

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕЖСИСТЕМНОЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ЛЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЫКАЮЩИМИ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ РАЗНЫХ ЧАСТОТ

Ю.И. Хохлов  
г. Челябинск, ЮУрГУ

В среде MATLAB/SIMULINK представлена полная модель межсистемной компенсированной ЛЭП постоянного тока с двенадцатифазными выпрямителем и инвертором, работающими в режимах с одноступенчатой искусственной коммутацией тиристорov. В общем случае примыкающие энергосистемы имеют разную частоту напряжения. Разработанная модель позволяет исследовать как квазиустановившиеся, так и переходные (рабочие и аварийные) процессы в комплексе. Показана возможность работы выпрямительной и инверторной подстанций как в зоне потребления, так и в зоне генерирования реактивной мощности, приведены спектральные характеристики токов и напряжений, описан аварийный режим при опрокидывании инвертора на инверторной подстанции. В более простом частном случае модель отвечает некомпенсированной ЛЭП.

Развитие мировой энергетики неизбежно идет по пути создания единых крупных национальных и транснациональных электроэнергетических систем. Новый рыночный механизм хозяйствования усиливает этот процесс и повышает требования по увеличению пропускной способности и управляемости межсистемных линий электропередач (ЛЭП). Наряду с развивающимся в настоящее время на основе силовой электроники направлением применения гибких электропередач переменного тока (Flexible AC Transmission Systems - FACTS), большие перспективы имеют передачи (ППТ) и вставки (ВПТ) постоянного тока. К настоящему времени в разных странах мира в эксплуатации находится более 50 ППТ и ВПТ. В ближайшие годы планируется ввести в эксплуатацию еще около 20 ППТ и ВПТ [1].

Внедрение современных ППТ и ВПТ позволяет:

- уменьшить затраты и потери по передаче энергии на большие расстояния;
- снизить максимальные значения генерирующей мощностей в объединяемых энергосистемах за счет управляемого энергообмена при разнесенных во времени пиковых значениях нагрузки и генерации;
- объединить энергосистемы с различной частотой напряжения;
- ограничить распространение аварийных процессов из одной энергосистемы в другую;

- повысить эффективность работы систем распределенной генерации, в том числе возобновляемых источников энергии, за счет возможности организации управления выдачей электроэнергии от этих источников в единую сеть (ветроагрегаты, солнечные батареи и др.);

- повысить устойчивость и надежность работы систем.

Новые ППТ и ВПТ строятся как на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, так и на основе тиристорov. Так первая межсистемная ППТ мощностью 180 МВт (Direct-link) на полностью управляемых приборах (IGBT) введена в эксплуатацию в 2000 году в Австралии. Недостатки некомпенсированных тиристорных ЛЭП привели к необходимости изучения их работы в компенсированных режимах, использующих одноступенчатую искусственную коммутацию тиристорov с помощью конденсаторных батарей. Глубокий анализ компенсированных ЛЭП постоянного тока, выполненный, в частности, в нашей стране [2], позволил в последнее время фирме АББ реализовать компенсированную ВПТ Аргентина - Бразилия мощностью 1000 МВт [1]. Появившиеся новые программные продукты, такие как MATLAB, позволяют проводить более углубленные исследования как квазиустановившихся, так и переходных рабочих и аварийных процессов, а следовательно, и оптимизировать работу столь сложных систем.

В данной статье приводятся сведения о разработке в пакете MATLAB/SIMULINK модели компенсированной ЛЭП постоянного тока, связывающей энергосистемы с разной частотой переменного напряжения. В модели реализован двенадцатифазный режим преобразования как на выпрямительной, так и на инверторной подстанциях ЛЭП. С помощью этой модели проведены исследования статических и динамических процессов в компенсированной ЛЭП. Аналогичные исследования выполнены и в частном случае, отвечающем некомпенсированной ЛЭП. Некоторые результаты этих исследований описаны ниже.

Модель рассматриваемой ЛЭП представлена на рис. 1. Она содержит трехфазные источники напряжения *Power supply system 1* и *Power supply system 2*, эквивалентирующие энергосистемы с любыми задаваемыми при моделировании частотами. В приводимых ниже материалах это соответственно 50 Гц и 60 Гц. Блоки маршрутизации, преобразования и измерения выводят на дисплеи *Display 1, 2* и *3, 4* амплитуды и начальные фазы фазных напряжений и токов энергосистем. Мгновенные значения этих же величин фиксируются осциллографами *Scope 1* и *2*. Кроме того, на экранах осциллографов с помощью мультиметров *Multimeter 1* и *2* фиксируются мгновенные значения напряжения и тока тиристорных мостов, а также напряжения на компенсирующих конденсаторах. С помощью трехфазных измерителей на дисплеях *Display 5* и *6* выводятся величины трехфазных активной и реактивной мощностей энергосистем. В развернутом виде подсистема «*Subsystem of compensated direct current line*» представлена на рис. 2. Подсистема содержит два управляемых тиристорных преобразователя двенадцатифазных преобразователя по цепи постоянного тока связанные посредством установленных на преобразовательных подстанциях реакторов *Series RL Branch1* и *Series RL Branch2*. Двенадцатифазный режим каждого из преобразователей обеспечивается подключением выпрямительных мостов *Universal Bridge 1, 2* и *3, 4* к вентильным обмоткам трансформаторов *Three-Phase Transformer 1* и *2* со схемами соединения «звезда» и «треугольник», а искусственная коммутация тиристорных мостов - компенсирующими конденсаторами *Compensation capacitor 1* и *2*. Импульсы управления на тиристоры преобразователей подаются от самостоятельных систем управления. Формирование импульсов обеспечивается генераторами *Synchronized 12-Pulse Generator 1* и *2*, а их движение - источниками периодического сигнала *Repeating Sequence 7* и *2*. На стороне постоянного тока ЛЭП измеряются средние значения тока, а также напряжений на входе и выходе линии. Эти величины фиксируются дисплеями *Display 1, 2* и *3* подсистемы.

Представленные ниже результаты моделирования отвечают ЛЭП, связывающей энергосистемы с напряжением 500 кВ и частотами 50 и 60 Гц.

Преобразовательные трансформаторы выполнены со схемой соединения «звезда/звезда, треугольник». Линейное напряжение первичных обмоток 500 кВ. Линейное напряжение вторичных обмоток трансформатора на выпрямительной подстанции 400 кВ, а на инверторной 300 кВ. Емкость конденсаторов на фазу на обеих подстанциях принята равной 8 мкФ. Активные и реактивные сопротивления элементов исследуемого комплекса, включая тиристорные блоки, выбраны близкими к реальным.

Важнейшим преимуществом компенсированных ЛЭП постоянного тока, в отличие от некомпенсированных, является возможность работы как выпрямительной, так и инверторной подстанций не только в режиме потребления, но и в режимах без потребления и генерирования реактивной мощности. Этот факт на рис. 3 и 4 иллюстрируется полученными в результате моделирования временными диаграммами включения и управления процессами соответственно на выпрямительной и инверторной подстанциях. Как следует из рис. 3, на выпрямительной подстанции смоделирован процесс ее перехода из режима генерирования в режим потребления реактивной мощности с наращиванием выдачи активной мощности. В то же время системой управления тиристорами инверторная подстанция переведена из режима потребления в режим генерирования реактивной мощности с соответствующим наращиванием приема активной мощности. Переход подстанций в указанные режимы подтверждается показаниями на дисплеях 1, 2 и 3, 4. Действительно, угол сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока на выпрямительной подстанции положительны и составляет порядка 45 эл. град. На инверторной подстанции этот угол примерно 219 эл. град. Тот же факт подтверждается показаниями измерения трехфазных активной и реактивной мощностей на дисплеях 5 и 6. Активная мощность первой энергосистемы, примыкающей к выпрямительной подстанции, положительна. Эта энергосистема отдает активную мощность в ЛЭП. После перевода в режим потребления реактивная мощность этой подстанции также положительна. Активная и реактивная мощности на инверторной подстанции отрицательны. Это говорит о приеме активной мощности второй энергосистемой и генерировании в нее инверторной подстанцией реактивной мощности.

Сравнение диаграмм на рис. 3 и 4 подтверждает работу примыкающих энергосистем с разными частотами, а именно с частотами 50 и 60 Гц. Из показаний дисплеев 1, 2 и 3 подсистемы следует, что после осуществления режима управления передача энергии в ЛЭП постоянного тока осуществляется при напряжении около 700 кВ и токе порядка 1200 А.

Временные диаграммы на рис. 4 подтверждают повышенную устойчивость инверторного

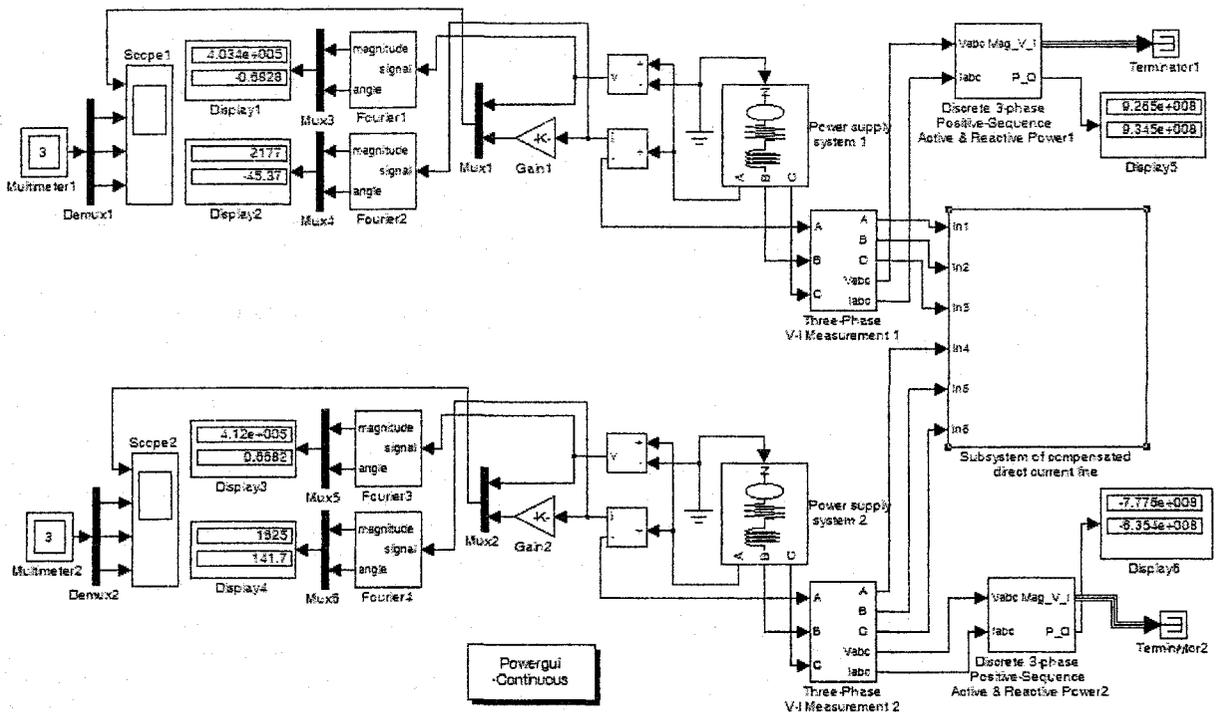


Рис. 1. Модель компенсированной ЛЭП постоянного тока с примыкающими энергосистемами

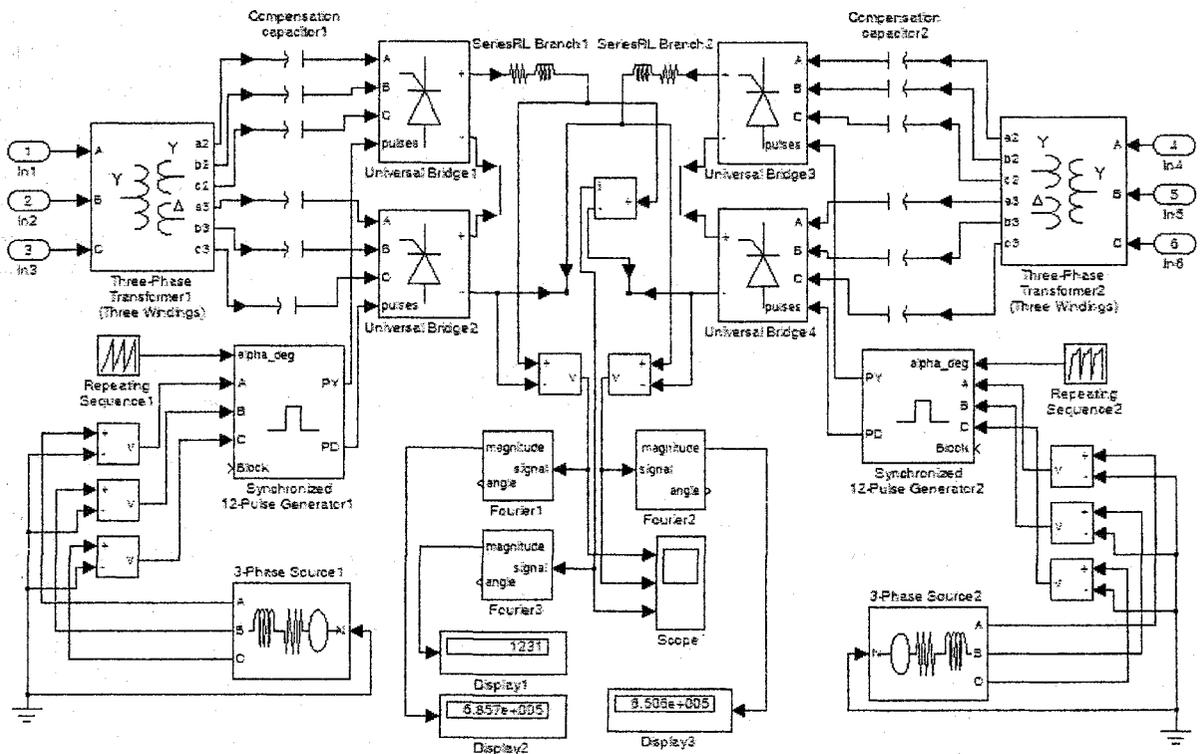


Рис. 2. Подсистема «Компенсированная ЛЭП постоянного тока»

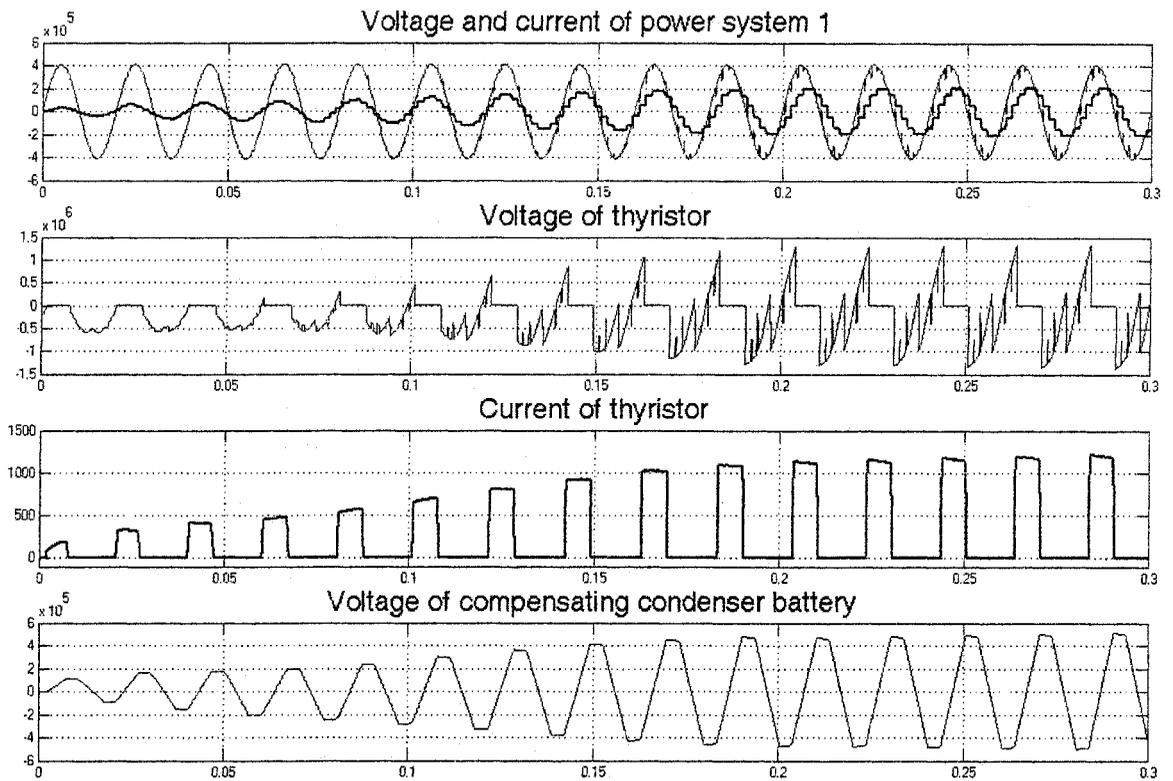


Рис. 3. Электромагнитные процессы на выпрямительной подстанции

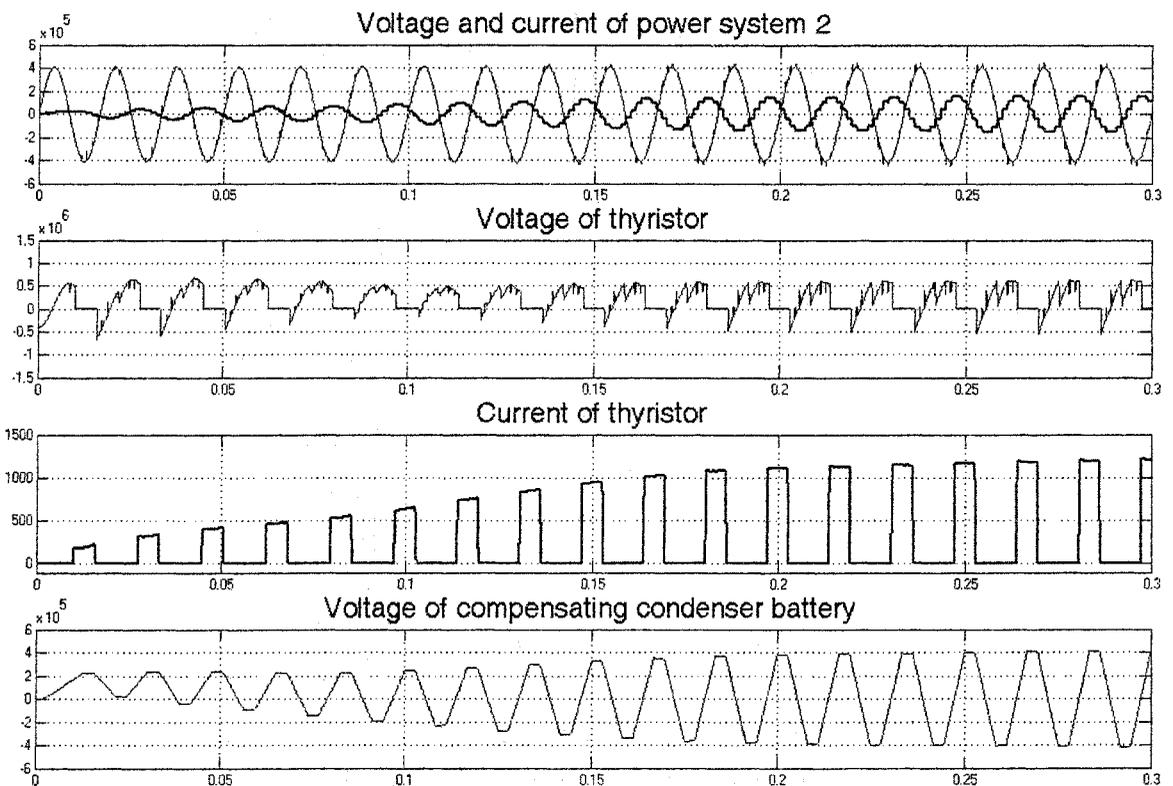
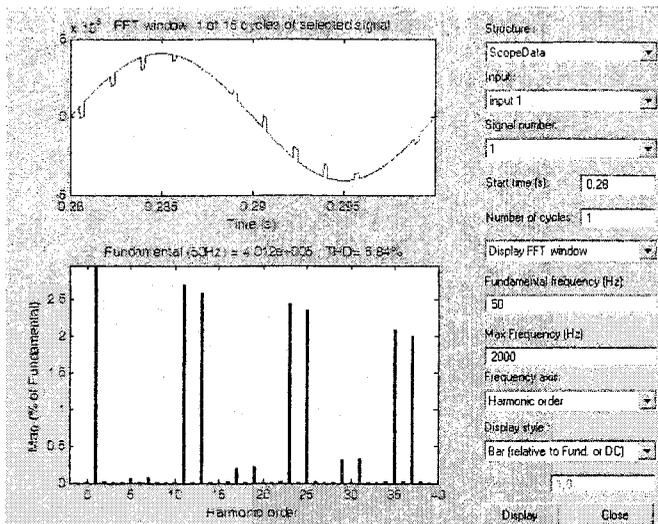
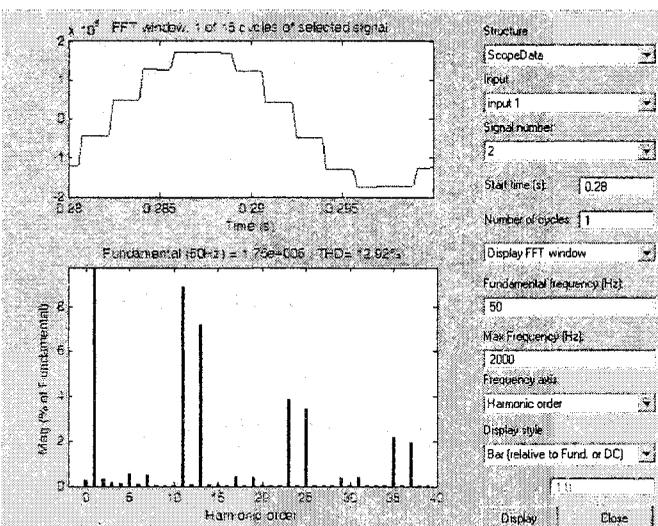


Рис. 4. Электромагнитные процессы на инверторной подстанции

а)



б)



в)

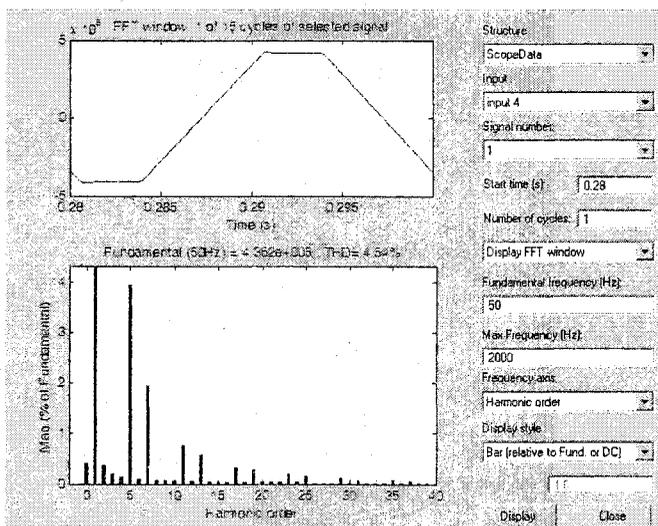


Рис. 5. Дискретные спектры напряжений и тока на выпрямительной подстанции:  
 а - фазного напряжения энергосистемы;  
 б - фазного тока;  
 в - фазного напряжения на конденсаторах

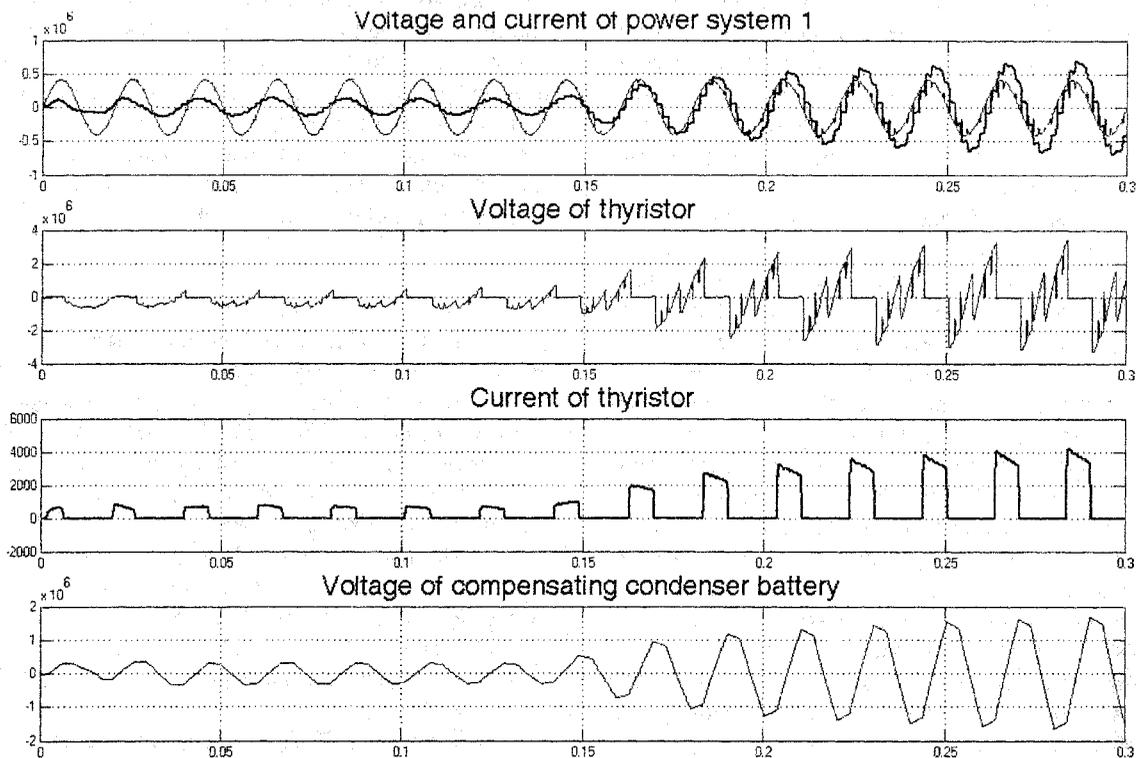


Рис. 6. Электромагнитные процессы на выпрямительной подстанции при опрокидывании инвертора на инверторной подстанции

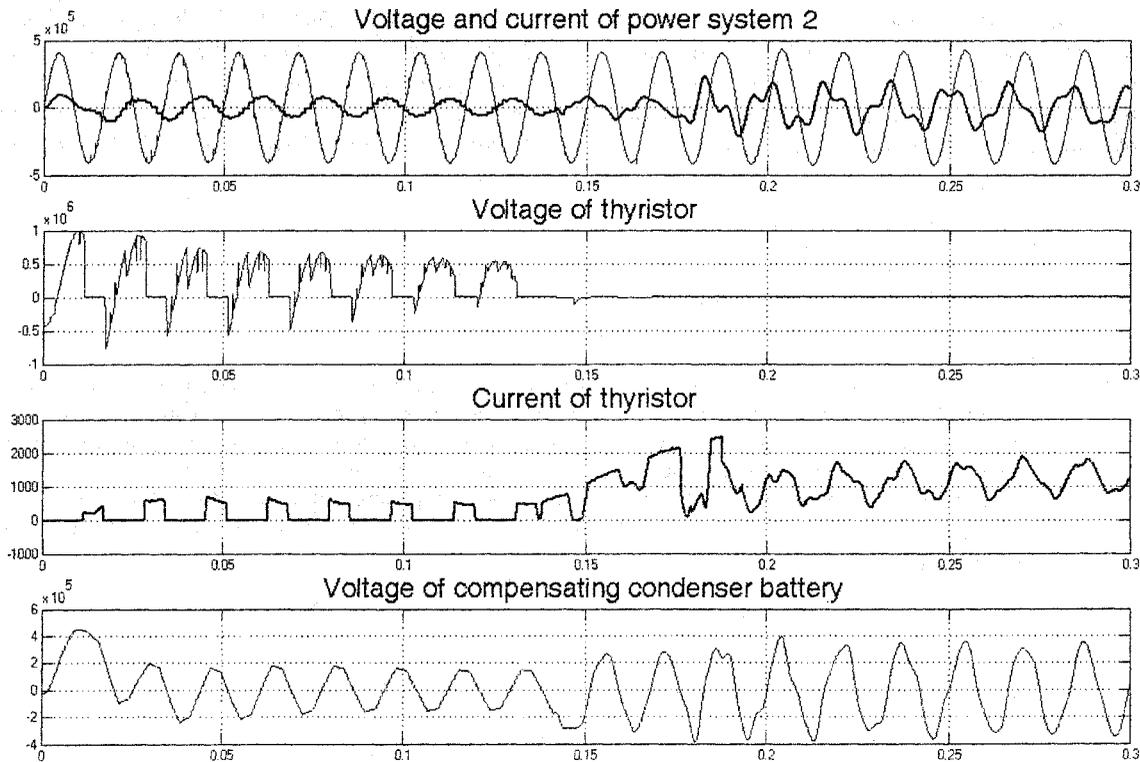


Рис. 7. Электромагнитные процессы на инверторной подстанции при опрокидывании инвертора

режима компенсированного преобразователя, благодаря которому и обеспечена возможность перехода инвертора в режим генерирования реактивной мощности. Устойчивость инвертора повышается при увеличении напряжения на конденсаторах, т.е. при уменьшении их емкости и возрастании тока в линии.

С помощью блока графического интерфейса пользователя *Powerqui -Continuous* (см. рис. 1) осуществлен спектральный анализ токов и напряжений в рассматриваемом комплексе. В качестве примера на рис. 5 приведены спектры напряжения и тока первой энергосистемы и напряжения на конденсаторах выпрямительной подстанции. Из рис. 5 следует, что подстанция работает в классическом двенадцатифазном режиме преобразования с генерацией 11, 13, 23, 25 и т. п. высших гармоник. Компенсирующие конденсаторы работают на основной частоте с содержанием в спектре напряжения 5, 7, 11, 13 и т.п. высших гармоник.

Разработанная модель позволяет исследовать статические и динамические не только рабочие, но и аварийные процессы в компенсированной ЛЭП постоянного тока с примыкающими энергосистемами, частоты напряжения которых могут быть произвольными. Так на рис. 6 и 7 иллюстрируется аварийный переходный процесс в комплексе при опрокидывании инвертора на приемной подстанции. В результате повышенной скорости движения управляющих импульсов углы безопасности проводящих ток тиристоров на инверторной подстанции снижаются до величин, меньших необходимых для восстановления запирающих свойств вентилях. При этом проводящие ток вентилях не выводятся из работы, токи в них и в других элементах подстанции аварийно нарастают. Возникают пере-

напряжения на конденсаторах и другом оборудовании инверторной подстанции. Резко возрастает ток в ЛЭП. Это в свою очередь приводит к соответствующему росту токов и напряжений на выпрямительной подстанции, несмотря на то, что она сохраняет двенадцатифазный режим преобразования. Аварийный режим должен быть прекращен действием релейных защит ЛЭП.

### Литература

1. Ивакин В.Н. *Мощная преобразовательная техника в электроэнергетических системах (опыт применения, тенденции развития)*// *Материалы VII Симпозиума «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2010 ГОД: Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии»*. - М.: ТРАВЭК. - 2003. - Т. IV. - С. 53- 57.
2. Глинтерник СР. *Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей*. - Л.: Наука, 1968. - 308 с.
3. Черных И. В. *SIMULINK среда создания инженерных приложений*. - М: Диалог - МИФИ, 2004. - 496 с.
4. Хохлов Ю.И. *Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутационные конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков*. - Челябинск: ЧГТУ, 1995.-355 с.
5. *Комплекс виртуальных лабораторных работ по электроснабжению и энергетической электронике/ Ю.И. Хохлов, М.В. Гельман, К.А. Преображенский, К.П. Федюнин*// *Материалы Второй Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB»*. - М.: ИПУ РАН, 2004. - Электронное издание на компакт диске (ISBN- 5-201-14971-5).

Хохлов Юрий Иванович в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт (ныне Южно-Уральский государственный университет) по специальности «Электрические станции». В 1991 году в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию. Декан энергетического факультета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения», директор Центра «Энергосбережение» ЮУрГУ, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения.