Цифровой индукционный источник питания с полным воздушным охлаждением

ООО Шанхай Бамакэ Электрооборудование Ли Нанкунь

Основное содержание:  
В данной статье, анализируя причины низкой эффективности и низкой надежности современных продуктов индукционного нагрева, предлагается высокоэффективный цифровой индукционный источник питания с полным воздушным охлаждением. Также рассматриваются его ключевые технологии и энергосберегающие характеристики.

Ключевые слова:  
Индукционный источник питания, цифровой, эффективность, надежность

I. Введение  
Индукционные источники питания широко применяются в таких областях, как термообработка металлов, закалка, прогрев, плавка, сварка, термозащита, удаление газа в вакуумных устройствах, переработка полупроводниковых материалов, термообработка пластмасс, сушка и очистка. Эти устройства используют индукционный ток, возникающий в проводнике под воздействием высокочастотного магнитного поля, для его нагрева. По сравнению с газовым или электрическим нагревом, индукционный нагрев обладает значительными преимуществами, такими как энергосбережение, бесконтактность, высокая скорость, высокая эффективность, простота процесса и легкость в автоматизации.

Индукционный источник питания в основном состоит из инвертора, резонансного блока, трансформатора и индуктора. Инвертор является преобразователем переменного тока в постоянный, который затем преобразует низкочастотное переменное электричество в высокочастотное (от нескольких тысяч до нескольких сотен килогерц). Резонансный блок и трансформатор соединены с инвертором с одной стороны и с индуктором с другой. Они преобразуют высокое напряжение в низкое и проводят согласование импеданса. Во время нагрева в индукторе протекает мощный высокочастотный ток, который вызывает образование индукционного тока в проводнике, что приводит к его быстрому нагреву.

Необходимые для инвертора высокочастотные компоненты определяют форму устройства, которое прошло эволюцию от электронных ламп и тиристоров до широко применяемых сегодня IGBT (биполярных транзисторов с изоляцией от основания). Ранние устройства индукционного нагрева использовали мощные вакуумные электронные лампы как основной элемент и работали как однофазные автогенные колебательные схемы, преобразуя высоковольтное постоянное электричество в высокочастотный переменный ток. Из-за множества этапов преобразования напряжения и низкой эффективности электронных ламп общая эффективность таких устройств была ниже 50%, с огромным расходом воды и энергии. В сравнении с электронными ламповыми устройствами, индукционные устройства с тиристорами имеют значительное улучшение эффективности, достигая около 90%. Однако их резонансная частота низка, инверторная схема сложная, потери все еще велики, а коэффициент мощности низок. Современные индукционные устройства с использованием IGBT или MOSFET имеют общую эффективность более 90%, резонансная частота может достигать сотен килогерц, а структура значительно упрощена. Это повышает надежность устройств, коэффициент мощности и другие параметры.

**II. Основные проблемы текущих продуктов и их причины**  
Несмотря на значительные достижения в замене тиристоров и электронных ламп на IGBT, большинство производителей индукционных источников питания, выпускающих продукцию, сталкиваются с рядом общих проблем. Эти проблемы в основном выражаются в следующем:

⏺Низкая эффективность, большой расход электроэнергии и охлаждающей воды

⏺Легкость повреждения силовых компонентов IGBT

⏺Легкость повреждения выходного трансформатора

⏺Частые неисправности в системе охлаждения воды

⏺Низкий коэффициент мощности, значительное загрязнение гармониками

⏺Недостаточная надежность и продолжительность работы оборудования

Основные причины этих проблем заключаются в недостатках в проектировании. Рассмотрим их более подробно:

◆В настоящее время все аналогичные продукты используют водяное охлаждение для выходного трансформатора, который намотан медными трубками. Во время работы на высоких частотах потери вихревых токов очень велики, что приводит к низкой эффективности и большому расходу охлаждающей воды.

◆Поскольку выходной трансформатор, IGBT и резонансные конденсаторы используют водяное охлаждение, это не только приводит к большим потерям, но и увеличивает вероятность повреждений из-за забивания медных трубок и засорения, что может вызвать перегрев трансформатора и силовых компонентов. Также возникают проблемы с протечками воды, что может привести к расширению зоны неисправности. Кроме того, из-за большого числа параллельных водяных трубок система не может гарантировать защиту от отключения воды для каждой линии.

◆Контрольная схема не адаптирована к изменяющимся рабочим условиям, что приводит к тому, что силовые компоненты IGBT выходят из состояния мягкого переключения при переходе через ноль. Это увеличивает потери при переключении и часто вызывает перегрев и повреждение IGBT.

◆Некоторые продукты используют схему с мягким включением и жестким выключением (или жестким выключением с буферизацией), что также увеличивает потери на IGBT, а в случае перегрузки IGBT легко повреждаются.

◆В случае перенапряжения, пониженного напряжения, перегрузки, короткого замыкания индукционной катушки или частичного короткого замыкания, перегрева силовых компонентов контрольная схема не выполняет эффективные функции ограничения и защиты, что приводит к повреждению оборудования.

◆Контрольная схема имеет плохую помехозащищенность, система работает нестабильно, или функции защиты и ограничения легко вызывают ложные срабатывания, что снижает надежность оборудования.

◆После выпрямления используется фильтрация с большим емкостным фильтром без индуктивных фильтров или схемы IGBT на постоянном токе, что приводит к низкому коэффициенту мощности и высоким гармоникам во входном токе. Если используется электролитический конденсатор, это вызывает проблемы с нагревом, балансировкой напряжения и коротким сроком службы.

III. Ключевые технологии нового цифрового воздушного охлаждения  
Новый источник питания для высокочастотного индукционного нагрева имеет следующую основную схему, как показано на рисунке. Этот продукт представляет собой полностью цифровую систему управления, в которой под контролем центрального процессора DSP силовые компоненты IGBT работают в состоянии нулевого тока переключения. Кроме того, на стороне постоянного тока используется схема управления IGBT для повышения эффективности, что значительно улучшает коэффициент мощности устройства и снижает гармонические искажения на входе.

Кроме того, этот продукт применяет различные методы для снижения потерь в системе и повышения эффективности, что позволяет использовать полностью воздушное охлаждение и устраняет проблемы, связанные с системой водяного охлаждения. Рабочая частота устройства составляет от 1 кГц до 100 кГц.



1. Точное и надежное управление инвертором IGBT с мягким переключением через ноль  
Источники питания для высокочастотного индукционного нагрева обычно используют управление с резонансным мягким переключением, что значительно снижает потери на переключении в IGBT и позволяет автоматически отслеживать резонансную частоту.

Некоторые продукты не используют схему IGBT для резонансной чиповой технологии на стороне постоянного тока, применяя схему мягкого включения и жесткого выключения или жесткого выключения с буфером. В таких схемах потери при выключении значительно выше. Применение схемы IGBT на стороне постоянного тока позволяет добиться полного мягкого включения и выключения, тем самым минимизируя потери на включение и выключение.

Традиционные схемы управления используют систему фазы для отслеживания резонансной частоты, но при высокой резонансной частоте возникает значительное влияние дискретных параметров, что снижает точность отслеживания частоты. При высоких частотах точности фазового замыкания недостаточно, и система легко выходит из состояния мягкого переключения, что приводит к увеличению потерь при переключении и в некоторых случаях может вызвать повреждение IGBT.

Пример: если в цепи передачи сигнала возникает ошибка 1 мкс, в условиях высоких частот потери на переключении значительно возрастают. Например, при выходной частоте 40 кГц и выходном токе 180 А RMS ошибка в 1 мкс плюс время мертвого пространства 0.75 мкс приводит к углу 25,2 градуса. При этом ток жесткого переключения составляет 108 А. Согласно характеристикам IGBT, потери при частоте переключения 40 кГц будут около 1200 Вт, что в два раза больше, чем при точном мягком переключении, что делает IGBT уязвимым для повреждения.

Таким образом, повышение точности управления является важным условием для безопасной работы IGBT.

Новый высокочастотный источник питания индукционного нагрева использует DSP для контроля и компенсации, благодаря высокой скорости обработки данных DSP система может точно отслеживать и компенсировать изменения рабочих условий, что значительно повышает точность системы, а погрешности отслеживания резонансной частоты и фазы значительно уменьшаются. Кроме того, быстродействующая схема драйвера IGBT способствует более точному и быстрому достижению мягкого переключения в высокочастотной схеме.

2. Воздушное охлаждение выходного трансформатора  
Традиционные водяные охлаждаемые выходные трансформаторы имеют два основных недостатка: во-первых, большие потери, во-вторых, высокая вероятность повреждения. Поскольку трансформаторные катушки водяного охлаждения намотаны медными трубками, при работе на высоких частотах потери на вихревые токи становятся очень большими, и вся потерянная энергия выводится с помощью воды, что снижает эффективность системы. Кроме того, водяные охлаждаемые трансформаторы часто страдают от засорения труб, что приводит к перегреву и выходу из строя трансформатора. Поэтому для повышения надежности выходных трансформаторов и снижения потерь необходимо разработать трансформаторы с воздушным охлаждением.

При проектировании воздушного охлаждения трансформатора основная задача заключается в снижении потерь на вихревые токи в проводах, а также снижении потерь на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе. Для этого провода изготавливаются из множества тонких эмалированных проводников, намотанных методом обмотки, а магнитопровод используется из ферритов с низкими потерями, с подбором соответствующей магнитной индукции. Кроме того, необходимо учитывать структуру вентиляции и охлаждения обмоток и магнитопровода, а также снижение утечек трансформатора — эти проблемы являются обязательными для решения при проектировании воздушного охлаждения высокочастотных трансформаторов.

3. Управление с помощью DSP  
В новом высокочастотном источнике питания для индукционного нагрева роль DSP (цифрового сигнального процессора) крайне важна. Он должен не только обеспечивать точное и надежное управление инвертором IGBT с мягким переключением через ноль, но и выполнять множество других задач в реальном времени:

⏺Сбор различных сигналов для управления

⏺Обработка интерфейса отображения

⏺Обеспечение различных режимов управления

⏺Обеспечение надежных защитных мер в различных рабочих режимах

⏺Обработка пользовательского интерфейса, включая коммуникации

⏺Настройка параметров, управление событиями и авариями

Таким образом, для обеспечения последовательного выполнения всех задач необходимо правильно распределить ресурсы и установить приоритеты.

4. Совершенные меры ограничения и защиты  
В оборудовании для индукционного нагрева из-за сложности рабочих условий, наличия различных видов нагрузок, совершенные меры ограничения и защиты являются необходимыми. Однако "совершенные меры ограничения и защиты" не должны снижать надежность работы устройства с целью его защиты. Если оборудование будет выходить из работы при малейших колебаниях в сети или изменениях нагрузки, это приведет к значительному снижению надежности работы устройства, что не является совершенными мерами защиты.

Совершенные меры защиты должны быть основаны на значительной устойчивости к помехам. При возникновении серьезных помех устройство должно активировать программу ограничения, но продолжать безопасную работу. После устранения помех устройство восстанавливает нормальную работу, что позволяет обеспечивать непрерывную и надежную работу оборудования. Только в случае превышения предельных возможностей устройства должна быть активирована принудительная защита, которая остановит работу.

В источниках питания для индукционного нагрева, из-за различий в вихревых токах при разных температурах заготовки и часто меняющихся рабочих условиях, программы ограничения и защиты имеют особое значение. Они должны обеспечивать как безопасную работу устройства, так и возможность адаптации к изменяющимся условиям, предоставляя надежную непрерывную эксплуатацию.

5. Повышение стойкости управляющей схемы к электромагнитным помехам (EMI)  
Несмотря на то, что IGBT работает в состоянии мягкого переключения через ноль, при высокочастотной работе необходимо максимально увеличить скорость переключения IGBT для снижения потерь. В связи с этим как параметр  так и параметр в схеме остаются высокими, что вызывает значительное электромагнитное воздействие. Микропроцессорные и схемы быстрого обработки сигналов также очень чувствительны к электромагнитным помехам. Быстрое и точное отслеживание частоты и фазы накладывает дополнительные требования к защите от EMI. Поэтому в источниках питания для высокочастотного индукционного нагрева, особенно в полностью цифровых продуктах, повышение стойкости управляющей схемы к EMI является гарантией стабильной работы системы.

IV. Сравнение характеристик различных типов источников питания для индукционного нагрева  
В настоящее время источники питания для индукционного нагрева могут быть электронно-ламповыми, тиристорными, MOSFET, IGBT, а новый цифровой источник питания с воздушным охлаждением на основе IGBT является усовершенствованным продуктом, разработанным на основе последних технологий. Каждый из этих типов имеет свои преимущества и недостатки, и в некоторых случаях они имеют свои области применения.

Электронно-ламповые источники питания были первыми продуктами в области индукционного нагрева, и сейчас, за исключением частот выше 100 кГц, они постепенно заменяются другими типами. Тиристорные источники питания по-прежнему имеют преимущество в области сверхвысокой мощности. Источники питания на основе MOSFET в настоящее время подходят только для маломощных приложений. Если же они используются для большой мощности, требуется слишком много параллельных силовых компонентов, что снижает стабильность системы. С быстрым развитием мощности и характеристик IGBT, источники питания на основе IGBT стали наиболее быстро развивающимися в последние годы и имеют тенденцию заменять традиционные тиристорные и электронно-ламповые устройства.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип устройства | Электронно-ламповый | Тиристорный | MOSFET | IGBT | Воздушное охлаждение IGBT |
| Общая надежность | Низкий | Обычный | Относительно высокий | Обычный | Относительно высокий |
| Общий уровень отказов | Высокий | Относительно высокий | Низкий | Относительно высокий | Низкий |
| Эффективность устройства (включая трансформатор) | Менее 50％ | Около90％ | Около90％ | Около90％ | Около95％ |
| Тепловая эффективность заготовки | Менее 40％ | Около68％ | Около75％ | Около75％ | Около80％ |
| Коэффициент мощности | Относительно высокий | Низкий | Относительно высокий | Относительно высокий | Высокий |
| Высокое напряжение | Есть | Нет | Нет | Нет | Нет |
| Водяная система | Сложный | Сложный | Обычно проектируется для малой мощности и воздушного охлаждения. | Сложный | Только водяное охлаждение индуктора |
| Потребление воды | Очень высокий | Относительно высокий | Относительно высокий | Низкий |
| Обслуживание | Сложный | Относительно сложный | Относительно простой | Относительно сложный | Простой |
| Изнашиваемые компоненты | Электронная лампа | Нет | Нет | Электролитический конденсатор | Нет |
| Область применения | Частота выше 100 кГц | Частота ниже 5 кГц, высокая мощность | Частота ниже 500 кГц, низкая мощность | Частота 1-100 кГц, мощность 0-1000 кВт, различные условия | |

Примечание: Тепловая эффективность заготовки — это отношение фактически полученной мощности на заготовке к входной мощности устройства. На тепловую эффективность заготовки влияет множество факторов, включая материал заготовки, частоту, форму индуктора и заготовки и другие. Приведенные данные носят справочный характер.

V. Анализ энергосбережения

1. Сравнение индукционного нагрева с другими методами нагрева

⏺Сравнение с отоплением с использованием газа и масла:  
Поскольку отопление с использованием газа и масла является пассивным методом нагрева, а индукционный нагрев — активным, их эффективность значительно различается. Если сравнивать энергетическую эффективность нагреваемой заготовки, то электрическая тепловая эффективность индукционного нагрева в 4 раза выше тепловой эффективности сжигания газа и масла, что позволяет достичь экономии энергии более 50%. Таким образом, индукционный нагрев значительно снижает энергозатраты в процессе обработки металлов и имеет дополнительные социальные преимущества, такие как улучшение рабочих условий, снижение загрязнения и повышение производительности.  
Обычно, после замены нагрева с использованием газа и масла на индукционный нагрев, инвестиции можно окупить в течение полугода — года.

⏺Сравнение с электрическим нагревом:  
Другим методом неиндукционного нагрева является прямой нагрев металла с помощью электрического тока, который также является активным методом нагрева. Однако его область применения ограничена и подходит только для материалов с высоким сопротивлением. Кроме того, потери электроэнергии в трансформаторах и линиях передачи очень высоки, что снижает эффективность и коэффициент мощности. Другим методом является косвенный электрический нагрев, который представляет собой пассивный метод нагрева и, очевидно, имеет более низкую эффективность.  
По сравнению с методом электрического нагрева, метод индукционного нагрева обычно позволяет сэкономить более 30% энергии.

2. Сравнение индукционного нагрева с воздушным охлаждением IGBT с другими методами индукционного нагрева

⏺Сравнение с электронно-ламповым индукционным нагревом:  
Устройства для индукционного нагрева на основе электронных ламп имеют множество этапов преобразования напряжения и низкую эффективность преобразования электронных ламп, что приводит к тому, что общая эффективность устройства обычно ниже 50%, а потребление воды и электроэнергии очень высоко. По сравнению с электронными лампами, новое устройство индукционного нагрева с воздушным охлаждением IGBT позволяет достичь экономии энергии более чем на 40%.

⏺Сравнение с тиристорным индукционным нагревом:  
Поскольку рабочая частота тиристорных устройств для индукционного нагрева ниже, эффект вихревых токов в нагреваемых объектах снижается, а потери в индукторах увеличиваются. Поэтому IGBT-устройства имеют преимущество по рабочей частоте. Кроме того, инверторная часть тиристорных источников питания имеет довольно сложную структуру, и потери на переключении тока значительны. Обычно, по сравнению с тиристорными устройствами, новое устройство индукционного нагрева с воздушным охлаждением IGBT позволяет сэкономить более 10% энергии.

⏺Сравнение с традиционными IGBT-устройствами для индукционного нагрева:  
В новом устройстве индукционного нагрева с воздушным охлаждением потери на переключение IGBT меньшие, а потери на вихревые токи в выходном трансформаторе снижены. По сравнению с традиционными устройствами на основе IGBT, эффективность нового устройства повышается на более чем 5%.

3. Сравнение энергопотребления четырех типов индукционного нагрева:  
В качестве примера возьмем источник индукционного нагрева с мощностью 60 кВт, необходимой для нагрева заготовки, и сравним энергопотребление электронно-лампового, тиристорного, IGBT и полностью воздушно-охлаждаемого IGBT источников. При этом расчет ведется исходя из среднего ежегодного времени работы 200 дней по 6 часов в день, что составляет 1200 часов в год, а стоимость электроэнергии принимается равной 0,80 юаней за кВт·ч.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Источник индукционного нагрева | Мощность заготовки | Входная мощность | Эффективность устройства | Тепловая эффективность заготовки | Ежегодное потребление электроэнергии | Ежегодная стоимость электроэнергии |
| Электронно-ламповый | 60kW | 150kW | 50％ | 40％ | 180000kWH | 14.40юаней |
| Тиристорный | 60kW | 88.2kW | 90％ | 68％ | 105840kWH | 8.47юаней |
| IGBT | 60kW | 80kW | 90％ | 75％ | 96000kWH | 7.68юаней |
| Полностью воздушное охлаждение IGBT | 60kW | 75kW | 95％ | 80％ | 90000kWH | 7.20юаней |

VI. Заключение

1.Традиционные источники индукционного нагрева имеют такие недостатки, как большие потери, высокое потребление электроэнергии и воды, низкий коэффициент мощности, частые сбои водяной системы и низкая надежность работы.

2.Новый цифровой источник индукционного нагрева с воздушным охлаждением снижает потери в системе за счет применения воздушно-охлаждаемого трансформатора, IGBT мягкого переключения и других мер. Это не только увеличивает эффективность, но и устраняет сбои, связанные с водяной системой. Благодаря использованию DSP для цифрового управления, повышается точность отслеживания и контроля системы, а также увеличивается ее надежность и уровень технологичности. Структура с IGBT ножевого переключателя на стороне постоянного тока не только реализует мягкое включение и выключение IGBT через ноль, но и улучшает коэффициент мощности устройства.