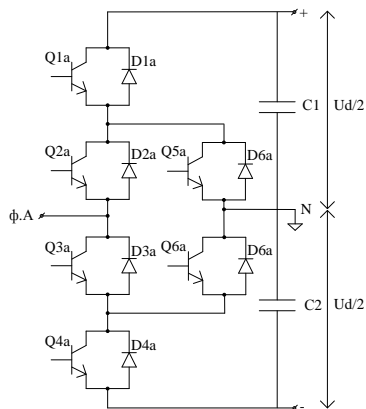
IGBT	$U_{BbIX} =$		
	$+U_d/2$	0	$-U_d/2$
Q1x	On	Off	Off
Q2x	On	On	Off
Q3x	Off	On	On
Q4x	Off	Off	On

б)

Рис. 1. Схема трехуровневая схема СПН с NPC (а) и возможные состояния IGBT ключей (б).

Несмотря на преимущества NPC [3], данная топология предполагает неравномерное распределение потерь между силовыми ключами, что снижает эффективность их использования. В качестве решения был разработан преобразователь с активной фиксированной нейтралью (Active Neutral Point Clamped, ANPC).

### 5. Преобразователь с активной фиксированной нейтралью (рис.2).



а)

$U_{BbIX} =$	IGBT					
	Q1x	Q2x	Q3x	Q4x	Q5x	Q6x
$+U_d/2$	On	On	Off	Off	Off	On
0	Off	On	Off	Off	On	Off
0	Off	On	Off	On	On	Off
0	On	Off	On	Off	Off	On
0	Off	Off	On	Off	Off	On
$-U_d/2$	Off	Off	On	On	On	Off

б)

Рис. 2. Трехуровневая схема СПН с ANPC (а) и возможные состояния IGBT ключей (б).

Применяя соответствующий алгоритм переключения дополнительных ключей Q5 и Q6, можно фиксировать выходное напряжение нейтральной точки цепи постоянного тока «активным» образом. Гибкость применения дополнительных ключей Q5 и Q6 позволяет более равномерно распределить потери на электропроводность и коммутационные потери ключей.

В формате данного доклада представлены фрагменты разработки физической модели трехуровневого СПН (ФМ) с ANPC гибридной модели HVDC, более детально представленной в [4].

### Физическая модель трехуровневого статического преобразователя напряжения

В соответствии с [4] модели силовых ключей воспроизведены на модельном физическом уровне посредством интегральных микроэлектронных цифрово-управляемых аналоговых ключей (ЦУАК), для которых разработаны универсальные алгоритмы управления, реализованные на цифровом уровне.

Внешний вид макета разработанной ФМ СПН с ANPC представлен на рисунке 3:

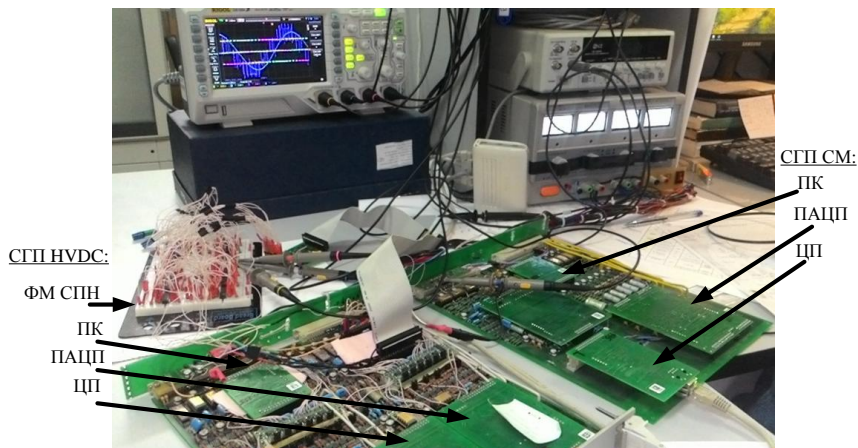


Рис. 3. Внешний вид макета разработанной ФМ СПН с ANPC, где СГП HVDC – специализированный гибридный процессор модели HVDC, СГП СМ – специализированный гибридный процессор модели синхронной машины, ПК – процессор коммутации, ПАЦП – процессор аналого-цифрового преобразования, ЦП – центральный процессор [4].

На рисунке 4 представлены осциллограммы фазного (а) и линейного (б) напряжений на выходе ФМ СПН с ANPC, функционирующего в режиме инвертора.

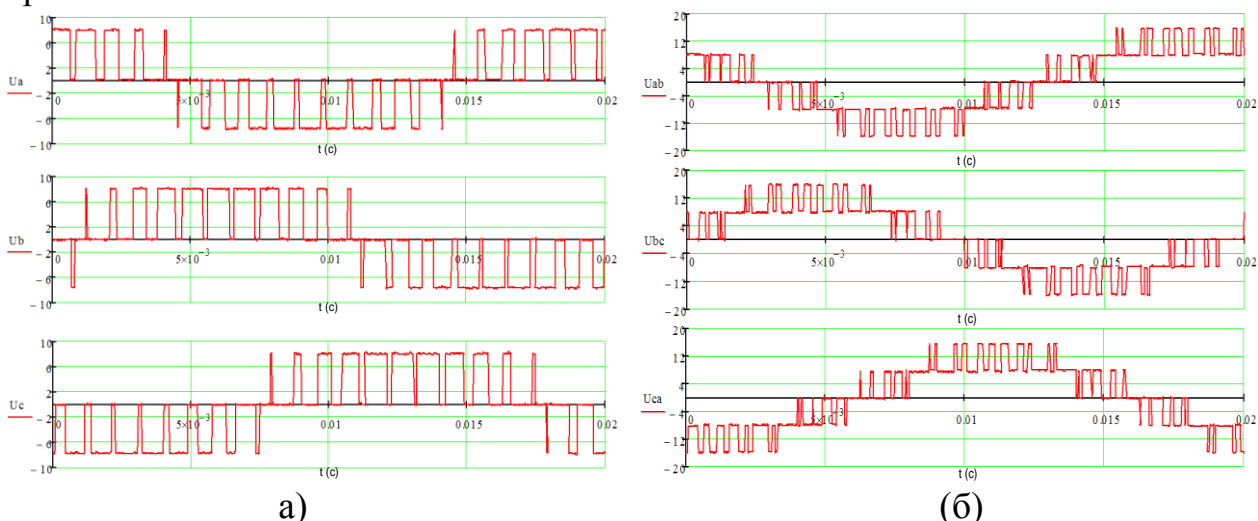


Рис. 4. Осциллограммы фазного (а) и линейного (б) напряжений на выходе ФМ СПН, функционирующего в режиме инвертора.

Для подтверждения адекватности воспроизведения коммутационного процесса на рисунке 5 представлен результат спектрального анализа фазных напряжений на выходе ФМ СПН с ANPC и типовой модели СПН с ANPC программного комплекса MatLAB Simulink.

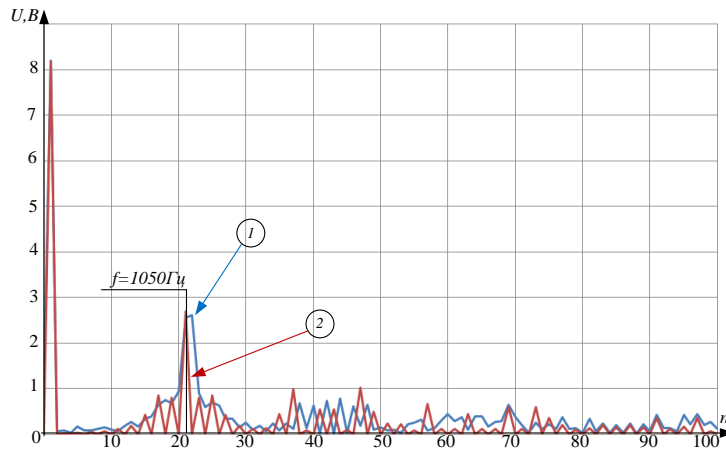


Рис. 5. Результаты спектрального анализа фазного напряжения на выходе ФМ СПН с ANPC, функционирующего в режиме инвертора: 1 – физическое моделирование СПН с ANPC, 2 – математическое моделирование СПН с ANPC в MatLAB Simulink, где  $f = 1050 \text{Гц}$  – частота широтно-импульсной модуляции,  $n$  – номер гармоники.

Представленные результаты экспериментального исследования и компьютерного тестирования подтверждают адекватность разработанной ФМ СПН с ANPC и возможность ее применения для достоверного воспроизведения различных коммутационных процессов в устройствах FACTS и HVDC, реализованных в рамках концепции и средств гибридного моделирования реальных ЭЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука», проект №3901: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Sellick R.L., Åkerberg M. Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, 2012. – pp. 1–6.
2. Chuanyue L., Xiaobo H, Jingli G., Jun L. The DC Grid Reliability and cost evaluation with Zhoushan Five-Terminal HVCD case study // 50th International Universities Power Engineering Conference, 2015. – pp. 1–6.
3. Rocha V.A., Silva S.M., Pires I.A., Machado A.A., Amaral F.V., Ferreira V.N., Paula H., Cardoso Filho B.J. A New Fault-Tolerant Realization of the Active Three-Level NPC Converter // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2014. – pp. 3483–3490.

4. Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Ufa R.A., Vasilev A.S., Andreev M.V., Ruban N.Yu., Suvorov A.A. A Hybrid Simulation Model for VSC HVDC // IEEE Transactions on Smart Grid. – 1997. – V. 7.-P. 2242-2249.

Научный руководитель: Р.А. Уфа, ассистент каф. ЭЭС ЭНИН ТПУ.

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ПЕРСПЕКТИВНЫМИ МНОГОТЕРМИНАЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАМИ И СЕТЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

<sup>1</sup>О.В. Сулова, <sup>2</sup>Р.А. Уфа, <sup>2</sup>В.Е. Рудник

<sup>1</sup>ОАО «Научно-технический центр единой энергетической системы»

<sup>2</sup>Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭЭС

В настоящее время перед отечественной электроэнергетической отраслью стоят задачи модернизации и развития единой энергетической системы (ЕЭС) с последовательным присоединением к ней объединенной энергосистемы Востока и ряда изолированных энергосистем при обеспечении эффективного и надежного электроснабжения в сочетании с интеллектуализацией систем, интеграции электроэнергетики в едином экономическом пространстве Евразийского экономического союза и увеличение экспорта электрической энергии и мощности, прежде всего на востоке страны. При реализации протяженных электрических присоединений на переменном токе могут возникать проблемы с обеспечением их устойчивости, повышенными потерями мощности, увеличением токов короткого замыкания, необходимостью установки дополнительных средств компенсации реактивной мощности. Перспективным альтернативным решением является использование для этих целей воздушно-кабельных и кабельных электропередач постоянным током с использованием преобразователей напряжения (ПН). Среди преимуществ электропередачи с использованием ПН по сравнению с аналогичными устройствами, выполненными на основе преобразователей тока, можно отметить: возможность поддержания напряжения при авариях в примыкающих сетях; работа в условиях малых отношений короткого замыкания и даже на автономную нагрузку; отсутствие фильтров высших гармоник на стороне переменного тока; возможность балансирования и симметрирования напряжения примыкающей сети переменного тока. Использование ПН, объединенных в многотерминальную электропередачу (МТЭ) кабельными или воздушно-кабельными линиями, позволит реализовать осуществить присоединение изолированных энергосистем к ЕЭС, осуществить надежное энергоснабжение изолированных потребителей и энергорайонов, обеспечив присоединение промежуточных подстанций. Использование сложноразветвленной сети постоянного тока (СПТ) обеспечивает передачу балансового потока мощности при отключенном состоянии одного из элементов сети (принцип «n-1»), повышая надежность энергоснабжения [1].