

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

МОЛОГИН Д.С., заместитель начальника отдела систем управления «АО Ансальдо-ВЭИ»

ПАНОВА О.С., инженер-программист «АО Ансальдо-ВЭИ», к.т.н.

В статье рассматривается принцип построения имитационной модели комплекса «СЕТЬ–ДСП–СТК». Предлагается способ решения проблемы построения адекватной модели дуговой печи, позволяющей воспроизводить динамические режимы работы, сопровождающиеся нелинейностью и несимметрией фазных токов. Имитационная модель комплекса «СЕТЬ–ДСП–СТК» применяется в исследованиях и разработках статических тиристорных компенсаторов для ДСП компанией «АО Ансальдо-ВЭИ».

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) как нагрузки негативно влияют на качество электрической энергии питающей сети. Потребление активной и реактивной электроэнергии печными агрегатами имеет резкопеременный и случайный характер работы. Работа ДСП с нестабильным потреблением реактивной мощности сопровождается возникновением в электрической сети колебаний напряжения, а нелинейность и несимметрия фазных токов, потребляемых печью, приводит к искажению формы кривой тока, несимметрии напряжения. Значительная энергоёмкость сталеплавильного производства обуславливает повышенные требования к организации надежных и рациональных режимов работы системы электроснабжения.

Один из эффективных мероприятий по повышению качества электроэнергии и снижению потерь – установка средств компенсации реактивной мощности.

Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК) получают все большее распространение в странах СНГ и используются для решения различных проблем передачи и распределения электрической энергии, связанных с большими и резкими изменениями реактивной мощности.

Несмотря на обилие рекламных материалов различных компаний, объ-

ясняющих принцип действия СТК, на практике при разработке и настройке системы управления возникает много проблем, связанных как с предсказанием эффекта от работы СТК, так и с наладкой СТК на работающих объектах, когда неверные уставки регуляторов приводят к убыткам предприятия или могут привести к его отключению энергоснабжающими организациями.

Наибольшая сложность, с которой сталкиваются разработчики систем управления СТК, сама дуговая печь, поскольку резкопеременный режим работы печи, который сопровождается внезапными короткими замыканиями и обрывами дуги, является непредсказуемым. Кроме этого, работа печи сопровождается нелинейностью и несимметрией фазных токов, генерацией в сеть как высших гармоник, так и низкочастотных модуляционных колебаний основной частоты, которые являются причиной возникновения колебаний напряжения в сети, что вызывает, в свою очередь, эффект фликера (мерцания ламп освещения). При таком широком наборе помех система управления СТК должна выделять полезный сигнал управления с минимальным запаздыванием.

Разработка системы управления при подобном наборе требований – задача трудоемкая, требующая проведения

комплексных исследований с применением современных компьютерных технологий.

Для проведения исследований режимов работы СТК, оценки степени подавления фликера в сети, разработки и проверки алгоритмов управления СТК в компании «АО Ансальдо-ВЭИ» разработана имитационная модель комплекса «СЕТЬ–ДСП–СТК».

Основная проблема имитационной модели комплекса – адекватность модели ДСП, которая должна воспроизводить динамические режимы работы печи, сопровождающиеся нелинейностью и несимметрией фазных токов. Спектр токов модели должен иметь как высшие гармоники, так и низкочастотные модуляционные колебания основной частоты.

Существующие на сегодняшний момент имитационные модели дуговых печей основываются на воспроизведении вольт-амперной характеристики дуги [6, 7], которая описывается множеством параметров, изменяющихся на разных плавках. Для построения подобной модели необходимо иметь статистику изменения приведенных параметров. При моделировании необходимо учитывать параметры печного трансформатора, взаимные индуктивности между фазами короткой сети, реактивные сопротивления ванны печи

с учетом сопротивлений электродов и т.д. В такой модели необходимо также иметь генератор случайных колебаний, настраиваемый под конкретную ДСП, который имитирует, в том числе, обрыв или короткое замыкание дуги.

Настройка модели требует большого количества времени и связана с рядом трудностей, поскольку часть параметров неизвестна, и приходится прибегать к упрощению модели, что неизбежно ведет к некачественному воспроизведению динамических режимов ДСП.

В статье представлен вариант решения проблемы построения модели печи, использующийся в комплексе «СЕТЬ-ДСП-СТК».

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТК

Принцип действия СТК заключается в пофазной компенсации реактивной мощности, потребляемой ДСП [1, 2]. Основная схемная конфигурация СТК, приведенная на рис. 1, включает в себя фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ) и включенные параллельно им по схеме «треугольник» три фазы управляемых тиристорами реакторов – тиристорно-реакторную группу (ТРГ). ФКЦ представляют собой совокупность последовательных резонансных контуров, предназначенных для компенсации высших гармонических составляющих сетевого тока и являющиеся нерегулируемым источником реактивной мощности. ТРГ – потребитель реактивной мощности, изменение тока которого в каждом плече треугольника позволяет компенсировать разницу реактивных составляющих основной гармоники тока ДСП и ФКЦ с целью подавления колебаний реактивного тока линии. Угол зажигания тиристоров ТРГ задается таким, чтобы суммарная реактивная мощность ДСП и ТРГ была равна реактивной мощности ФКЦ.

Система автоматического управления СТК обеспечивает быструю компенсацию реактивной мощности на грузки и поддержание регулируемого параметра в соответствии с заданной уставкой (рис. 2). В связи с несимметрией токов ДСП каждая фаза ТРГ имеет свой канал регулирования, содержащий быстрый контур по реактивной мощности нагрузки, использующий ток нагрузки I_L , и медленный по уставке реактивной мощности линии, использующий ток линии I_S .

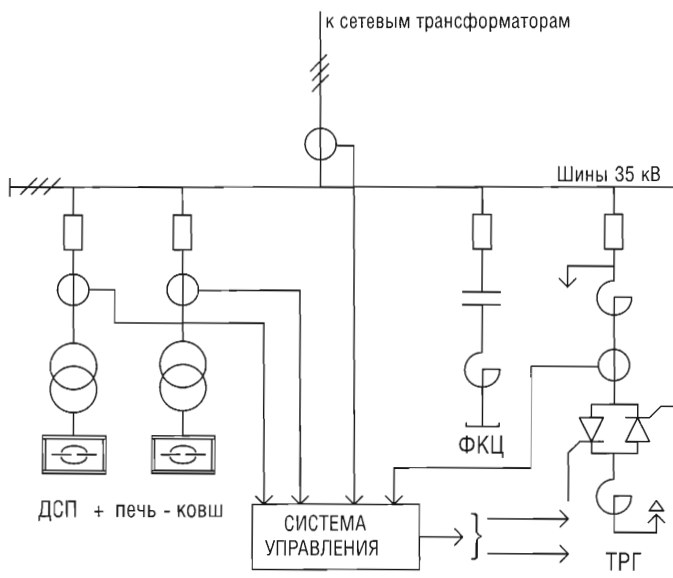


Рис. 1. Схема подключения СТК

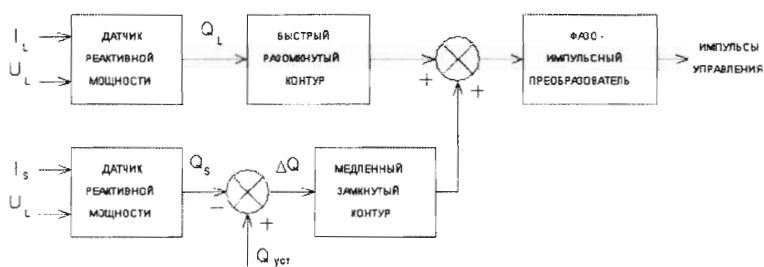


Рис. 2. Блок-схема регулятора реактивной мощности

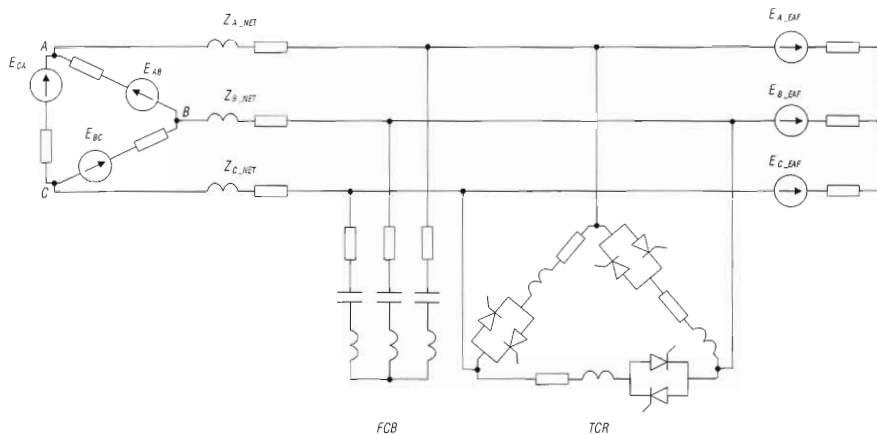


Рис. 3. Схема замещения комплекса «СЕТЬ – ДСП – СТК»

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА МОДЕЛИ

При построении имитационной модели комплекса «СЕТЬ-ДСП-СТК» целесообразно выявить основные функциональные узлы системы и построить схему замещения каждого (рис. 3).

Схема замещения прилегающей сети представляет собой три источника ЭДС, включенные по схеме «треугольник»,

фазы которого соединены с остальной частью схемы через активно-реактивные сопротивления сети, параметры которых рассчитываются исходя из мощности короткого замыкания питающей сети, сопротивлений линий и трансформаторов (на схеме: $Z_{A.NET}, Z_{B.NET}, Z_{C.NET}$).

Схема СТК соответствует своей конфигурации и состоит из схем ФКЦ и

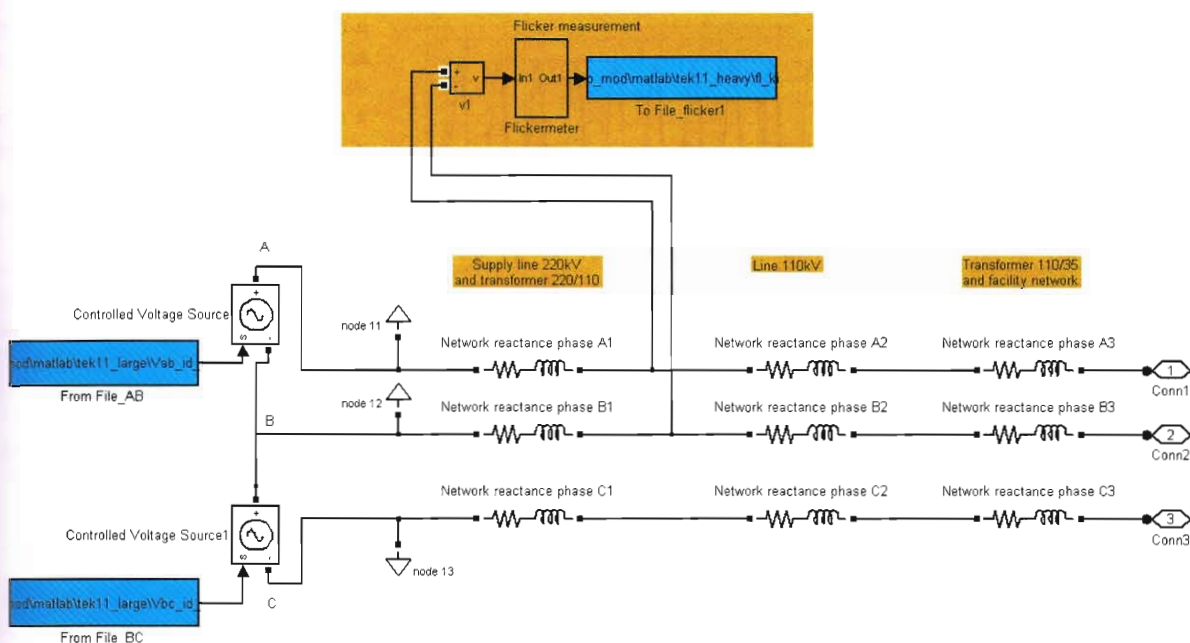


Рис. 6. Структурная схема блока модели питающей сети

конвертером по результатам осциллографирования на объекте.

Напряжение на модели удаленного генератора (рис. 6) подстраивается таким образом, чтобы напряжение на зажимах модельной печи соответствовало реальному. Формирование напряжения модели удаленного генератора происходит в отдельной программе-конвертере.

Для анализа модель использует частоту дискретизации внешних данных, равных 36000 Гц.

Считывание значений напряжения для расчета фликера в модели осуществляется с линии 110 кВ имитируемой подстанции. Модель фликерметра (рис. 7) выполнена в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.15-99 [8].

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

На рис. 8 приведены осциллограммы реального тока ДСП в сравнении с током модели. Аналогичные осциллограммы приведены на рис. 9 для тока линии. На рис. 10, а и б, представлены осциллограммы и спектры напряжений на вводах реальной ДСП и модели.

Для проверки адекватности модели были сопоставлены значения кратковременных (1-минутных) доз фликера, снятых на объекте фликерметром и полученных на модели с помощью внешних данных, которые записывались на объекте одновременно с измерением фликера. В таблицах 1 и 2 и на рис. 11 приведены результаты сравнения.

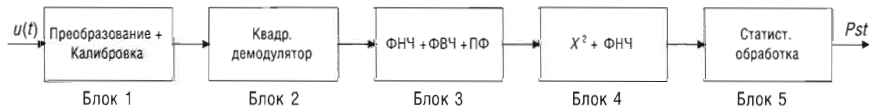


Рис. 7. Блок-схема расчета фликера

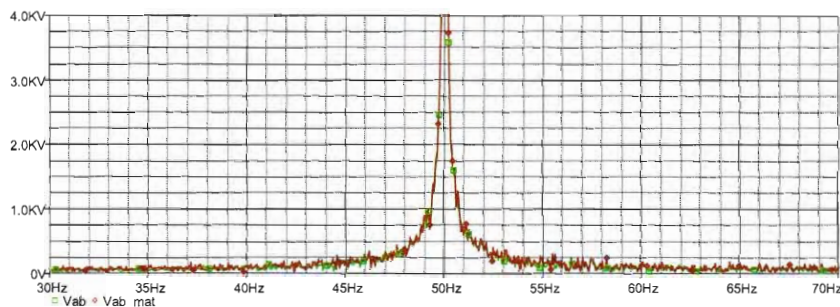


Рис. 8. Осциллограммы тока реальной ДСП и модели

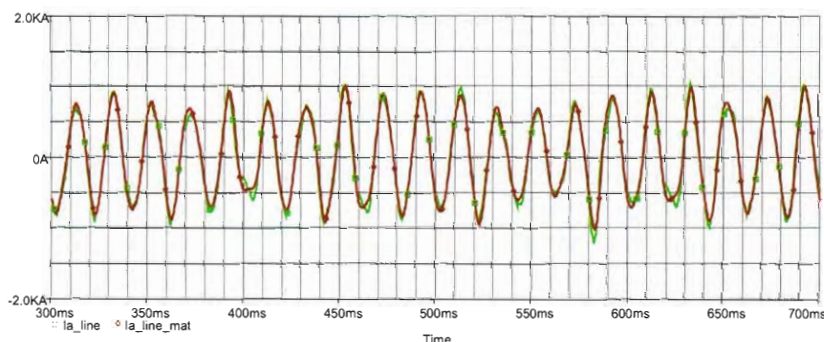


Рис. 9. Осциллограммы реального и модельного тока линии

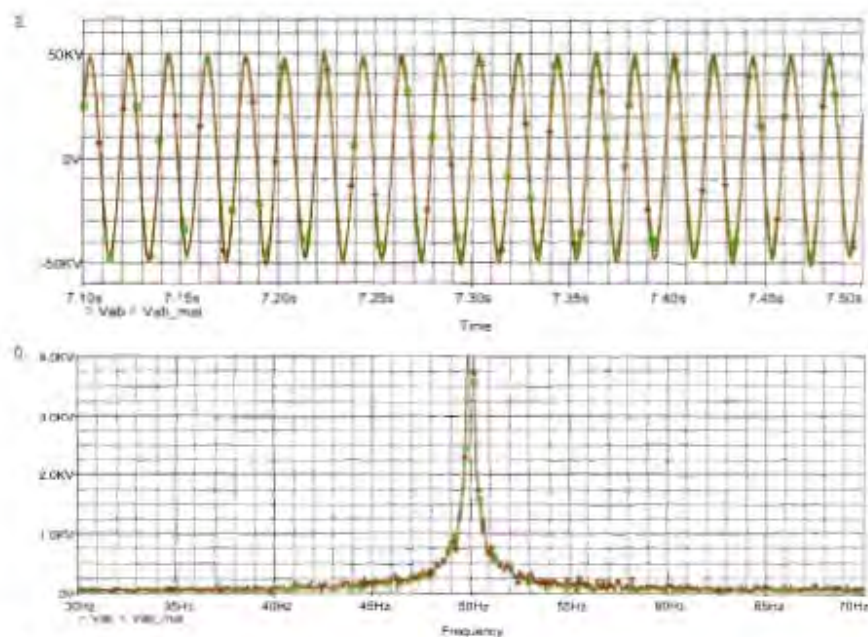


Рис. 10. а) Осциллограммы напряжения на вводах реальной ДСП и модели. б) Спектры напряжения на вводах реальной ДСП и модели

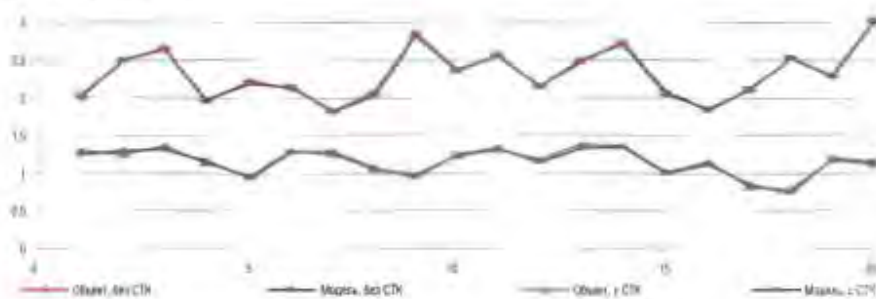


Рис. 11. Графики кратковременных (1-минутных) доз фликера на объекте и модели

Выводы

1. Сравнение работы модели и реального объекта в разных условиях показывают высокую степень достоверности при вычислении тока сети и вызываемого им фликера.
 2. Модель не является сугубо теоретической разработкой, она облегчила оптимизацию алгоритмов управления каждого конкретного объекта для достижения максималь-

но возможного подавления фликера и приведения параметров энергосистемы в точку подключения объекта в стандарты ГОСТ.
 3. Разработанная модель позволила, опираясь на реальные данные, проводить следующие работы:
 • оценка дозы фликера при работе ДСП без СТК и с СТК;
 • гармонический анализ реактивного тока печи и линии при применении СТК;

Табл. 1. Значения 1-минутных доз фликера на объекте и модели без СТК

Объект	2,00	2,50	2,64	1,95	2,2	2,11	1,82	2,06	2,85	2,37
Модель	2,02	2,49	2,65	1,97	2,17	2,13	1,81	2,01	2,82	2,35
Объект	2,55	2,15	2,50	2,70	2,02	1,85	2,10	2,54	2,28	2,98
Модель	2,56	2,14	2,47	2,73	2,06	1,83	2,11	2,52	2,29	3,01

Табл. 2. Значения 1-минутных доз фликера на объекте и модели при работающем СТК

Объект	1,30	1,25	1,35	1,13	0,97	1,30	1,25	1,05	0,98	1,22
Модель	1,25	1,30	1,31	1,16	0,93	1,27	1,28	1,06	0,95	1,25
Объект	1,31	1,18	1,38	1,36	1,02	1,15	0,82	0,78	1,17	1,12
Модель	1,33	1,15	1,33	1,34	0,99	1,11	0,85	0,74	1,19	1,15

• оценка характеристик сигнала управления в зависимости от динамики изменения реактивного тока ДСП.
 • оценка качества работы регулятора и проверка его работы с различными коэффициентами;
 • оптимизация фильтрации реактивного тока ДСП, проектирование цифровых фильтров, входящих в состав датчика реактивного тока.
 4. Исследования, проведенные на модели комплекса «СЕТЬ–ДСП–СТК», позволили разработать новый алгоритм системы регулирования СТК для ДСП, с помощью которого удалось дополнительно снизить негативное влияние ДСП и повысить качество электроэнергии питающей сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности. Под ред. Матура Р.М. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
2. Ананишвили К.Е., Коровин А.И., Ольшванг М.В., Рычков Е.В., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы для сетей электропитания мощных дуговых печей // Тезисы докладов VIII Всесоюзного н/т совещания по электротермии и электротермическому оборудованию. г. Чебоксары. М., 1985.
3. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения). // «Электро», № 5, 2003 г.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2007.
5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс. СПб.: Питер, 2008.
6. Omer Ozgun, Ali Abur. Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
7. Tongxin Zheng, Elham B. Makram. An Adaptive Arc Furnace Model. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000.
8. ГОСТ Р 51317.4.15-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Технические требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2000.

Наша стратегия – эффективное использование электроэнергии
и энергетических технологий для более экологичного будущего



Комплекс промышленной автоматизации на базе ARTICS Smart Energy контролирует потоки электроэнергии в локальных сетях и позволяет оптимальным образом интегрировать нагрузку и генерирующее оборудование, добиваясь максимальной энергоэффективности и энергосбережения.

Мы предлагаем нашим клиентам готовые решения на основе следующих видов продукции:

- Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК) напряжением 6...35 кВ мощностью до 200 Мвар для промышленности и электроэнергетики
- Управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа (УШРТ) напряжением 110...400 кВ мощностью до 160 Мвар
- Статические компенсаторы реактивной мощности на базе преобразователей напряжения СТАТКОМ
 - для электроэнергетики напряжением до 35 кВ мощностью до 100 Мвар
 - для промышленности напряжением 6–10 кВ мощностью до 6 Мвар
- Электрические двигатели и частотно-регулируемые электроприводы
- Системы автоматизации технологических процессов
- Мощные преобразователи постоянного тока (до 120 кА)