

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ПЛАВКИ В ИНДУКЦИОННЫХ СРЕДНЕЧАСТОТНЫХ ПЕЧАХ

И. Н. Прусенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь

Научные руководители: И. Б. Одарченко, А. В. Козлов

Технология плавления металлов с помощью электромагнитных полей стала стандартным методом на многих литейных предприятиях во всем мире. Современные индукционные печи работают на средних частотах (от 250 до 500 Гц), что позволяет не только более энергоэффективно вести процесс плавки, но и технологически контролировать перемешивание расплава при высоких плотностях мощности. Это стало возможным благодаря разработке специальных полупроводниковых инверторов с изменяемой частотой для генерации и регулировки мощности. Эти инверторы используют резонансные свойства индуктора печи и конденсаторов источника питания.

С производственно-технологической точки зрения для литейного производства индукционные печи средней частоты (ИПСЧ) имеют существенные преимущества по сравнению с другими плавильными установками. Индукционный метод обеспечивает выделение теплоты непосредственно в металле без теплопередачи излучением или конвекцией, сопровождаемых значительными потерями, поэтому индукционные печи имеют значительно более высокий технологический КПД, чем агрегаты, работающие на топливе. Благодаря садовому режиму работы в ИПСЧ, при котором металл не подвергается многократному перегреву, и щадящему температурному режиму выдержки в период разливки, в расплаве сохраняются центры кристаллизации, что способствует формированию мелкозернистой структуры в отливках. Кроме того, пониженное на 25–30 % содержание газа (азота, водорода, кислорода) в расплаве металла, обеспечиваемое ИПСЧ, а также значительное уменьшение содержания неметаллических примесей повышают прочность отливок и уменьшают каверны на их по-

верхности. Это, в свою очередь, позволяет снизить отходы металла при дальнейшей обработке на 20–25 % и уменьшить металлоемкость отливок. Более высокая удельная мощность ИПСЧ позволяет быстрее нагревать чугун (со скоростью 30–35 °С/мин), а потери исходного материала из-за угара снижаются. Циркуляция расплава под действием электромагнитных сил в индукционной тигельной печи приводит к равномерному температурному распределению и хорошему перемешиванию. В сочетании с отсутствием загрязняющих веществ это обеспечивает высокую точность химического состава металла, расплавленного индукционным методом.

Известно, что тигельная индукционная печь состоит из медной спиральной обмотки, охлаждаемой водой, и керамического тигля, заполненного шихтой.

Переменный ток в катушке генерирует магнитное поле, которое индуцирует ток в шихте. Контур магнитного поля вызывается через внешние магнитные шунты, изготовленные из листов трансформаторной стали. Индукционную печь можно представить в виде свободно связанного трансформатора, в котором витки первичной обмотки магнитно связаны с витком вторичной, образованного расплавленной шихтой. Таким образом, можно принять, что отношение тока, наведенного в расплаве, к току в обмотке примерно равно числу витков в обмотке. Максимальная плотность тока индуцируется на периметре расплава, экспоненциально уменьшаясь в глубине расплава по направлению к центру.

Высокая удельная мощность позволяет лучше использовать оборудование, минимизировать время, необходимое для выполнения плавки, снизить энергетические потери, расходуемые на тепловые проводимость и излучение.

Однако метод скоростной плавки с высокой энергонасыщенностью требует использования мощных источников питания, работающих на повышенных частотах. Применение мощных тиристоров и транзисторов, которые способны переключать большие токи, дало возможность сконструировать инверторы с эквивалентной мощностью 10000 кВт, работающих на выходных частотах в несколько сотен герц.

Современный преобразователь состоит из:

- 1) выпрямителя переменного напряжения с фильтром постоянного тока;
- 2) преобразователя постоянного тока в переменный средней частоты;
- 3) согласующего трансформатора, который используется преимущественно с инвертором напряжения;
- 4) батареи подстроечных конденсаторов.

Такая комплектация позволяет реализовать два возможных варианта работы стационарных мощных полупроводниковых преобразователей. Это:

- инвертор тока с параллельной компенсацией индуктивности печи;
- инвертор напряжения с последовательной компенсацией сопротивления печи.

Рассмотрим инвертор тока с параллельной компенсацией индуктивной проводимости печи (рис. 1).

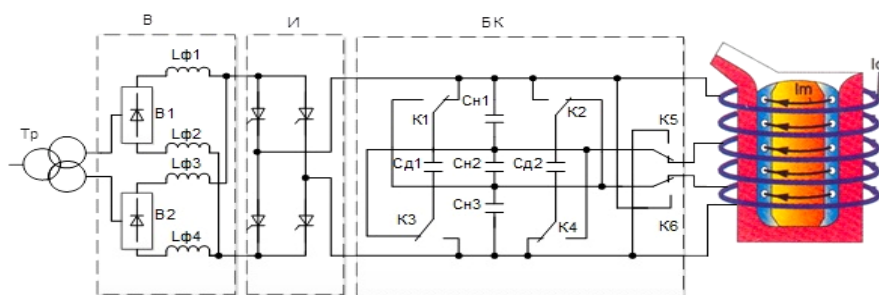


Рис. 1. Схема среднечастотной плавильной системы с использованием преобразователя тока

Батареи конденсаторов, корректирующих коэффициент мощности ($\cos\phi$), подсоединяются к медной спиральной обмотке печи параллельно. На первой стадии разогрева и плавления шихты в режиме стабилизации мощности, напряжение на секциях индуктора примерно одинаково вследствие проявления эффекта резонанса тока высокодобротного нагрузочного контура, поскольку ток инвертора в 5–7 раз ниже контурного тока. На второй стадии, обработки расплава, начинается этап легирования и коррекции химического состава металла. Рассматриваемая схема позволяет осуществить перераспределение мощности по секциям индуктора, иными словами, произвести фокусировку мощности в отдельных зонах тигля печи и обеспечить различные виды активного перемешивания металла (рис. 2).

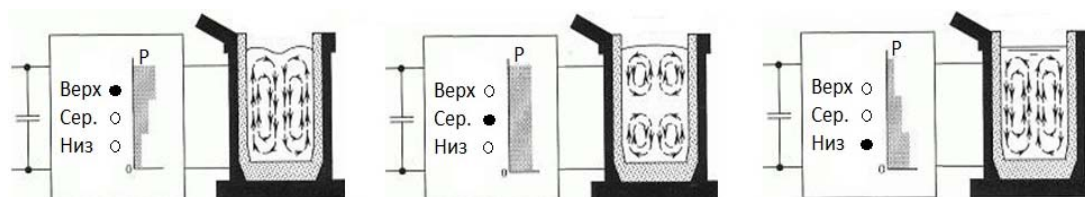


Рис. 2. Фокусировка мощности в отдельных зонах тигля печи

Данный инвертор на резонансной частоте нагрузочного контура отдает в нагрузку минимальную активную мощность. При отклонении от резонансной частоты активная мощность возрастает и к ней добавляется реактивная мощность. Таким образом, чтобы иметь возможность регулировать мощность от номинальной в сторону уменьшения необходимо, чтобы максимальная активная мощность потреблялась от источника в режиме максимальной расстройки колебательного контура. Это делает энергетически не выгодным частотное регулирование в параллельном инверторе, так как приводит к завышенным потерям в номинальном режиме и завышенной установленной мощности оборудования. В этом случае целесообразно использовать регулируемый источник питания (выпрямитель) на входе инвертора. При этом мы получаем регулирование мощности печи при постоянно высоком $\cos\phi$ (рис. 4, а).

Достоинством параллельного инвертора является относительная простота его согласования с низкоомной высокодобротной индукционной нагрузкой за счет параллельного подключения к индуктору компенсирующей конденсаторной батареи. При этом согласующий трансформатор может располагаться на значительном расстоянии от нагрузочного контура, что важно при создании малогабаритных нагревательных узлов.

Рассмотрим теперь инвертор напряжения, в этом случае корректирующие блоки емкостей присоединяются к индуктору сопротивления печи последовательно (рис. 3).

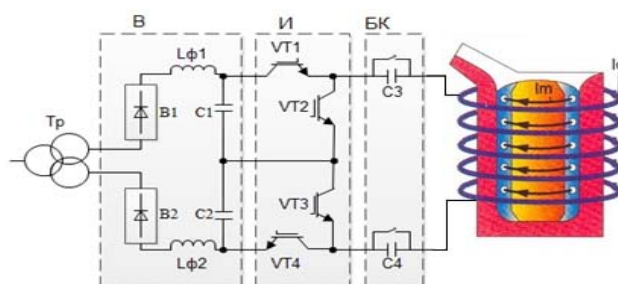


Рис. 3. Схема среднечастотной плавильной системы с использованием преобразователя напряжения

В этой схеме при резонансе напряжений компенсируется индуктивное сопротивление печи, что приводит к многократному увеличению тока через индуктор плавильной установки и происходит интенсивное плавление шихты. Параметры коммутрующих индуктивности и емкости выбираются так, чтобы их резонансная частота была выше частоты инвертора с нагрузкой. Это даст возможность работать с минимально допустимым током моста, позволяющим выделять на нагрузке необходимую мощность.

Для последовательного инвертора напряжения частотное регулирование энергетически выгодно, а регулируемость источника питания необязательна. Последовательный инвертор на резонансной частоте нагрузочного контура отдает в нагрузку максимальную активную мощность. В результате отклонения выходной частоты инвертора от резонансной частоты нагрузки активная мощность снижается, а реактивная возрастает (рис. 4, б). Полная мощность, потребляемая от источника, которая определяет загрузку элементов током, снижается. Таким образом, частотное регулирование мощности в последовательном инверторе энергетически выгодно.

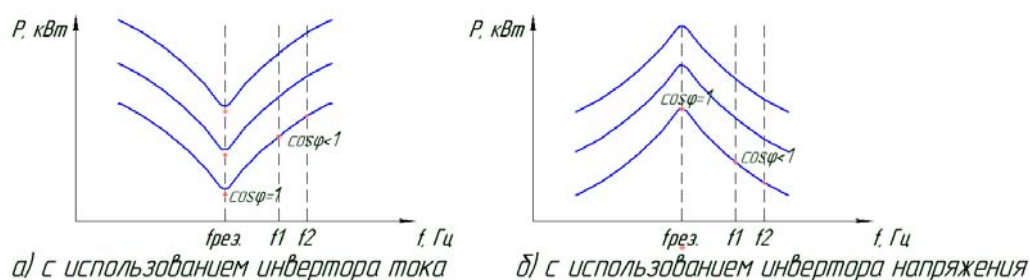


Рис. 4. Регулирование мощности печи в зависимости от источника питания

Недостатком инвертора напряжения является то, что возможна только последовательная или последовательно-параллельная компенсация реактивной мощности индуктора. Последовательный резонанс, увеличивающий напряжение на индукторе, приводит к необходимости использования для согласования с низкоомным индуктором трансформатора с большим коэффициентом трансформации, конструкция которого сложнее, а энергетические показатели хуже. Кроме того, трансформатор должен располагаться в непосредственной близости к нагревательному контуру, так как по его вторичной обмотке течет полный ток индуктора.

В последние годы получили развитие системы электропитания двух или нескольких одновременно работающих печей от одного источника, в которых имеется возможность гибкого перераспределения подводимой энергии от одной печи к другим (рис. 5). Электрическая энергия перемещается от одной печи к другой: в одной печи высокая мощность плавки, в то время как во второй печи металл выдерживается для металлургических процессов. В такой установке использование энергетического и плавильного оборудования приближается к ста процентам. Основой такой системы является статический многоинверторный преобразователь частоты, в котором питание инверторов постоянным током осуществляется от общего выпрямителя, а выход каждого инвертора подключается к колебательно-контурной каждой печи.

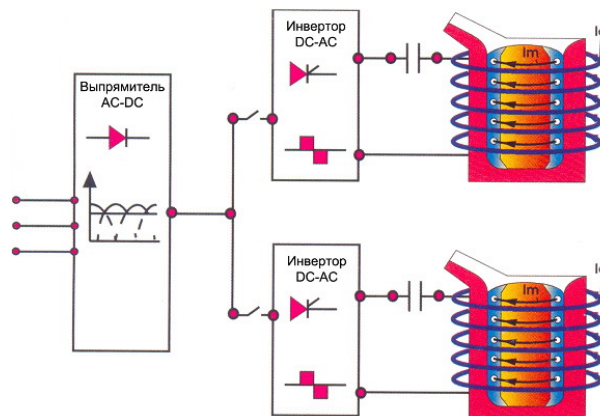


Рис. 5. Двойной выходной инвертор мощности, питающий одновременно две печи

Преимущества данной системы электропитания состоят в следующем:

1. Мощность источника питания, подводимая к каждой печи, может изменяться от 0 до 100 %, при этом каждая печь может быть настроена на свой режим работы
2. Источник питания загружен на 100 % в ходе технологического процесса плавки, что позволяет снизить его установленную мощность на 40 % и выровнять график суточного потребления энергии.
3. Можно одновременно на двух печах выполнять сушку футеровки и сушку шихты, либо осуществлять на одной печи сушку футеровки, на другой – плавку металла, уменьшая время межремонтных простоев печей.
4. Обеспечивается высокая эффективность работы оборудования, увеличивается производительность печей на 20–30 %. Снижаются массогабаритные показатели.

Эффективность использования той или иной схемы определяется удобством согласования ее с конкретным индукционным нагревателем. С этой точки зрения высоковольтные, высокочастотные и относительно маломощные индукционные нагреватели целесообразно питать от источников с последовательным инвертором, а низковольтные, относительно низкочастотные и мощные нагрузки – от источников с параллельным инвертором.