

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ НАГРУЗКИ

Abstract: A new more effective topology of transformer is offered in connection with development of demand on transformers with the high volume density of energy. A quasireverberatory transformer on the base of inductor with a throttle in the chain of alternating current is the offered chart of construction of power circuit. A functional model confirmed possibility of diminishment of losses of switching and receipt of high coefficient of efficiency (94%) and power-factor (0,9) in the range of loadings from 20% to 100% of nominal. Also it enables the key transistors of source to function with the minimum losses at switching in all range of loadings with frequency of switching to 150 kHz. As compared to the known topology the negligible quantity of additional components is required here only.

Key words: zero-voltage switched converter, zero-voltage switched Pulse Width Modulated converter (ZVS-PWM converter), quasireverberatory inductor power supply for the arc loading.

Анотація: У зв'язку з розвитком попиту на перетворювачі з високою об'ємною густиною енергії, запропонована нова, більш ефективна топологія перетворювача. Запропонованою схемою побудови силової частини є квазірезонансний перетворювач на базі інвертора з дроселем в ланцюзі змінного струму. Функціональна модель підтвердила можливість зменшення втрат перемикання і отримання високих ККД (94%) і коефіцієнта потужності (0,9) у діапазоні навантажень від 20% до 100% номінальної. Також вона дає можливість ключовим транзисторам джерела функціонувати з мінімальними втратами при перемиканні у всьому діапазоні навантаження з частотою перемикання до 150 кГц. У порівнянні з відомою топологією тут вимагається лише незначна кількість додаткових компонентів.

Ключові слова: перетворювач нуля напруги, конвертор нуля напруги широтно-імпульсної модуляції, квазірезонансний інверторне джерело живлення для дугового навантаження.

Аннотация: В связи с развитием спроса на преобразователи с высокой объемной плотностью энергии, предложена новая, более эффективная топология преобразователя. Предложенной схемой построение силовой части является квазирезонансный преобразователь на базе инвертора с дроселем в цепи переменного тока. Функциональная модель подтвердила возможность уменьшения потерь переключения и получения высоких КПД (94%) и коэффициента мощности (0,9) в диапазоне нагрузок от 20% до 100% номинальной. Также она дает возможность ключевым транзисторам источника функционировать с минимальными потерями при переключении во всем диапазоне нагрузок с частотой переключения до 150 кГц. По сравнению с известной топологией здесь требуется лишь незначительное количество дополнительных компонентов.

Ключевые слова: преобразователь нуля напряжения, конвертор нуля напряжения широтно-импульсной модуляции, квазирезонансный инверторный источник питания для дуговой нагрузки.

1. Введение

В последние годы оформился устойчивый спрос на преобразователи с высокой объемной плотностью энергии. Это побуждает к внедрению новых, более эффективных топологий преобразователей. Критериями их разработки, помимо объемной плотности энергии, выступают энергетика потребления (КПД, $\cos\phi$), надежность, ресурс работы, уровень создаваемых помех, электромагнитная совместимость, цена. Наиболее вероятным претендентом для решения поставленной задачи – одна из модификаций преобразователей с “мягким” переключением – по нулевому напряжению (Zero Voltage Switching, сокращенно ZVS). Преимуществами ZVS-схемы являются, в первую очередь, меньшие потери на ключах в трансформаторе по сравнению с режимом HS – жесткого переключения, более низкий уровень создаваемых помех, возможность работы на более высоких частотах переключения. Во-вторых, обеспечение высокой надежности функционирования, электромагнитной совместимости с первичной сетью, максимизации производительности и минимизации удельных затрат электроэнергии. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является широкое внедрение ZVS-преобразователей для питания дуговой нагрузки.

Современные источники питания для дуговой нагрузки (резка, сварка, наплавка, напыление, плазменное воспламенение и пр.), главным образом, строятся по инверторному принципу [1]. Увеличение частоты преобразователя до 100 кГц и выше является желательным с точки зрения дальнейшего повышения управления процессами и снижения массогабаритных показателей, что может быть достигнуто лишь с использованием квазирезонансной ("мягкой") коммутации силовых полупроводниковых приборов. В докладе рассматривается новый ZVS-преобразователь, учитывающий специфические статические и динамические условия нагрузки электрической дугой.

В результате предварительных исследований высокочастотного регулятора тока при работе на мощный воздушный плазматрон установлено, что переход на высокую частоту преобразования обеспечивает устойчивость дугового разряда при индуктивности выходной цепи ≤ 300 мкГн. Малая инерционность регулятора обеспечивает быстрое нарастание тока при возбуждении дугового разряда и исключает необходимость применения дополнительных резисторов в выходной цепи, а высокая крутизна участка токоограничения (более 40 В/А) обеспечивает снижение флуктуаций тока при изменении скорости воздушного потока.

В силу ряда объективных обстоятельств практически все установки нового класса с середины 90-х годов XX века импортируются, в частности, *Air-Plasma* ("Озас" Польша), *Superplasma* ("Телвин" Италия), *PlasmaProf* ("Цеборн", Италия) и др. В настоящее время остро возникла необходимость вытеснения импортного оборудования для плазменной техники средней и большой мощности, разработанной и серийно производимой на отечественных заводах.

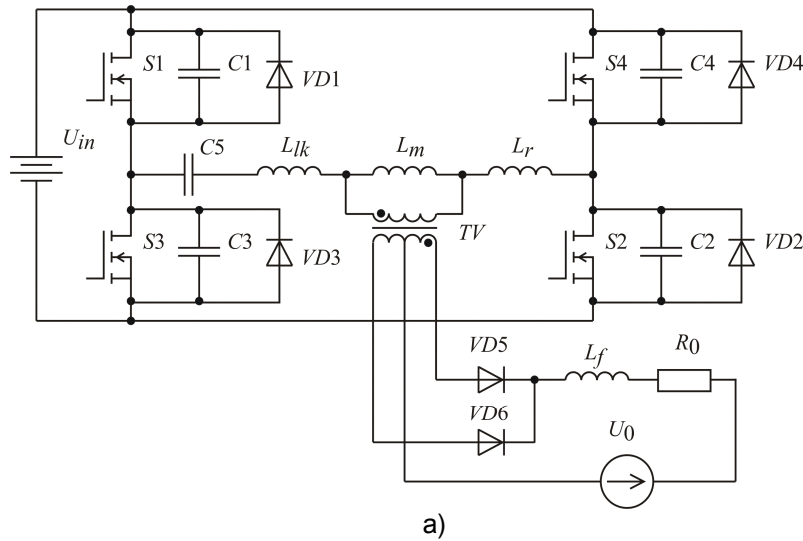
Создание устройств электропитания для промышленных плазматронов большой мощности представляет собой сложную техническую проблему [1]. Сегодня воздушно-плазменная резка – это наиболее эффективный способ резки низколегированных и легированных сталей, цветных металлов и сплавов. Использование источников питания нового типа значительно повышает качество резки и сокращает не менее чем в 2 раза расход быстроизнашивающихся деталей плазматронов.

2. Моделирование нового преобразователя с мягким переключением нуля напряжения инверторного источника питания

Новая схема топологии, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к источникам питания дуги, с их весьма динамичной нагрузкой показана на рис. 1. Эта схема отличается от известных [2] наличием двух Т-образных низкочастотных фильтров C1-L1-C2 и C3-L2-C4 и, соответственно, алгоритмом управления. Предложенная новая схема позволяет реализовать высокие частоты переключения транзисторов инвертора при малых коммутационных нагрузках, высокой эффективности преобразователя во всем диапазоне нагрузок.

Таким образом, оригинальной схемой построения силовой части является квазирезонансный преобразователь на базе инвертора с дросселем в цепи переменного тока [3]. Введение в диагональ переменного тока преобразователя последовательно с первичной обмотки трансформатора ограничивающего дросселя позволяет сформировать требуемую крутопадающую внешнюю характеристику, параметры которой могут регулироваться в широких пределах путем

изменения частоты преобразователя, осуществлять коррекцию ее низкоомного участка в сторону уменьшения тока, что дает возможность избегания бросков тока при уменьшении сопротивления дугового промежутка. При этом снижаются потери энергии и устраняются перегрузки в силовых элементах, что, в свою очередь, ведет к повышению КПД и надежности источника, ток дуги может быть увеличен в соответствующее число раз за счет возможности параллельного соединения источников. Отсутствие связи согласующего трансформатора с нулевым проводом трехфазной сети позволяет выполнять источник разных модификаций: с питанием от трехфазной сети и с питанием от однофазной сети.



U_{in} – входное напряжение 540 В; $C1...C4 = 0,01$ мкФ; $L_{lk} + L_r = 20$ мкГ; $C5 = 20,0$ мкФ; $TV - n = w1/w2 = 2$; $f_0 = 26$ кГц; $U_{xx} = 250$ В; $U_0 = 120$ В, 100 А; $U_0 = 108$ В, 70 А

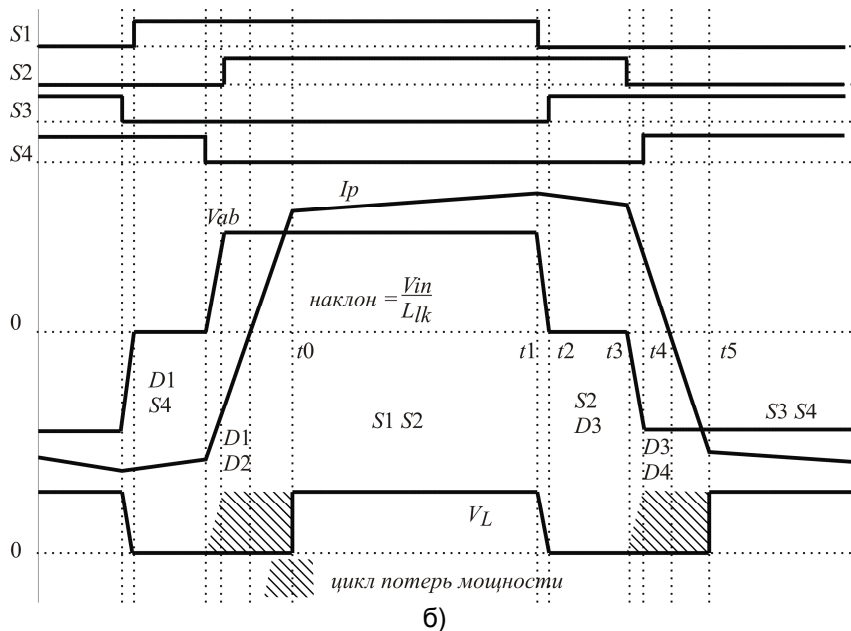


Рис. 1. Базовый ZVS-ШИМ конвертор: а) расчетная схема; б) временные диаграммы

К одному и тому же техническому результату в совокупности с другими существенными признаками приводит введение вместо ограничивающего дросселя развитого нормируемого

магнитного потока рассеивания согласующего трансформатора, который может быть предусмотрен его конструкцией.

Для резонансной схемы с небольшой нагрузкой должны быть соблюдены два условия, относящиеся к энергии, запасенной в резонансной катушке индуктивности. Во-первых, необходимо иметь достаточно запасенной индуктивной энергии, чтобы возбуждать резонансный процесс между паразитными емкостями и противоположной шиной питания. Второе условие состоит в том, что этот процесс должен происходить в пределах допустимого времени процесса. Результатом нарушения одного или обоих условий является появление потерь переключения при ненулевом напряжении.

Остановимся несколько подробнее на первом условии. Требование к запасенной энергии индуктивности и ограниченная максимальная длительность резонансного процесса также определяют угловую частоту ω_r схемы резонансного контура. Элементы этого контура: резонансная индуктивность L_r и емкость C_r , сформированная выходными емкостями двух ключей, а также включенной параллельно с трансформатором емкостью первичной обмотки C_{TV} . Максимальная длительность резонансного процесса не может превышать четырех периодов самой резонансной частоты, чтобы удовлетворять условию переключения при нулевом напряжении.

Отмеченные выше недостатки, характерные для базовой схемы ZVS – преобразователя, устранены в предлагаемом новом ZVS-ШИМ-конвертере. Получение необходимой величины тока первичной обмотки здесь обеспечивается шунтированием полупроводниковых ключей L_{k1} , $C6$, $C7$ и L_{k2} , $C8$, $C9$ внешними цепями. Ток дополнительных цепей помогает резонансным процессам на стороне первичной обмотки. Формирование цепи обеспечивает ZVS-режим как при малой, так и большей нагрузке, чем значительно снижает вероятность выхода из строя МОП-транзисторов без усложнения схемы. Еще больший эффект даст сочетание этого решения с применением транзисторов типа *FredFET*. Предлагаемая наработка на отказ моделей мощных ZVS преобразователей при этом достигнет несколько миллионов часов. Модель нового преобразователя представлена на рис. 2.

Для моделирования преобразователей использован пакет TCAD, разработанный и достаточно широко используемый в Польше. Несмотря на то, что этот пакет не получил широкого распространения в мире, он очень удобен при исследовании полупроводниковых преобразователей.

Модель содержит мостовой преобразователь на МОП – транзисторах, шунтированных диодами, источник питания и схему управления, реализующую типовой закон управления. В этой модели учтены внутренние параметры ключей, диодного выпрямителя, регулятора и пр. В качестве нагрузки выбрана активно-индуктивная с против-ЭДС. Блоки измерения измеряют ток и напряжение на нагрузке, ток и напряжение на силовом ключе, квазистатическую мощность рассеиваемую ключом. Модельные исследования электромагнитных и энергетических характеристик инвертора являются основой его проектирования.

Результаты моделирования подтверждают эффективность нового преобразователя по сравнению с базовым. Данные, полученные в результате анализа, позволяют рассчитать

энергетические характеристики инвертора, синтезировать на выходе инвертора фильтр, цепи демпфирования, а также реализовать диагностику неисправностей в схеме.

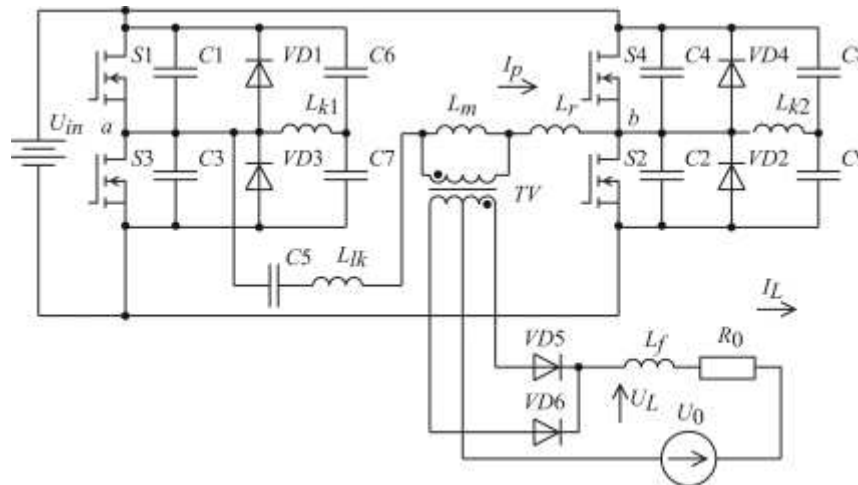


Рис. 2. Схема нового ZVS-преобразователя

Величина демпфирующих конденсаторов выбирается исходя из времени выключения силовых транзисторов. Так как спад тока при выключении силового транзистора происходит за достаточно большое время, ёмкость демпфирующего конденсатора была выбрана равной 10 нФ. Индуктивность $L_k = 276$ мкГн, а емкости $C6-C9 = 0,68$ мкф.

3. Выводы

Таким образом, в основу построения источника питания положен ZVS-преобразователь, для управления которым использован разработанный метод комбинированной импульсной модуляции. При этом разработаны модели и рассмотрены вопросы проектирования современного полупроводникового преобразователя (статические и динамические характеристики) с использованием методов компьютерного моделирования. Полученные результаты и приёмы исследования позволяют получить ряд новых выводов и рекомендаций и приступить к практической реализации построения источника питания.

Предложенная функциональная модель подтвердила возможность уменьшения потерь переключения и получения высоких КПД (94%) и коэффициента мощности (0,9) в диапазоне нагрузок от 20% до 100% номинальной. Более того, новая ZVS-топология инвертора дает возможность ключевым IGBT-транзисторам источника функционировать с минимальными потерями переключения во всем диапазоне нагрузок с частотой переключения до 150 кГц. По сравнению с известной топологией здесь требуется лишь незначительное количество дополнительных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 664 с.
2. Jovanovic M. Zero-Voltage-Switching Technique in High-Frequency off-line Converters // IEEE Proceedings of APEC. – 1988. – P. 23–32.
3. Ширишов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 192 с.