

Гетопанов А.Ю.¹, Табаров Б.Д.², Климах В.С.²¹ ОАО «АМУРМЕТАЛЛ», г. Комсомольск-на-Амуре² Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ И ВЛИЯНИЯ НА СЕТЬ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА НА ВЫСОКОЙ СТОРОНЕ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрен наиболее энергоёмкий объект сталеплавильного комплекса – дуговая сталеплавильная печь (ДСП-125) металлургического предприятия ОАО «АМУРМЕТАЛЛ», г. Комсомольск-на-Амуре. Описана функциональная роль статического тиристорного компенсатора (СТК). Приведена упрощённая схема электроснабжения ДСП. Указано на недостаточное быстродействие гидравлических приводов, перемещающих электроды печи, что приводит к разрыву дуги. Ступенчатое регулирование напряжения на входе печного трансформатора (ПТ), с помощью регулятора под нагрузкой (РПН), ведёт к потере непрерывного контроля над технологическим процессом выплавки стали. При переключении ступеней РПН возникают межвитковые короткие замыкания, которые создают электродинамические ударные нагрузки на обмотки трансформатора, снижающие надёжность ПТ. Предложено техническое решение, позволяющее заменить РПН, на бесконтактное устройство, позволяющее непрерывно регулировать напряжение, в заданных пределах, на высокой стороне ПТ. В среде «MatLab» разработаны математические модули реакторно-тиристорного регулятора напряжения (РТРН) и его системы управления. Приведена блочно – модульная имитационная модель РТРН с реальными параметрами. Численными экспериментами проведены исследования его регулировочных свойств и влияния на сеть. Рассмотрены осциллограммы тока и напряжения элементов устройства. Результаты исследования показали, что процесс регулирования существенно не влияет на форму тока и напряжения сети, отсутствует режим прерывистого тока. Рассмотрена возможность использования тиристорного регулятора напряжения с естественной коммутацией (ТРНЕ), входящего в состав СТ.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, тиристорный вентиль, реакторно-тиристорный регулятор напряжения, ток дуги, печной трансформатор, статический тиристорный компенсатор, регулятор под нагрузкой.

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно эффективными, как показывает современная практика, признаны металлургические мини-заводы мощностью 600–2000 тыс. т/год. Они представляют собой промышленные модули, состоящие из дуговой сталеплавильной печи (ДСП), агрегата ковш – печь (АКП), машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), системы статической компенсации реактивной мощности (ССКРМ), главной преобразующей подстанции (ГПП). Основное потребление электроэнергии в технологическом процессе выплавки стали приходится на долю ДСП со средним удельным показателем 385 кВт·ч/т [1]. Авторы выяснили на примере металлургического завода ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» г. Комсомольска-на-Амуре, что это составляет приблизительно 60–80% от затрат электроэнергии на производство готовой продукции, в зависимости от состава шихты и интенсивности производства. Очевидно, что рациональное потребление электроэнергии будет способствовать снижению себестоимости продукции сталелитейной промышленности.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Электросталеплавильный цех завода ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» оснащён печью ДСП-125 производства итальянской фирмы «CONCAST», упрощённая однолинейная схема электроснабжения которой изображена на рис. 1. Печной трансформатор (ПТ) марки «TAMINI» – трёхфазный, двухобмоточный, номинальной мощностью 120 МВА при напряжении 35 кВ с высокой стороны. Соответственно условиям эксплуатации ПТ рассчитан на длительную работу в режиме к.з., при резкопеременной, несимметричной нагрузке.

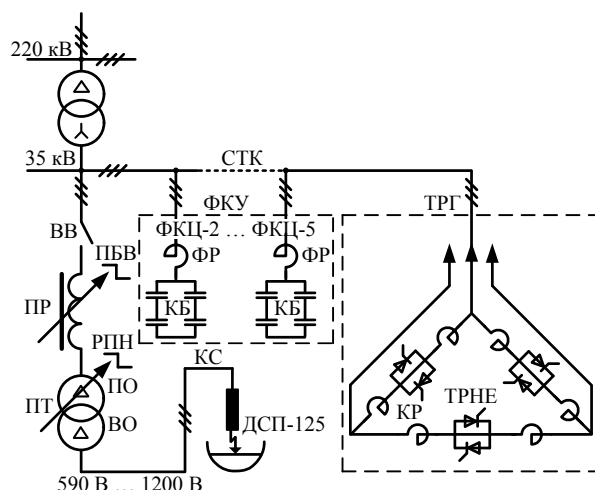


Рис. 1. Упрощённая однолинейная схема электроснабжения ДСП-125 ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»

Электроды печи подключены к зажимам низкого напряжения вторичной обмотки (ВО) ПТ через короткую сеть (КС). Первичная обмотка (ПО) снабжена восемнадцатью отпайками, подключенными к ступенчатому регулятору под нагрузкой (РПН), который позволяет варьировать напряжением на зажимах ВО от 590 до 1200 В. Для повышения индуктивности контура ПО в его цепь последовательно подключен печной реактор (ПР), что помогает поддерживать непрерывность дуги, при переходах фаз напряжения сети через «ноль». ПР производства «TAMINI», максимальной мощностью 20 МВАр, с помощью встроенного шестиступенчатого переключателя без возбуждения (ПБВ) позволяет регулировать собственную индуктивность от нуля до 14,7 мГн. Автоматизированная система управления (АСУ) ДСП, на основании непрерывного анализа импеданса дуги, оперирует РПН и взаимно-независимыми гидравлическими приводами

электродов, тем самым, стремясь поддерживать ток дуги в заданных рабочих координатах.

Статический тиристорный компенсатор (СТК) состоит из тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и фильтрокомпенсирующей установки (ФКУ).

СТК предназначен для косвенной компенсации реактивной мощности, потребляемой ПТ, согласно условию

$$Q_{\text{ПТ}} + Q_{\text{ТРГ}} = Q_{\text{ФКУ}},$$

где $Q_{\text{ПТ}}$ – реактивная мощность, потребляемая ПТ; $Q_{\text{ТРГ}}$ – реактивная мощность, потребляемая компенсирующими реакторами; $Q_{\text{ФКУ}}$ – реактивная мощность, вырабатываемая конденсаторами ФКУ.

ФКУ представляет собой устройство, состоящее из набора фильтрокомпенсирующих поперечно-резонансных цепей (ФКЦ), с отдельными коммутационными аппаратами и средствами релейной защитной автоматики, включающими в себя конденсаторные батареи (КБ) и фильтрующие реакторы (ФР). Набор ФКЦ обычно ограничивается наиболее часто встречающимися, при работе сталеплавильной печи, высшими гармониками, как правило 2, 3, 4, 5. На промышленной частоте КБ компенсируют индуктивную составляющую реактивной мощности, вырабатываемой печным трансформатором, в процессе работы ДСП. Для баланса между индуктивной и ёмкостной составляющей реактивной мощности, параллельно сети 35 кВ, подключена тиристорно-реакторная группа. Регулирование реактивной мощности, потребляемой компенсирующими реакторами (КР) ТРГ, осуществляется с помощью трёхфазного тиристорного регулятора напряжения с естественной коммутацией (ТРНЕ), изготовленного по проекту совместного итало-российского предприятия «Ансальдо-ВЭИ» (см. **рис. 1**). Трёхфазный ТРНЕ рассчитан на номинальную мощность 160 МВАр при номинальном напряжении 35 кВ. Каждая фаза ТРНЕ состоит из двух параллельных силовых модулей, по 9 пар тириستоров класса 65, соединённых встречно-параллельно. Система управления тиристорами основана на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Развязка силовых модулей с системой управления обеспечивается с помощью оптоэлектронных компонентов и оптических каналов связи.

Цель и задачи исследования

Наряду с современными технологиями управления мощностью электропотребителей, на основе силовых полупроводниковых и микропроцессорных элементов (например, тиристорный регулятор напряжения в составе ТРГ), для управления мощностью дуги ДСП всё ещё применяют РПН, электромеханический контактный агрегат, который имеет ряд недостатков. Переключение ступеней РПН с промежутками в 3–5 с приводит к потере непрерывного контроля над технологическим процессом и увеличению времени цикла выплавки стали [2]. Межвитковые к.з., сопровождающие каждое переключение, несмотря на токоограничивающие реакторы, конструктивно предусмотренные в РПН, приводят к значительным электродинамическим ударным воздействиям на обмотки ПТ, тем самым, снижая надёжность ПТ [3–4]. Вследствие износа контактных поверхностей, РПН требуется регулярное техническое обслуживание с частичной разборкой, что ведёт к простою производственных мощностей.

С развитием силовой полупроводниковой электроники и технологии ее применения в высоковольтных устройствах, таких как тиристорные преобразователи, тиристорные регуляторы напряжения, рассчитанные на мощность, сопоставимую с мощностью печных трансформаторов ДСП, появилась реальная возможность усовершенствовать традиционные методы коммутации и регулирования напряжения на зажимах ПТ, а следовательно, и управлять током дуги.

Обоснование необходимости тиристорного регулирования достаточно доказательно изложено в публикации [5]. Цель проводимого исследования – выявить регулировочные свойства реакторно-тиристорного устройства, определить допустимые пределы регулирования и наметить перспективы работы в данном направлении. При этом необходимо ориентироваться на параметры действующего производства, в данном случае параметры системы электропитания ДСП-125 ОАО «АМУРМЕТАЛЛ».

Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач в среде «MatLab»:

- разработать математический модуль силового трёхфазного реакторно-тиристорного устройства для управления напряжением на высокой стороне ПТ;
- разработать математическую модель нагрузки с электрическими параметрами, близкими к параметрам электрической дуги;
- разработать упрощённую, имитационную модель электропитания ДСП;
- численными экспериментами исследовать регулировочные свойства устройства и его влияние на питающую сеть.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ

Существуют публикации, как отечественные [6, 7], так и зарубежные [8–9], в которых предлагается применять однооперационные тиристоры для регулирования напряжения трансформатора. В предложенных способах тиристоры используются либо как набор ключевых элементов взамен механических контактов РПН (что не устраняет проблему дискретности регулирования), либо как замена РПН в трёхобмоточных ПТ (в цепи вольтодобавочного трансформатора). Предлагаемая разработка ориентирована на двухобмоточные ПТ малой и средней мощности и основана на патенте «Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции» [10], в части регулирования напряжения. Следует пояснить, что отказ от применения способа коммутации трансформаторной подстанции, предусмотренного в изобретении, вызван конструктивными особенностями печных трансформаторов. Резкопеременная, несимметричная нагрузка, длительная работа в режимах, близких к к.з., вызывают значительные электродинамические усилия в обмотках и магнитопроводе ПТ. В конструкциях печных трансформаторов предусмотрено влияние этих факторов, поэтому переходные процессы, происходящие при включении и отключении трансформатора, не нанесут ему существенного ущерба [11].

На **рис. 2** иллюстрируется принцип технического решения, позволяющего регулировать ток в цепи низкого напряжения ДСП.

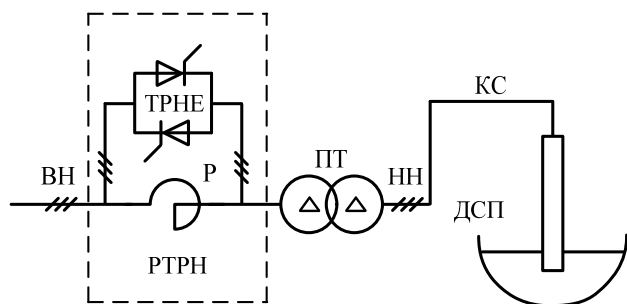


Рис. 2. Упрощённая однолинейная схема силовых цепей ДСП для пояснения принципа регулирования тока в цепи низкого напряжения

К зажимам первичной обмотки трёхфазного ПТ, со стороны высокого напряжения (ВН), последовательно подключён трёхфазный реактор (Р). Параллельно трёхфазному реактору в цепь ВН подключен трёхфазный ТРНЕ. Изменением проводящего состояния тиристоров ТРНЕ обеспечивается регулирование напряжения на зажимах первичной обмотки ПТ. Верхний предел напряжения на нагрузке задаётся коэффициентом трансформации ПТ при полностью открытых тиристорах, а нижний предел ограничивается индуктивностью Р при полностью закрытых тиристорах. Управление током в цепи низкого напряжения (НН) производится путём регулирования напряжения на зажимах первичной обмотки ПТ.

При разработке нагрузочного модуля исходили из следующих соображений. Электрическая дуга ДСП как физический процесс представляет собой многофакторное явление. На неё могут влиять: физико-химический и структурный состав скрапа, плотность и форма печных электродов, мощность короткого замыкания питающей сети и т.п. Эти факторы, зачастую, носят случайный, непрогнозируемый характер. Существуют

публикации, в которых представлены модели дуги, в том числе в среде «MatLab» [12–13], но все математически описанные электродуговые процессы происходят в условиях, отличающихся от реальных. Наше исследование носит предварительный характер и направлено на изучение возможности, в принципе, применения РТ-регулятора напряжения для поддержания тока короткой сети ДСП на заданном уровне. Поэтому для достижения цели мы применили модель ПТ с реальными параметрами, а параметры модели переменной RL-нагрузки подбирали так, чтобы ток короткой сети печного трансформатора соответствовал реальному рабочему диапазону ДСП-125 (50–90 кА).

На рис. 3 приведена блочно-модульная схема модели электроснабжения ПТ с тиристорно-реакторным регулятором напряжения, разработанная в среде «MatLab». Модель устройства содержит: три однофазных источника напряжения (U_a, U_b, U_c); блок высоковольтных выключателей (ВВ); модуль реакторно-тиристорного регулятора напряжения (РТПН); трёхфазный силовой трансформатор (СТ); модуль трёхфазной активно-индуктивной нагрузки (RL); модуль системы управления тиристорами (СУ); датчики тока и напряжения ($RS1, RS2, RU1$) и другие вспомогательные элементы.

На рис. 4 показана развёрнутая схема модуля РТПН, в состав основных элементов которой входят: однооперационные тиристорные модули, соединённые пофазно, встречно-параллельно (1–6), и модуль трёхфазного реактора (L), включённый параллельно тиристорам.

С помощью системы управления, схема которой приведена на рис. 5, задаётся угол отпирания тиристоров и осуществляется синхронизация с сетью.

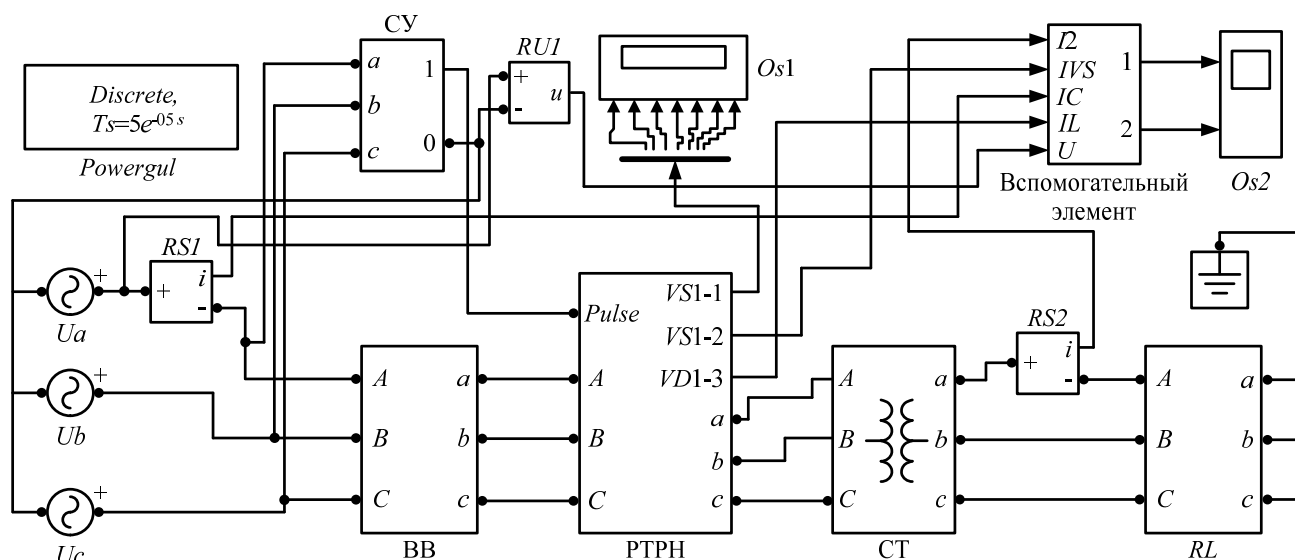


Рис. 3. Блочная-модульная схема реакторно-тиристорного регулятора напряжения на высокой стороне ПТ

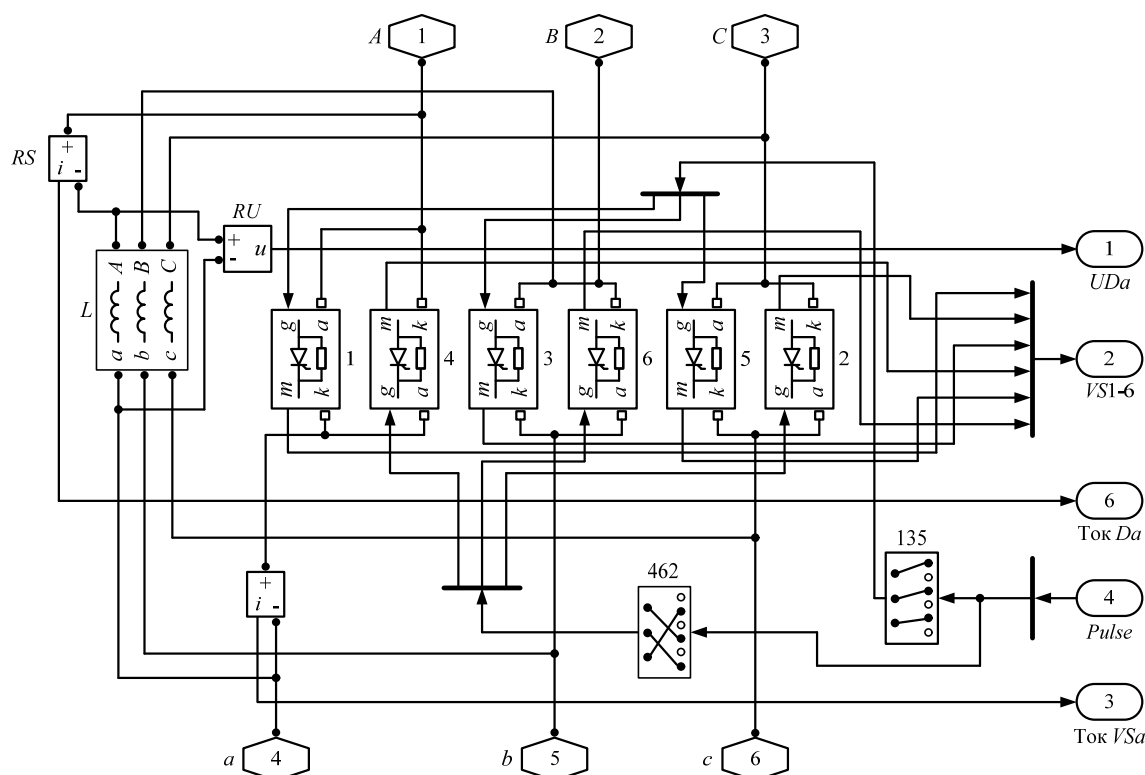


Рис. 4. Развёрнутая схема модуля РТРН

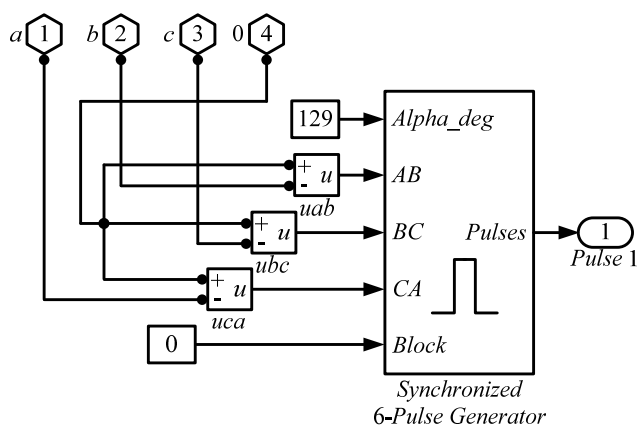


Рис. 5. Схема модуля системы управления тиристорами РТРН

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

Исследования РТРН производились на разработанной математической модели путём численных экспериментов в среде «MatLab» [14]. Стабилизация тока во вторичном контуре ПТ, при изменяющейся мощности нагрузки, обеспечивалась изменением проводящего состояния тиристорov. На рис. 6 приведены однофазные осциллограммы: напряжения (U_c) и тока (I_c) сети, тока в контуре нагрузки (I_n), тока тиристорного регулятора (I_t) и тока реактора (I_p). Было выяснено, что при данном выборе мощностей нагрузки диапазон регулирования напряжения ПТ составляет не менее 50% от номинала. При этом токи сети и нагрузки остаются непрерывными, а напряжение сети не меняется.

На рис. 7 показаны однофазные осциллограммы напряжений при нагрузке средней мощности, где U_c – напряжение сети, U_n – напряжение на нагрузке и U_p – напряжение на РТРН.

На рис. 8 построена диаграмма регулировочной характеристики ПТ с тиристорным регулятором напряжения, которая показывает зависимость напряжения на нагрузке (U_n) от угла отпирания тиристорov α при понижающей мощности нагрузки. Ток в контуре нагрузки (I_n) при этом остаётся практически неизменным.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ПРОМЫШЛЕННО ВЫПУСКАЕМОГО ТРНЕ

Как говорилось ранее, на предприятии ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» применяется высоковольтный ТРНЕ в системе статической компенсации реактивной мощности. Внедрённый на СТК в 2007 году, взамен устаревшей модели ВТСВП 1700/38,5, выпускаемой ещё советской промышленностью, современный тиристорный регулятор напряжения имеет значительные преимущества. Оснащенный тиристорами класса 65 на номинальный ток 2250 А «Трёхфазный Водохлаждаемый Тиристорный Вентиль 160 МВАр / 35 кВ, 50 Гц Статического Тиристорного Компенсатора ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» (ТВТВ) разработан на италороссийском предприятии «Ансальдо-ВЭИ» [15]. Масштабные показатели нового устройства снизились на порядок, по сравнению с предыдущим. Усовершенствованная система управления на основе ПЛИС за десятилетний срок эксплуатации ни разу не давала сбой. Силовым модулям ни разу не потребовалась замена тиристорov или вспомогательных элементов. Единственный объект устройства, которому необходимы периодические материальные затраты, – система водохлаждения, где производится регулярная замена фильтров и картриджей-деионизаторов.

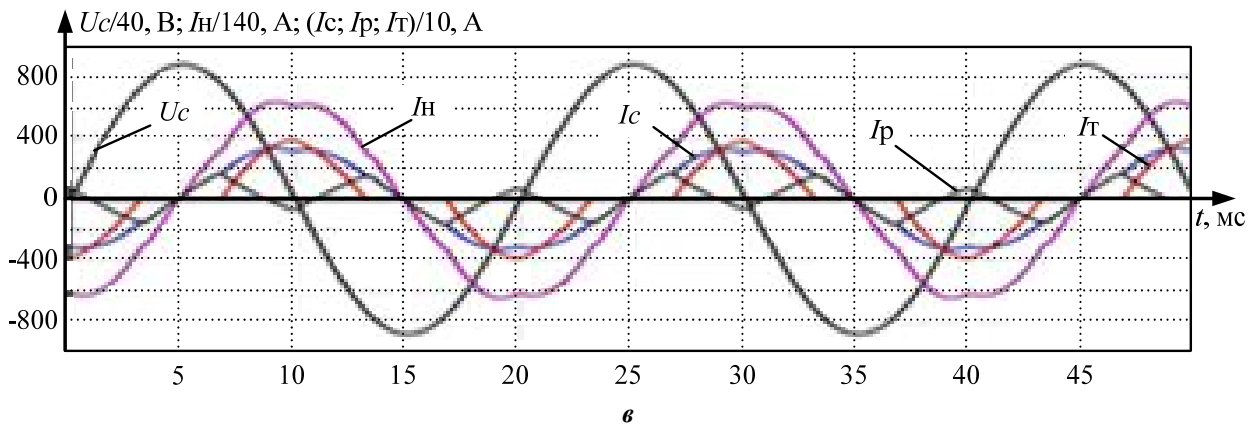
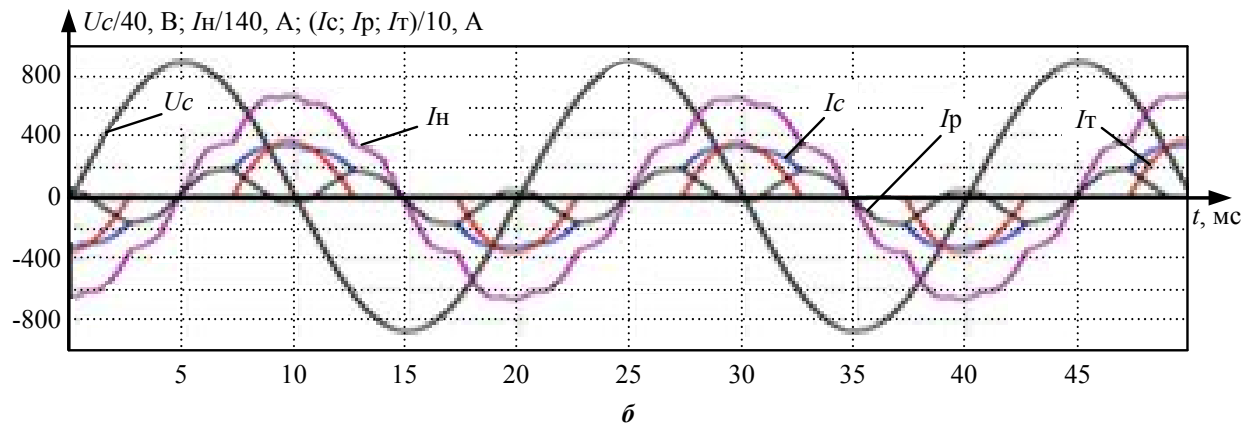
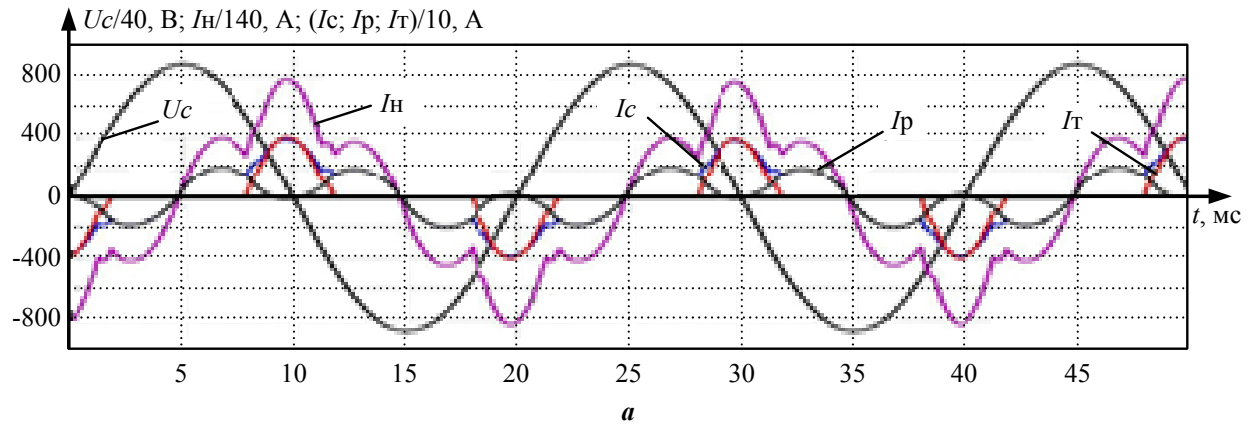


Рис. 6. Осциллограммы фазы «А» при различных мощностях нагрузки:
а – минимальная; б – средняя; в – максимальная

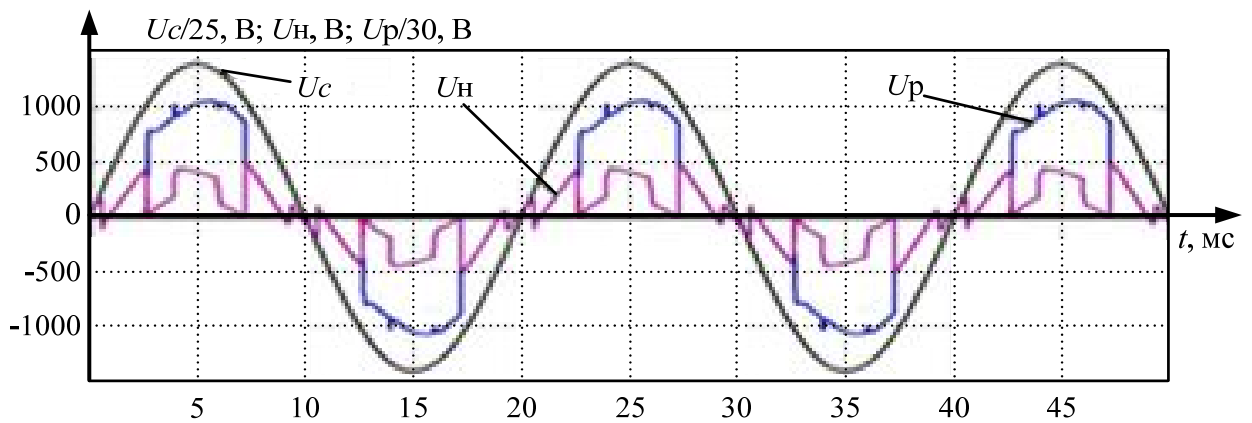


Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений при нагрузке средней мощности

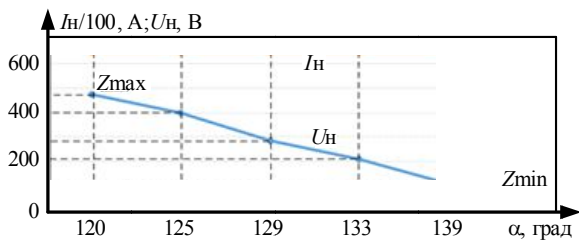


Рис. 8. Регулировочные характеристики ПТ с реакторно-тиристорным устройством в режиме стабилизации тока при изменяющейся мощности нагрузки

Но эти работы не требуют высокой квалификации специалистов. На рис. 9 приведена фотография ТВТВ, СТК ОАО «АМУРМЕТАЛЛ». Таким образом, существует ТРНЕ, прошедший апробацию в условиях промышленной эксплуатации и подходящий по электрическим параметрам, для применения в тиристорно-реакторном регуляторе напряжения на высокой стороне ПТ мощностью до 120 МВА.

Необходимы дальнейшие исследовательские и проектные работы по адаптации данного устройства в новом качестве. В публикации [6] затронут вопрос взаимодействия быстродействующего тиристорного регулятора напряжения и гидравлических приводов электродов в технологическом процессе выплавки стали. Постоянная времени системы гидроприводов ($0,2 \div 0,4$ с) значительно больше постоянной времени дуги ($0,1 \div 0,6$ мс) из-за инерционности перемещаемых масс, поэтому адекватно реагировать на резкопеременные электродуговые процессы она не в состоянии. Очевидно, что, дополняя широкий диапазон регулирования системы позиционирования электродов, тиристорно-реакторным регулятором напряжения, с быстродействием порядка 1 мс, можно достичь качественно нового уровня управляемости технологическим процессом плавки, что невозможно при использовании РПН с быстродействием 3–5 с. Возможность стабилизации тока дуги в заданных рабочих координатах, как следствие, позволит сократить расход графитированных электродов, минимизировать потери от угара и увеличить межремонтные периоды футеровки печи. Быстрое и непрерывное управление электрическими параметрами ДСП даст возможность усовершенствовать технологические процессы выплавки стали, снизит энергетические потери. Пофазное регулирование мощности даст возможность снизить асимметрию токов, чем уменьшит нагрузку на СТК.



Рис. 9. Фотография ТВТВ, СТК ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная исследовательского плана работа, направленная на совершенствование электросталеплавильного комплекса, позволила сделать следующие выводы.

1. Применяемый в статическом компенсаторе реактивной мощности электросталеплавильного комплекса тиристорный регулятор ТРНЕ на 2 кА и 35 кВ по току и напряжению полностью подходит для регулирования напряжения на высокой стороне печного трансформатора. Для улучшения технологического процесса дуговой плавки металла за счет стабилизации тока дуги и повышения надежности печного трансформатора целесообразно взамен РПН на высокой стороне печного трансформатора применить реакторно-тиристорный регулятор на основе ТРНЕ.

2. На разработанной в среде «MatLab» имитационной модели печного трансформатора с реакторно-тиристорным регулятором напряжения исследованы мгновенные значения токов и напряжений в процессе регулирования угла управления тиристорами, при изменении напряжения в сети и мощности нагрузки. В результате исследований численными экспериментами установлено:

а) реакторно-тиристорное устройство обеспечивает требуемый диапазон регулирования напряжения на высокой стороне печного трансформатора с сохранением непрерывного тока в сети и трансформаторе при работе тиристоров ТРНЕ в режиме прерывистых токов;

б) перемещение электродов и одновременное регулирование напряжения с высоким быстродействием будет предотвращать гашение электрической дуги и на протяжении всей плавки металла улучшит стабильность работы электросталеплавильного комплекса и его статического компенсатора реактивной мощности в стационарных режимах;

в) при значительных искажениях токов через тиристоры и реактор, искажения, вносимые устройством в сеть и трансформатор, сравнительно небольшие, что также способствует улучшению стабильности работы статического компенсатора реактивной мощности, повышению его надежности и энергетических показателей электросталеплавильного комплекса в целом.

3. Предлагаемое быстродействующее реакторно-тиристорное устройство Р-ТРНЕ для непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне печного трансформатора, выполненное на основе освоенного производством изделия ТРНЕ, имеет высокую готовность к применению в электросталеплавильном комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлургические мини-заводы / Смирнов А.Н. и др. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 469 с.
2. Якимов И.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Исследование сверхмощных дуговых сталеплавильных печей с тиристорным регулятором напряжения в промежуточном контуре печного трансформатора // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1, №1. С. 41–47.
3. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарлыбаев А.А., Леднов Р.А. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2 (25). С. 58–68.
4. Свиридов В.А., Бахарев Н.П. Обеспечение электродинамической стойкости силовых трансформаторов // Молодой ученый. 2017. №32. С. 20–25.

5. Пат. 166559 Российская Федерация, Н 02 М 5/00, Н 02 Р 13/00. Пускорегулирующее устройство на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». № 2016121772/07; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. №34.
6. Якимов И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №2 (35). С. 41–48.
7. Пат. 2086076 Российская Федерация, МПК Н 05 И 7/148 G 05 F 1/02, F 27 D 19/00. Способ регулирования тока трёхфазной электродуговой печи прямого нагрева / Дж. Дженсини, Л. Морелло, Дж. Коассини, Р. Фраджакомо. Опубл. 27.07.1997.
8. Pat. 09/778,835 United States, H05B 7/144; H05B 7/148. Power control system for ac electric arc furnace / Hatch Associates Ltd., Satcon Power Systems Canada Ltd.; Assignees Thomas Lai Wai Ma, Mohammad Sedigay, Brian Kennet Perkins, Theodorus Anthonius Gerritsen, Janos Rajda. №6, 603,795 B2; fil. 02. 8, 2001; publ. 08. 5, 2003.
9. Zenzo I., Tsutomu K. Steel melting arc furnace transformer equipment directly connected to 154 kV power source with tertiary load switching system // Fuji electric review. 2014, vol. 17, no. 1, pp.16–23.
10. Пат. 2622890 Российская Федерация, H02M 5/257. Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». № 2016131037/07; заявл. 27.07.2016; опубл. 21.06.2017, Бюл. №18.
11. Аншин В.Ш. Электротехнические трансформаторы для металлургической промышленности, выпускаемые ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД» // Электро. 2006. № 4. С. 16–20.
12. Верещаго Е. Н., Костюченко В. И. Модель электрической дуги в Matlab / simulink // Электротехника и электроэнергетика. 2013. №2 (25). С. 40–46.
13. Чунинин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
14. Свидетельство Российская Федерация о регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс математических моделей магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства для силового трансформатора в среде MatLab / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявитель «Климаш Владимир Степанович». № 2017613852; заявл. 16.12.2016; опубл. 03.04.17, Бюл. №4.
15. Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности типа СТК-160/35: техническое описание и инструкция по эксплуатации / АО Ансальдо-ВЭИ. М., 2008. 71 с.

Поступила в редакцию 01 марта 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVESTIGATION OF REGULATION PROPERTIES AND INFLUENCE OF THE REACTOR-THYRISTOR DEVICE ON THE NETWORK ON THE HIGH-VOLTAGE SIDE OF THE FURNACE TRANSFORMER

Aleksey Yu. Getopanov

Postgraduate student, the Head of substation section of the electrical repair shop, OJSC «AMURMETALL», Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: Getopanov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4638-9993>

Bekhruz D. Tabarov

Postgraduate student, the Department of Career Guidance and Advertising, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru.

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru.

The paper considers the most energy-intensive object of the steelmaking complex, particularly, the electric arc furnace (EAF-125) of a metallurgical open Joint-stock company "AMURMETAL", Komsomolsk-on-Amur. The authors described the functional role of the static thyristor compensator (STC). The simplified scheme of electric power supply of the EAF is given. The insufficient speed of hydraulic drives moving the furnace electrodes is indicated, which leads to the arc extinction. Stepwise regulation of the voltage at the input of the furnace transformer (FT), with the help of an on-load tap changer, leads to the loss of continuous control over the technological process of steelmaking. When switching the stages of the on-load tap changer, short-circuits can arise between the coils, which create electrodynamic shock loads on the transformer windings reducing the reliability of the FT. The research group suggested a technical solution, which makes it possible to replace the on-load tap changer, providing continuous adjustment of the voltage within the predetermined range on the high side of the FT. Mathematical models of reactor-thyristor voltage regulator (RTVR) and its control system were developed in "MatLab" environment. The paper shows a block-modular simulation model of RTVR with real parameters. Numerical experiments were conducted to investigate its

regulatory properties and its influence on the network. Oscillograms of current and voltage of the device elements are considered. The results of the study showed that the process of regulation does not effect significantly the current and voltage; the mode of intermittent current does not arise. The possibility of using a thyristor voltage regulator with natural switching (TVRN), which is part of STC, is considered.

Keywords: arc steel-smelting furnace, thyristor valve, reactor-thyristor voltage regulator, arc current, furnace transformer, static thyristor compensator, on-load tap changer.

REFERENCES

1. Smirnov A.N. *Metallurgicheskie mini-zavody* [Metallurgical mini-factories]. Donetsk: Nord-Press, 2005. 469 p. (In Russian)
2. Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Kornilov G.P. Investigation of Ultra-High Power Furnaces with Thyristor Voltage Regulator in the Intermediate Circuit of the Furnace Transformer. *Setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 1, pp. 41–47. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A., Lednov R.A. Requirements to the monitoring system of ultra-

- high power electric arc furnace transformer performance. *Rossiyskiy internet-zhurnal promishlennoy inzhenerii* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2 (25), pp. 58-68. (In Russian).
4. Sviridov V.A., Bakharev N.P. Providing electrodynamic withstand of power transformers. *Molodoy uchyoniy* [Young scientist], 2017, no. 32, pp. 20-25. (In Russian).
 5. Klimash V.S., Tabarov B.D., Getopanov A.Yu. *Puskoreguliruyushee ustroystvo na storone vysokovo napryaweniya transformatornoy podstantsii* [The ballast on the high voltage side of the transformer substation]. Patent RF, no. 166559, 2016.
 6. Yakimov I.A. Substantiation of thyristor regulation of voltage of arc furnace transformer. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 41-48. (In Russian).
 7. Gensini J., Morello L., Koassini J., Fragiaco R. *Sposob regulirovaniya tryokhfaznoy elektrodugovoy pechi pryamovo nagreva* [Method of current regulation of three-phase electric arc furnace of direct heating]. Patent RF, no. 2086076, 1997.
 8. Hatch Associates Ltd., Satcon Power Systems Canada Ltd. Power control system for ac electric arc furnace. Patent US, no. 09/778,835, 2003.
 9. Zenzo I., Tsutomu K. Steel melting arc furnace transformer equipment directly connected to 154 kV power source with tertiary load switching system. *Fuji elektricheskiy obzor* [Fuji electric review], 2014, vol. 17, no. 1, pp. 16-23.
 10. Klimash V.S., Tabarov B.D., Getopanov A.Yu. *Sposob vklyucheniya, viyklyucheniya i regulirovaniya napryaweniya transformatornoy podstantsii* [A method for switching on and off and regulation of voltage transformer substation]. Patent RF, no. 2622890, 2017.
 11. Anshin V.Sh. Electric furnace transformers for the metallurgical industry, produced by the Open Joint-Stock Company "Electrozavod". *Elektro* [Electro], 2006, no. 4, pp. 16-20. (In Russian)
 12. Vereshchago E.N., Kostyuchenko V.I. The model of electric arc in Matlab / simulink. *Elektrotehnika i elektroenergetika* [Electrical Engineering and Power Engineering], 2013, no.2(25), pp. 40-46. (In Ukrainian).
 13. Chunikhin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electrical apparatus]. General course. Textbook for high schools. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p. (In Russian)
 14. Klimash V.S., Tabarov B.D. Certificate RF №2017613852 of software registration for computers «Program complex mathematical models of thyristor magnetic ballast for power transformer in Matlab medium». Bulletin no. 4, 03.04.17.
 15. Static thyristor reactive power compensator type STK-160/35: technical description and operating instructions. JSC Ansaldo-VEI. Moscow, 2008. 71 p.

Гетопанов А.Ю., Табаров Б.Д., Климаш В.С. Исследование регулировочных свойств и влияния на сеть реакторно-тиристорного устройства на высокой стороне печного трансформатора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 49-56. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-49-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-49-56)

Getopanov A.Yu., Tabarov B.D., Klimash V.S. Investigation of Regulation Properties and Influence of the Reactor-Thyristor Device on the Network on the High-Voltage Side of the Furnace Transformer. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 49-56. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-49-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-49-56)