

Опыт разработки и внедрения динамического тиристорного компенсатора реактивной мощности на сталеплавильных печах

В статье описаны результаты разработки высокодинамичного компенсатора реактивной мощности с применением фильтрокомпенсирующих цепей и отечественных тиристорных блоков. Показано, что выбранная структура, технические решения и алгоритмы позволили добиться сокращения времени плавки и значительного экономического эффекта.

Алексей Клоков

aaklokov@mail.ru

Валерий Вачугов

asuep@rambler.ru

Андрей Ершков

and_er@mail.ru

Дмитрий Тюрин

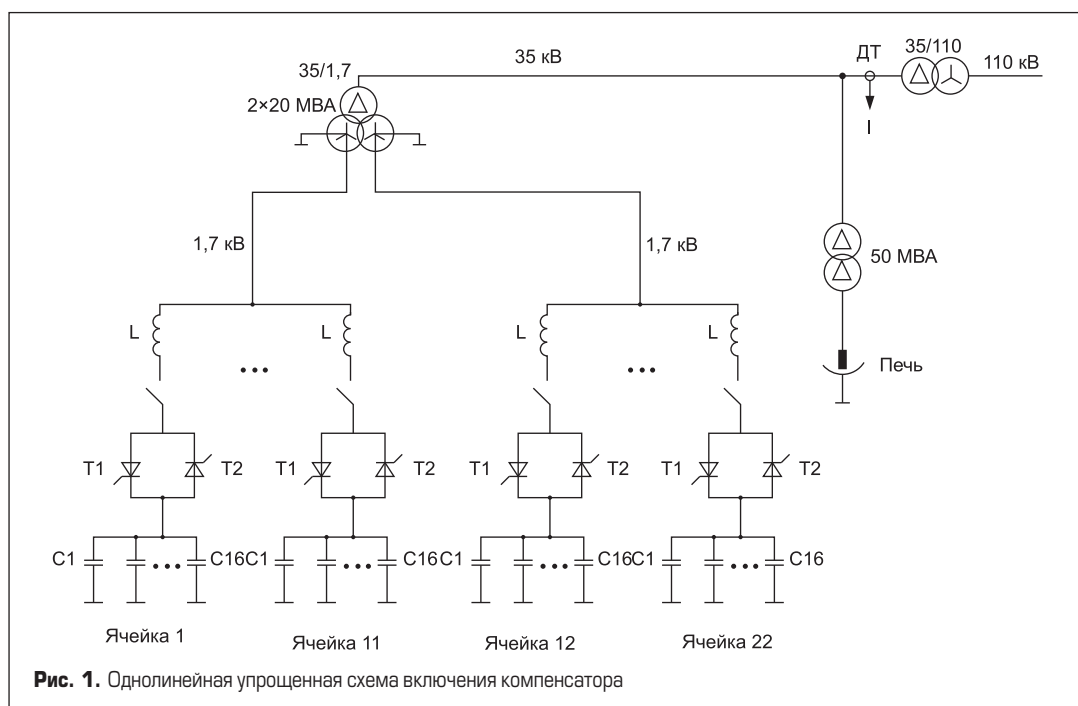
turindmitry@yandex.ru

Нагрузка в промышленных сетях обычно имеет индуктивную составляющую тока, что приводит к потреблению реактивной мощности (РМ), увеличению платы за электроэнергию, дополнительным потерям в сетях, завышению мощности трансформаторов и сечения кабелей, отклонению напряжения в сети от номинального. По оценкам зарубежных экспертов, доля реактивной энергии для различных объектов составляет 12–45% от активной. Для борьбы с этими явлениями применяют компенсацию РМ, подключая к сети фильтрокомпенсирующие и конденсаторные установки таким образом, чтобы результирующий коэффициент мощности был близок к единице [1].

Для таких мощных объектов, как электродуговые печи, задача компенсации реактивной энергии осложняется резкопеременным, нелинейным и случайным характером потребления токов и коэффициентов мощности, несинусоидальностью и асимметрией фазных токов, вызванных корот-

кими замыканиями электродов с шихтой, обрывами дуг при обвалах шихты и неустойчивым их горением в период расплавления, поэтому необходимо применять быстродействующие системы слежения за токами и углами. В настоящее время для сталеплавильных печей одним из популярных типов компенсаторов являются статические тиристорные компенсаторы (СТК), которые обычно содержат фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ) и тиристорно-реакторные группы, с помощью которых осуществляется симметрирование напряжений, генерирование необходимой в данный момент реактивной мощности, стабилизация напряжения в точке подключения к сети [2, 3, 4].

В ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) совместно с ТОО «Фирма АСУЭП» (г. Павлодар) для нужд сталеплавильного производства ТОО «KSP Steel» разработан и внедрен на объекте мощный компенсатор РМ для двух сталеплавильных печей ДСП-60. После обследования объекта и необходи-



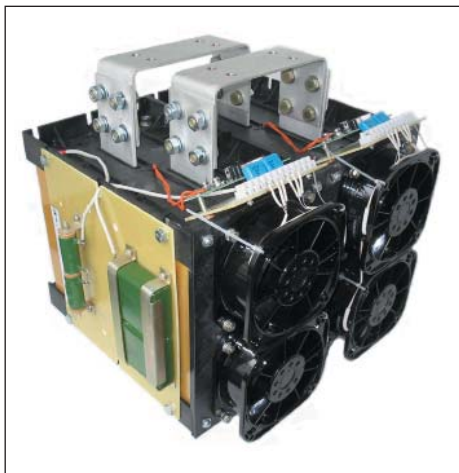


Рис. 2. Внешний вид тиристорного блока БК2Т-1400-1,1-П

ных расчетов было решено применить для компенсации комбинированный способ — настроенную на третью гармонику мощную ФКЦ, состоящую из последовательно соединенных конденсаторов и реакторов на напряжение 35 кВ, и определенное количество управляемых низковольтных ФКЦ, настроенных на пятую гармонику и подключаемых тиристорами к сети 1,7 кВ (после понижающих трансформаторов 35/1,7 кВ). На каждую фазу каждого из двух понижающих трансформаторов к шинам 1,7 кВ подключено по 22 ячейки мощностью 1 МВАр, таким образом, все ячейки компенсатора позволяют генерировать до 132 МВАр.

Упрощенная однолинейная схема подключения компенсатора для одной печи показана на рис. 1.

Тиристорные ключи необходимы для бестоковой коммутации конденсаторных батарей, включение тиристора происходит в момент равенства фазного напряжения на ФКЦ и напряжения на конденсаторе.



Рис. 3. Внешний вид СУ ТТКРМ

Основные достоинства структуры ФКЦ + ТК:

- сравнительно низкая стоимость отдельного шкафа с локальной микроконтроллерной системой управления, низковольтными конденсаторами и тиристорами;
- низкие собственные потери;
- отсутствие генерации высших гармоник;
- относительно высокое быстродействие;
- простая возможность наращивания мощности;
- высокие эксплуатационные характеристики благодаря возможности бесперебойной работы компенсатора при выводе в ремонт любого количества конденсаторных ячеек.

Такая структура является и наиболее экономичной в эксплуатации [3].

Печные трансформаторы подключены к линии 35 кВ, и к ней же через трансформаторы 35/1,7 подключены ячейки компенсатора. Каждая ячейка компенсатора представляет собой шкаф типа КСО-285, в нижней части которого смонтированы 16 конденсаторов КЭП-1,05-63 производства ООО «УККЗ» (Казахстан) со встроенными предохранителями и разрядными резисторами. Каждый из конденсаторов обеспечивает мощность 63 кВАр, поэтому суммарная мощность конденсаторов одной ячейки равна 1 МВАр при напряжении 1000 В.

Для фильтрации высших гармоник токов над шкафом каждой ячейки установлен реактор индуктивностью 0,139 мГн, образующий с конденсаторной батареей контур, настроенный на пятую гармонику. При таком включении индуктивность реактора одной ячейки ограничивает ток при короткозамкнутом конденсаторе ФКЦ до величины 15 кА и защищает остальное оборудование.

В каждой ячейке установлен силовой блок БК2Т-1400-1,1-П (рис. 2), который содержит два тиристора Т163-1000-42-71 УХЛ2, включенных встречно-параллельно, снабженные цепи, драйверы и датчики температуры охлаждающих элементов каждого из тиристоров.

Охлаждение силового блока осуществляется четырьмя вентиляторами 1,25 ЭВ-2,8-6-3272. В шкафу также смонтированы разъединитель с видимым разрывом цепи и заземляющие ножи.

На лицевой двери шкафа установлена локальная микроконтроллерная система управления тиристорного ключа компенсатора реактивной мощности (СУ ТТКРМ), показанная на рис. 3 и реализующая перечисленные ниже основные функции:

1. Синхронизация с сетью и формирование импульсов управления тиристорами.
2. Включение данной ячейки в работу и отключение по сигналу с системы управления релейной защиты и автоматики (СУРЗА) верхнего уровня.
3. Защита от токов короткого замыкания в ячейке — останов управления, когда ток через батарею конденсаторов превышает заданную уставку. Время срабатывания защиты выбирается программно. Защита срабатывает при коротких замыканиях в конденсаторах и, благодаря выдержке времени,

отстраивается от времени перегорания встроенных в конденсаторы предохранителей.

Ток однофазного короткого замыкания до реактора $I_{кзд} = 46,53$ кА.

Ток однофазного короткого замыкания после реактора для $I_{кзп} = 15,16$ кА.

4. Контроль срабатывания предохранителей конденсаторов батареи (по первому уровню — выдача предупреждающего сигнала для СУРЗА, по второму уровню — отключение управления и выдача сигнала «АВАРИЯ»).

Контроль количества сработавших предохранителей реализован по отклонению фактической емкости конденсаторов от первоначально установленной. Для этого в память контроллера СУ ТТКРМ в момент запуска вводится точное значение суммарной емкости конденсаторной батареи ячейки, а в процессе работы контроллер вычисляет фактическое значение оставшейся емкости батареи и ее отклонение от первоначально введенного значения. Величина емкости, выраженная в процентах, сравнивается с уставками и выводится в виде токового сигнала 0–10 мА на аналоговый щитовой прибор для визуального контроля состояния конденсаторной батареи.

5. Контроль текущего напряжения на конденсаторе для вычисления момента включения тиристора и контроль тока через ячейку с помощью датчика LEM.
6. Защита тиристорov от превышения температуры с помощью датчиков температуры ТСМУ 9304 — работа по первой и второй уставкам с выработкой сигналов предупреждения и неготовности и снятием сигнала неготовности после снижения температуры до допустимого значения ниже первой уставки.
7. Контроль короткого замыкания (пробоя) тиристорov.
8. Защита от невключения тиристорov при поданном открывающем импульсе.
9. Передача данных о сигнализации, срабатывании защит, состоянии ячейки и положении элементов управления (в том числе уровни токов, напряжений и температур охлаждающих тиристорov) по гальванически развязанному последовательному каналу (интерфейс RS-485, протокол Modbus RTU) в СУРЗА.
10. Возможность автономной работы ячейки при отсутствии сигналов от СУРЗА.
11. В СУ ТТКРМ предусмотрен дополнительный токовый аналоговый вход и возможность задания программным обеспечением уставки срабатывания и выдержки времени для включения ТТКРМ. Эта функция предусмотрена для возможности автономного управления компенсатором (без СУРЗА) по величине индуктивного тока компенсируемой нагрузки от иной системы управления.
12. СУ ТТКРМ поддерживает все заданные режимы при возобновлении силового и оперативного питания после перебоев.
13. Предусмотрена возможность перепрограммирования всех уставок с помощью последовательного канала с ноутбука.

Сообщение предупредительной сигнализации формируется при срабатывании всех видов диагностики, не приводящих к снятию импульсов с тиристоров, а аварийная сигнализация — при срабатывании всех видов защит, когда управление с тиристоров ячейки снимается.

На передней панели СУ ТККРМ установлены элементы управления:

- переключатель режимов «ВКЛ»–«СУРЗА»–«АНАЛОГ»–«ВЫКЛ»;
- кнопка «СБРОС» для сброса защиты после устранения неисправности;
- тумблер «ВКЛ» включения питания системы управления данного ТККРМ.

На переднюю панель СУ ТККРМ выведена индикация (светодиоды):

- напряжений питания +15 В, -15 В, +5 В;
- индикаторы работы тиристоров — два мигающих светодиода T1 и T2;
- индикатор «ЗАЩ» — ТККРМ не готов (сработала защита по одной из «высоких» уставок);
- индикатор УС наличия напряжения 40 В на конденсаторах (предупреждающая сигнализация для персонала о запрете включения заземляющих ножей разъединителя перед ремонтом ячейки);
- индикатор количества сработавших предохранителей (контроль емкости) — миллиамперметр, показывающий, сколько процентов емкости подключено в данный момент по отношению к первоначальной.

В блоке применены тиристорные драйверы ДРТ11-5-2ОП1К-1 (ДЖИЦ.687253.435), вклю-

чающие преобразователь постоянного питающего напряжения в переменное (рис. 4), разделительный трансформатор, выпрямители для питания управляющей схемы и выходного каскада, выходной каскад.

Электрическая изоляция выходного каскада от источника питания и системы управления обеспечивается трансформатором и оптопарами.

Амплитуды тока и напряжения выходного импульса достаточны для включения тиристора.

Технические характеристики драйвера:

- напряжения питания +24 В ±5%; +5 В ±5%;
- потребляемая мощность от источника +24 В — не более 6 Вт;
- амплитуда выходного тока при коротком замыкании — не менее 4 А;
- скорость нарастания выходного тока — не менее 20 А/мкс;
- средний выходной ток полки в течение импульса при коротком замыкании на выходе драйвера — не менее 1 А;
- амплитуда выходного напряжения при холостом ходе — не менее 10 В;
- максимальная частота импульсов — 20 кГц;
- максимальная длительность импульсов — 3 мс;
- скважность импульсов — не менее 4.

Осциллограмма выходного тока драйвера при частоте повторения импульсов 50 Гц и длительности 120 мкс при работе на сопротивление шунта 0,1 Ом показана на рис. 5.

В режиме «СУРЗА» контроллер ждет от СУРЗА по интерфейсу RS-485 сигнала на включение, после чего, при поступлении ближайшего синхроимпульса, отслеживает напряжение на конденсаторе, включает очередную тиристор и держит батарею подключенной до прихода от СУРЗА приказа на отключение ячейки.

В этом режиме также проводятся все сопутствующие анализы — температур охладителей тиристоров, превышения токов через конденсаторы, состояний тиристоров, величины емкости, целостности предохранителей вентиляторов в силовом блоке.

В режиме «АНАЛОГ» контроллер следит за аналоговым сигналом уставки, и, если уставка больше запрограммированной в памяти величины, включает тиристоры. Этот способ предусмотрен для работы секции шкафов без управления от СУРЗА или при отказе этого управления. Шкафы должны быть запрограммированы на разные уставки таким образом, чтобы с помощью несложных схе-

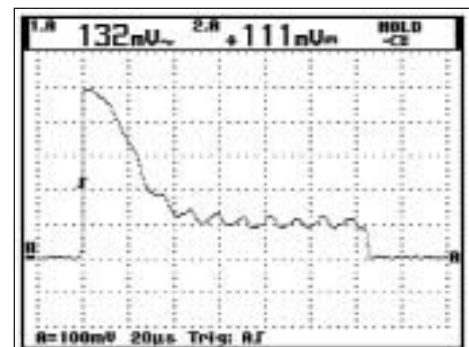


Рис. 5. Осциллограмма выходного тока тиристорного драйвера



Рис. 4. Внешний вид платы тиристорного драйвера ДРТ11-5-2ОП1К-1



Рис. 6. Вид на монтаж шкафа ячейки компенсатора

технических средств организовать управление ячейками компенсатора.

Аналоговый управляющий сигнал подается одновременно на все шкафы каждой фазы, а включаются в работу только те ячейки, для которых запрограммированная уставка меньше управляющего сигнала.

Вид на монтаж шкафа ячейки показан на рис. 6.

СУРЗА представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для анализа состояния сети, выработки решения о необходимости компенсации реактивной (индуктивной) составляющей мощности, потребляемой нагрузкой этой сети, и передачи управляющих команд массиву ячеек — генераторов реактивной мощности (СУ ТТКРМ). Регулирование РМ, генерируемой компенсатором, осуществляется по мгновенным величинам токов, потребляемым по двум линиям 35 кВ, с помощью программного ПИ-регулятора.

В СУРЗА реализованы необходимые защиты и предусмотрена возможность перепрограммирования всех необходимых уставок с клавиатуры на базе резистивного сенсорного экрана.

Центральным процессором системы служит промышленный компьютер на базе процессора AMD Geode GX1, совместимый по своей архитектуре и системе команд с IBM PC/AT.

Данный модуль реализует всю «интеллектуальную» часть работы системы, а также обеспечивает интерфейс пользователя посредством терминала на базе LCD-дисплея. За сбор, обработку и группировку данных о состоянии ячеек СУ ТТКРМ непосредственно отвечают четыре промышленных контроллера ADAM 4500, связанные с ячейками СУ ТТКРМ, разбитыми на четыре секции, по гальванически развязанным каналам RS-485. Собранный информация поступает на центральный модуль по четырем независимым каналам RS-232.

Модуль ADAM 4500 непрерывно и последовательно опрашивает все подчиненные ячейки СУ ТТКРМ, считывая их текущие состояния и значения рабочих параметров. По завершении каждого цикла опроса информация о состоянии собирается в один пакет и отправляется в основной процессор с контрольной суммой. Процессор по мере надобности передает модулю управляющие команды, которые вынуждают модуль прервать цикл опроса и оттранслировать данные команды на шину RS-485 ячеек СУ ТТКРМ.

Центральный модуль следит за токами и напряжениями сети 35 кВ, оцифровывая их с частотой 2000 отсчетов в секунду, формирует для них движущиеся окна шириной 40 отсчетов (один период 50 Гц) и вычисляет в этих окнах

значения первых коэффициентов разложения в ряд Фурье (алгоритм БПФ). Сдвиг окна и вычисление коэффициентов осуществляется с получением каждого нового отсчета. Далее потребляемые токи раскладываются на три составляющие — прямую, обратную и нулевую последовательности, вычисляется реактивная мощность, которую необходимо сгенерировать по каждой фазе в сеть, чтобы реактивная составляющая потребляемого из сети тока каждой фазы устремилась к заданной пользователем уставке, а угол сдвига фаз между токами прямой последовательности составлял 120 электрических градусов. Данные значения поступают на вход ПИ-регулятора, который определяет количество ячеек СУ ТТКРМ, которые необходимо добавить или убрать в данный момент в каждой фазе. С целью равномерного распределения нагрузки по ячейкам, при необходимости увеличить количество задействованных ячеек, первыми включаются наиболее «холодные» или давно простаивающие ячейки, и наоборот, при уменьшении генерируемой мощности первыми выключаются ячейки, наиболее долго находящиеся в работе или близкие к предаварийному состоянию по одному из параметров.

Структурная схема СУРЗА приведена на рис. 7.

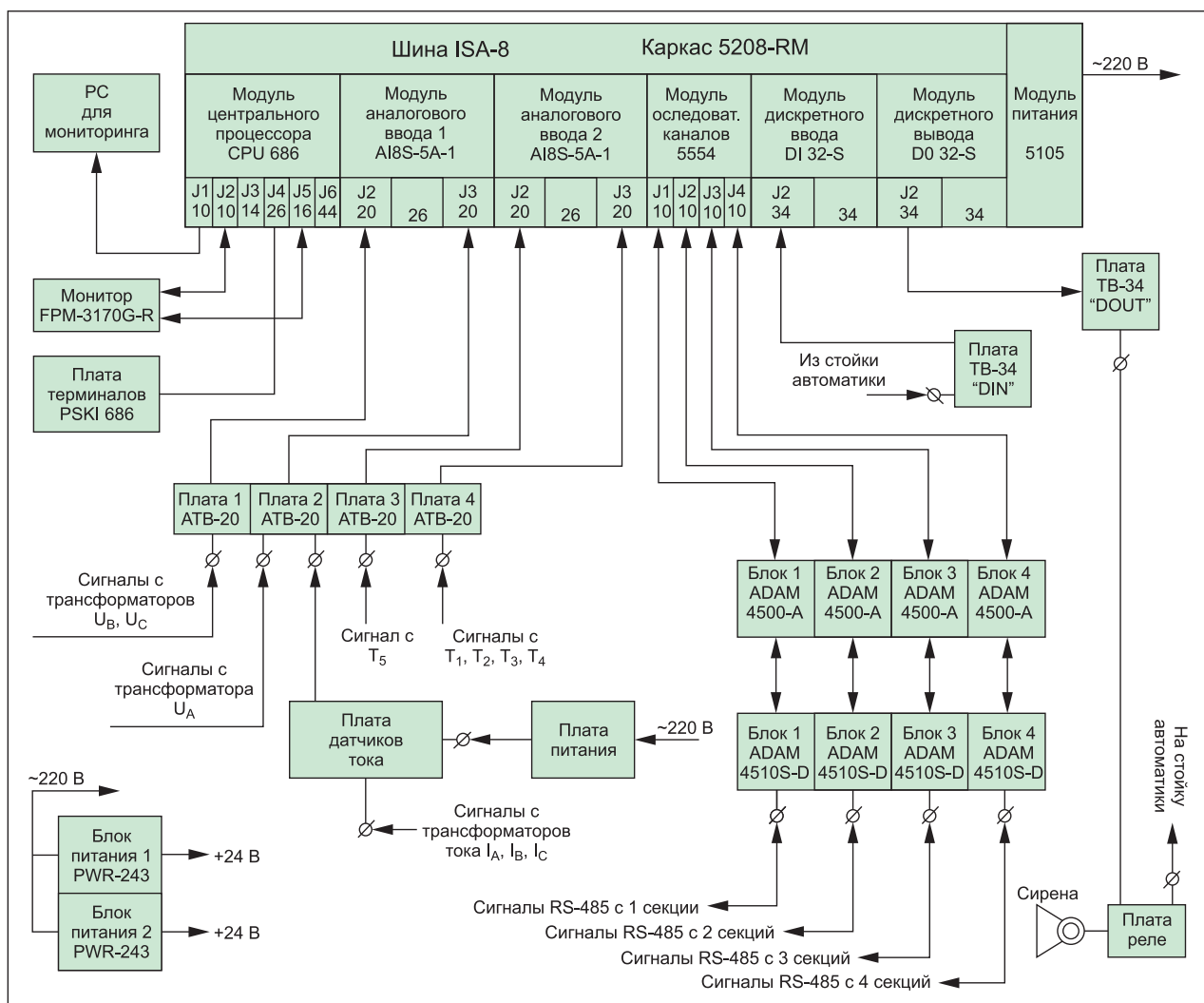


Рис. 7. Структурная схема СУРЗА

На этой схеме изображен блок контроллера, основой которого служит каркас 5208-RM с шиной ISA-8, объединяющей входящие в блок модули процессора, аналогового и дискретного ввода и вывода, а также модуль последовательного интерфейса.

Сигналы с датчиков тока и напряжения, а также с температурных датчиков поступают на модули аналогового ввода через терминальные платы АТВ-20, на которых смонтированы прецизионные делители напряжения для согласования диапазонов сигналов.

Модуль дискретного ввода DI32-5 с терминальной платой ТВ-34 обслуживают входные управляющие сигналы, поступающие со стоек автоматики.

Взаимодействие пользователя с СУРЗА организовано посредством LCD-дисплея с чувствительной к касаниям поверхностью. Общий вид главного экрана СУРЗА показан на рис. 8. Все измеряемые, вычисляемые и принимаемые от ячеек СУ ТККРМ данные сгруппированы в четыре страницы, выбор которых осуществляется посредством нажатия кнопок в левой верхней части главного экрана.

На главном экране отображаются вычисленные значения коэффициента нелинейности сети, углы между током и напряжением, активная и реактивная мощности, потребляемые нагрузкой, величины токов, напряжений, гистограммы гармоник напряжения от второй до пятнадцатой по трем фазам (сверху вниз — А, В, С). В правой части экрана отображается диаграмма токов и напряжений в векторной форме для визуального слежения в реальном времени за характером нагрузки. Такая форма отображения оказалась очень информативной и удобной для оператора.

С этого главного экрана можно вызвать несколько вспомогательных страниц с более детальной информацией о процессах в компенсаторе.

Для вызова страницы, отображающей параметры сети, служит верхняя кнопка панели управления на главном экране. Сама кнопка отображает пофазные углы между током и напряжением и величину РМ, потребляемой нагрузкой; эти данные отображаются все время, даже когда страница просмотра параметров сети неактивна.

Для вызова страницы просмотра состояния ячеек служит вторая сверху кнопка панели управления. На кнопке отображается уменьшенная копия страницы контроля состояния ячеек во время активности других страниц. На самой странице отображены сгруппированные по секциям и фазам кнопки, соответствующие ячейкам.

Цвет кнопки конкретной ячейки отражает текущее ее состояние:

- серый — связь с ячейкой не установлена (или ячейка просто отключена);
- синий — ячейка готова к работе и ждет команды на включение;

- зеленый — тиристоры ячейки открыты;
- желтый — ячейка находится в предаварийном состоянии;
- красный — ячейка в аварии;
- черный — тиристор в ячейке закорочен.

При нажатии кнопки отличного от серого цвета (серые не нажимаются) открывается страница просмотра состояния и параметров соответствующей ячейки и редактирования ее уставок. После ввода пароля можно изменить параметры ячейки: номинальную емкость, пороги предупреждения и аварии по емкости, перегреву, уставки температур, времена включения и выключения тиристора и т. д.

Для вызова страницы просмотра параметров СУРЗА служит третья сверху кнопка, на самой странице отображаются текущие пофазные значения токов и напряжений, значения пяти измеряемых СУРЗА температур и кнопка вызова редактора уставок СУРЗА. После ввода пароля можно изменить перечисленные ниже параметры СУРЗА:

- пороги предупредительной и аварийной сигнализации измеряемой наружной температуры;
- пороги предупредительной и аварийной сигнализации измеряемых внутренних температур (четыре датчика);
- пороги предупредительной и аварийной сигнализации напряжения сети 35 кВ;
- пороги предупредительной и аварийной сигнализации токов сети 35 кВ;
- время непрерывной работы ячейки — СУРЗА будет избегать (если это возможно, т. е. при наличии свободных ячеек) удержания каждой из ячеек, включенных в работу, дольше заданного времени;
- целевая уставка компенсатора — компенсация возможна не точно в 0, а может идти с перекомпенсацией или недокомпенсацией, в зависимости от уставки (уставка в МВАр на фазу);

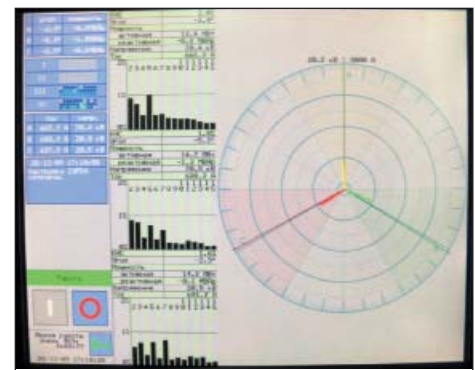


Рис. 8. Вид главного экрана СУРЗА

- скорость реагирования СУРЗА на изменение РМ сети.

Большее значение последнего параметра приводит к более быстрой реакции СУРЗА на изменения РМ, потребляемой из сети, и, соответственно, более точному удержанию уставки мощности. Однако слишком высокое значение данного параметра может привести к нестабильной работе. При пуске компенсатора экспериментально для конкретных печей подобрано максимальное рекомендуемое значение скорости реакции.

СУРЗА ведет журнал событий (хранятся 50 000 последних событий). Для просмотра событий и истории изменений состояний ячеек служит отдельная страница. Каждый элемент журнала содержит порядковый номер события в списке (для удобства просмотра списка номер за сообщением не закрепляется и будет изменен при добавлении нового элемента), дату и время возникновения события, краткое его описание. Для просмотра списка используется полоса навигации. Быстрое перемещение по списку может осуществляться посредством календаря (происходит перемещение к первому элементу с данной датой).

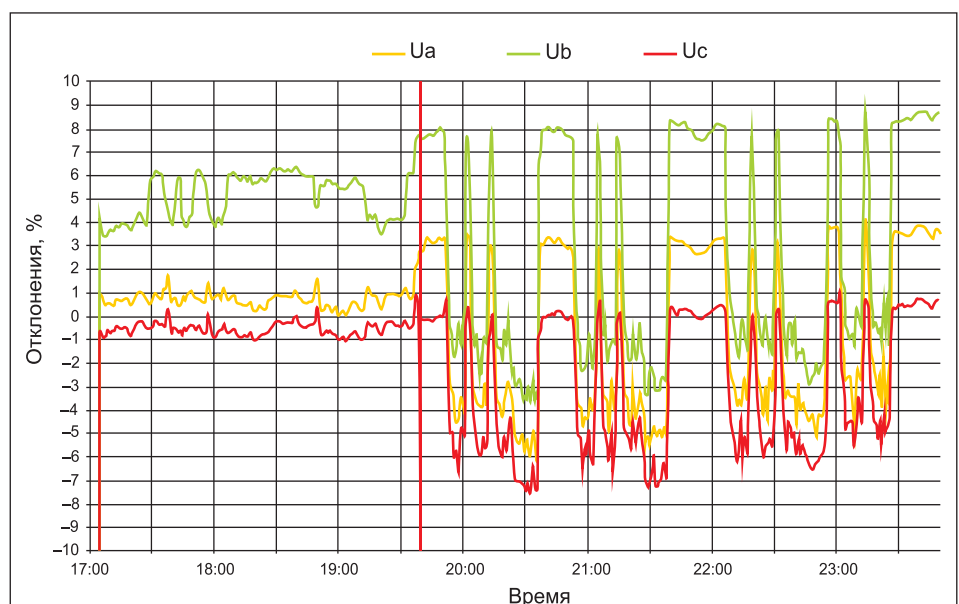


Рис. 9. Отклонения фазных напряжений на шинах 35 кВ

Отображаемые события можно отфильтровать по их типу, для чего служат четыре кнопки внизу экрана.

Эксплуатация компенсатора с двумя сталеплавильными печами производительностью 60 т металла в час показала высокую эффективность выбранных технических решений и алгоритмов и значительную экономию электроэнергии. В среднем, в течение одной плавки компенсатор генерирует 40 МВАр.

Некоторые результаты, снятые с помощью измерителя параметров электрической сети «Ресурс-UF2» и цифрового осциллографа АСК 3106, показаны на рис. 9–11.

Например, на рис. 9 приведены осциллограммы отклонения фазных напряжений на стороне 35 кВ, компенсатор был включен до отметки времени 19:40. Видно, что размах отклонений фазных напряжений при работающем компенсаторе в среднем для фазы А составлял около 1%, для фазы В — около 2,5%, для фазы С — около 1,2%, а без компенсатора (после времени 19:40) откло-

нения напряжений этих же фаз составляли соответственно 9, 11 и 7%.

На рис. 10 показаны графики коэффициентов несимметрии напряжения по нулевой (K0) и обратной (K2) последовательностям при работающем и отключенном компенсаторе. Видно, что при включенном компенсаторе несимметрия значительно лучше и укладывается в нормы, предписанные ГОСТ 13109-97.

На рис. 11 приведены графики активных и реактивных трехфазных мощностей на шинах 35 кВ в тех же условиях. Видно, что средняя активная мощность во время плавки на одной печи составляет около 34 МВт, реактивная без компенсатора — около 30 МВА, а при работающем компенсаторе — значительно меньше.

Заключение

В результате оптимизации коэффициентов основного ПИ-регулятора и подбо-

ра времен включения и выключения тиристоров ячеек при работе компенсатора удалось достигнуть среднего значения $\cos \varphi$ при работе печей под нагрузкой, равного 0,981 (без компенсатора при тех же условиях средний $\cos \varphi = 0,694$).

Наибольший экономический эффект при внедрении компенсатора дало сокращение времени плавки под током в среднем на 6,33 мин. Это объясняется стабилизирующим влиянием компенсатора на характер горения дуги.

С учетом сокращения времени плавки под током, среднее время плавки составляет 65,1 мин. Это соответствует возможности проведения дополнительно 2,6 плавки в сутки и получения одной печью дополнительно более 52 000 т металла в год, что обеспечило окупаемость установки компенсатора в течение двух лет.

Замеры показали, что работа компенсатора обеспечивает снижение удельного расхода электроэнергии на 1 т металла на 25 кВт·ч.

Кроме этого, сократился расход огнеупорных материалов и электродов, уменьшились потери активной мощности в сети 110 кВ, повысилось качество электроэнергии, существенно снизились удельные общецеховые расходы на выработку 1 т металла.

Работа компенсатора, снижая колебания напряжения, выполняет функцию стабилизации напряжения, снижает несимметрию напряжений и уровень высших гармоник, улучшает режим горения дуги и уменьшает ее негативное воздействие на энергосистему. После ввода компенсатора в работу параметры качества электроэнергии в точке подключения к сетям общего пользования, нормируемые ГОСТ 13109-97, не превышают допустимых значений.

Литература

1. Кочкин В. И., Нечаев О. П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС. 2000.
2. Николаев А. А., Корнилов Г. П., Анохин В. В. Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16, № 2.
3. Корнилов Г. П., Николаев А. А., Пястолова Д. Ю. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей широкого класса мощности // Электротехнические системы и комплексы. Электроэнергетика. 2016. № 1(30).
4. Чаплыгин Е. Е., Ковырзина О. С. Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей // Электричество. 2009. № 11.

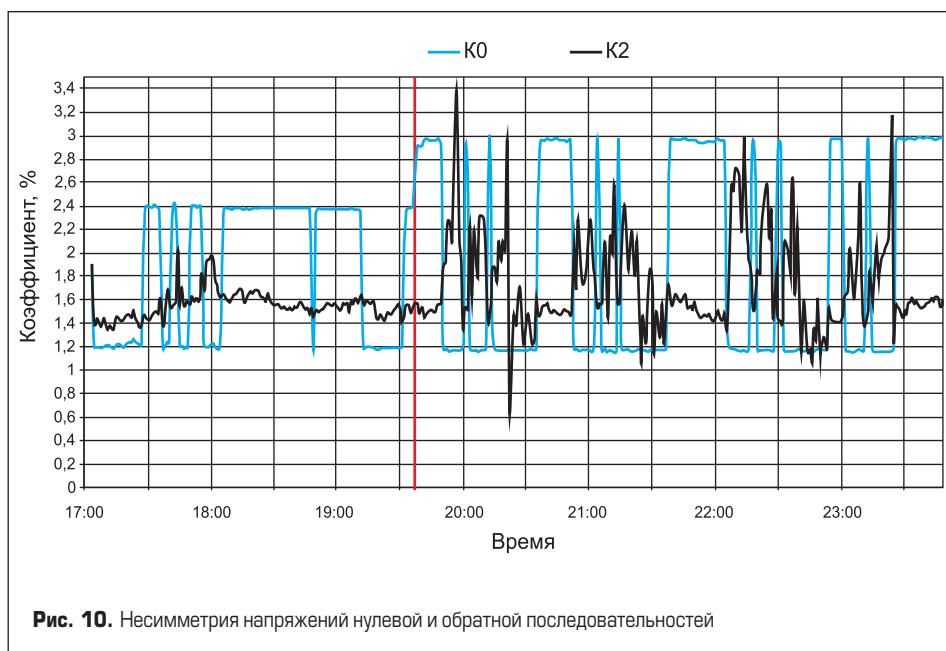


Рис. 10. Несимметрия напряжений нулевой и обратной последовательностей

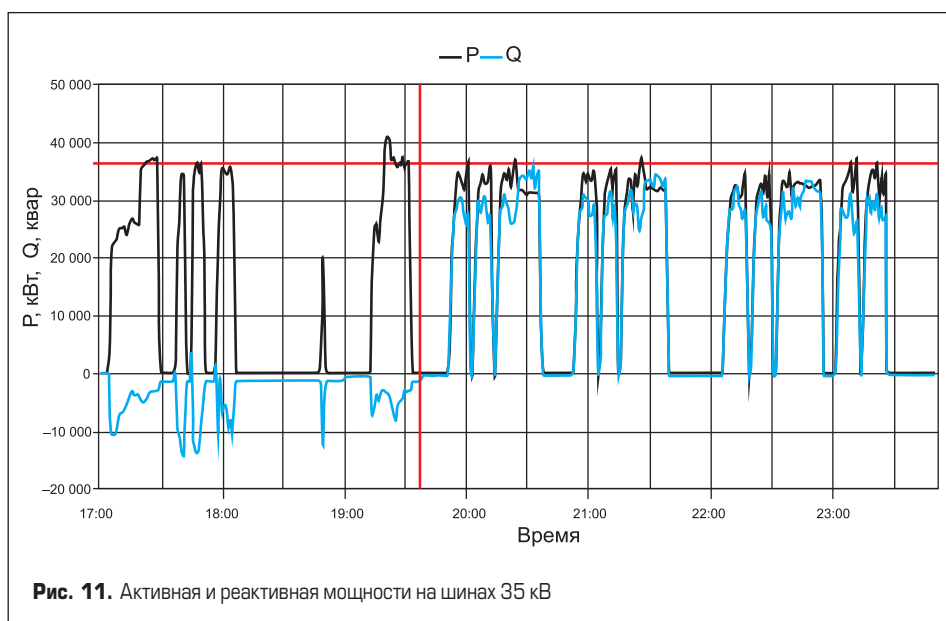


Рис. 11. Активная и реактивная мощности на шинах 35 кВ