МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УПРАВЛЯЕМОГО ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

АВТОРЫ:

В.С. ЧУПРИКОВ,
ООО «АВД-ЭЛЕКТРО»

А.В. ФОМИН,
АО «НИДЕК АСИ ВЭИ»

Несмотря на очевидные технические преимущества управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа (УШРТ) перед другими типами управляемых реакторов, прямых доказательств этих преимуществ до сих пор представлено не было. Строго говоря, с точки зрения принципа действия, УШРТ — это обычный статический тиристорный компенсатор, в котором понижающий трансформатор и компенсирующие реакторы объединены в одном электромагнитном устройстве.

Ключевые слова: управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа; статический тиристорный компенсатор; линия электропередачи; регулирование напряжения; ограничение перенапряжений; пауза ОАПВ.

Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа

ВВЕДЕНИЕ

Как известно из мировой практики, широкое применение статического тиристорного компенсатора (СТК) в электроэнергетике обусловлено в первую очередь его высоким быстродействием, обеспечивающим эффективную работу в динамических (нестационарных) режимах работы линии электропередачи [1, 2, 3]. Еще 26 лет назад в результате физического моделирования СТК, установленного на подстанции линии электропередачи, один из авторов данной статьи показал, что СТК ограничивает коммутационные перенапряжения на линии не хуже, чем линейный неуправляемый шунтирующий реактор [4]. Тем не менее, УШРТ — это все-таки отличное от СТК устройство, и требуется подтверждение его эффективности.

Цель исследования, описываемого в данной статье, — доказать эффективность работы УШРТ в следующих переходных режимах линии электропередачи:

- в паузе ОАПВ;
- при включении холостой линии;
- при резком сбросе нагрузки;
- при использовании специальных алгоритмов регулирования.

СХЕМА МОДЕЛИ

Математическое моделирование работы УШРТ было выполнено с помощью прикладного пакета программ MATLAB. Однолинейная схема модели представлена на рис. 1.

Структура математической модели представлена на рис. 2. Она состоит из следующих модулей: источника напряжения 220 кВ (Generator), двух участков воздушной линии 220 кВ длиной 150 км каждый (Line 1 и Line 2), стандартного шунтирующего реактора (ШР) 220 кВ 60 МВА (SR), управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа 220 кВ 60 МВА (CSRT), активно-индуктивной нагрузки 50 МВт 30 Мвар (Load)

ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА МОДЕЛИ

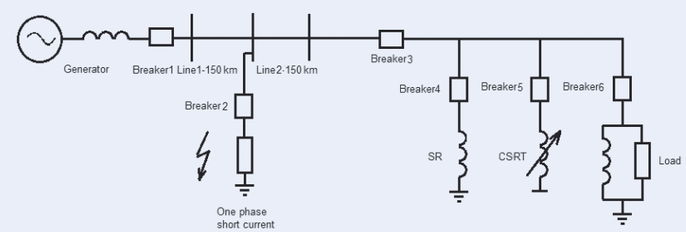

Рис. 1

СТРУКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

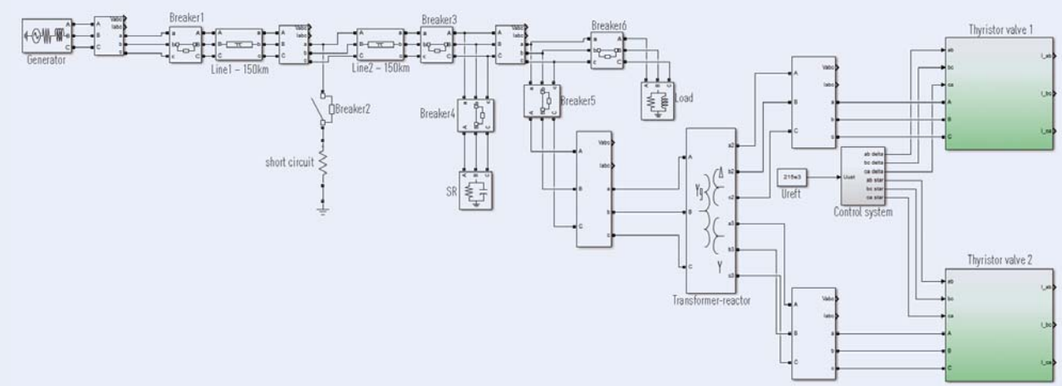

Рис. 2

СХЕМА МОДУЛЯ ТИРИСТОРНОГО ВЕНТИЛЯ

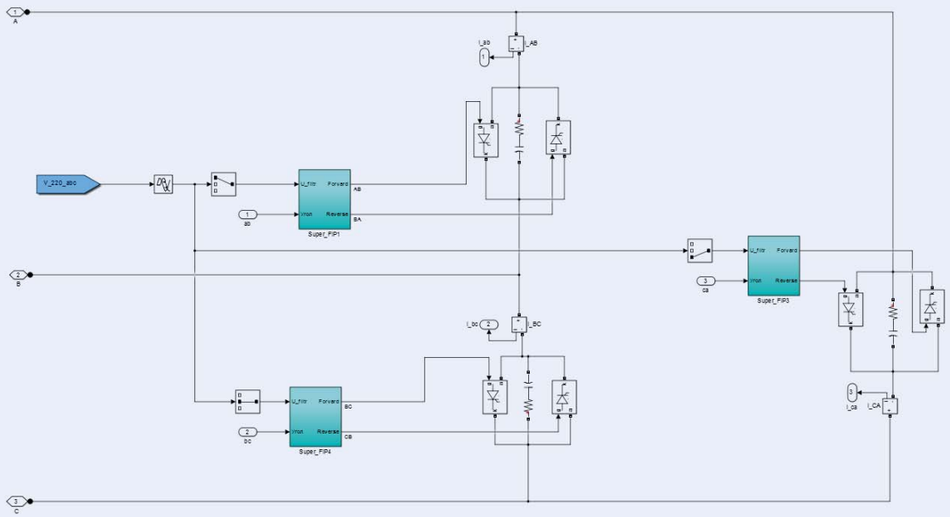

Рис. 3

и шести выключателей (Breaker 1...6), а также однофазного резистора для имитации однофазного КЗ на линии (One phase resistor).

Модель УШРТ состоит из трехфазного трехобмоточного реактора (модуль Transformer-reactor), двух трехфазных тиристорных вентилей (модули Thysristor valve 1 и Thysristor valve 2) и модуля системы управления (Control system), реализующих 12-пульсную схему преобразования, обеспечивающую минимальное содержание высших гармоник в токе сетевой обмотки [1].

Схема модуля тиристорного вентиля приведена на рис. 3. Два антипараллельных тиристора управляются от модуля фазоимпульсного преобразования SuperFIP, преобразующего сигнал угла управления в импульсы зажигания тиристоров.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

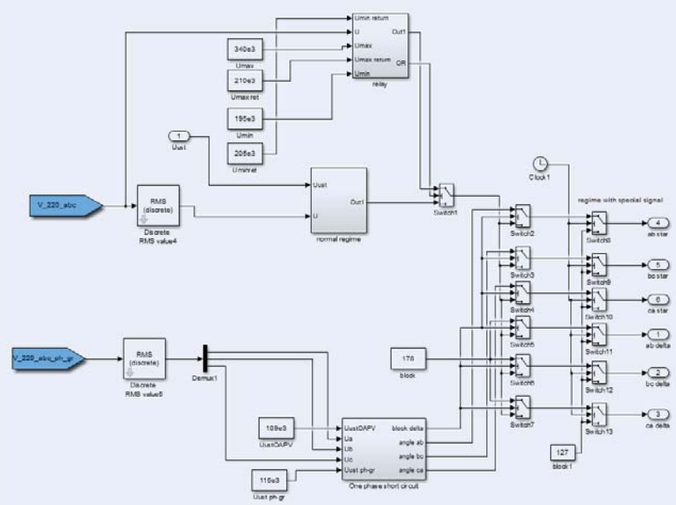

Рис. 4

Структура модели системы управления (СУ) представлена на рис. 4. СУ может работать в четырех различных режимах по алгоритмам, специально созданным для переходных режимов линии электропередачи:

1. Нормальный (штатный) режим (блок normal regime), осуществляющий регулирование напряжения в точке подключения УШРТ, — на шинах ВН подстанции (рис. 5).
2. Релейный режим (блок relay), обеспечивающий быстрое переключение УШРТ в режим максимальной и минимальной мощности при наличии перенапряжения или посадки напряжения на шинах 220 кВ соответственно (рис. 6).
3. Работа по специальному алгоритму во время паузы ОАПВ (блок one phase short circuit; рис. 7).
4. Работа в «диодном» режиме по упреждающему сигналу при включении холостой линии (блок regime with special signal).

БЛОК ШТАТНОГО РЕЖИМА

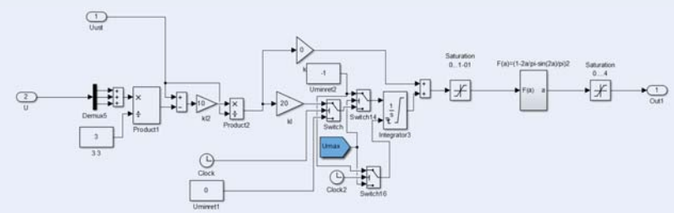

Рис. 5

РАБОТА УШРТ В ПАУЗЕ ОАПВ В СРЕДНЕЙ ТОЧКЕ ВЛ 220 КВ

Результаты моделирования работы ОАПВ в средней точке ВЛ 220 кВ представлены на рис. 8–16.

1. УШРТ отключен (рис. 8).
2. УШРТ включен (рис. 9).

БЛОК РЕЛЕЙНОГО РЕЖИМА

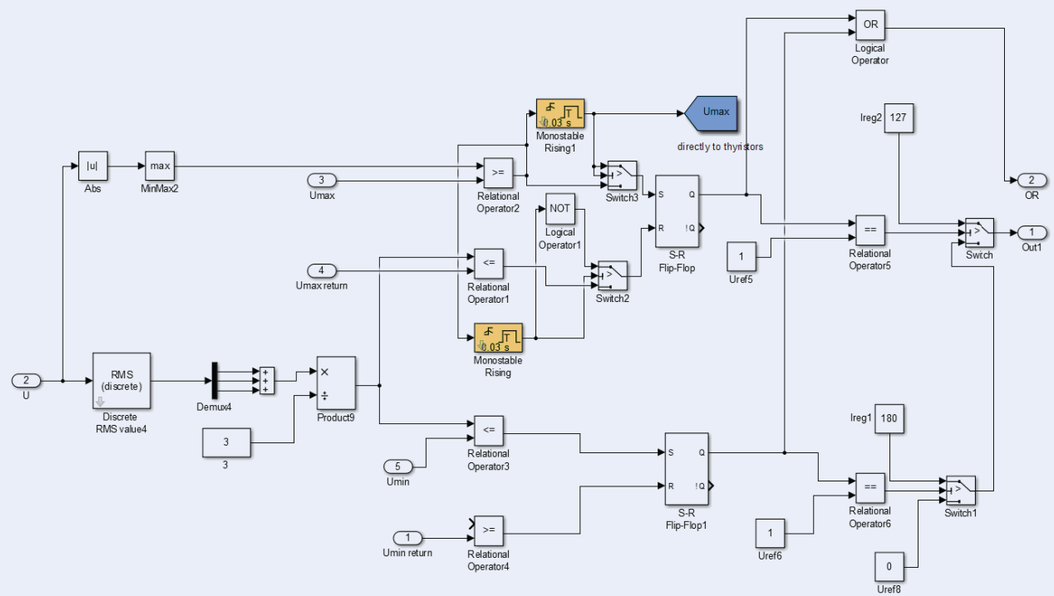

Рис. 6

ИЗ «СТАНДАРТА ОРГАНИЗАЦИИ ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.180.03.198-2015»

Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей напряжением 110–500 кВ.

Настоящий стандарт распространяется на управляемые шунтирующие реакторы класса напряжения 110–500 кВ, предназначенные для регулирования и стабилизации напряжения в точке присоединения к узлам нагрузки электрических сетей, подстанций путем плавного регулирования своей реактивной мощности в ручном или автоматическом режиме.

Типовые технические требования к управляемым шунтирующим реакторам включают:

1. Условия эксплуатации.
2. Электромагнитная часть УШР:
   - номинальные параметры и характеристики;
   - требования к материалам;
   - требования к конструкции и составным частям;
   - требования по надежности;
   - требования по безопасности.
3. Силовая часть устройства управления УШР:
   - условия эксплуатации;
   - номинальные параметры и характеристики;
   - требования к материалам;
   - требования к конструкции и составным частям;
   - требования по надежности;
   - требования по безопасности.
4. Быстродействие УШР при работе в режимах стабилизации напряжения и тока.
5. Система регулирования и управления УШР.
6. Требования по экологии.
7. Комплект поставки.

УРОВНИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ХОЛОСТОЙ ЛИНИИ

Режим работы	Без реакторов	С ШР	С УШРТ в релейном режиме	С УШРТ в диодном режиме
Положительный максимум, о.е.	1,72	1,40	1,56	1,40
Отрицательный максимум, о.е.	2,05	1,80	1,94	1,80
Установившееся значение, о.е.	1,35	1,0	1,0	1,0

Таблица 1

БЛОК РАБОТЫ В ПАУЗЕ ОАПВ

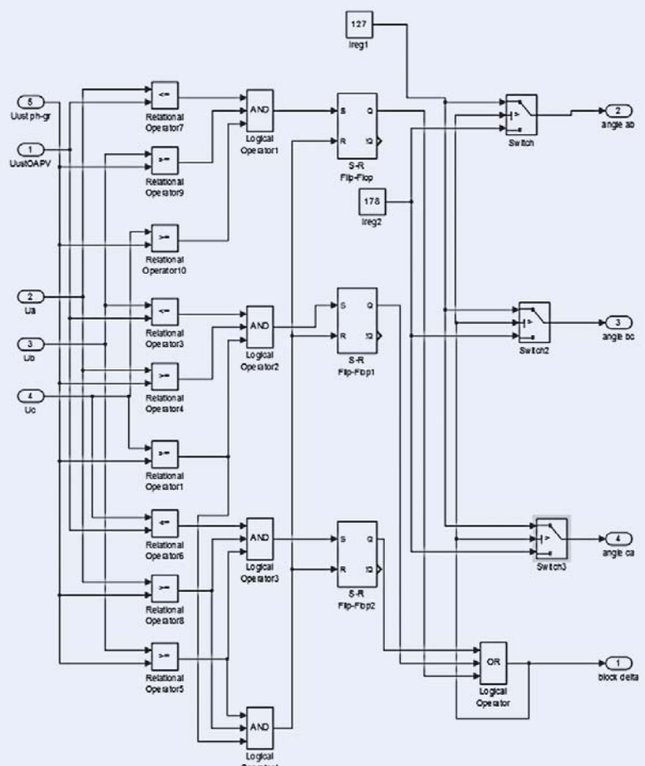

Рис. 7

ТОК КЗ БЕЗ УШРТ

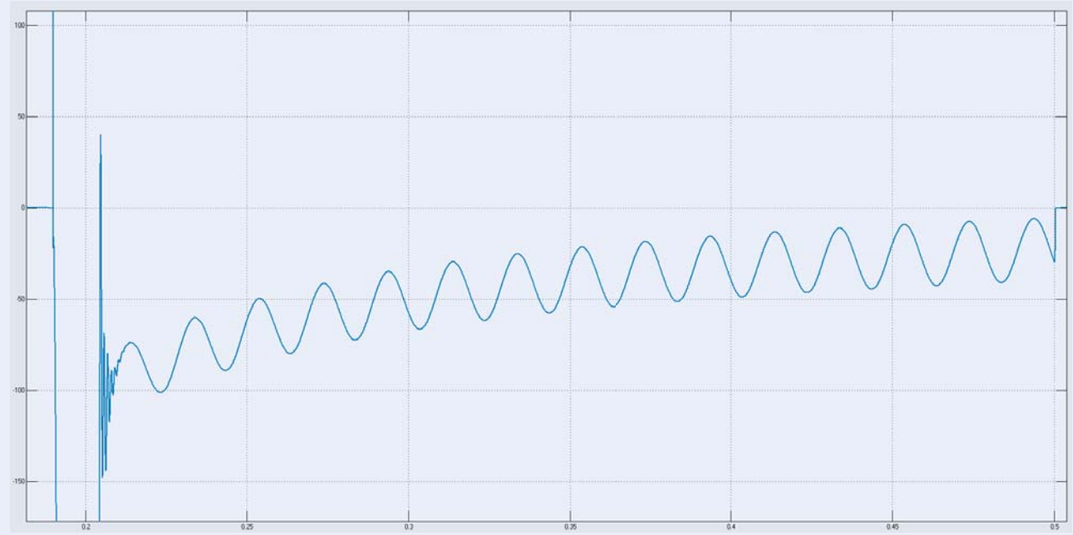

Рис. 8

ТОК КЗ С РАБОТАЮЩИМ УШРТ

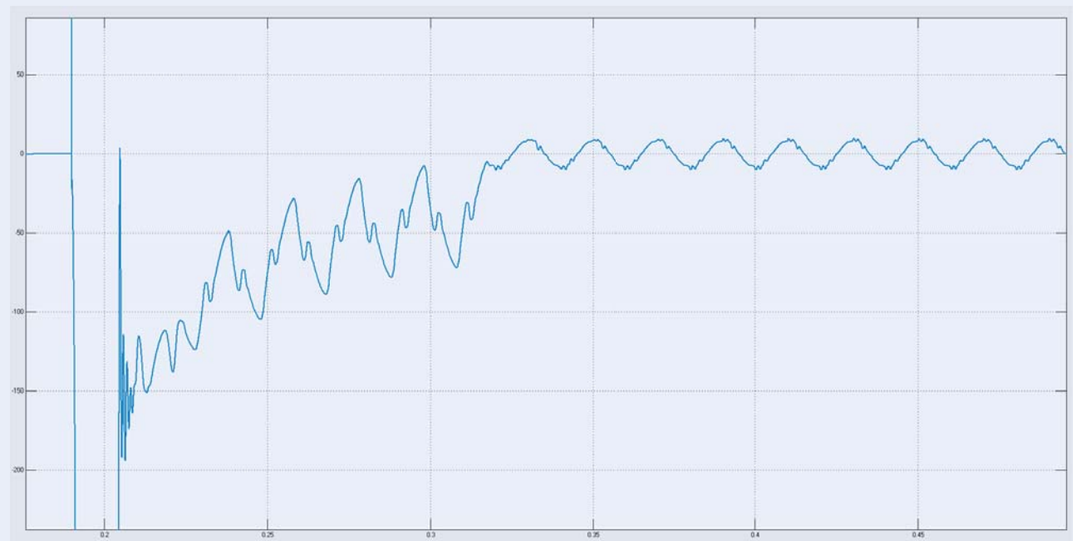

Рис. 9

ЛИНЕЙНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ УШРТ И ТОКИ ФАЗ СЕТЕВОЙ ОБМОТКИ УШРТ

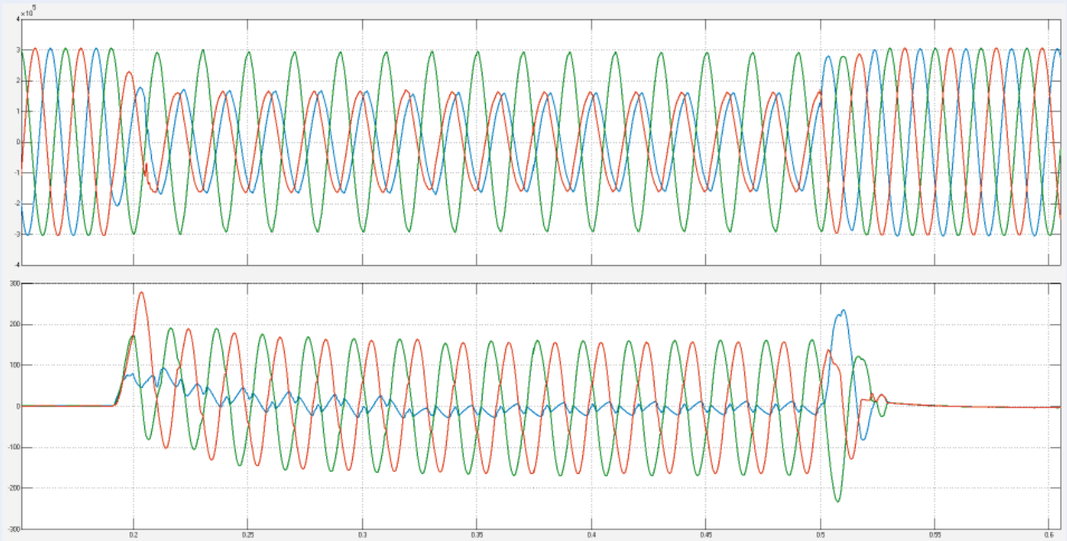

Рис. 10

ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ЛИНИИ БЕЗ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

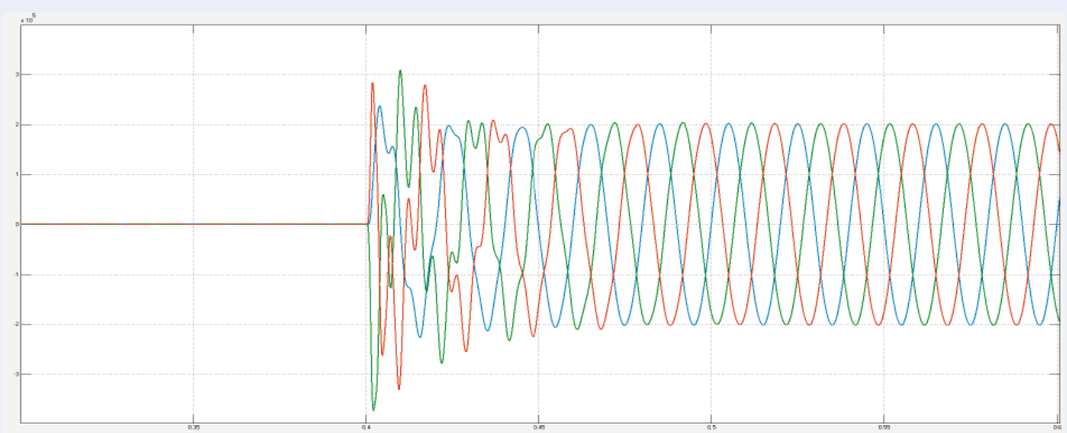

Рис. 11

ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ЛИНИИ И ФАЗНЫЕ ТОКИ ШР

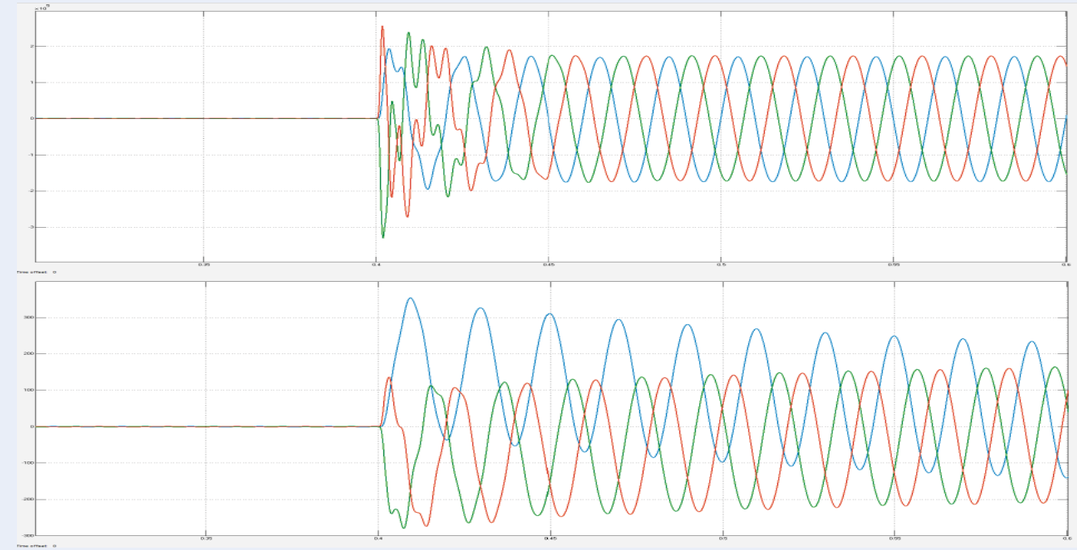

Рис. 12

ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ЛИНИИ И ФАЗНЫЕ ТОКИ УШРТ ПРИ РАБОТЕ В РЕЛЕЙНОМ РЕЖИМЕ

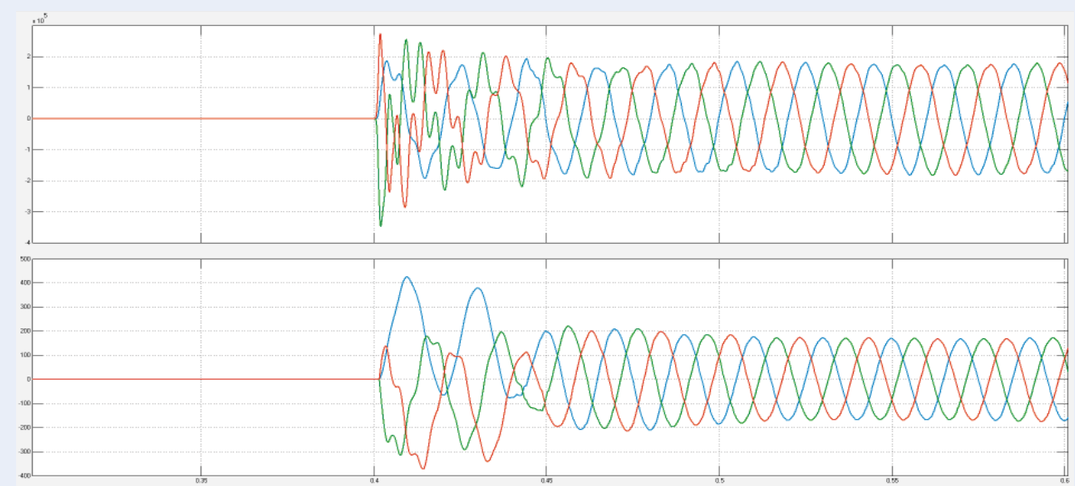

Рис. 13

Вывод: Работа УШРТ в паузе ОАПВ обеспечивает снижение действующего значения тока КЗ в 1,5 раза и уменьшает длительность КЗ.

РАБОТА УШРТ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ХОЛОСТОЙ ЛИНИИ

1. Включение линии без шунтирующих реакторов (рис. 11).
2. Включение линии с нерегулируемым шунтирующим реактором (рис. 12).
3. Включение линии с регулируемым шунтирующим реактором (УШРТ).

Проверялась работа УШРТ по двум алгоритмам: в стандартном релейном режиме и при работе по упреждающему сигналу, при котором первые пять периодов после появления напряжения УШРТ работает в так называемом «диодном» режиме, а потом автоматически переходит в штатный режим регулирования напряжения (рис. 13, 14).

Полученные в результате моделирования значения уровней перенапряжений сведены в табл. 1.

Вывод: УШРТ при специальном алгоритме, обеспечивающем его переключение в диодный режим перед включением холостой линии, ограничивает коммутационные перенапряжения с той же эффективностью, что и стандартный линейный шунтирующий реактор.

РАБОТА УШРТ ПРИ СБРОСЕ НАГРУЗКИ

1. Без УШРТ (рис. 15).
2. С УШРТ.

Сброс нагрузки вызывает перенапряжения на шинах подстанции и СУ УШРТ активизирует релейный канал, который немедленно переводит УШРТ в режим максимального потребления реактивной мощности, а тиристорные вентили

ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ЛИНИИ И ФАЗНЫЕ ТОКИ УШРТ ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ПО УПРЕЖДАЮЩЕМУ СИГНАЛУ (ПОЛНОЕ ОТКРЫТИЕ ТИРИСТОРОВ ПЕРЕД ВКЛЮЧЕНИЕМ ЛИНИИ)

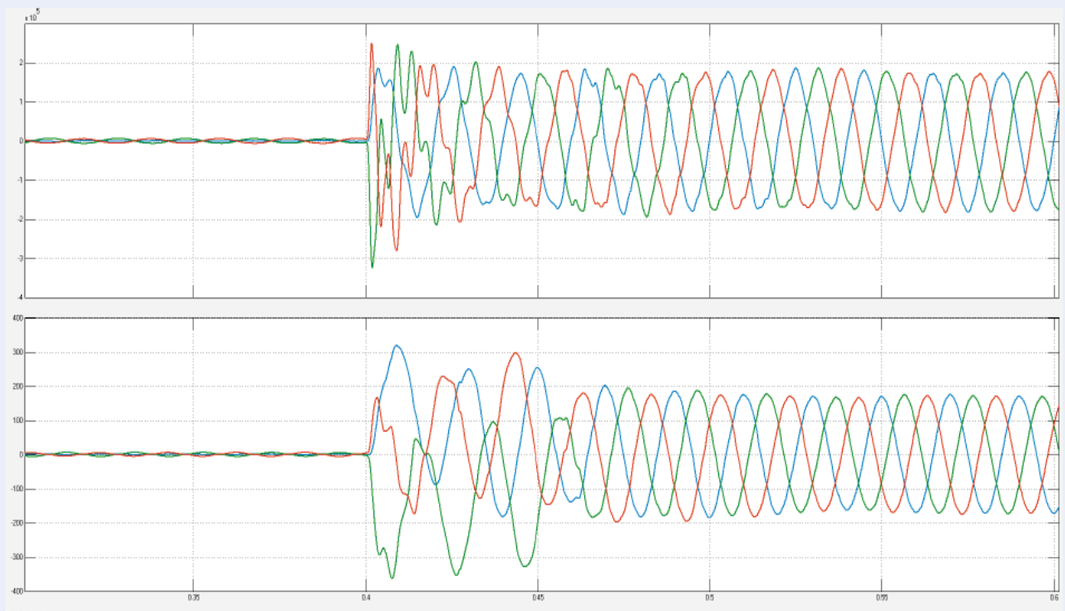

Рис. 14

ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ЛИНИИ И ФАЗНЫЕ ТОКИ НАГРУЗКИ БЕЗ УШРТ

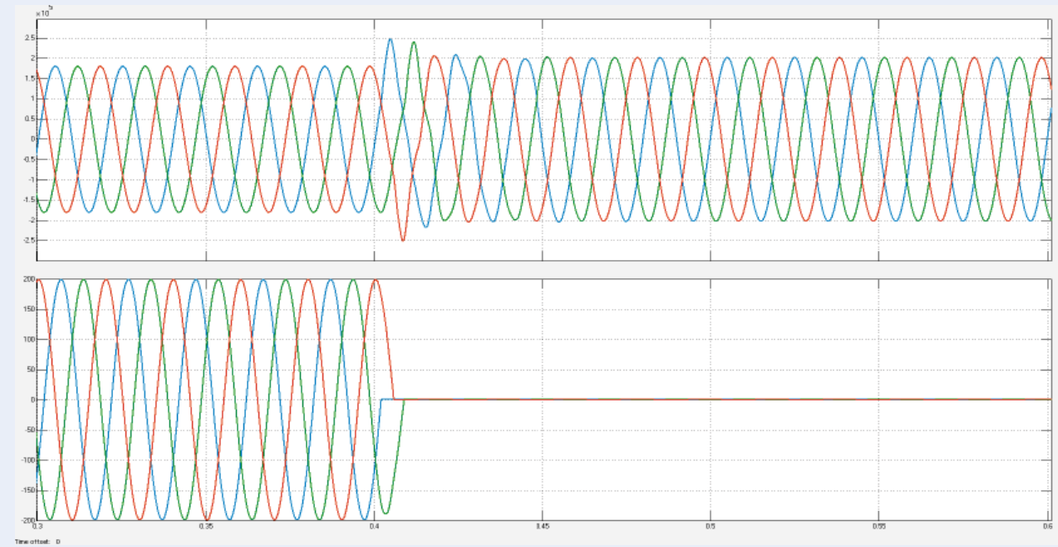

Рис. 15

в диодный режим с последующим автоматическим возвращением в режим регулирования напряжения при его снижении до заданного уровня (рис. 16). В результате работы УШРТ коммутационное перенапряжение снизилось с 1,39 до 1,17 о.е., а установившееся напряжение стабилизировалось на уровне уставки регулятора напряжения УШРТ, нивелируя все негативные последствия отключения нагрузки. В отсутствие УШРТ подобный сброс нагрузки может вызвать срабатывание защиты от перенапряжений и отключение линии. Именно способность предотвращения блэкаута, продемонстрированная двумя УШРТ, установленными в энергосистеме Norte de Angola, обеспечила их высшую оценку руководством заказчика — компании ENE-E.P. [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты моделирования работы УШРТ в переходных режимах работы линии электропередачи продемонстрировали его эффективную работу при использовании специальных алгоритмов регулирования, в частности:

1. в режиме работы в паузе ОАПВ УШРТ обеспечивает снижение тока КЗ в 1,5 раза и уменьшает длительность замыкания;
2. в режиме включения холостой линии УШРТ ограничивает коммутационные перенапряжения практически так же, как стандартный линейный шунтирующий реактор;
3. при резком сбросе нагрузки УШРТ успешно снижает перенапряжения и предотвращает возможное аварийное отключение линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Чуприков. Концепции применения статических тиристорных компенсаторов в электрических сетях сверхвысокого напряжения // Энергоэксперт. 2014. № 5.
2. L. Paulsson, A. Silva, B. Thorvaldsson, R. Gonzalez. Combined Short and Long Term Ratings of Static Var System Components for Steady State and Transient Voltage Support in a 500-kV Power Grid. Invited paper 24, IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Foz do Iguaçu. Brazil, 23–27 May 1994.
3. IEEE Special Stability Controls Working Group. Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 8. No. 1. Pp. 113–121, Feb. 1994.
4. В.С. Чуприков. Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередачи // Электричество. 1990. № 4.
5. Д.С. Мологин, В.С. Чуприков. Реализация пилотного проекта CSRT в энергосистеме Norte de Angola // Энергоэксперт. 2010. № 1.

ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ЛИНИИ И ФАЗНЫЕ ТОКИ НАГРУЗКИ И УШРТ

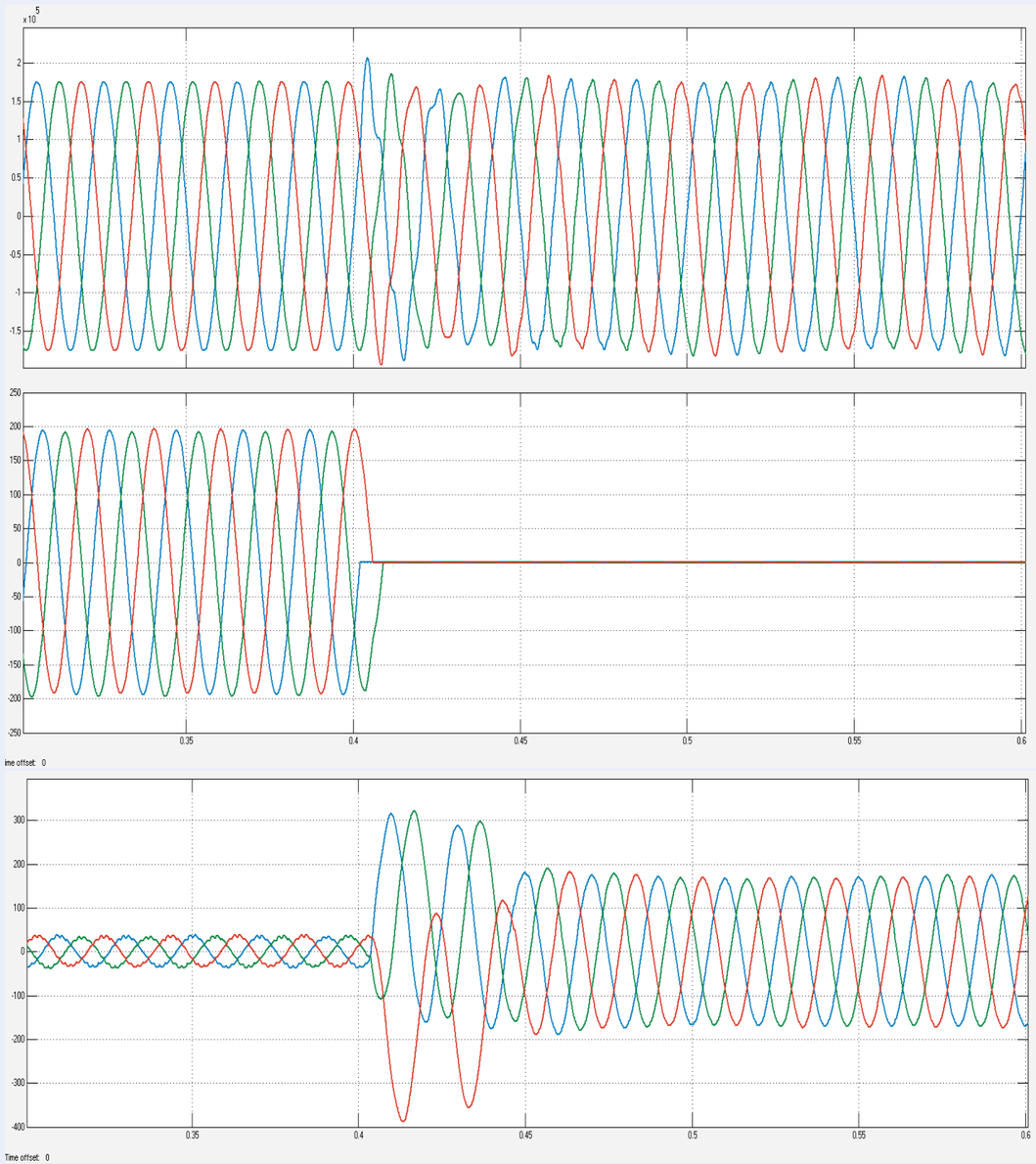

Рис. 16