

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.В. Анохин

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск*

Приведены основные результаты сравнительного анализа режимов работы статических тиристорных компенсаторов (СТК), устанавливаемых в системах электроснабжения мощных и сверхмощных дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Рассмотрены классические режимы регулирования СТК, которые направлены на обеспечение нулевого потребления реактивной мощности из питающей сети и на поддержание неизменного уровня напряжения в точке общего подключения СТК и ДСП. Дополнительно в статье представлено описание разработанного режима регулирования СТК, который предназначен для контроля суммарной активной мощности дуг ДСП. Исследование влияния параметров питающей сети и режима регулирования СТК на электрические характеристики ДСП проведено с помощью математической модели электросталеплавильного комплекса «ДСП-120-СТК», разработанной в приложении *Simulink* математического пакета *Matlab*. По результатам эксперимента определены основные достоинства и недостатки рассмотренных режимов регулирования СТК, даны общие рекомендации по их применению.

Ключевые слова: статический тиристорный компенсатор, дуговая сталеплавильная печь, режимы управления тиристорно-реакторной группой, компенсация реактивной мощности, электрические характеристики дуговой сталеплавильной печи.

Введение

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются несимметричными электроприемниками с нелинейной вольт-амперной характеристикой и резкопеременным режимом работы. Выплавка стали в дуговых печах при прямом подключении печного трансформатора к сети без компенсирующих устройств сопровождается высоким потреблением реактивной мощности из питающей системы и значительным ухудшением качества электрической энергии практически по всем показателям [1]. Нарушение баланса реактивной мощности в сторону дефицита приводит к отрицательному отклонению напряжения относительно его номинального уровня. Как известно, мощность печи имеет нелинейную зависимость от напряжения питания, поэтому из-за его снижения ухудшаются электрические характеристики самой ДСП. По этим причинам в системах электроснабжения мощных электросталеплавильных комплексов устанавливаются специальные компенсирующие устройства. Широкое распространение получили статические тиристорные компенсаторы (СТК), которые обладают достаточным быстродействием для компенсации резкопеременной нагрузки и возможностью пофазного регулирования для устранения несимметрии напряжений. Также к достоинствам СТК можно отнести их невысокую стоимость по сравнению с быстродействующими статическими компенсаторами (СТАТКОМ) [2–4].

Статический тиристорный компенсатор. Режимы управления тиристорно-реакторной группой

Статический тиристорный компенсатор – это устройство косвенной компенсации реактивной мощности, которое состоит из двух основных частей: тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ). Фильтрокомпенсирующие цепи представляют собой нерегулируемый источник реактивной мощности, их параметры настроены на фильтрацию токов высших гармоник от ДСП и ТРГ. Тиристорно-реакторная группа предназначена для потребления избытка реактивной мощности, генерируемой ФКЦ, в периоды технологических пауз дуговой печи или при ее работе с малыми токами. Величина потребляемой ТРГ реактивной мощности пофазно регулируется углом открытия вентильной группы, элементами которой являются тиристоры или симисторы [5–7].

На сегодняшний день системы автоматического управления СТК предусматривают возможность работы тиристорно-реакторной группы в двух режимах: обеспечение нулевой величины суммарной реактивной мощности электросталеплавильного комплекса и стабилизация напряжения в точке общего подключения дуговой печи и компенсатора [8, 9].

В первом случае при работе СТК по реактивной мощности с нулевой уставкой $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр

реактивная составляющая тока нагрузки полностью компенсируется, в результате чего в питающей сети наблюдаются только незначительные потери из-за протекания активных токов ДСП. При стабильном напряжении во внешней сети напряжение на шинах распределительного устройства (РУ) электросталеплавильного комплекса будет сохраняться близким к номинальному, что позволит печи работать на проектных мощностях. Однако на практике питающее напряжение не является постоянной величиной и изменяется в некоторых пределах. Регулирование вторичного напряжения осуществляется с помощью переключения ступеней РПН сетевого трансформатора, через который получает питание комплекс «ДСП-СТК». Стоит отметить, что такое регулирование производится с определенным шагом, величина которого зависит от количества ступеней, и трансформатор работает с одним положением РПН в некотором диапазоне первичного напряжения, что, естественно, отражается на величине вторичного напряжения [10]. В этой ситуации напряжение на первичной стороне печного трансформатора при работе СТК по реактивной мощности может сильно отклоняться от номинального уровня.

Для поддержания номинального уровня напряжения на шинах сталеплавильного комплекса СТК переводят в режим регулирования по напряжению $U_{\text{шин}} = \text{const}$. В этом случае компенсатор берет на себя функцию автоматического подбора уставки по реактивной мощности в каждый момент времени с целью стабилизации напряжения на заданном оператором уровне. Поддержание номинального напряжения на шинах РУ еще не обеспечивает полного контроля величины активной мощности ДСП. В процессе плавки длины дуг постоянно изменяются, особенно на начальных стадиях (из-за обвалов шихты, проплавления коллодцев и т. п.). Система управления положением электродов дуговой печи обладает достаточно высокой инерционностью по сравнению со скоростью изменения электрических параметров, поэтому на графиках изменения активной мощности ДСП во времени наблюдаются ее колебания относительно некоторого среднего уровня, определяемого величиной уставки регулирования полной проводимости $Y_{\text{уст}}$ и средним уровнем напряжения питающей сети.

Таким образом, существующие режимы регулирования СТК позволяют влиять на величину активной мощности ДСП лишь косвенно, оперируя электрическими параметрами сети: реактивной мощностью и напряжением. С целью непосредственного контроля активной мощности разработан новый режим регулирования ТРГ, который предусматривает прямое задание уставки по активной мощности дуг ДСП [11]. Компенсатор за счет управления реактивной мощностью автоматически подстраивает величину напряжения на шинах РУ

для обеспечения требуемой мощности ДСП. Оператору будет достаточно ввести в систему управления СТК диапазон уставок при различных стадиях плавки.

Разработка математической модели электросталеплавильного комплекса ДСП-120-СТК

Исследование параметров сети и электрических характеристик ДСП при трех режимах регулирования СТК проведено на математической модели электросталеплавильного комплекса ДСП-120-СТК, разработанной в приложении *Simulink* математического пакета *Matlab*. Структурная схема математической модели изображена на рис. 1. Для наглядности первичные цепи силовой сети показаны электрической схемой.

Система автоматического управления (САУ) тиристорно-реакторной группы *MACH2* фирмы *ABB* работает на основе сигналов ортогональных составляющих прямой и обратной последовательности токов и напряжений комплекса ДСП-СТК [12]. В представленной модели САУ ТРГ предусмотрены прямой быстродействующий канал и три обратных канала, соответственно, по суммарной реактивной мощности комплекса, напряжению на шинах РУ и активной мощности ДСП. Прямой канал осуществляет симметрирование нагрузки, исключая токи обратной последовательности. Обратные каналы производят необходимую добавку к проводимостям фаз ТРГ для реализации принятого режима управления. Задание уставки регулирования активной мощности осуществляется в зависимости от номера ступени печного трансформатора и рабочей кривой. В общем случае при определении уставки активной мощности необходимо также учитывать номер ступени реактора печного трансформатора. На исследуемом объекте реактор встроен в печной трансформатор и имеет фиксированные параметры, поэтому в данной модели номер ступени реактора в САУ ТРГ не подается. Расчет действительной активной мощности дуг осуществляется на основе ортогональных составляющих прямой последовательности токов дуг и вторичных напряжений печного трансформатора, мгновенные значения которых приходят из системы управления *HiREG Plus*. Суммарные значения проводимостей фаз ТРГ подаются на блоки нелинейности, в которых реализована обратная регулировочная характеристика $\alpha = f(B)$. Сигналы задания на углы отпирания тиристорной группы передаются в систему импульсно-фазового управления (СИФУ) [13–16].

Для управления положением электродов на исследуемом объекте используется САУ *HiREG Plus* фирмы *Danieli*. Алгоритм данной системы подразумевает косвенное регулирование адмитанса электрического контура за счет поддержания на нулевом уровне ошибки регулирования. Подробно

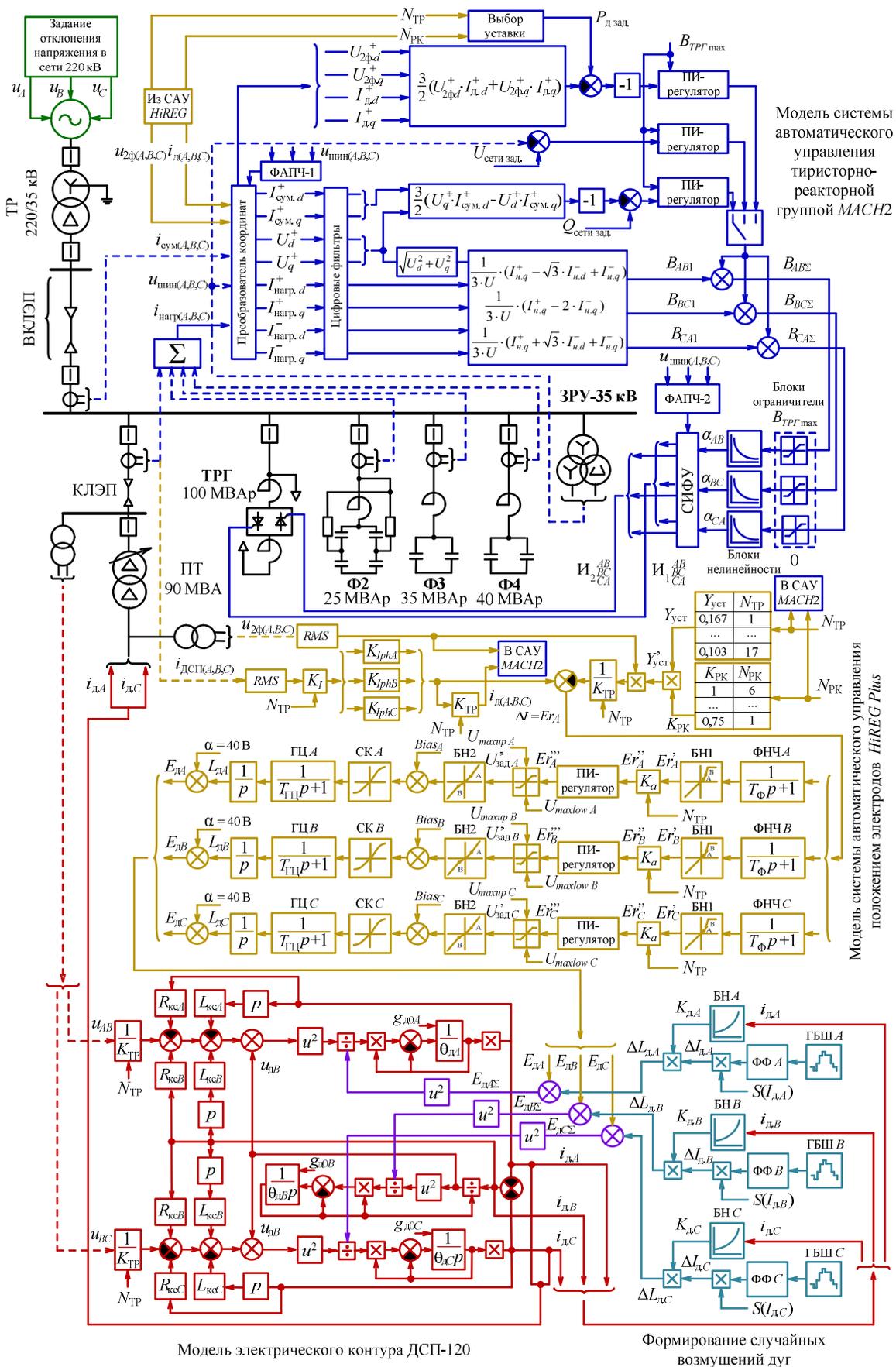


Рис. 1. Структурная схема математической модели электросталеплавильного комплекса ДСП-120-СТК

математическая модель САУ *HiREG Plus* описана в работах [17–21].

Электрическая дуга ДСП-120 в математической модели представлена нелинейным звеном, описываемым нелинейным дифференциальным уравнением Касси [22].

Для исследования особенностей работы комплекса ДСП-СТК в условиях приближенных к реальным в модели предусмотрено задание отклонений напряжения во внешней сети на стороне 220 кВ и моделирование случайных колебаний длин дуг ДСП-120 [23]. На выходе блока формирования случайных возмущений дуг получаем изменение их длин $\Delta L_d \approx \Delta E_d$, которые суммируются со значениями ЭДС дуг из модели САУ *HiREG Plus*.

Результирующие величины E_d поступают в модель электрической дуги и короткой сети, из которой в имитационную модель системы электроснабжения электросталеплавильного комплекса подаются сигналы токов дуг.

Сравнительный анализ режимов регулирования СТК

На математической модели комплекса ДСП-120-СТК были получены графики изменения электрических параметров сети и активной мощности дуг ДСП при трех режимах регулирования СТК, причем для их объективного сравнения отклонения напряжения в сети 220 кВ и возмущения длин дуг во всех случаях были одинаковыми.

Отклонения напряжения в сети 220 кВ принимались от 0% $U_{\text{номТР}}$ (поддерживалось на неизменном номинальном уровне) до $\pm 1,5\% U_{\text{номТР}}$. На рис. 2, а представлен график изменения напряжения питающей сети с $\delta U_{\text{откл}} = \pm 1,5\% U_{\text{номТР}}$. Для оценки влияния нестабильного процесса плавки на работу комплекса были сняты графики изменения электрических параметров ДСП и сети 35 кВ при двух коэффициентах усиления колебаний длин дуг.

При регулировании СТК по реактивной мощности характер изменения напряжения на шинах РУ-35 кВ аналогичен отклонению напряжения на стороне 220 кВ, вследствие чего мощность дуг также изменяется вокруг некоторого среднего значения. Реактивная мощность практически полностью компенсируется, коэффициент реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) близок к нулю, поэтому данный режим характеризуется минимальными потерями активной мощности в элементах сети до шин РУ-35 кВ.

При проведении исследований осуществлялся контроль коэффициента реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и энергоснабжающей организации, коэффициент $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}$ контролируется на первичной стороне понизительного трансформатора в сети 220 кВ.

Для сетей напряжением $U > 110$ кВ в соответствии с приказом Минэнерго № 380 от 23 июня 2015 г $\text{tg}\varphi_{\text{норм}} = 0,5$. По рис. 2, г можно видеть, что в режиме работы СТК с уставкой $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр величина активной мощности дуг зависит от двух факторов: отклонения уровня напряжения на первичной стороне печного трансформатора и колебания длин дуг ДСП. Для наглядности проведено наложение области распределения рабочих точек ДСП-120 на ее электрическую характеристику $P_d = f(I_d)$ (см. рис. 3, а). В таблице представлены средние значения мощностей $M(P_d)$ и токов дуг $M(I_d)$, а также их стандартные отклонения $S(P_d)$ и $S(I_d)$, полученные при моделировании работы комплекса ДСП-120-СТК в различных условиях.

Переключение САУ ТРГ в режим поддержания напряжения $U_{\text{ном}} = 35$ кВ позволило стабилизировать его уровень на шинах РУ-35 кВ (рис. 2, б) при отклонениях напряжения в сети 220 кВ за счет изменения величины суммарной реактивной мощности комплекса ДСП-СТК (рис. 2, в). В периоды отрицательного отклонения напряжения в сети 220 кВ реактивная мощность комплекса ДСП-СТК Q_{Σ} имеет емкостный характер, в результате уровень напряжения на шинах РУ-35 кВ повышается. В периоды положительных отклонений напряжения Q_{Σ} имеет индуктивный характер, при этом протекание реактивной мощности в сети приводит к дополнительным потерям активной мощности в ее элементах до шин РУ-35 кВ. На графике $U_{\text{шин}} = f(t)$ (рис. 2, б) выделены области нарушения режима регулирования СТК из-за закрытия тиристоров при увеличении угла отпирания ТРГ до $\alpha \approx 180^\circ$, которые имеют место при максимальном снижении напряжения в сети 220 кВ (δU_{max}^-) в ситуации дефицита емкостной составляющей реактивной мощности нагрузки. Коэффициент реактивной мощности не выходит за нормативные значения (рис. 2, д), однако если предположить, что комплекс ДСП-СТК имел большую установленную мощность, то при определенных условиях имели бы место превышения $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}$. Активная мощность ДСП при работе СТК в режиме $U_{\text{шин}} = \text{const}$ не зависит от уровня напряжения во внешней сети, а колебания P_d обусловлены изменением длин дуг и инерционностью системы управления положением электродов (рис. 4, б и в).

В третьем случае СТК работал в режиме поддержания неизменной мощности ДСП. Как можно видеть по рис. 2, г (регулирование СТК по активной мощности ДСП) график $P_d = f(t)$ имеет сглаженную форму, а среднее значение мощности дуг близко к уставке на регулирование. Можно сделать

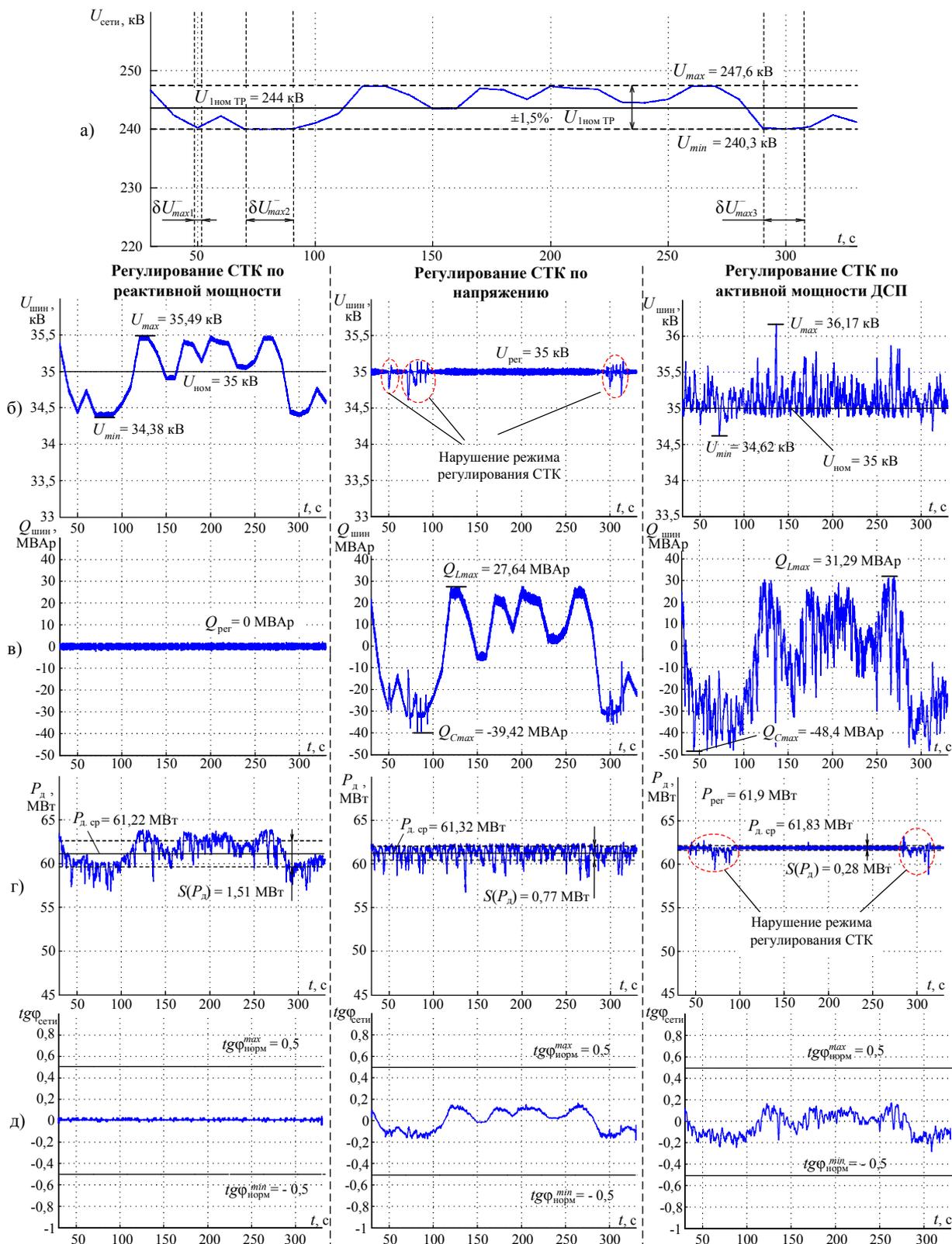


Рис. 2. Графики изменения электрических параметров питающей сети и ДСП-120: а – напряжение на стороне 220 кВ; б – напряжение на стороне 35 кВ; в – суммарная реактивная мощность комплекса ДСП-СТК; г – активная мощность дуг ДСП-120; д – коэффициент реактивной мощности на стороне 220 кВ

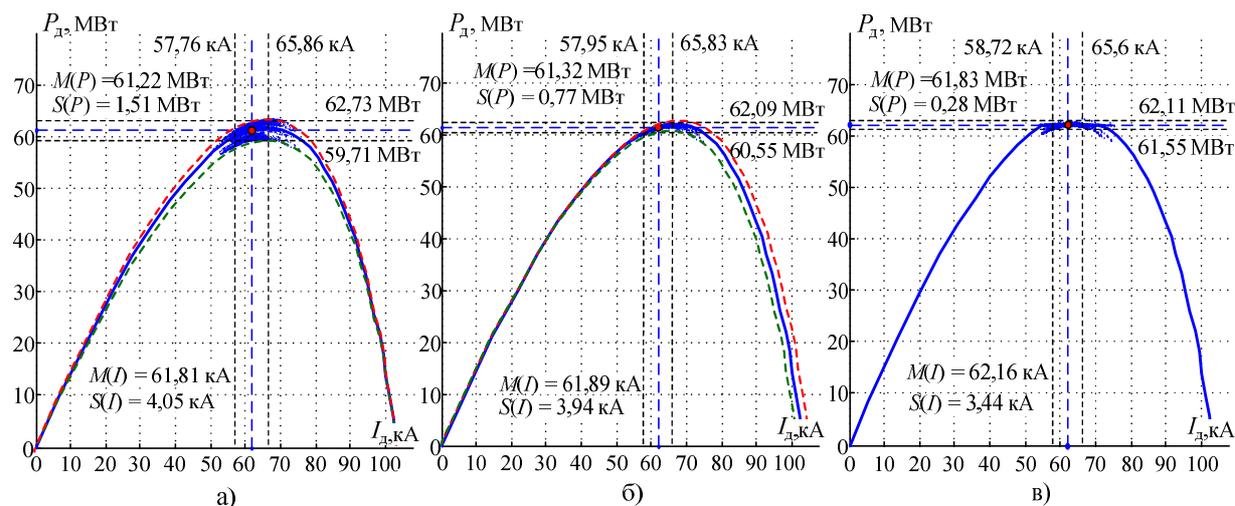


Рис. 3. Электрические характеристики ДСП-120 с указанием распределения рабочих точек при режимах регулирования СТК: а – $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр; б – $U_{\text{шнн}} = 35$ кВ; в – $P_d = 61,9$ МВт

Статистические параметры распределения рабочих точек ДСП-120

Параметр	Режим регулирования СТК-100 МВАр		
	$Q_{\Sigma} = 0$ МВАр	$U_{\text{шнн}} = 35$ кВ	$P_d = 61,9$ МВт
Номинальный уровень напряжения в сети 220 кВ; исходное возмущение длин дуг ДСП-120			
$M(P_d)$, МВт	61,12	61,36	61,9
$S(P_d)$, МВт	0,71	0,72	0,09
$M(I_d)$, кА	61,79	61,91	62,20
$S(I_d)$, кА	3,76	3,77	3,22
Отклонение напряжения в сети 220 кВ $\pm 0,8\% \cdot U_{1 \text{ ном ТР}}$; исходное возмущение длин дуг ДСП-120			
$M(P_d)$, МВт	61,11	61,33	61,89
$S(P_d)$, МВт	1,00	0,77	0,16
$M(I_d)$, кА	61,77	61,90	62,20
$S(I_d)$, кА	4,00	3,98	3,43
Отклонение напряжения в сети 220 кВ $\pm 0,8\% \cdot U_{1 \text{ ном ТР}}$; возмущения длин дуг ДСП-120 усилены на 40 %			
$M(P_d)$, МВт	60,66	60,87	61,82
$S(P_d)$, МВт	1,35	1,21	0,40
$M(I_d)$, кА	61,44	61,57	62,07
$S(I_d)$, кА	5,53	5,50	4,78
Отклонение напряжения в сети 220 кВ $\pm 1,5\% \cdot U_{1 \text{ ном ТР}}$; исходное возмущение длин дуг ДСП-120			
$M(P_d)$, МВт	61,22	61,32	61,83
$S(P_d)$, МВт	1,51	0,77	0,28
$M(I_d)$, кА	61,81	61,89	62,16
$S(I_d)$, кА	4,05	3,94	3,44

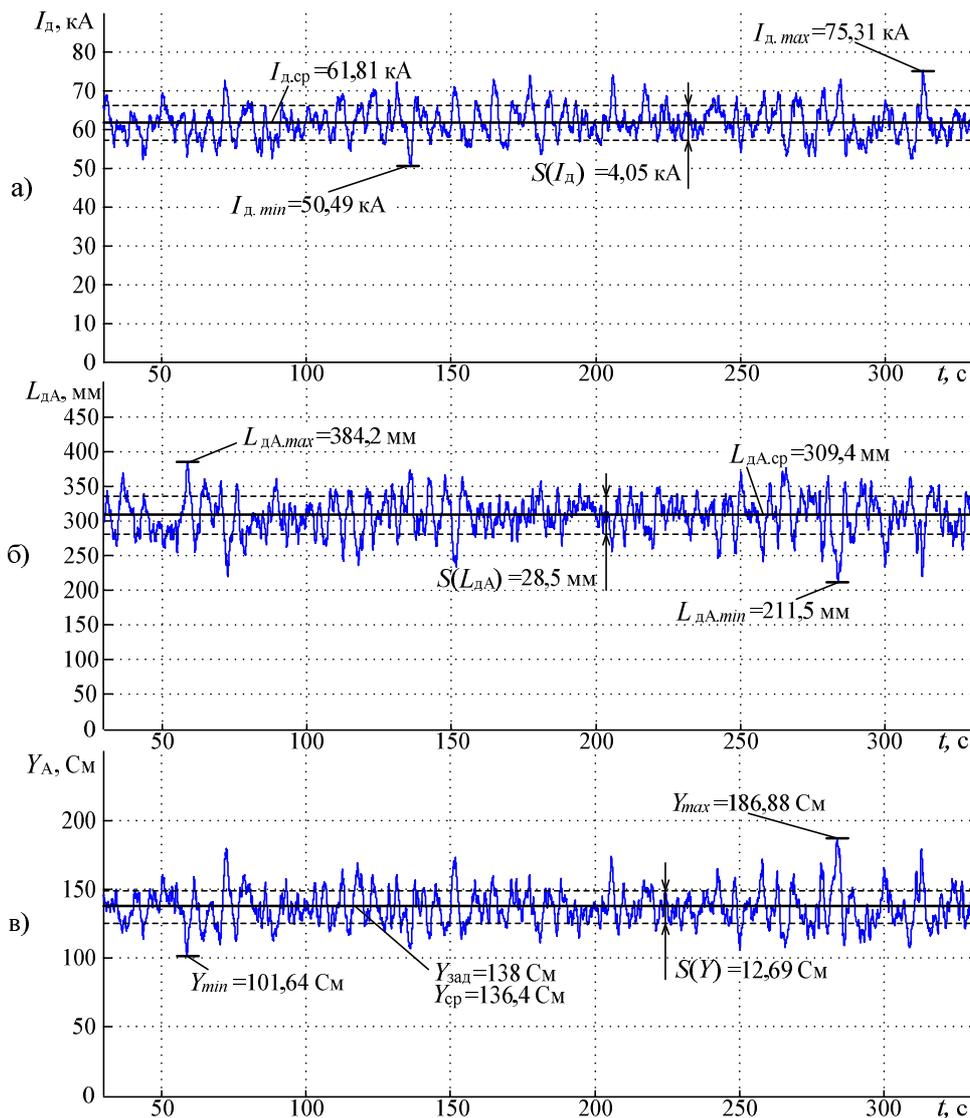


Рис. 4. Графики изменения электрических величин ДСП-120: а – ток дуги; б – длина дуги фазы А; в – адмитанс фазы А

закключение о способности СТК обеспечить режим $P_d = \text{const}$ в условиях резкопеременной нагрузки и непостоянных параметров питающей сети. В отдельные периоды наблюдаются колебания мощности дуг, причина нарушения режима регулирования аналогична описанной для $U_{\text{шнн}} = \text{const}$.

К недостаткам разработанного режима в исходном виде относится рост дозы фликера, а также отсутствие контроля над уровнем напряжения на шинах РУ сталеплавильного комплекса и коэффициентом реактивной мощности на границе балансового раздела. Рост дозы фликера обусловлен устранением колебаний мощности дуг за счет ответного изменения уровня напряжения на шинах РУ-35 кВ (рис. 2, б). Особенности работы СТК в новом режиме можно увидеть по графикам, представленным на рис. 5, б и рис. 6. На рис. 5, а изображены графики зависимости реактивной мощ-

ности элементов комплекса ДСП-СТК при работе ТРГ с уставкой $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр, суммарная реактивная мощность комплекса поддерживается на нулевом уровне во всем рабочем диапазоне СТК, далее при токах дуг, близких к КЗ, она начинает потребляться из сети.

В режиме управления $P_d = \text{const}$ для сохранения постоянной мощности ДСП в некотором диапазоне токов дуг СТК изменяет часть естественной электрической характеристики $P_d = f(I_d)$ при мощностях выше заданной уставки по активной мощности, в результате чего имеет место горизонтальный участок с $P_d = \text{const}$. Данный эффект достигается за счет дополнительного потребления ТРГ реактивной мощности (рис. 5, б), вследствие чего напряжение на шинах понижается относительно его номинального уровня (рис. 6, б).

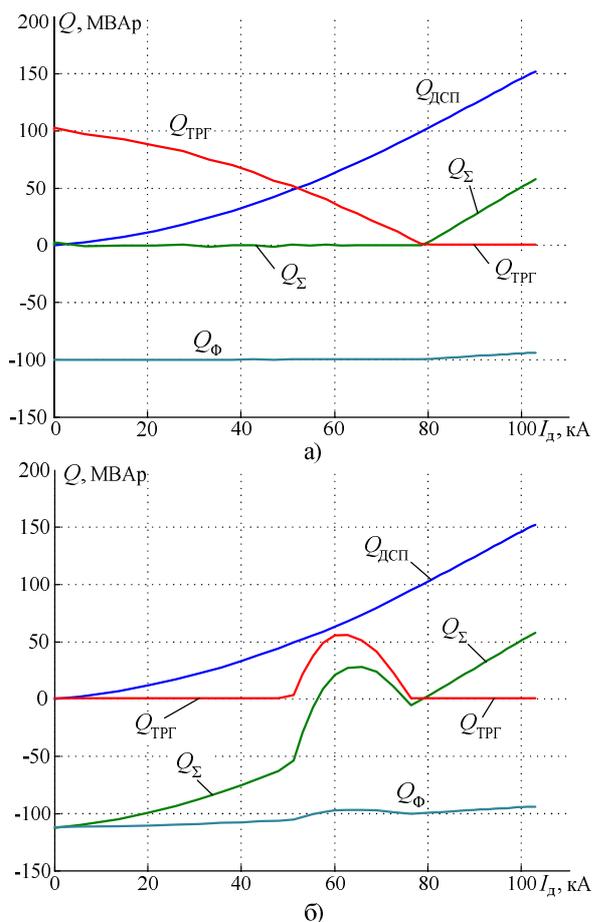


Рис. 5. Графики зависимости реактивной мощности комплекса ДСП-СТК от тока дуг при работе СТК в режимах: а – $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр; б – $P_d = 60$ МВт

Обратная ситуация наблюдается при удлинении дуг и уменьшении их мощности на естественной характеристике – СТК начинает повышать напряжение с целью сохранения мощности ДСП (рис. 6, б). Для корректной работы СТК в САУ ТРГ необходимо предусмотреть задание уставок P_d , значения которых приводятся в проектной документации на ДСП в зависимости от номера ступени реактора, печного трансформатора и рабочей кривой. В этом случае отклонения напряжения не будут превышать допустимых значений.

При всем этом электросталеплавильные установки обычно электрически разделены с более спокойной промышленной нагрузкой за счет сооружения отдельных подстанций глубокого ввода, поэтому к показателям качества электроэнергии на шинах комплекса ДСП-СТК предъявляют менее жесткие требования.

Таким образом, режим поддержания неизменной мощности ДСП является наиболее предпочтительным, если исходить из соображений технологии выплавки стали в дуговых печах. Однако предложенный режим регулирования СТК на данном этапе его разработки имеет достаточно огра-

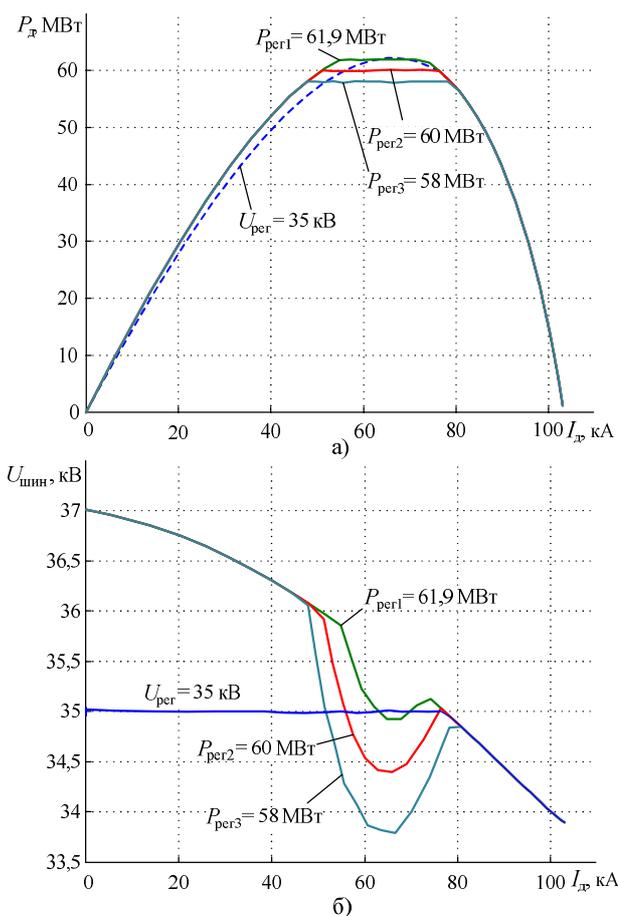


Рис. 6. Графики зависимости мощности ДСП (а) и напряжения на шинах РУ (б) от тока дуг при различных режимах работы СТК

ниченную область применения. Многие электросталеплавильные комплексы работают в режиме «тандема» ДСП и агрегата «печь-ковш» (АПК). При питании ДСП и АПК от общих шин РУ работа СТК с контролем активной мощности ДСП может ухудшить электрические характеристики АПК. Поэтому данный режим управления ТРГ может найти применение на тех объектах, где предусмотрено раздельное питание ДСП и АПК.

Заключение

1. Статический тиристорный компенсатор предназначен для улучшения показателей качества электрической энергии в точке подключения дуговой сталеплавильной печи, а также для повышения ее производительности за счет компенсации реактивной мощности и, соответственно, повышения напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса.

2. Для обеспечения электромагнитной совместимости ДСП с другими электроприемниками и управления потоками мощности в системе регулирование СТК по реактивной мощности является оптимальным, к тому же при достаточно стабиль-

ном напряжении внешней сети, полностью компенсируя реактивную составляющую мощности ДСП, компенсатор снижает потери электроэнергии в элементах системы электроснабжения и поддерживает напряжение на шинах РУ близким к номинальному.

3. Одновременное улучшение показателей качества электрической энергии (ПКЭ) и повышение мощности ДСП наблюдается при эксплуатации СТК в режиме стабилизации напряжения, однако возможны значительные перетоки реактивной мощности в системе электроснабжения, что приводит к росту потерь активной мощности в элементах сети и нарушению нормативного коэффициента реактивной мощности. Данный режим рекомендуется к применению при частых отклонениях напряжения питающей сети.

4. Режим управления по активной мощности является наиболее удобным для работы ДСП, если исходить из технологических соображений, однако, полностью ориентируя СТК на подстройку параметров сети под дуговую печь, компенсатор перестает выполнять свою основную задачу – улучшение ПКЭ. В настоящее время ведется работа по совершенствованию предложенного режима управления ТРГ, которая направлена на создание компромиссного алгоритма работы компенсатора, позволяющего поддерживать постоянную мощность ДСП и подавлять электромагнитные помехи до предельно допустимых значений.

Литература

1. Вагин, Г.Я. *Электромагнитная совместимость в электроэнергетике* / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 244 с.

2. Николаев, А.А. *Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 1* / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // *Электрометаллургия*. – 2014. – № 5. – С. 15–22.

3. Николаев, А.А. *Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 2* / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // *Электрометаллургия*. – 2014. – № 6. – С. 9–13.

4. *Means and trends of reactive power management at large ironworks* / А.А. Nikolaev, G.P. Kornilov, A.Y. Kovalenko, E.A. Kuznetsov // *Russian Electrical Engineering*. – 2008. – Vol. 79, no. 5. – P. 248–253. DOI: 10.3103/S1068371208050052

5. Кочкин, В.И. *Применение статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий* / В.И. Кочкин, О.П. Нечаев. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 247 с.

6. Hingorani, N.G. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems* / N.G. Hingorani, L. Gyugyi. – New York: IEEE Press book, 2000. – 444 p.

7. *Компенсирующие устройства в системах промышленного электроснабжения* / Г.П. Корнилов, А.С. Карандаев, А.А. Николаев и др. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 235 с.

8. Wernersson Lennart. *Method and a device for compensation of the consumption of reactive power by an industrial load* // *United States Patent US 6,674,267 B2*. 2004.

9. *Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности*. – <http://nidec-asi-vei.ru/produksiya/staticheskie-tiristornie-kompensatori-reaktivnoy-moschnosti> (дата обращения: 06.04.2016).

10. Николаев, А.А. *Определение оптимального режима работы статического тиристорного компенсатора в условиях сильных отклонений напряжения* / А.А. Николаев, В.В. Анохин, В.С. Ивекеев // *Инновации в науке: сб. ст. по материалам ЛП междунар. науч.-практ. конф.* – Новосибирск: Изд-во АНС «СибАК», 2015. – Т. 1, № 12 (49). – С. 46–55.

11. Николаев, А.А. *Исследование работы статического тиристорного компенсатора в режиме поддержания постоянной мощности дуговой сталеплавильной печи* / А.А. Николаев, В.В. Анохин, В.Е. Котышев // *Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам ЛП междунар. науч.-практ. конф.* – Новосибирск: Изд-во АНС «СибАК», 2015. – № 12 (48). – С. 203–211.

12. Корнилов, Г.П. *Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий* / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмынин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 239 с.

13. Николаев, А.А. *Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – Магнитогорск ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2009. – 20 с.

14. *Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского электроснабжения* / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 1. – С. 59–69.

15. *Особенности построения систем управления статическим тиристорным компенсатором дуговой сталеплавильной печи* / А.А. Николаев, В.Е. Котышев, В.В. Анохин, Ф.Ф. Урманова // *Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр.* – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – Вып. 2. – С. 11–20.

16. *Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory Power Supply System of Metallurgical Enterprise* / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, T.R. Khrushin et al. // *Proceedings Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. – Calgary (Canada). – 2014. – P. 235–241. DOI: 10.1109/EPEC.2014.18

17. *Research and Development of Automatic Control System for Electric Arc Furnace Electrode Positioning* / A.A. Nikolaev, E.V. Povelitsa, G.P. Kornilov, A.V. Anufriev // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 785. – P. 707–713. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.785.707

18. *Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковши-печь* / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулунов и др. // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 48–58.

19. *Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces* / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, A.V. Anufriev et al. *Steel in Translation*. – 2014. – Vol. 44, no. 4. – P. 289–297. DOI: 10.3103/S0967091214040135

20. *Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и*

установок ковши-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулунов, Е.В. Повелица // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2015. – № 2 (50). – С. 90–100.

21. *Experimental Investigation of Dependence of Power Quality from the Operation Mode of the Ultra High-Power Electric Arc Furnace* / G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev, T.R. Khrushin, A.N. Shemetov // *5th International Conference-Workshop Compatibility in Power Electronics (CPE 2007)*. – Gdansk (Poland), 2007. – P. 1–4. – <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4296496>. DOI: 10.1109/CPE.2007.4296496

22. *Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса* / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмушин и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2013. – № 1 (41). – С. 76–82.

23. *Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи с реализацией случайных возмущений электрических дуг* / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, Е.В. Повелица // *Приложение математики в экономических и технических исследованиях*. – 2014. – № 4 (4). – С. 260–271.

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; alexniko@inbox.ru.

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn_mgn@mail.ru.

Анохин Василий Васильевич, магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; anohinvasilii@mail.ru.

Поступила в редакцию 7 апреля 2016 г.

DOI: 10.14529/power160205

COMPARATIVE ANALYSIS OF STATIC VAR COMPENSATOR CONTROL MODES FOR HIGH POWER ELECTRIC ARC FURNACE

A.A. Nikolaev, alexniko@inbox.ru,
G.P. Kornilov, korn_mgn@mail.ru,
V.V. Anokhin, anohinvasilii@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper deals with the main results of comparative analysis of static var compensator (SVC) control modes, which are used in electric power system of high and ultra-high power electric arc furnaces (EAF). Traditional SVC control modes designed for implementation of zero reactive power consumption of the steel-smelting complex and voltage stabilization at the common connection point of EAF and SVC are considered.

In addition, this paper describes the developed mode, which maintains a constant active power of an electric arc furnace. The effects of supply main parameters and SVC control modes on the EAF electrical characteristics are investigated with a mathematical model of the EAF-120 and SVC-100 MVar steel-smelting complex developed in the Matlab's Simulink application. Thus, advantages and disadvantages of the discussed SVC control modes are determined and main recommendations for their application are given.

Keywords: static var compensator, electric arc furnace, control mode of thyristor controlled reactor, reactive power compensation, electrical characteristics of electric arc furnace.

References

1. Vagin G.A., Loskutov A.A., Sevostyanov A.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic Compatibility in Electric Power Industry]. Moscow, Academy Publ., 2010. 244 p.
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. [Investation of Modes Arc Furnaces in the Complex with Static Thyristor Compensators of Reactive Power. Part 1]. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2014, no. 5, pp. 15–22. (in Russ.)
3. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. [Investation of Modes Arc Furnaces in the Complex with Static Thyristor Compensators of Reactive Power. Part 2]. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2014, no. 6, pp. 9–13. (in Russ.)
4. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Kovalenko A.Y., Kuznetsov E.A. Means and Trends of Reactive Power Management at Large Ironworks. *Russian Electrical Engineering*, 2008, vol. 79, no 5, pp. 248–253. DOI: 10.3103/S1068371208050052
5. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatiy* [Application of Static Var Compensator in Electric Networks of Power Supply and Enterprises]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 247 p.
6. Hingorani, N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. *Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York, IEEE Press book, 2000. 444 p.
7. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Shemetov A.N., Khrumshin T.R., Khrumshin V.R., Medvedev A.G. *Kompensiruyushchie ustroystva v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya* [Reactive Power Compensators in Industrial Power Supply Systems]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 235 p.
8. Wernersson Lennart. Method and a device for compensation of the consumption of reactive power by an industrial load. United States Patent US 6,674,267 B2. 2004.
9. *Staticheskii tiristornyy kompensator reaktivnoy moshchnosti* [Static Var Compensator]. Available at: <http://nidec-asi-vei.ru/produksiya/staticheskie-tiristornie-kompensatori-reaktivnoy-moshchnosti> (accessed 6 April 2016).
10. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Ivekeev V.S. [Determination of the Optimal Operation Mode of the Static Var Compensator in a Situation of Significant Voltage Deviations]. *Innovatsii v nauke* [Innovations in Science], Novosibirsk, ANS "SibAK" Publ., 2015, vol. 1, no. 12 (49), pp. 46–55. (in Russ.)
11. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Kotyshev V.E. [The Study of Electric Arc Furnases Static Var Compensator Working with the Constant Active Power Control Mode]. *Tekhnicheskie nauki ot teorii k praktike* [Engineering Science from Theory to Practice], Novosibirsk, ANS "SibAK" Publ., 2015, no. 12(48), pp. 203–211. (in Russ.)
12. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatiy* [Mathematical Modeling of the Industrial Plants Electrotechnical Complexes]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2014. 239 p.
13. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty staticheskogo tiristornogo kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavilnoy pechi. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tehnikeskikh nauk*. [Improve the Efficiency of Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace. Extended Abstract of PhD Dissertation]. Magnitogorsk, Nosov MSTU, 2009. 20 p.
14. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyshev V.E., Tukhvatullin M.M. [Using of the Static var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power Systems Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 1, pp. 59–69. (in Russ.)
15. Nikolaev A.A., Kotyshev V.E., Anokhin V.V., Urmanova F.F. [The Characteristics of Building Management Systems Static Var Compensator Arc Furnace]. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy* [Energy and Electrotechnical Systems]. Magnitogorsk, Nosov MSTU Publ., 2015, vol. 2, pp. 11–20. (in Russ.)
16. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Akcay I., Gok Y. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory Power Supply System of Metallurgical Enterprise. Proceedings Electrical Power and Energy Conference (EPEC), IEEE. Calgary (Canada), 2014, pp. 235–241. DOI: 10.1109/EPEC.2014.18

17. Nikolaev A.A., Povelitsa E.V., Kornilov G.P., Anufriev A.V. Research and Development of Automatic Control System for Electric Arc Furnace Electrode Positioning. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 785, pp. 707–713. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.785.707

18. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Yakimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V. [Design of the Improved Electric Arc and Ladle Furnaces Electrodes Position Automatic Control System]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 1, pp. 48–58. (in Russ.)

19. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 289–297. DOI: 10.3103/S0967091214040135

20. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Povelitsa E.V. [Study of Different Methods to Design Automated Electrode Position Control Systems for Electric Arc Furnaces and Ladle Furnaces]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2 (50), pp. 90–100. (in Russ.)

21. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R., Shemetov A.N. Experimental Investigation of Dependence of Power Quality from the Operation Mode of the Ultra High-Power Electric Arc Furnace. 5th International Conference-Workshop Compatibility in Power Electronics (CPE 2007), Gdansk (Poland), 2007, pp. 1–4. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4296496>. DOI: 10.1109/CPE.2007.4296496

22. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R., Vakhitov T.Yu., Yakimov I.A. [Feature of the Simulation the Electric Arc Furnace as Electrotechnical Complex]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 1(41), pp. 76–82. (in Russ.)

23. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Povelitsa E.V. [The Mathematical Model of Electric Arc Furnaces Electric Circuit with Realization of the Electric Arcs Random Disturbances]. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* [The Application of Mathematics to Economic and Technical Studies], 2014, no. 4 (4), pp. 260–271. (in Russ.)

Received 7 April 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Николаев, А.А. Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.В. Анохин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 35–46. DOI: 10.14529/power160205

FOR CITATION

Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anokhin V.V. Comparative Analysis of Static Var Compensator Control Modes for High Power Electric Arc Furnace. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 35–46. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160205