

Вопросы энергоэффективного управления электрическим режимом сверхмощных дуговых сталеплавильных печей на примере ДСП-180 ПАО “ММК”

Якимов И.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
yakimov_ivan@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы эффективной работы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей на примере ДСП-180 ПАО “Магнитогорский металлургический комбинат”. Приведена краткая характеристика ДСП-180, показано, что специфика ее работы приводит к значительным проблемам электромагнитной совместимости с питающей сетью. Проводится анализ причин низкой эффективности управления электрическими режимами, предлагаются новые способы управления, основанные на быстродействующем регулировании вторичного напряжения печного трансформатора.

Ключевые слова: печной трансформатор, сверхмощная дуговая печь, система управления, электрический режим, тиристор, гидропривод электродов, регулирование напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития металлургического производства характеризуется ростом объемов стали, выплавляемой в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). По данным всемирной металлургической ассоциации World Steel Association (до 2009 г. Международный институт чугуна и стали) в 2015 г. в мире было выплавлено 1,66 млрд. т стали. Крупнейшими производителями являлись Китай (822,7 млн. т), Япония (110,7 млн. т), США (88,2 млн. т), Индия (86,5 млн. т), Южная Корея, Россия (72 млн. т) [1, 2]. В промышленно развитых странах Евросоюза объем электростали в 2015 г. превысил 35%, в США – 45%, в России – 30,6%.

На сегодняшний день ДСП являются самыми мощными электроприемниками в металлургической промышленности. Современные ДСП четвертого поколения характеризуют следующие показатели [3, 4]: относительная мощность печного трансформатора приближается к 1000 кВа на одну тонну, вторичное напряжение превышает 1000 В (800–1400 В), цикл плавки – от выпуска до выпуска не превышает 40 минут. Потребление мощности находится на уровне 120–150 МВт, при этом доля реактивной мощности составляет 80–100% активной мощности.

Мощности печных трансформаторов (ПТ) ДСП составляют 150–300 МВА, а годовое электропотребление отдельных сталеплавильных агрегатов может превышать потребление электроэнергии городом с населением 300–400 тыс. человек [5]. Помимо этого, ДСП являются электроприемниками с нелинейной, резкопеременной и несимметричной нагрузкой. Их работа вызывает сильные

возмущения в питающей сети, что является причиной ухудшения показателей качества электроэнергии. Кроме того, современные «высокоимпедансные» дуговые печи, оснащенные дополнительным реактором для обеспечения устойчивой работы на длинных дугах, имеют низкий коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi = 0,72\text{--}0,75$. Это приводит к значительному потреблению реактивной мощности, что создает дополнительные потери электроэнергии в элементах электрических сетей и сопровождается повышением результирующего коэффициента реактивной мощности $tg(\varphi) = Q_{\Sigma} / P_{\Sigma}$.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ

При эксплуатации таких уникальных энергоемких потребителей с резкопеременной, нелинейной нагрузкой наиболее актуальными являются две задачи: во-первых, поиск резервов энергосбережения и повышения производительности при изменении технологических и электрических параметров в широких пределах; во-вторых, обеспечение условий электромагнитной совместимости ДСП с питающей сетью.

Решение этих задач является актуальным для Магнитогорского металлургического комбината (ПАО “ММК”), в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) которого компанией VAI FUCHS поставлены две ДСП сверхвысокой мощности, серии “Ultimate” («достигшие предела»). Рабочая емкость каждой печи составляет 180 т, годовая производительность – 2 млн. т стали. Мощность печного трансформатора 150 МВА. Установленная мощность двух трансформаторов составляет примерно одну треть мощности, потребляемой всем металлургическим комбинатом. Поэтому изучение вопросов эффективного управления электрическим режимом с целью снижения электропотребления и улучшения энергетических показателей ДСП является остроактуальной задачей.

Исследования и разработки в направлении улучшения энергетических показателей и технико-экономических характеристик ДСП проводятся многими отечественными и зарубежными авторами. Этим вопросам посвящены труды известных отечественных ученых Николаева А.А., Корнилова Г.П. [6–18], Свенчанского А.Д. [20], Салтыкова В.М., Кудрина Б.А., Рубцова В.П., Вагина Г.Я. и других. Также известны труды зарубежных авторов, в том числе [19].

Мировыми лидерами – производителями систем автоматического управления электрическим режимом ДСП являются Siemens VAI (ныне Primetals Technologies) (системы управления ArCOS и Simelt), DANIELI (системы Hi-REG и Q-REG). Среди отечественных разработок следует выделить серийно выпускаемые системы АРДГ, АРДМ-М, АРДМ-Т [10].

Вместе с тем, следует отметить, что большинство известных разработок направлены на совершенствование фильтрокомпенсирующих устройств, подключаемых в узле нагрузки (в точке присоединения ДСП), и систем управления ими (рис. 1). Данный путь является затратным и не обеспечивает улучшения параметров технологического процесса за счет оптимального ввода электрической энергии и быстродействующего управления электрическим режимом.

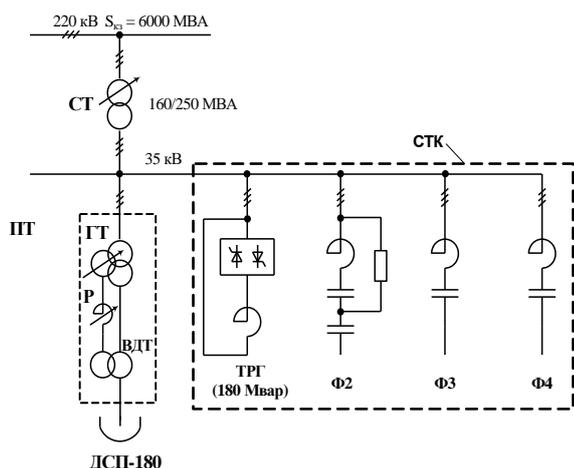


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения ДСП-180

Как показали проведенные исследования, значительное влияние на процесс плавления и потребление электрической энергии оказывает высокая дисперсия токов дуг, которая неизбежно возникает в процессе расплава электрической шихты. Сказанное подтверждают экспериментальные исследования, проведенные путем статистической обработки обширных массивов данных. На рис. 2 приведена зависимость уровня активной мощности ДСП от величины средней дисперсии токов по фазам. Здесь же приведен коэффициент парной корреляции, который показывает тесную отрицательную связь.

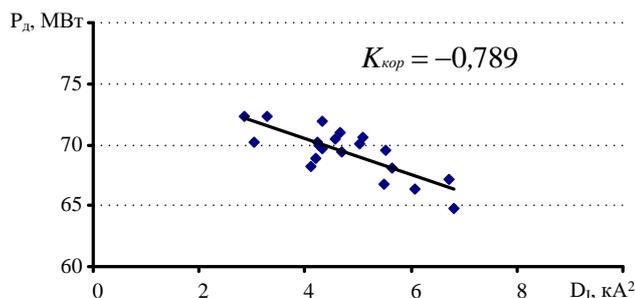


Рис. 2. Экспериментальная зависимость активной мощности дуг от дисперсии тока

Снижение колебаний токов дуг и соответственно токов обмоток ПТ целесообразно обеспечить за счет сглажива-

ния колебаний непосредственно в месте возникновения. Это следует осуществить путем регулирующих воздействий от системы автоматического управления электрическим режимом (САУЭР).

Практически все современные САУЭР выполнены по двухканальному принципу, основанному на регулировании полного сопротивления вторичного контура (импеданса) [11]. Регулирование импеданса осуществляется по первому (основному) каналу путем перемещения электродов гидравлическими устройствами. По второму каналу осуществляется ступенчатое регулирование напряжения трансформатора за счет переключения отпаяк электромагнитическими устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Теоретически, такие переключения должны осуществляться в нормальном рабочем режиме – под напряжением и током, однако в реальности это происходит в паузах между стадиями плавки.

Проведенные исследования показали, что такие системы не обеспечивают регулирования заданных параметров электрического режима (токов, активной либо реактивной мощности и др.) с необходимым быстродействием. Канал регулирования положения электродов является инерционным в связи с большой массой перемещаемых устройств.

Повышение быстродействия САУЭР возможно за счет применения бесконтактных (тиристорных либо транзисторных) регуляторов напряжения трансформаторов и/или индуктивности реакторов. Работы в направлении их создания ведутся зарубежными электротехническими компаниями. В данном направлении следует отметить разработки [19-21], в которых предлагаются различные схемы подключения тиристорных регуляторов. Наиболее перспективным с точки зрения обеспечения максимальной производительности печи и высоких показателей качества электроэнергии в точке подключения ПТ является вариант с тиристорным регулятором напряжения в третичной обмотке. Следует отметить разработку [19], на основании которой предложена новая концепция управления электрическим режимом ДСП, обеспечивающая постоянство потребляемой реактивной мощности.

Вместе с тем, известные разработки систем управления электрическим режимом ДСП не доведены до опытно-промышленных испытаний и не получили практического внедрения. Для вышеупомянутых систем регулирования разработана действующая однофазная физическая модель [19], информация об испытаниях других систем в литературных источниках отсутствует. Также отсутствует информация о возможности применения оптимальных алгоритмов управления на действующем оборудовании сверхмощных ДСП, что позволило бы обеспечить достижение эффекта при минимальных затратах.

Наиболее энергетически эффективным способом управлять электрическим режимом ДСП возможно за счет разработки быстродействующей системы автоматического управления электрическим режимом на основе тиристорных регуляторов вторичного напряжения печного трансформатора. Здесь под термином «энергетически эффективным» понимается рациональное использование меньшего количества электрической энергии для обеспечения требуемого уровня технологического процесса ДСП или снижение расхода электрической энергии на выпуск тонны продукции.

Для достижения вышеуказанной цели необходимо поставить и решить следующие задачи:

1. Исследовать технологические и электрические режимы ДСП-180 ЭСПЦ ПАО “ММК”, с целью обоснования направлений совершенствования САУЭР.

2. Разработать концептуально связанные способы и системы автоматического управления электрическим режимом, обеспечивающие улучшение энергетических показателей и снижение негативного влияния ДСП на сеть.

3. Разработать математические модели электротехнических комплексов ДСП с учетом специфики разрабатываемой САУЭР. Исследовать усовершенствованные способы управления электрическими режимами ДСП методами математического моделирования.

4. Провести сравнительный анализ электрических характеристик ДСП в существующей и разработанных системах управления. Оценить эффективность предложенных решений и разработать рекомендации по промышленному внедрению на действующих ДСП.

Решение поставленных задач выполняется применительно к ДСП-180 ПАО “ММК”. Вместе с тем, проблема предотвращения негативных последствий высокой дисперсии токов электрических дуг является общей для всех печей переменного тока. Поэтому выполненные разработки не будут иметь принципиальных отличий при использовании на других электропечных агрегатах.

В настоящее время выплавка стали в электросталеплавильном цехе ПАО “ММК” осуществляется в двух современных высокоимпедансных дуговых печах ультравысокой мощности серии ULTIMATE, производителем и поставщиком которой является австрийская фирма VAI FUCHS. Общий вид ДСП-180 представлен на рис. 3. В состав агрегата входят:

- сталеплавильная печь, состоящая из подины, водоохлаждаемой рубашки и свода;

- закрытое распределительное устройство, состоящее их двух ячеек с вакуумными выключателями на напряжение 35 кВ и ток 2500 А;
- трансформатор производства фирмы TAMINI (Италия) мощностью 150 МВА;
- шинопровод, соединяющий ЗРУ-35 кВ и трансформатор;
- короткая сеть;
- электродержатель с электродами.



Рис. 3. Общий вид ДСП-180 ПАО “ММК”

Технология ведения плавки складывается из комплекса мероприятий, позволяющих получить металл заданного химического состава и температуры при минимальных энергетических затратах. На рис. 4 представлен типовой график изменения мощности дуг для профиля плавки №2 (100% скрап), и выделены характерные стадии, соответствующие основным технологическим операциям [4-15]. Такими операциями являются: завалка стального лома; зажигание дуги и начало проплавления колодцев; окончание плавления колодцев; основной период плавки; доплавление шихты; горение дуг под слоем шлака при жидком металле (окислительный период) и выпуск плавки.



Рис. 4. Основные технологические стадии ДСП-180 (работа в три бады при 100% ломе)

В зависимости от исходного состава шихты, определяемого процентным содержанием лома и жидкого чугуна, профиль плавки может включать одну или две подвалки исходного материала (две или три “корзины”). В процессе плавки печь переходит с одной рабочей стадии на другую. Критерием перехода служит удельный расход суммарной электрической энергии дуг, рассчитываемый относительно веса металлошихты, приходящейся на текущую “корзину”.

Основным источником тепловой энергии в ДСП являются электрические дуги, которые горят между графитовым электродом и металлическим ломом (скрапом). В процессе плавки необходимо регулировать мощность дуг, изменяя количество энергии, вводимой в печь. Активная мощность дуг в ДСП-180 регулируется путем изменения вторичного напряжения печного трансформатора, а при постоянном напряжении – путем изменения тока в электрическом контуре печи. Для поддержания заданного значения тока фазы и соответственно мощности дуги используется система регулирования импеданса [16, 17]

На рис. 1 представлен фрагмент однолинейной схемы подключения ДСП-180. Система электроснабжения имеет следующие особенности:

1. Впервые на ММК осуществлен глубокий ввод напряжения 220 кВ непосредственно на промплощадку.
2. В узле подключения сетевых трансформаторов СТ 220/35 кВ установлены статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности.
3. Печные трансформаторы мощностью 150 МВА выполнены со встроенными реакторами мощностью 46 МВАр. При этом трансформатор и реактор снабжены индивидуальными устройствами РПН (на рисунке не показаны).

Работа ДСП сопровождается значительными колебаниями токов электрических дуг, значительным потреблением реактивной мощности, поэтому оказывает негативное влияние на качество электроэнергии в точке присоединения [18, 19]. Размах колебаний тока имеет различную величину в зависимости от стадии плавания. В начальный период, когда шихта находится в твердой фазе, амплитуда колебаний тока имеет наибольшее значение. По мере расплавления шихты и перехода ее в жидкую фазу амплитуда уменьшается, что вызвано снижением вероятности обвалов лома и эксплуатационных коротких замыканий. Вследствие случайной природы колебаний токов, колебания напряжений также носят случайный характер по амплитуде, частоте и форме волны.

Эти особенности работы ДСП приводят к необходимости использования дополнительных технических устройств, обеспечивающих заданные показатели качества электроэнергии и сохранение производительности печи. Для ДСП-180 таким устройством является статический тиристорный компенсатор (СТК) фирмы АВВ в составе фильтров суммарной мощностью 180 МВАр и тиристорно-реакторной группы (ТРГ) такой же мощности. СТК относится к устройствам регулируемой компенсации, в нем за счет изменения момента подачи отпирающих импульсов на тиристоры варьируется величина потребляемой реактивной мощности реакторов ТРГ. За счет этого обеспечивается постоянство реактивной мощности на заданном уровне. Применение регулируемой компенсации вызвано тем, что средние уровни активной и реактивной мощностей изменяются в зависимости от стадии плавки.

Печной трансформатор (ПТ, рис. 1) типа FTOHBR-

150200/35 35/(0,8-1,4) кВ состоит из главного трансформатора (ГТ) номинальной мощностью 150 МВА, вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) мощностью 30 МВА и реактора (Р).

Силовая схема ПТ представлена на рис. 5, она разработана фирмой SIEMENS в 1966 г. и впервые апробирована в Японии [20]. Главный трансформатор представляет собой трехобмоточный агрегат высокой мощности с возможностью регулирования напряжения под нагрузкой в третичной обмотке. Вольтодобавочный трансформатор представляет собой двухобмоточный агрегат, который выполняет регулировочную функцию. Первичная обмотка ВДТ соединена по схеме “звезда с заземленной нейтралью”.

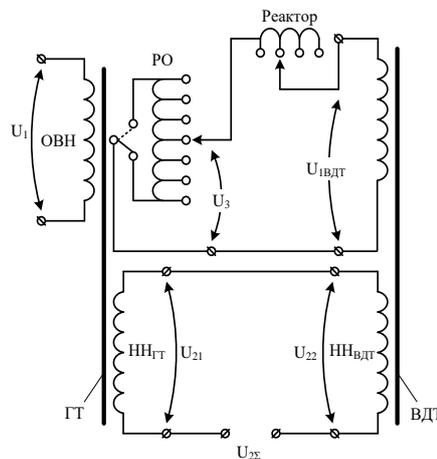


Рис. 5. Силовая схема ПТ

Все известные САУЭР сверхмощных ДСП обладают одним общим недостатком – они используют контактные РПН сложной конструкции. Устройства РПН обладают низким быстродействием (переключение ступеней происходит в течении 3-5 с), регулирование осуществляется дискретно с определенным шагом. На печных трансформаторах они работают в интенсивном режиме: 30-40 переключений под током за плавку или до 1000 раз в сутки. Частые переключения повышают износ РПН и снижают надежность работы печного трансформатора. Вопрос влияния быстродействия РПН на регулировочные свойства САУЭР заслуживает отдельного рассмотрения.

Выводы

1. Проведенный анализ некоторых вопросов энергоэффективного управления режимами и технологических стадий плавки сверхмощных ДСП показал, что их основными недостатками являются низкие энергетические показатели, вызванные высоким потреблением реактивной мощности, и негативное влияние на параметры электрической энергии, создающее проблемы электромагнитной совместимости ДСП с питающей сетью.
2. Основной причиной ухудшения характеристик является высокая дисперсия токов электрических дуг (и соответственно токов обмоток трансформатора), что связано с нестабильностью технологического процесса, в наибольшей мере, проявляющейся на начальных стадиях плавки.
3. Экспериментально подтверждено, что высокая дисперсия токов дуг приводит к снижению активной мощности, вводимой в печь, и ухудшению энергетических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А.А. Сравнительный анализ показателей качества электрической энергии в промышленности / А.А. Николаев, Н.Г. Емалеева, И.А. Якимов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2008. – Вып. 15. – С. 252-258.
2. Повышение качества внутризаводского электрообеспечения на примере ОАО "ММК" / А.Ю. Коваленко, Г.П. Корнилов, А.В. Русанов и др. // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сб. статей II Международной науч.-практ. конф. – Пенза, 2011. – С. 98-100.
3. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов // Электротехника. – 2013. – №7. – С. 2-10.
4. Проблемы энергосбережения металлургического предприятия // Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – №3-4. – С. 45-52.
5. Пути совершенствования динамических характеристик дуговых сталеплавильных печей / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Д.А. Корнилов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2010. – Вып. 18. – С. 233-240.
6. Основные резервы повышения производительности электродуговой печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2010. – Вып. 18. – С. 233-240.
7. Анализ системы управления дуговой сталеплавильной печи с целью повышения ее эффективности / Г.П. Корнилов, И.А. Якимов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2012. – Вып. 20. – С. 89-95.
8. Корнилов Г.П. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования // Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2009. – №15. – С. 32-38.
9. Способы повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин и др. // Труды X конгресса сталеплавателей (Магнитогорск, 13-17 октября 2009 г.). – Магнитогорск, 2009. – С. 274-279.
10. Еланов А.Ю. Анализ колебаний тока дуговой сталеплавильной печи / А.Ю. Еланов, Ю.В. Путинцев, В.С. Чередниченко // Исследования в области промышленного электрообогрева: Труды ВНИИЭТО. – 1974. – вып. 1(139).
11. Макаров А.Н. Анализ энергетических характеристик высокоомощных дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, Р.А. Макаров, В.В. Воропаев // Электричество. – 2014. – №5. – С. 34-36.
12. Анализ режимов работы статического тиристорного компенсатора реактивной мощности дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.Н. Шеметов и др. // Главный энергетик. – 2011. – №3. – С. 30-34.
13. 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 // Электротехника. – 2014. – №5. – С. 15-22.
14. Выбор мощности статических тиристорных компенсаторов для сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, П.Ю. Полозюк, Т.Е. Пелагеин, Г.П. Корнилов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2011. – Вып. 19. – С. 80-84.
15. Экспериментальное исследование системы управления электрическим режимом сверхмощной ДСП // Д.А. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов, А.В. Ануфриев // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сб. статей II Международной науч.-практ. конф. – Пенза, 2011. – С. 103-107.
16. Корнилов Г.П. Основные способы регулирования напряжения печного трансформатора / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2008. – Вып. 15. – С. 247-252.
17. Якимов И.А. Повышение эффективности дуговой сталеплавильной печи за счет бесступенчатого регулирования напряжения печного трансформатора / И.А. Якимов, А.А. Николаев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Пятнадцатая международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл. в 3-х т. Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 177-178.
18. Мещеряков А.Ю. Задачи управления электрическим режимом дуговых печей / А.Ю. Мещеряков, И.А. Якимов // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: Международный сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2006. – С. 137-141.
19. Век G.P. Новая концепция питаемой от выпрямителя трехфазной дуговой электропечи с высокой динамикой регулирования / G.P. Vek, A. Volf // Черные металлы. – 1998. – №2. – С. 16-24.
20. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №1. – С. 76-82.
21. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г.П. Корнилов, А.Ю. Мещеряков, А.А. Николаев и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2006. – Вып. 12. – С. 210-217.

Questions to Control the Electric Energy Efficient Mode of Ultra-High Power Arc Furnaces Using the Example EAF-180 PJSC "MMK"

Yakimov I.A.

South Ural State University (National Research University)

Chelyabinsk, Russian Federation

yakimov_ivan@mail.ru

Abstract. In the article the questions of effective work of super-power arc steel-smelting furnaces on an example EAF-180 PJSC "Magnitogorsk metallurgical combine" are considered. A brief description of EAF-180 is given, it is shown that the specificity of its operation leads to significant problems of electromagnetic compatibility with the supply network. An analysis is made of the reasons for the low efficiency of controlling electrical regimes, and new methods of control are proposed, based on the high-speed regulation of the secondary voltage of the furnace transformer.

Keywords: furnace transformer, ultra-high electric arc furnace, control system, electric mode, thyristor, voltage regulator, secondary voltage, hydraulic drive of electrodes, voltage regulation.

REFERENCES

1. Nikolayev A.A., Yemaleyeva N.G., Yakimov I.A. Comparative Analysis of the Quality Metrics of Electric Power in Industry [Sравnitelnyy analiz pokazateley kachestva elektricheskoy energii v promyshlennosti], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MG TU, 2008, vol. 15, pp. 252-258. (in Russ.)
2. Kovalenko A.Yu., Kornilov G.P., Rusanov A.V. et al. Improving the quality of in-plant power supply as an example of "MMK" [Povysheniye kachestva vnutrizavodskogo elektrooborudovaniya na primere OAO "MMK"], *Sbornik statey II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Energoberezeniye, elektromagnitnaya sovmestimost i kachestvo v elektricheskikh sistemakh"* [Collection of articles and the international scientific-practical conference "Energy saving, electromagnetic compatibility and quality in electrical systems"], Penza, 2011, pp. 98-100. (in Russ.)
3. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu. Analysis and optimization of electric modes of ultra-high power electrical arc furnaces [Analiz i optimizatsiya elektricheskikh rezhimov sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey], *Elektrometallurgiya [Electrometallurgy]*, 2013, no.7, pp. 2-10. (in Russ.)
4. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A., Zhuravlev Yu.P., Kuznetsov Ye.A. Problems of energy saving steel plant [Problemy energoberezeniya metallurgicheskogo predpriyatiya], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki [Proceedings of the Tula State University. Engineering science]*, Tula, TulGU, 2010, no.3 (4), pp. 45-52. (in Russ.)
5. Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Kornilov D.A. et al. Ways of improving the dynamic characteristics of the EAF [Puti sovershenstvovaniya dinamicheskikh kharakteristik dugovykh staleplavilnykh pechey], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MG TU, 2010, vol. 18, pp. 233-240. (in Russ.)
6. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. et al. The main reserves increased productivity of the electric arc furnace as of the electrical complex [Osnovnyye rezervy povysheniya proizvoditelnosti elektrodugovoy pechi kak elektrotekhnicheskogo kompleksa], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MG TU, 2011, vol. 1, pp. 89-95. (in Russ.)
7. Kornilov G.P., Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Anufriyev A.V. Analysis of the control system of the electric arc furnace in order to increase its effectiveness [Analiz sistemy upravleniya dugovoy staleplavilnoy pechi s tselyu povysheniya yeye effektivnosti], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MG TU, 2012, vol. 20, pp. 309-315. (in Russ.)
8. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. Methods to increase the effectiveness of the electric arc furnaces by means of power electrical equipments, *Bulletin of South Ural State University*, 2009, no.15, pp. 32-38. (in Russ.)
9. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R. et al. Ways to improve the efficiency of electric arc furnaces by a power electric equipment [Sposoby povysheniya effektivnosti dugovykh staleplavilnykh pechey za schet silovogo elektrooborudovaniya], *Proceedings of X Congress of Steelmakers [Trudy X kongressa staleplavilshchikov]*, Magnitogorsk, 13-17 oct., 2009, pp. 274-279. (in Russ.)
10. Yelanov A.Yu., Putintsev Yu.V., Cherednichenko V.S. Analysis of the current oscillations of the electric arc furnace [Analiz kolebaniy toka dugovoy staleplavilnoy pechi], *Issledovaniya v oblasti promyshlennogo elektronagreva. Trudy VNIETO [Research in the field of industrial electric heating. Proceedings VNIETO]*, 1974, vol. 1 (139). (in Russ.)
11. Makarov A.N., Makarov R.A., Voropayev V.V. The analysis of the energy characteristics of ultra-high power electric arc furnaces [Analiz energeticheskikh kharakteristik vysokomoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey], *Elektrichestvo [Electricity]*, 2014, no.5, pp. 34-36. (in Russ.)

12. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Shemetov A.N. et al. Analysis of modes of static VAR compensator electric arc furnace [Analiz rezhimov raboty staticheskogo tiristorного kompensatora reaktivnoy moshchnosti dugovoy staleplavilnoy pechi], *Glavnyy energetik [Main power engineering]*, 2011, no.3, pp. 30-34. (in Russ.)

13. Nikolayev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. Investigation of modes arc furnaces in the complex with static thyristor compensators of reactive power [Issledovaniye rezhimov raboty dugovykh staleplavilnykh pechey v komplekse so staticheskimi tiristornymi kompensatorami reaktivnoy moshchnosti], *Elektrometallurgiya [Electrometallurgy]*, 2014, no.5, pp. 15-22. (in Russ.)

14. Nikolayev A.A., Polozyuk P.Yu., Pelagein T.E., Kornilov G.P. Selecting power static thyristor compensators for ultra-high power arc furnaces [Vybor moshchnosti staticheskikh tiristornykh kompensatorov dlya sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы" [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]*, Magnitogorsk, MGTU, 2011, vol. 19, pp. 80-84. (in Russ.)

15. Kornilov D.A., Nikolayev A.A., Yakimov I.A., Anufriyev A.V. Experimental research the control system of electric mode ultra-high power EAF [Eksperimentalnoye issledovaniye sistemy upravleniya elektricheskim rezhimom sverkhmoshchnoy DSP], *Energoberezheniye, elektromagnitnaya sovместimost i kachestvo v elektricheskikh sistemakh: sb. statey II Mezhdunarodnoy nauchn.-prakt. konf. [Energy saving, electromagnetic compatibility and quality in electrical systems: a collection of articles II International Scientific and Practical Conference]*, Penza, 2011, pp. 103-107. (in Russ.)

16. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. The main methods of regulating the voltage of the furnace transformer [Osnovnyye sposoby regulirovaniya napryazheniya pechnogo transformatora], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы" [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]*, Magnitogorsk, MGTU, 2008, vol. 15, pp. 247-252. (in Russ.)

17. Yakimov I.A., Nikolayev A.A. Improving the efficiency of the electric arc furnace by the stepless voltage furnace transformer [Povysheniye effektivnosti dugovoy staleplavilnoy pechi za schet besstupenchatogo regulirovaniya napryazheniya pechnogo transformatora], *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: Pyatnadsyataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov i aspirantov: tezisy dokladov v 3-kh tomakh [Radio electronics, electrical engineering and energy: Fifteenth International Scientific and Technical Conference of undergraduate and graduate students: abstracts in 3 volumes]*, Moscow (MEI), 2009, vol. 3, pp. 177-178. (in Russ.)

18. Meshcheryakov A.Yu., Yakimov I.A. Control problems of electric arc furnaces regime [Zadachi upravleniya elektricheskim rezhimom dugovykh pechey], *Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov "Sovremennyye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroyeniya" [International Collection of Scientific Papers "Modern construction methods and technologies of metallurgical machinery"]*, Magnitogorsk, MGTU, 2006, pp. 137-141. (in Russ.)

19. Bek G. –P., Volf A. A new concept of a three-phase rectifier supplied from an electric arc furnace with high dynamics control [Novaya kontseptsiya pitayemoy ot vypryamitelya trekhfaznoy dugovoy elektropechi s vysokoy dinamikoy regulirovaniya], *Chernyye metally [Ferrous materials]*, 1998, no.2, pp. 16-24. (in Russ.)

20. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R. et al. Details of modeling the electric arc furnace as a complex electrical [Osobennosti modelirovaniya dugovoy staleplavilnoy pechi kak elektrotekhnicheskogo kompleksa], *Vestnik MGTU [Bulletin of Nosov MSTU]*, 2013, no.1, pp. 76-82. (in Russ.)

21. Kornilov G.P., Meshcheryakov A.Yu., Nikolayev A.A. et al. Modeling of the electric arc furnace circuit [Modelirovaniye elektricheskogo kontura dugovoy pechi], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы" [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]*, Magnitogorsk, MGTU, 2006, vol. 12, pp. 210-217. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Якимов И.А. Вопросы энергоэффективного управления электрическим режимом сверхмощных дуговых сталеплавильных печей на примере ДСП-180 ПАО "ММК" // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.5, №2. – С. 3-9. DOI: 10.24892/RIJEE/20180201

Reference to article

Yakimov I.A. Questions to control the electric energy efficient mode of ultra-high power arc furnaces using the example EAF-180 PJSC "MMK", *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol.5, no.2, pp. 3-9. DOI: 10.24892/RIJEE/20180201