УДК 62–83(075.8)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ*

Р.А. Уфа, В.А. Сулайманова, А.С. Гусев, С.А. Ставицкий

Томский политехнический университет
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30

Аннотация. *Гибридная модель вставки постоянного тока разработана на основе концепции гибридного моделирования и представляет собой синтез разработанных математических моделей трансформаторов связи, фильтров высших гармоник, фазных реакторов, цепи постоянного тока, физических моделей статического преобразователя напряжения, а также модели системы автоматического управления и защиты, алгоритмы функционирования которой реализованы на цифровом уровне. Представлен принцип построения математических моделей оборудования вставки постоянного тока на примере модели фильтра высших гармоник, а также физической модели статического преобразователя напряжения. Разработанная гибридная модель вставки постоянного тока интегрирована в моделирующий комплекс, реализованный на базе концепции гибридного моделирования, в котором подготовлена тестовая схема двухмашинной электроэнергетической системы. В данной схеме воспроизведены процессы при коротком замыкании и регулирование мощности через вставку постоянного тока. Полученные результаты моделирования совпадают с результатами, полученными в программном комплексе MatLAB Simulink, что говорит о соответствии разработанной модели цифровой. При этом свойства и возможности концепции гибридного моделирования и, как следствие, разработанной модели и моделирующего комплекса позволяют использовать их при моделировании функционирования больших электроэнергетических систем, в том числе в реальном времени и на неограниченном интервале времени, в отличие от многих цифровых программных и программно-аппаратных комплексов.*

Ключевые слова: *электроэнергетическая система, вставки постоянного тока, концепция гибридного моделирования, гибридная модель, цифровое моделирование, анализ, сопоставление.*

Растущая сложность электроэнергетических систем (ЭЭС) ставит новые задачи на пути обеспечения их надежности и устойчивости. В то же время достигнутый к настоящему моменту прогресс в области силовой полупроводниковой

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00862 «Совершенствование теории и практики демпфирования низкочастотных колебаний в электроэнергетической системе с помощью вставки постоянного тока».*

Руслан Александрович Уфа, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ), Инженерная школа энергетики (ИШЭ).
Венера Алмазовна Сулайманова, аспирант.
Александр Сергеевич Гусев (д.т.н., профессор), профессор ОЭЭ ИШЭ.
Сергей Александрович Ставицкий, аспирант.

техники заставляет обращать все большее внимание на перспективность применения технологий передачи энергии постоянным током высокого напряжения, в частности вставки постоянного тока (ВПТ). Данное устройство доказало свою эффективность в решении задач несинхронного объединения ЭЭС, повышения пропускной способности элементов сети, интеграции распределенных возобновляемых источников энергии [1].

В то же время появление преобразователя напряжения (ПН) на базе более совершенных силовых полупроводниковых ключей (запираемые GTO тиристоры (Gate Turn-Off), биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) не только открыло новые возможности для повышения управляемости энергосистем, но и увеличило объем эксплуатационных и исследовательских задач на пути масштабного внедрения ВПН на базе ПН (ВПТН), обобщенная структура которой приведена на рис. 1 [1, 2].

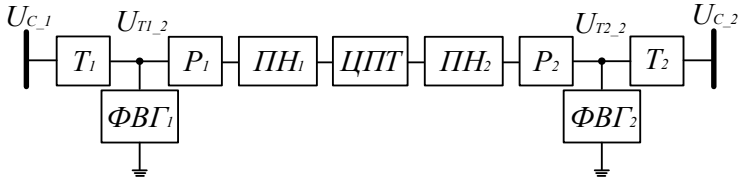


Рис. 1. Структурная схема ВПТН:
Т1 и Т2 – трансформаторы связи; ФВГ1 и ФВГ2 – фильтры высших гармоник; Р1 и Р2 – фазные реакторы; ПН1 и ПН2 – статические преобразователи напряжения; ЦПТ – цепь постоянного тока

Свойства и возможности обозначенных устройств обеспечивают независимое регулирование активной и реактивной мощности, возможность работы в несимметричной сети (например, во время неисправности сети переменного тока или при наличии существенно несимметричных нагрузок с возможностью ее симметрирования), применимость в слабых сетях переменного тока и сетях с пассивными нагрузками [3, 4]. Кроме того, топология ПН позволяет реализовать многоуровневые схемы, что снижает требования к пассивным фильтрам, и возможность активной фильтрации высших гармоник [5, 6].

Однако внедрение ВПТН существенно изменяет динамические свойства ЭЭС и связанные с этим процессы и ставит новые задачи на пути обеспечения надежного функционирования создаваемых ЭЭС с ВПТН. В число наиболее сложных задач входят:

– исследование процессов во всех значимых элементах и ВПТН в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ВПТН и ЭЭС;

– разработка, тестирование и настройка систем управления ВПТН в ЭЭС;

– исследование функционирования ЭЭС, содержащих ВПТН, с целью обеспечения надежной и эффективной работы ЭЭС.

Решение указанных задач требует наличия полной и достоверной информации о процессах во всех значимых элементах ВПТН и ЭЭС в целом во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы. При этом сложность поставленных задач, требующих комплексного исследования процессов в ЭЭС, а также характеристики самих ВПТН предъявляют достаточно высокие требования к системам моделирования [7, 8]:

– трехфазное моделирование;

– моделирование процессов в ЭЭС без декомпозиции и ограничений на их

длительность;

– отсутствие ограничений на размерность модели.

Данные свойства систем моделирования необходимы для всестороннего анализа взаимного влияния ВПТН и ЭЭС, а также их устройств управления и защиты в составе больших ЭЭС, и особенно при исследовании каскадных аварий [9, 10]. Немаловажным является воспроизведение процессов в масштабе реального времени для решения задач разработки, тестирования в замкнутом цикле и настройки систем управления и защиты ВПТН систем [11]. Кроме того, при моделировании больших ЭЭС реальное время моделирования позволяет значительно повысить продуктивность исследовательской работы [6, 10, 11].

На сегодняшний день в практике исследования ЭЭС преобладают цифровые системы моделирования, предельные возможности которых известны и в основном определяются применяемыми численными методами решения, поэтому при разработке моделей энергетического оборудования исходят из необходимого объема упрощений и допущений [7, 8, 11]. В настоящее время наблюдается тенденция к поиску новых технологий и инженерных решений, обеспечивающих такие ключевые характеристики систем моделирования, как реальное время, отсутствие декомпозиции процессов, неограниченная масштабируемость модели и др. Увеличивается количество работ в области создания гибридных моделирующих комплексов, основанных на использовании разных подходов моделирования [9, 11, 12]. Здесь можно выделить несколько направлений развития. Одним из них является применение различных численных методов – синтез нескольких цифровых комплексов, каждый из которых используется для решения определенного участка ЭЭС с соответствующим шагом расчета [9, 13]. В одной из подсистем моделируемой ЭЭС, где осуществляется воспроизведение электромагнитных процессов, шаг расчета обычно составляет 20 мкс, в то время как время переключения IGBT составляет 1–3 мкс. В другой подсистеме, где осуществляется воспроизведение электромеханических процессов, шаг расчета и соответственно обмен данными между подсистемами в процессе моделирования составляет 50 мкс. Таким образом, бездекомпозиционное моделирование, то есть предполагающее использование одного непрерывного метода решения математической модели ЭЭС и исключающее разделение единого непрерывного спектра нормальных, аварийных и послеаварийных процессов на различные стадии, в полной мере не достигается.

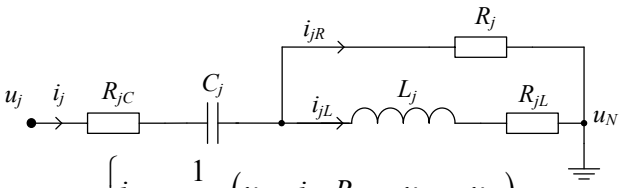
Другим направлением является еще большая гибридизация моделирующих комплексов, которая заключается в использовании нескольких подходов моделирования – физического, аналогового и цифрового. Примером такого моделирующего комплекса является всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС [14, 15].

1. Принципы построения гибридной модели ВПТН

Анализ структуры, специфики функционирования оборудования и ВПТН в целом и указанный комплексный подход позволяют обосновано сформулировать принципы построения гибридной модели ВПТН. Весь спектр значимых процессов в каждом оборудовании ЭЭС, не содержащем коммутационных элементов, полно и достоверно описывается теоретически строго обоснованными и надежно проверенными системами дифференциальных уравнений. Поэтому для трансформаторов связи, фильтров высших гармоник (ФВГ), фазных реакторов и цепи постоянного тока ВПТН обосновывается и синтезируется бездеком-

позиционная трехфазная математическая модель, достаточно полно и достоверно воспроизводящая единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы (рис. 2). Решение данных уравнений осуществляется с помощью способа методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале системы дифференциальных уравнений синтезированной математической модели оборудования. Данный способ заключается в аналоговом решении систем дифференциальных уравнений с помощью интегрирующих звеньев на основании фундаментального закона, определяющего напряжение на конденсаторе $U_c(t)$, равное интегралу от протекающего через него тока $\int i_c(t)$ [16]:

$$U_c(t) = \frac{1}{C}\int i_c(t).$$



$$\begin{cases} i_{jR} = \dfrac{1}{R_j}\cdot\left(u_j - i_j\cdot R_{jC} - u_{jC} - u_N\right) \\ \dfrac{di_{jL}}{dt} = \dfrac{1}{L_j}\cdot\left(i_{jR}\cdot R_j - i_{jL}\cdot R_{jL}\right) \\ i_j = i_{jL} + i_{jR} \\ \dfrac{du_{jC}}{dt} = \dfrac{1}{C_j}\cdot i_j \end{cases}$$

Рис. 2. Структурная схема и система дифференциальных уравнений ФВГ

Применение данного закона определяет отсутствие при таком подходе решения методической ошибки интегрирования в отличие от сугубо цифрового моделирования. Кроме этого, обеспечивается возможность параллельного решения, то есть одновременного (в одном масштабе времени) решения математических моделей оборудования, что снимает проблему последовательного вычисления и синхронизации обмена данными, характерную для цифровых моделирующих комплексов. Таким образом, для осуществления обозначенного способа разрабатывается и используется специализированная параллельная цифро-аналоговая структура решения математической модели оборудования, основу которой составляют решающие (или функциональные) элементы, выполняющие различные математические операции над подведенными к ним переменными. Решающие элементы строятся на основе усилителей постоянного тока, обладающих большими коэффициентами усиления и охваченных глубокой отрицательной обратной связью (рис. 3).

Далее разрабатывается функциональная схема специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры решения математической модели оборудования и проводятся предпроизводственные компьютерные исследования разработанной функциональной схемы. В частности, на рис. 4 представлено сопоставление частотных характеристик, полученных на основе математического описа-

ния и схемы замещения ФВГ, и разработанной модели ФВГ, что подтверждает ее адекватность.

Моделирование различных коммутаций силовых полупроводниковых ключей, а также линейных выключателей и разнообразных коротких замыканий осуществляется на физическом уровне с помощью цифроуправляемых аналоговых ключей (ЦУАК). ЦУАК представляет собой комплементарную пару МОП-транзисторов («металл – оксид – полупроводник»), коммутационные характеристики которых (время коммутации составляет 300 нс [17]) позволяют считать их практически идеальными по сравнению с моделируемыми силовыми полупроводниковыми ключами, линейными высоковольтными выключателями и различными короткими замыканиями.

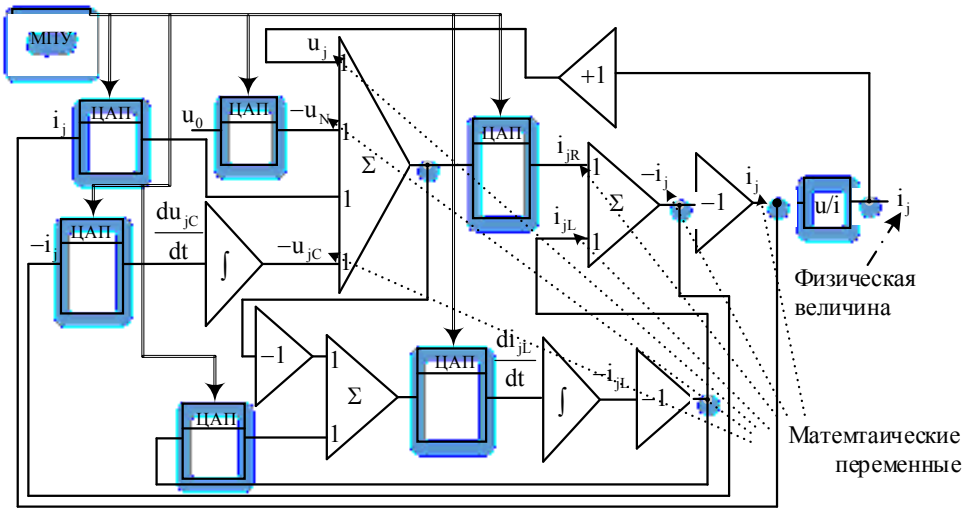


Рис. 3. Специализированная параллельная цифро-аналоговая структура решения математической модели ФВГ:
ЦАП – цифро-аналоговые преобразователи; МПУ – микропроцессорный узел

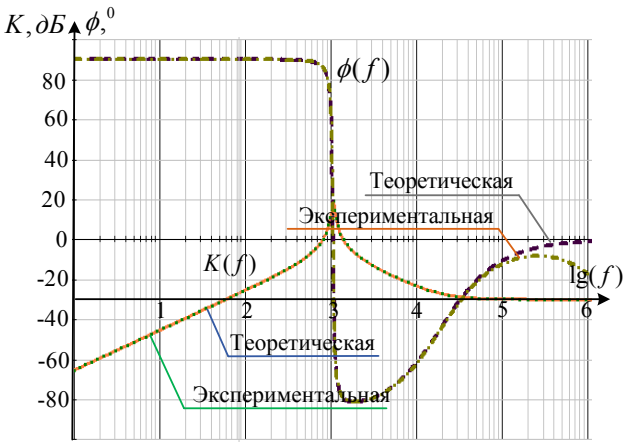


Рис. 4. Сравнение частотных характеристик разработанной модели ФВГ (экспериментальной) и характеристик, полученных на основе математического описания и схемы замещения (теоретических)

При этом ЦУАК – низковольтный аналог моделируемых полупроводниковых ключей, который может быть дополнен соответствующими RC-элементами для обеспечения более адекватного воспроизведения коммутационных процессов.

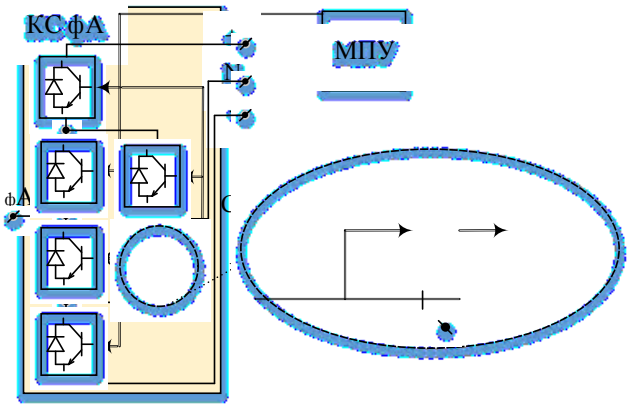


Рис. 5. Структурная схема физической модели одной фазы трехуровневого ПН и схема замещения воспроизводимых силовых ключей:
C_{IGBT}, R_{IGBT}, R_{F_IGBT} – параметры схемы замещения IGBT;
C_D, R_D, R_{F_D} – параметры схемы замещения D

Так, на рис. 5 представлена структурная схема физической модели одной фазы трехуровневого ПН, в которой каждый модуль коммутационной схемы соответствующей фазы (КС), образуемый встречно-параллельным включением IGBT транзистора и обратного диода (D), реализован посредством ЦУАК и схемой замещения воспроизводимых силовых полупроводниковых ключей. Связь математического и физического уровней осуществляется с помощью преобразования непрерывных математических переменных входных/выходных токов специализированных параллельных цифро-аналоговых структур в соответствующие им модельные физические токи посредством преобразователей напряжение/ток (u/i) (рис. 3) [18]. Согласно реальной реализации современных систем автоматического управления и релейной защиты их моделирование целесообразно осуществлять посредством соответствующих алгоритмов, воспроизводимых на цифровом уровне.

Заключительным этапом разработки гибридной модели ВПТН является синтез разработанных математических и физических моделей, а также моделей систем автоматического управления и защиты [19]. В дальнейшем данная модель интегрируется в ВМК РВ ЭЭС для проведения необходимых экспериментальных исследований функционирования ВПТН в составе ЭЭС.

2. Результаты исследования функционирования ВПТН в составе двухмашинной ЭЭС

Согласно [20, 21], для оценки статических и динамических характеристик модели ВПТН достаточным является воспроизведение процессов регулирования, в том числе реверса мощности, а также процессов при коротком замыкании на стороне переменного тока ВПТН. Для проверки адекватности результатов моделирования проведено их сопоставление с данными, полученными в программном комплексе MatLAB Simulink [22].

В рамках данных исследований в ВМК РВ ЭЭС была подготовлена двухмашинная ЭЭС с ВПТН (рис. 6).

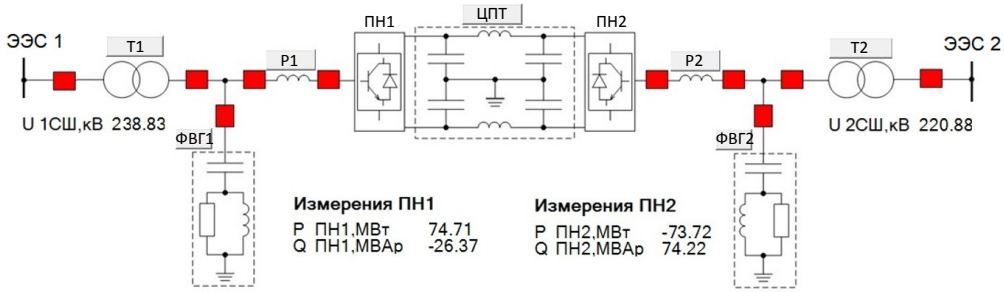
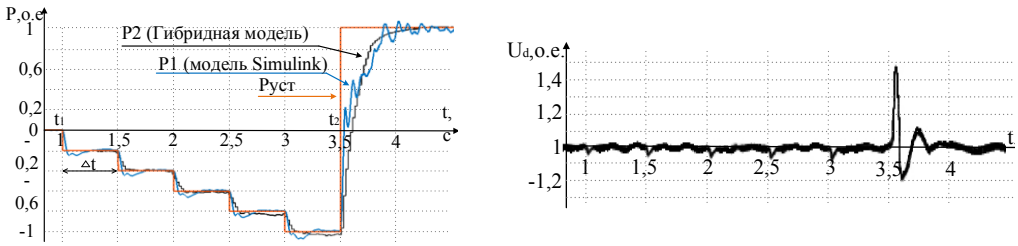


Рис. 6. Динамическая панель наблюдения и управления гибридной модели ВПТН

Моделирование процессов регулирования и реверса мощности. Согласно сценарию в момент времени t_1 осуществляется ступенчатое (с интервалом $\Delta t = 0.5$ сек) изменение уставки активной мощности (5 ступеней), затем в момент времени t_2 направление мощности меняется. Изменение перетока мощности через ВПТН (рис. 7, *а*) осуществляется за время $t \approx 0.5$ сек, что соответствует приводимому в литературе времени изменения перетока мощности через ВПТН [23, 24]. Процесс регулирования и реверса сопровождается колебаниями напряжения на конденсаторной батарее цепи постоянного тока (рис. 7, *б*), уровень которого контролируется системой автоматического управления ВПТН.



а *б*

Рис. 7. Процессы регулирования перетока мощности (*а*)
и напряжение на конденсаторной батарее цепи постоянного тока (*б*)

Моделирование процессов при трехфазном коротком замыкании. Согласно сценарию в момент времени t_1 (рис. 8) происходит трехфазное короткое замыкание на стороне переменного тока со стороны ЭЭС2, которое снимается в момент времени t_2. Ток в месте повреждения возрастает до 2 о.е., напряжение со стороны ЭЭС2 снижается до нуля. При этом согласно алгоритму функционирования системы автоматического управления и релейной защиты при резком увеличении токов происходит «запирание» силовых ключей ПН, уменьшение величины передаваемой через ВПТН мощности практически до нуля, а на стороне ЭЭС1 осуществляется выдача реактивной мощности для поддержания уровня напряжения (рис. 9).

Полученные результаты моделирования демонстрируют возможности ВПТН для регулирования перетока мощности и уменьшения влияния короткого замыкания в объединяемых частях ЭЭС.

Кроме этого, результаты воспроизведения процессов с помощью гибридной модели ВПТН практически совпадают с данными программного комплекса MatLAB Simulink, что говорит о соответствии разработанной модели цифровой. При этом свойства и возможности концепции гибридного моделирования и, как следствие, моделирующего комплекса позволяют использовать разработанную модель в отличие от многих цифровых программных и программно-аппаратных комплексов при моделировании функционирования больших электроэнергетических систем, в том числе в реальном времени и на неограниченном интервале времени.

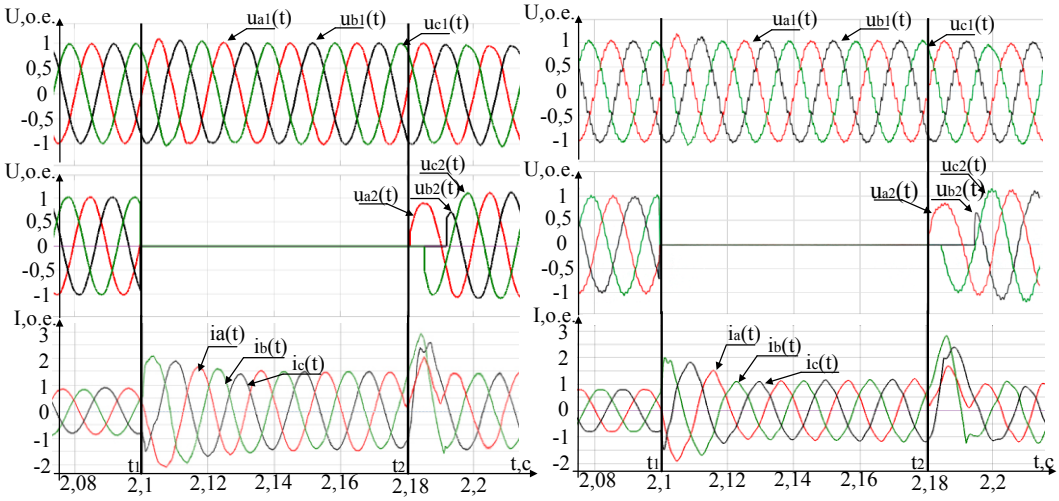


Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений при трехфазном коротком замыкании

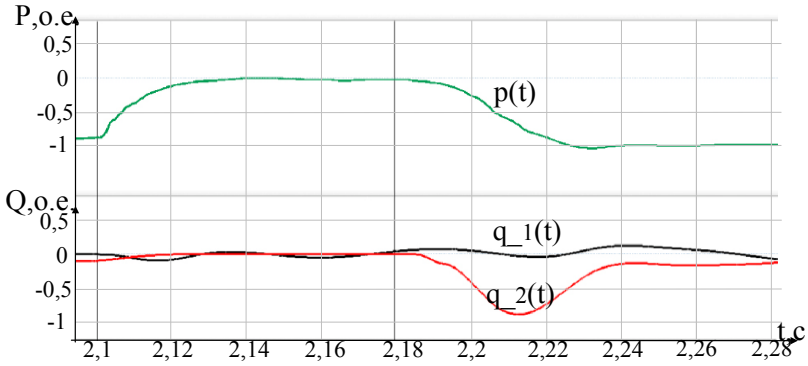


Рис. 9. Осциллограммы активной $p(t)$ и реактивной $q(t)$ мощностей при трехфазном коротком замыкании:
$q_1(t)$ и $q_2(t)$ – реактивные мощности соответственно ПН1 и ПН2 ВПТН

Выводы

1. Представлен краткий анализ существования проблемы получения полной и достоверной информации о процессах в ЭЭС, в том числе содержащих современные ВПТН, в рамках широко используемого цифрового подхода моделирования.

2. Предложен способ решения данной проблемы на основе гибридного подхода моделирования.

3. Представлено описание принципов построения гибридной модели ВПТН.

4. Приведены результаты моделирования процессов регулирования мощности, процессов при коротком замыкании на стороне переменного тока ВПТН, которые демонстрируют ее возможности для регулирования перетока мощности и уменьшения влияния короткого замыкания в объединяемых частях ЭЭС.

5. Результаты воспроизведения процессов с помощью гибридной модели ВПТН практически совпадают с данными программного комплекса MatLAB Simulink, что говорит о соответствии разработанной модели цифровой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alharbi M., Alfaris F.E., Bhattacharya S.* A novel current control strategy for a back-to-back HVDC applications under unbalanced operation conditions // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – Cincinnati, OH, USA: IEEE. – 2017. – С. 1263–1269.
2. *L'Abbate A., Fulli G.* Modeling and application of VSC-HVDC in the European transmission system // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. – 2010. – № 5(1). – С. 8–16.
3. *Setreus J., Bertling L.* Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems // Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. – Rincon, USA: IEEE. – 2008. – С. 1−8.
4. *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, United Kingdom: IET. – 2012. – С. 1−6.
5. *Xu L., Andersen B.R., Cartwright P.* VSC transmission operating under unbalanced AC conditions - analysis and control design // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – № 20(1). – С. 427–434.
6. *Guan M., Xu Z.* Modeling and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Unbalanced Grid Conditions // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – № 27 (12). – С. 4858–4867.
7. *Zhang Y., Gole A.M., Wu W., Zhang B., Sun H.* Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements // IEEE Transaction on power system. – 2013. – № 5(1). – С. 357−366.
8. *Nayak O., Santoso S., Buchanan P.* Power electronics spark new simulation challenges // IEEE Computer Applications in Power. – 2002. – № 15(4). – С. 37−44.
9. *Liu Z.H., Wang Y., Chen J.M., Guo Y.R., Wang X.G., Li Z.Q., D. Du X., Li X.* Modeling and simulation research of large-scale AC/DC hybrid power grid based on ADPSS // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – Kowloon, Hong Kong: IEEE. – 2014. – С. 1–6.
10. Impact of HVDC Stations on Protection of AC Systems / *Zhao X., Priebe T., Curis J-B.* – Research report. Joint Working Group JWG B5/B4.25, CIGRE, 2009. – 84 с.
11. *Zhang Y., Ding H., Kuffel R.* Key Techniques in Real Time Digital Simulation for Closed-loop Testing of HVDC Systems // CSEE journal of power and energy systems. – 2017. – № 3(2). – С. 125–130.
12. *Chen L., Zhang K.-J., Xia Y.-J., Hu G.* Hybrid Simulation of ±500kV HVDC Power Transmission Project Based on Advanced Digital Power System Simulator // Journal of electronic science and technology. – 2013. – № 11(1). – С. 66–71.
13. *Zhou X.X., Han Z.X., Tian F., Li F.L., Li F., Tian X S.* Concept and Mechanism on Full-Process Dynamic Real-Time Simulation of Power System with Parallel-in-Time-Space // International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Hangzhou, China: IEEE. – 2010. – С. 1–7.
14. *Andreev M., Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králík T.* Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – № 12(1). – С. 133–141.
15. *Уфа Р.А., Гусев А.С., Васильев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А.* Проблема адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах и средства ее решения (часть 1) // Известия РАН. Энергетика. – 2017. – № 5. – С. 32–46.
16. *Груздев И.А., Кадомская К.П., Кучумов Л.А.* Применение аналоговых вычислительных машин

в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов / Под ред. Н.И. Соколова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.
17. Low-Voltage, Quad, SPST CMOS Analog Switches MAX4610/MAX4611/MAX4612 / Maxim Datasheet Doc. No. 19–4793. – pp. 1–11.
18. *Тимонтеев В.Н., Величко Л.М., Ткаченко В.А.* Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Радио и связь, 2010. – 112 с.
19. Пат. 2606308C 1 Российская Федерация, МПК G06G 7/62. Устройство для моделирования вставки постоянного тока в энергетических системах / Уфа Р.А., Гусев А.С., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Сулайманова В.А. – № 2015151402; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет; заявл. 01.12.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
20. *Petersson A., Edris A.* Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie // 17 International Conference on AC-DC Power Transmission. – London, UK: IEEE. – 2001. – С. 220–225.
21. *Khatir M., Zidi S.-A., Hadjeri S., Fellah M.-K.* Dynamic performance of a back–to–back HVDC station based on voltage source converters // Journal of Electrical Engineering. – 2010. – № 61(1). – С. 29–36.
22. The MathWorks, Inc, "VSC-Based HVDC Link" [Online]. Available: http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/ infra/html
23. *Волошин М.В., Демидов А.А., Никишин К.А., Титаевская Н.А.* Разработка алгоритмов управления ВПТ от централизованной системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности // Известия НТЦ ЕЭС. – 2015. – № 1(72). – С. 95–108.
24. *Drozdov A., Kiselev A., Suslova O.* Current status and development VSC-based HVDC technologies in power system of Russian Federation // HVDC and Power Electronics International Colloquium. – Agra, India: Cigre. – 2015. – С. 1–9.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2018 г.

THE PRINCIPLES OF THE HYBRID BACK-TO-BACK HVDC MODEL

R.A. Ufa, V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, S.A. Stavitskiy

Tomsk Polytechnic University
30, Lenina avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract. *The hybrid model of back-to-back HVDC is based on the concept of hybrid simulation and includes mathematical models of transformers, harmonic filters, phase reactors, direct current circuit and physical models of a static voltage converter, as well as model of an automatic control and protection system whose operation algorithms implemented at the digital level. The principle of realization of the mathematical models is presented, by example of the harmonic filter model, as well as the physical model of the static voltage converter. The developed hybrid model is integrated into the simulation complex, based on the concept of hybrid simulation, and in which a test scheme of a two-machine electric power system is prepared. In this scheme, the case of a short circuit and power control through the back-to-back HVDC are reproduced. The obtained simulation results coincide with the results obtained in the MatLAB Simulink, which indicates the compliance of the developed model to the digital model. In this case, the properties and capabilities of the concept of hybrid modeling, and as a result the developed model and simulation complex, allow using them in modeling the large scale electric power systems, including in real time and for an unlimited time interval, unlike many digital hard- and software complexes.*

Ruslan A. Ufa, Senior lecturer.
Venera A. Sulaymanova, Postgraduate Student.
Alexander C. Gusev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Sergey A. Stavitskiy, Postgraduate Student.

Keywords: *electric power system, back-to-back HVDC, hybrid modeling technology, hybrid model, digital modeling, analysis, comparison.*

REFERENCES

1. *Alharbi M., Alfaris F.E., Bhattacharya S.* A novel current control strategy for a back-to-back HVDC applications under unbalanced operation conditions // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – Cincinnati, OH, USA: IEEE. – 2017. – P. 1263–1269.
2. *L'Abbate A., Fulli G.* Modeling and application of VSC-HVDC in the European transmission system // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. – 2010. – № 5(1). – P. 8–16.
3. *Setreus J., Bertling L.*Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems // Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. – Rincon, USA: IEEE. – 2008. – P. 1−8.
4. *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, United Kingdom: IET. – 2012. – P. 1−6.
5. *Xu L., Andersen B.R., Cartwright P.* VSC transmission operating under unbalanced AC conditions – analysis and control design // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – № 20(1). – P. 427–434.
6. *Guan M., Xu Z.* Modeling and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Unbalanced Grid Conditions // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – № 27 (12). – P. 4858–4867.
7. *Zhang Y., Gole A.M., Wu W., Zhang B., Sun H.* Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements // IEEE Transaction on power system. – 2013. – №. 5(1). – P. 357−366.
8. *Nayak O., Santoso S., Buchanan P.* Power electronics spark new simulation challenges // IEEE Computer Applications in Power. – 2002. – № 15(4). – P. 37−44.
9. *Liu Z.H., Wang Y., Chen J.M., Guo Y.R., Wang X.G., Li Z.Q., D. Du X., Li X.* Modeling and simulation research of large-scale AC/DC hybrid power grid based on ADPSS // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – Kowloon, Hong Kong: IEEE. – 2014. – P.1–6.
10. Impact of HVDC Stations on Protection of AC Systems / *Zhao X., Priebe T., Curis J-B.* – Research report. Joint Working Group JWG B5/B4.25, CIGRE, 2009. – 84 p.
11. *Zhang Y., Ding H., Kuffel R.* Key Techniques in Real Time Digital Simulation for Closed-loop Testing of HVDC Systems // CSEE journal of power and energy systems. – 2017. – № 3(2). – P. 125–130.
12. *Chen L., Zhang K.-J., Xia Y.-J., Hu G.* Hybrid Simulation of ±500kV HVDC Power Transmission Project Based on Advanced Digital Power System Simulator // Journal of electronic science and technology. – 2013. – № 11(1). – P. 66–71.
13. *Zhou X.X., Han Z.X., Tian F., Li F.L., Li F., Tian X S.* Concept and Mechanism on Full-Process Dynamic Real-Time Simulation of Power System with Parallel-in-Time-Space // International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Hangzhou, China: IEEE. – 2010. – P. 1–7.
14. *Andreev M., Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králík T.* Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – № 12(1). – P. 133–141.
15. *Ufa R.A., Gusev A.S., Vasilev A.S., Sulaymanov A.O., Suvorov A.A.* Challenges for adequate simulation of Back-To-Back High Voltage Direct Current link in electric power system (Part 1) // «Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering» Journal. – 2017. – № 5. – P. 32–46.
16. *Gruzdev I.A., Kadomskaya K.P., Kuchumov L.A.* Primenenie analogovykh vychislitel'nykh mashin v ehnergeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya perekhodnykh protsessov / pod red. N.I. Sokolova. – Izd. 2-e, pererab. i dop. – M.: Energiya, 1970. – 400 p.
17. Low-Voltage, Quad, SPST CMOS Analog Switches MAX4610/MAX4611/MAX4612 / Maxim Datasheet Doc. No. 19–4793. – pp. 1–11.
18. *Timonteev V.N., Velichko L.M., Tkachenko V.A.* Analogovye peremnozhiteli signalov v radioehlektronnoj apparature. – M.: Radio i svyaz', 1982. – 112 p.
19. Pat. 2606308S 1 Rossijskaya Federatsiya, MPK G06G 7/62. Ustrojstvo dlya modelirovaniya

vstavki postoyannogo toka v ehnergeticheskikh sistemakh / Ufa R.A., Gusev A.S., Borovikov YU.S., Sulajmanov A.O., Andreev M.V., Ruban N.YU., Suvorov A.A., Sulajmanova V.A. – № 2015151402; zayavitel' i patentoobladatel' Tomskij politekhnicheskij universitet; zayavl. 01.12.2015; opubl. 10.01.2017, Byul. № 1.

20. *Petersson A., Edris A.* Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie // 17 International Conference on AC-DC Power Transmission. – London, UK: IEEE. – 2001. – P. 220–225.
21. *Khatir M., Zidi S.-A., Hadjeri S., Fellah M.-K.* Dynamic performance of a back–to–back HVDC station based on voltage source converters // Journal of Electrical Engineering. – 2010. – № 61(1). – P. 29–36.
22. The MathWorks, Inc, "VSC-Based HVDC Link" [Online]. Available: http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/ infra/html
23. *Voloshin M.V., Demidov A.A., Nikishin K.A., Titaevskaya N.A.* Algorithms development for HVDC back-to-back link control from centralized load frequency control system // Proceedings of the STC UPS. – 2015. – № 1 (72). – P. 95–108.
24. *Drozdov A., Kiselev A., Suslova O.* Current status and development VSC-based HVDC technologies in power system of Russian Federation // HVDC and Power Electronics International Colloquium. – Agra, India: Cigre. – 2015. – P. 1–9.