

Моделирование вставки постоянного тока на преобразователях напряжения в режиме реального времени на RTDS

Представлены результаты разработки и исследования модели вставки постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН) с использованием вычислительного комплекса *RTDS*, работающей в условиях объединения двух изолированных энергосистем. Описаны структуры и принципы действия системы регулирования и основных защит ВПТН. Представлены результаты расчета переходных процессов при различных воздействиях со стороны примыкающих энергосистем.

Ключевые слова: вставка постоянного тока на преобразователях напряжения, моделирование в режиме реального времени, система регулирования и защиты, волновая модель.

1. Введение

В настоящее время передачи и вставки постоянного тока на преобразователях напряжения получают все более широкое применение в энергосистемах. Они могут быть использованы для решения таких задач, как соединение несинхронных электрических сетей различных частот, передача электроэнергии по кабельным линиям постоянного тока, в том числе через водные преграды, передача энергии с ветроэлектрических установок в открытом море, энергоснабжение инфраструктуры островов и морских нефтяных и газовых платформ, удаленных от центральных электрических сетей.

В настоящее время в ЭЭС России сооружается и планируется к сооружению ряд объектов ВПТН, например, ПС 220 кВ Могоча, ПС 220 кВ Хани.

При проектировании и оценке эффективности работы ВПТН требуется исчерпывающий анализ взаимодействия ВПТН с примыкающей сетью. Один из способов проведения такого анализа – моделирование в системах реального времени. Такое моделирование должно предшествовать системным испытаниям, что позволяет снизить материальные риски, связанные с проведением системных испытаний в реальной сети. Тестирование в режиме реального времени также может быть использовано при выборе оптимальной структуры системы регулирования ВПТН, работающего в условиях реальной сети, отладка и оптимизация алгоритмов регулирования, выбор настроек регуляторов и уставок систем защит.

Данная статья посвящена результатам разработки модели ВПТН с помощью программного комплекса *Real Time Digital Simulator (RTDS)*. Указаны особенности моделирования силового оборудования ВПТН в системе реального времени, связанные с расчетом участков схемы с разными шагами. Описаны структура и принципы действия системы регулирования и защит моделируемой ВПТН. Показаны результаты тестирования модели с параметрами схемы ВПТН ПС 220 кВ Могоча при различных воздействиях со стороны энергосистемы при упрощенной модели примыкающей сети.

2. RTDS – краткий обзор

Вычислительный комплекс RTDS разработан для расчетов различных переходных процессов в энергосистемах в реальном времени. Аппаратная часть комплекса включает в себя стойки, на каждой из которых могут быть установлены от 1 до 6 процессорных карт типа PB5, платы связи Inter Rack Communication (IRC), с помощью которых осуществляется обмен информацией между разными стойками комплекса в процессе расчета. При моделировании большой энергетической системы ее можно разделить на подсистемы, расчеты которых будут выполняться на разных процессорных картах и стойках вычислительного комплекса. Также в аппаратную часть входят модули ввода — вывода аналоговых и дискретных сигналов, обеспечивающие подключение внешних устройств, в частности, реальных систем регулирования и защиты, средства для поддержки высокоскоростных протоколов (по стандартам МЭК 61850-9-2, МЭК 61850-8-1), устройства, обеспечивающие GPS-синхронизацию.

Программное обеспечение представляет собой графический интерфейс для ввода параметров модели и вывода результатов расчетов, компилятор для создания модели, загружаемой в вычислительный комплекс, снабженный библиотекой моделей типовых элементов энергосистем.

Для расчета электромагнитных переходных процессов в вычислительном комплексе используется алгоритм Г. Доммеля [1] с преобразованием исходной схемы в эквивалентную схему замещения, состоящую из источников тока и проводимостей.

3. Особенности моделирования ВПТН на RTDS

Характерная конструкция ВПТН, состоящая из преобразователей напряжения, преобразовательных трансформаторов, фильтров на стороне переменного тока, фазных реакторов, конденсаторов на стороне постоянного тока, представлена на рис. 1.

Мощные преобразователи напряжения обычно строятся на основе мостовых схем, состоящих из высоковольтных запираемых вентилях, управляемых с высокой (до нескольких тысяч герц) частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Поэтому процессы в преобразователе напряжения должны рассчитываться с шагом 1–3 мкс, в то время как для расчета переходных процессов в примыкающих энергосистемах нет необходимости устанавливать такой малый шаг. При моделировании в режиме реального времени нужно учитывать это обстоятельство, чтобы правильно распределить ресурсы вычислительной системы.

В процессе подготовки модели ВПТН для расчета с помощью RTDS ее силовая часть была разделена на несколько подсистем: подсистемы преобразователей напряжения, моделируемые с малым шагом 1,5 мкс, и примыкающие энергосистемы, моделируемые с большим шагом 50 мкс (рис. 1). Для моделирования силового оборудования преобразователей напряжения применяются элементы библиотеки *small-dt*, разработанной специально для расчета процессов в преобразователях на IGBT и GTO с высокой частотой коммутации.

Участки системы, моделируемые с разными шагами, отделяются при помощи элементов, реализованных в виде волновых моделей, что позволяет решать узловые уравнения для каждого из этих участков независимо друг от друга.

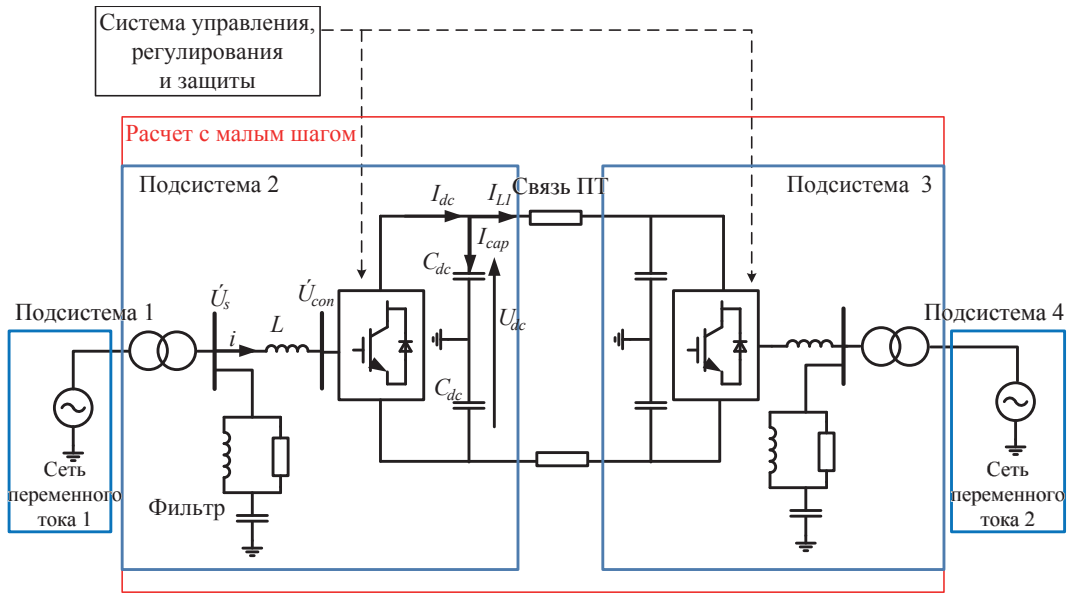


Рис. 1. Базовая конфигурация вставки постоянного тока на преобразователях напряжения

В нашем случае роль такого элемента выполняет преобразовательный трансформатор, индуктивность и искусственно вводимая емкость которого представляют собой распределенные параметры. Учитывая, что время пробега волны принято равным $1,8\Delta T_{l_{arg e}}$, где $\Delta T_{l_{arg e}}$ – шаг моделирования примыкающей энергосистемы, а потери в линии не учитываются, емкость схемы замещения трансформатора можно оценить по выражению $\frac{C = (1,8\Delta T_{l_{arg e}})^2}{L}$, где L – индуктивность схемы замещения трансформатора.

Для того чтобы избежать ситуации, когда значение искусственно вводимой емкости становится слишком большим и она начинает влиять на результаты расчета, индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора должно быть не менее 0,05 о. е.

Для моделирования с малым шагом выпрямительно-инверторного комплекса ВПТН в целом мощности одного процессора может не хватить. Это связано с количеством узлов схемы (предельное число однофазных узлов для одного процессора – 72), а также с количеством переменных, отслеживаемых в реальном времени (для одного процессора предельное число составляет 24). В этом случае участок энергосистемы ВПТН, моделируемый с малым шагом, разделяется на две подсистемы (см. рис. 1), каждая из которых привязывается к разным процессорам. Для связи между подсистемами со стороны постоянного тока должна быть использована модель линии с распределенными параметрами. При моделировании передачи это будет воздушная или кабельная линия с реальными параметрами, при моделировании вставки ее необходимо заменить фиктивной короткой линией. Параметры модели этой линии выбираются так, чтобы время пробега волны было равно малому шагу моделирования. Таким образом, минимальная длина линии составляет 430–770 м, в зависимости от шага моделирования в диапазоне от 1,4 до 2,5 мкс.

При расчете электромагнитных переходных процессов в цепях, содержащих транзисторные и тиристорные вентили, обычно вентиль в закрытом состоянии замещает-

ся малой проводимостью, а в открытом – проводимостью большой величины. В этой ситуации при изменении коммутационного состояния схемы изменяется ее матрица проводимости. Поэтому для расчета схемы с большим числом вентилях с малым шагом порядка 1–3 мкс в реальном времени необходим комплекс, обладающий большой вычислительной мощностью.

Для решения этой проблемы в RTDS применен альтернативный метод моделирования ключей [2]. Ключ в разомкнутом состоянии представляется емкостью и активным сопротивлением, а в замкнутом состоянии – индуктивностью. С учетом алгоритма Г. Доммеля можно преобразовать контуры, представляющие замкнутый и разомкнутый ключ, в параллельно соединенные источники тока и проводимости (рис. 2).

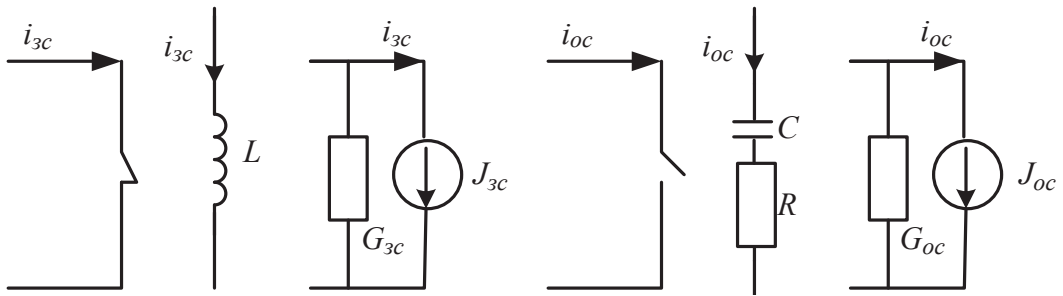


Рис. 2. Схемы замещения при моделировании замкнутого и разомкнутого ключа

Параметры R , C и L выбираются таким образом, что при изменении состояния ключа проводимости G_{zc} и G_{oc} будут равны между собой, а коммутационное состояние ключа определяет величина источника тока. При этом нет необходимости пересчитывать матрицу проводимости при изменении коммутационного состояния ключей, что позволяет сократить объем вычисления.

Отметим, что соотношение между сопротивлениями ключевых элементов в закрытом и открытом состоянии определяется выражением $\frac{1}{(2\pi f \Delta T)^2}$, где ΔT – шаг моделирования, f – основная частота в Гц. Следовательно, для осуществления корректного моделирования необходимо иметь шаг на минимальном уровне 1,4–15 мкс.

При изменении коммутационного состояния ключа происходит обмен энергией между емкостью и индуктивностью, часть которой рассеивается в активном сопротивлении. Это приводит к увеличению потерь моделируемого преобразователя напряжения по сравнению с потерями в реальном преобразователе, что особенно проявляется при увеличении частоты ШИМ.

3. Модели систем регулирования и защит ВПТН

3.1. Система регулирования ВПТН

Схема системы управления для каждого из двух преобразователей симметрична и состоит из следующих основных блоков: блока фазовой автоподстройки частоты (PLL), регулятора активной мощности, регулятора напряжения на шинах переменного тока, регулятора реактивной мощности, регулятора напряжения на шинах постоянного тока. На рис. 3 представлена общая структура системы регулирования преобразователя напряжения.

В системе предусмотрены варианты изменения режимов работы оборудования преобразователя напряжения. При помощи переключателя Mode можно выбрать задачу, решаемую ВПТН. Если переключатель sw_1 находится в положении 1, преобразователь стабилизирует напряжение в точке подключения. Во втором положении переключателя sw_1 преобразователь является источником реактивной мощности, определяемой оператором (Q_{ref}) исходя из нужд системы электроснабжения.

В системе реализована концепция векторного управления. Векторная система предусматривает перевод величин напряжений и токов из трехфазной системы координат во вращающуюся систему dq координат. Такая трансформация была подробно описана в [3]. Покажем основные соотношения, определяющие функционирование векторной системы регулирования преобразователя напряжения.

Уравнение баланса напряжений на стороне переменного тока запишем в виде:

$$L \frac{d\dot{i}}{dt} = -R\dot{i} + \dot{U}_{con} - \dot{U}_s, \quad (1)$$

где \dot{U}_s – вектор напряжения сети переменного тока;

\dot{U}_{con} – вектор напряжения преобразователя;

R и L – суммарные активное сопротивление и индуктивность фазного реактора и трансформатора.

Выражение (1) перепишем в системе dq координат [3]:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= -Ri_d + \omega Li_q - u_{ds} + u_{dcon}; \\ L \frac{di_q}{dt} &= -Ri_q + \omega Li_d - u_{qs} + u_{qcon}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

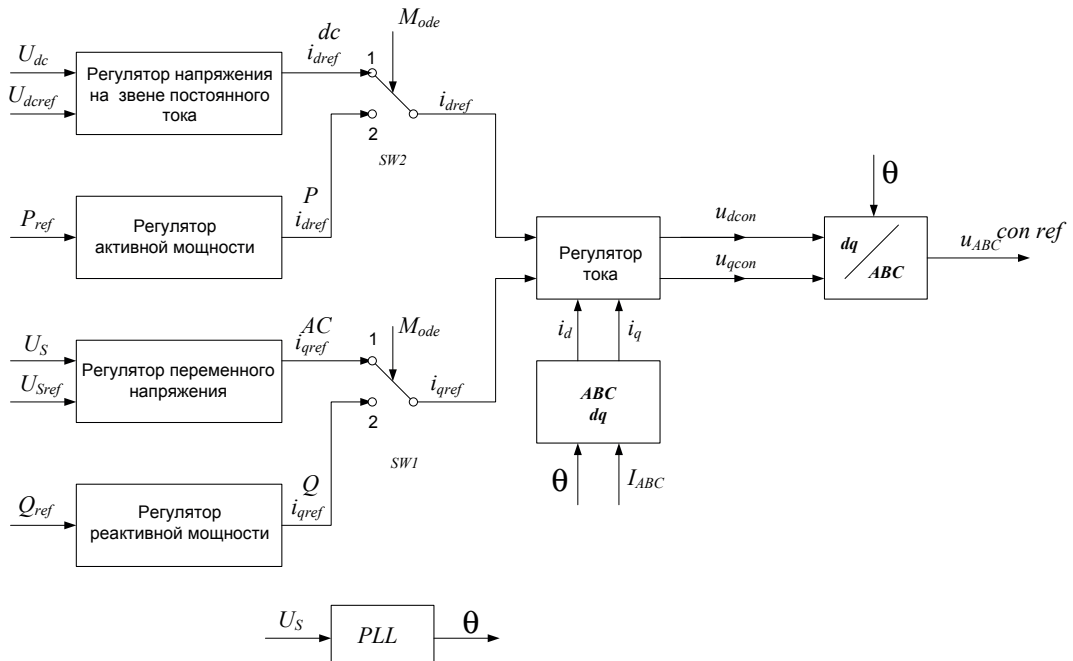


Рис. 3. Общая структура системы регулирования преобразователя напряжения

Уравнение баланса токов на стороне постоянного тока

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + I_L, \tag{3}$$

где I_{dc} – ток преобразователя на стороне постоянного тока;

I_L – ток в линии постоянного тока;

C – емкость на стороне постоянного тока.

Мощность на стороне постоянного тока определяется выражением $P_{dc} = I_{dc} U_{dc}$.

Мощность на стороне переменного тока можно определить как

$$p = u_{ds} i_d + u_{qs} i_q. \tag{4}$$

Поскольку изображающий вектор напряжения сети направлен по оси d , то в установившемся режиме $u_{ds} = u$, $u_{qs} = 0$, выражения для активной и реактивной мощностей можно определить в виде

$$\left. \begin{aligned} p &= u_{ds} i_d; \\ q &= -u_{ds} i_q. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Рассмотрим функционирование отдельных блоков системы регулирования.

Блок фазовой автоподстройки частоты предназначен для синхронизации вращающейся dq -системы координат с изображающим вектором напряжения сети \dot{U}_s . При этом определяется угол θ между неподвижной осью α и вращающейся осью d [3]. Схема блока представлена на рис. 4.

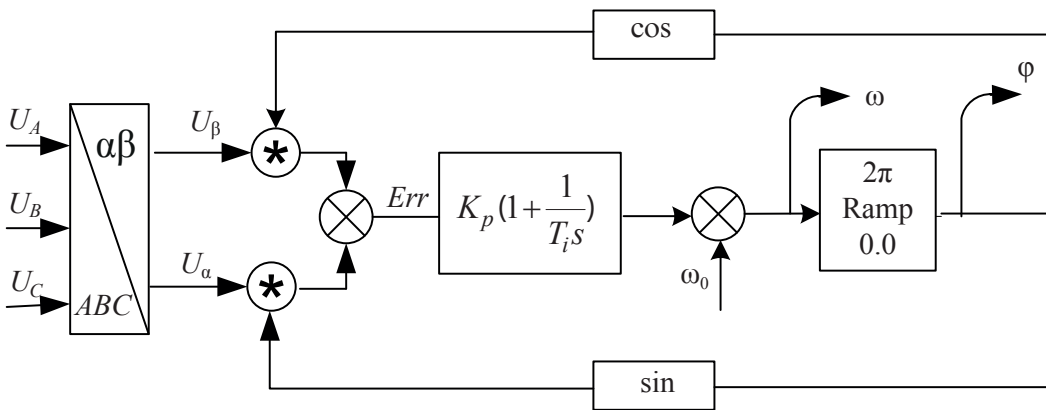


Рис. 4. Схема блока фазовой автоподстройки частоты

Измеренное фазное напряжение системы (U_A, U_B, U_C) преобразуется при помощи преобразования Кларка к неподвижной системе координат $\alpha\beta$. Ошибка определяется как $Err = -U_\alpha \sin \theta + U_\beta \cos \theta = \sin(\theta - \theta')$. Благодаря наличию ПИ-регулятора ошибка в установившемся режиме равна нулю. Выходной сигнал θ имеет пилообразную форму и изменяется от 0 до 2π .

Поведение системы в динамике в dq координатах описывается выражением (2). В уравнениях напряжения для каждой оси содержатся слагаемые ωLi_q и ωLi_d , которые определяют взаимосвязь между проекциями вектора напряжения преобразова-

теля на оси d и q . Чтобы компенсировать влияние контуров регулирования по осям d и q друг на друга используется регулятор тока с перекрестными связями. Перепишем выражения (2) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_{dcon} &= L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + u_{ds}; \\ u_{qcon} &= L \frac{di_q}{dt} + Ri_q - \omega Li_d + u_{qs}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Напряжения $\Delta u_{dcon} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d$, $\Delta u_{qcon} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q$ регулируются при помощи воздействия на dq составляющие тока. Сигнал управления поступает от пропорционально-интегральных регуляторов: $\Delta u_{dcon} = (i_{dref} - i_d) \left(K_p + \frac{1}{T_I S} \right)$; $\Delta u_{qcon} = (i_{qref} - i_q) \left(K_p + \frac{1}{T_I S} \right)$, где i_{dref} , i_{qref} – уставки по dq составляющим тока, i_d , i_q – измеренные значения dq составляющих тока, K_p и T_I – коэффициент усиления и постоянная времени ПИ-регуляторов. Структурная схема регулятора тока представлена на рис. 5.

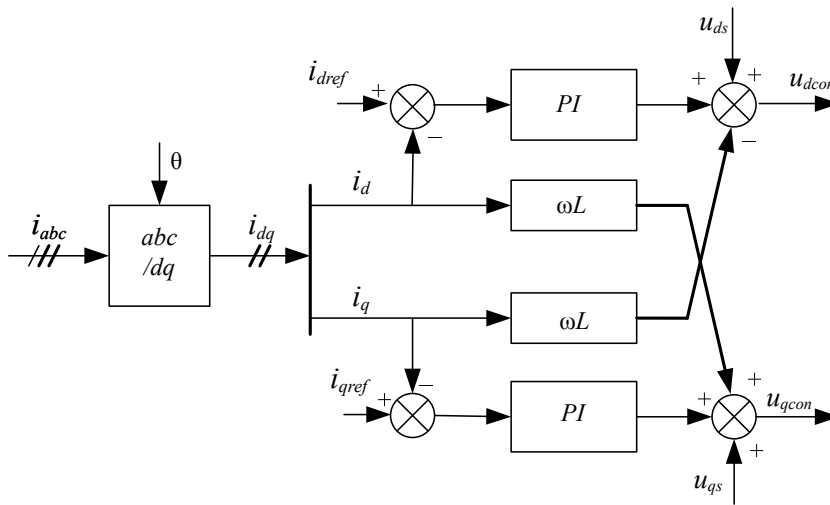


Рис. 5. Структурная схема регулятора тока

Регуляторы напряжения на КБ и на стороне переменного тока реализованы по ПИ-закону. На вход регулятора напряжения на КБ подается измеренное напряжение и напряжение уставки на КБ, выходом регулятора является уставка для регулятора тока i_{dref} . На вход канала регулирования напряжения на стороне переменного тока подается измеренное напряжение и напряжение уставки, выходом регулятора является уставка для регулятора тока i_{qref} .

На входы блоков регуляторов активной и реактивной мощности поступают уставки по активной и реактивной мощности P_{ref} , Q_{ref} и сигнал напряжения U_{ds} . Регуляторы активной и реактивной мощностей реализуются по соотношениям (5) и формируют уставки для регуляторов тока i_{dref}^P и i_{qref}^Q .

3.2. Система защит ВПТН

Основными защитами преобразователей напряжения являются максимальная токовая защита и защита по напряжению КБ на стороне постоянного тока.

Максимальная токовая защита предназначена для выявления токов в вентилях преобразователя, значение которых превышает расчетный ток. Это наиболее быстродействующая защита из комплекса программных и аппаратных защит. На каждом такте работы программы производится сравнение измеренных токов фаз мостов и тока уставки блока защиты. Если в течение заданного количества тактов (от 1 до 3) измеренное значение тока превышает значение уставки, формируется сигнал срабатывания максимальной токовой защиты и подается команда на снятие импульсов управления вентилей. Преобразователь отключается на паузу АПВ.

Защита от перенапряжений на КБ реализуется следующим образом.

Если измеренное напряжение на КБ превышает уставку защиты в течение заданного количества тактов, формируется сигнал срабатывания защиты по напряжению на КБ, подается команда на снятие импульсов управления вентилей. Если рост напряжения продолжается после блокирования импульсов управления, формируется команда на отключение выключателя ВПТН.

4. Тестирование модели ВПТН

Тестирование модели с параметрами схемы ВПТН ПС 220 кВ Могоча проводилось при различных воздействиях со стороны энергосистемы (короткие замыкания, просадки напряжения, изменение схемно-режимных условий), а также при изменении уставок системы регулирования. Примыкающие линии со стороны выпрямителя и инвертора представлены эквивалентной П-схемой замещения с параметрами $L_{\text{яч}} = 90$ км, $X_L = 0,33$ Ом/км, $b = 3,38 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Исследования показали, что при трехфазных и однофазных коротких замыканиях в примыкающих сетях со стороны выпрямителя и инвертора создаются условия для срабатывания максимальной токовой защиты вентилей. На рис. 6–8 представлены осциллограммы действующего значения напряжения сети, активной, реактивной мощностей преобразователей, токи в вентилях преобразователей и сигналы защит при однофазном КЗ со стороны инвертора. Максимальная токовая защита была настроена на срабатывание на отключение импульсов преобразователя при превышении тока в вентилях в течение 1 расчетного такта значения 3,5 кА. На время паузы АПВ фильтры преобразователя не отключаются. После паузы АПВ происходит разблокирование импульсов мостов, и преобразователь снова включается в работу.

Несимметричные режимы исследованы при подключении однофазной нагрузки различной величины. Варьированием величины однофазного шунта было установлено, что в режиме передаваемой мощности, близкой к максимальной, работоспособность сохраняется при просадке напряжения в одной из фаз на 15 %. При дальнейшем увеличении несимметрии из-за неравномерности распределения тока в фазах моста работает максимальная токовая защита. При снижении исходной мощности вставки допустимый коэффициент несимметрии увеличивается примерно обратно пропорционально изменению мощности.

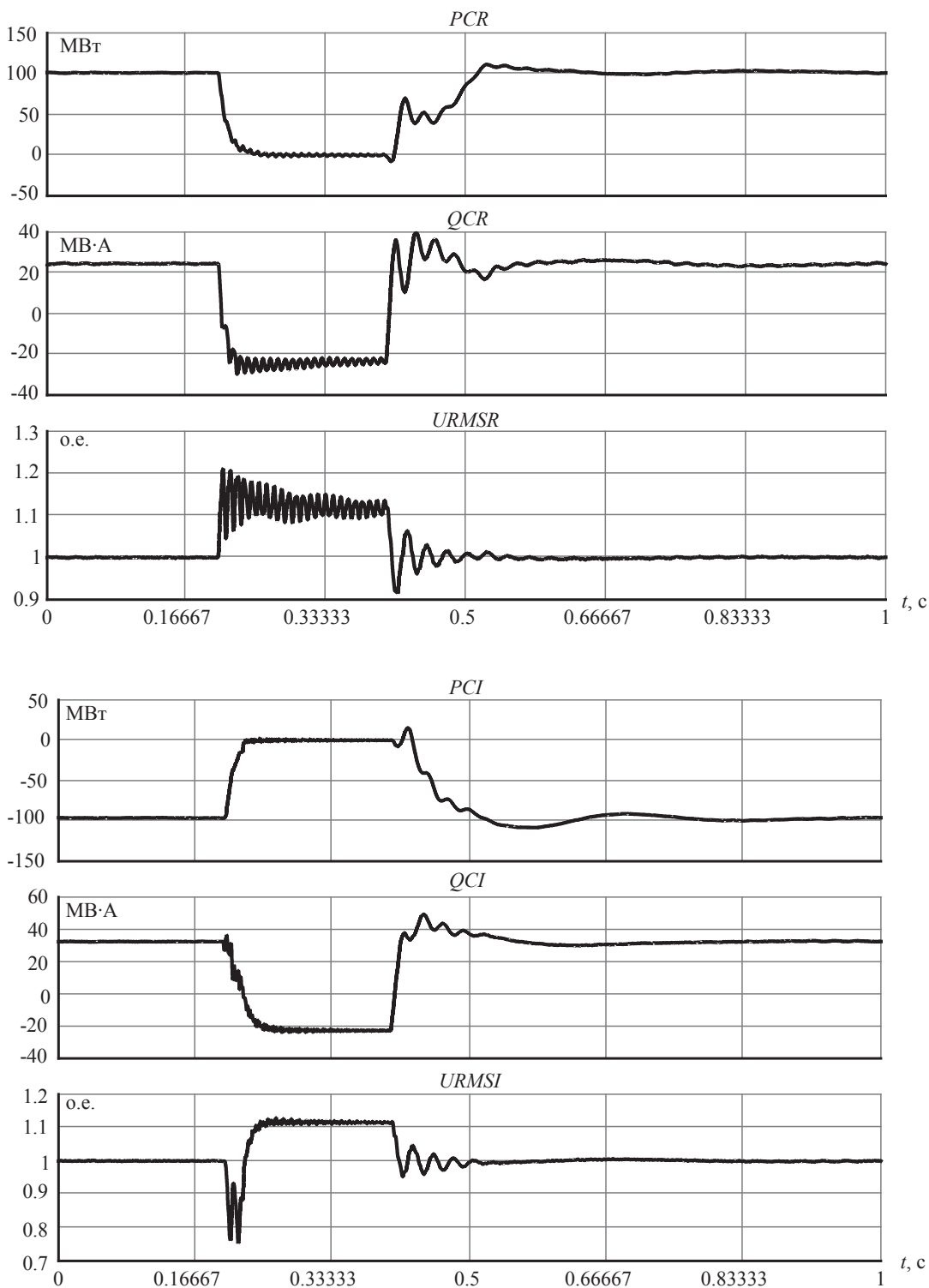


Рис. 6. Осциллограммы при однофазном кз со стороны инвертора:
 $PCR(I)$ – активная мощность выпрямителя (инвертора), MBт;
 $QCR(I)$ – реактивная мощность выпрямителя (инвертора), MB·A;
 $URMSR(I)$ – действующее значение напряжения выпрямителя (инвертора), о. е.

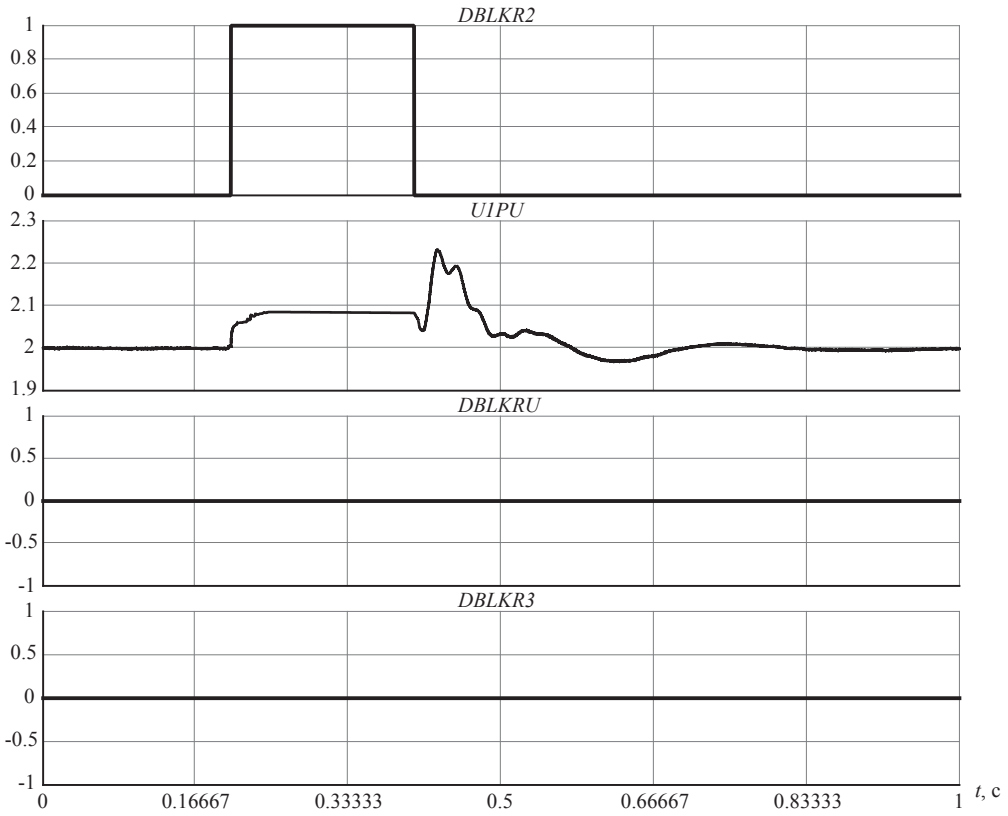


Рис. 7. Осциллограммы при однофазном кз со стороны инвертора:
DBLKR2 – сигнал максимальной токовой защиты инвертора;
UIPU – напряжение на КБ постоянного тока, о. е.;
DBLKR3 – сигнал максимальной токовой защиты выпрямителя;
DBLKR4 – сигнал защиты от повышения напряжения на КБ

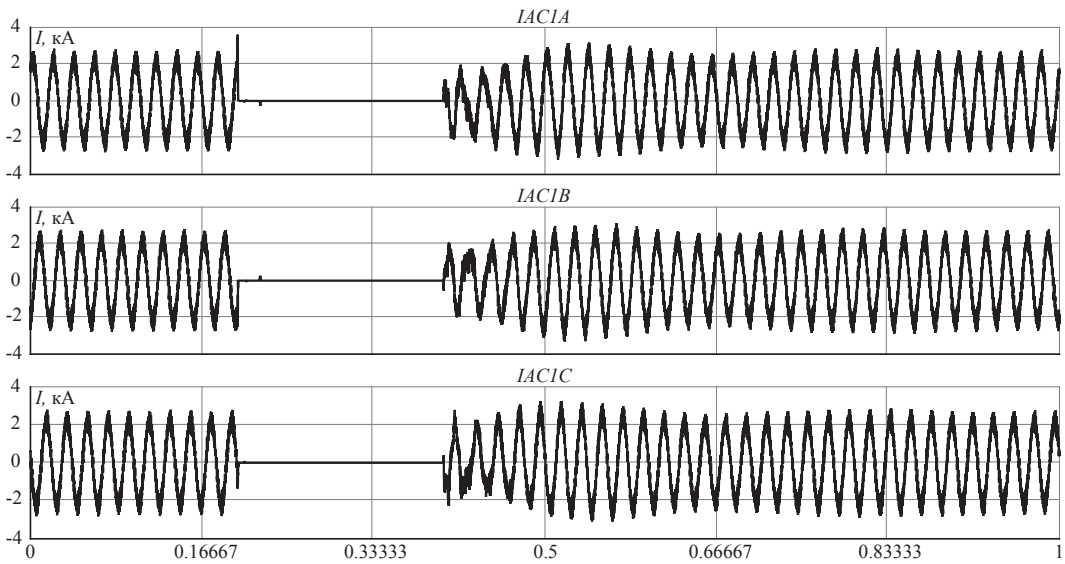


Рис. 8. Токи в фазах реактора инвертора при однофазном кз со стороны инвертора

5. Выводы

При подготовке модели ВПТН для расчета с помощью RTDS с целью оптимального использования вычислительных ресурсов ее силовая часть делится на несколько подсистем, расчеты в которых проводятся с различным шагом. Участки системы, моделируемые с разными шагами, отделяются при помощи элементов, реализованных в виде волновых моделей.

Представлена структура модели системы регулирования ВПТН, состоящая из блока автоподстройки частоты, регулятора тока, регуляторов напряжения на сторонах постоянного и переменного тока, регуляторов активной и реактивной мощностей.

Основными защитами преобразователей напряжения являются максимальная токовая защита вентиля и защита по напряжению конденсаторной батареи на стороне постоянного тока. Эти защиты работают при возмущениях в примыкающих сетях переменного тока.

Выполнены расчеты процессов при коротких замыканиях в сетях переменного тока со сторон выпрямителя и инвертора. Показано, что при этом наиболее вероятным является срабатывание максимальной токовой защиты.

Исследована работа ВПТН при несимметрии сети. Показано, что в режиме максимальной мощности допустимая несимметрия составляет не более 15 %. Превышение несимметрии приводит к токовой перегрузке и срабатыванию максимальной токовой защиты.

Список литературы

1. *Dommel H. W.* Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, April, 1969.
2. *Pejovic P., Maksimovic D.* A Method of fast time-domain simulation of Networks and Switches, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 9, N 4, p. 449–456, July, 1994.
3. *Amirnasir Yazdani, Reza Iravani.* Voltage-Sourced Converters in Power Systems, Wiley-IEEE press, 2010.

Сулова Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, главный специалист научно-технического отдела Научно-технического центра Единой энергетической системы (ОАО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: suslova_o@ntcees.ru

Suslova O. V.

Real time simulation of VSC back-to-back using RTDS

Results of development and study of VSC back-to-back connecting two isolated power systems in real time environment using computer complex Real Time Digital Simulator (RTDS) are given. The control and protection systems for VSC back-to-back are conceptually are described. The transients in various faults in adjacent power systems are given.

Key words: VSC back-to-back, real time simulation, control and protection system, travelling wave model.