

ПРОБЛЕМА ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

А.С. Ревко

Черниговский государственный технологический университет

Кафедра промышленной электроники, ул. Шевченко, 95, г. Чернигов-27, 14027, Украина

Тел. +38(04622) 3-16-96, E-mail: asr@inel.stu.cn.ua

Annotation - The problems of usage of pulse-width modulation in quasi-resonant converters are considered.

Key words - quasi-resonant pulse converters, pulse-frequency modulation, pulse-width modulation, PWM.

ВВЕДЕНИЕ

В народном хозяйстве Украины в настоящее время уделяется большое внимание проблемам энергосбережения и энергоэкологии. Квазирезонансные импульсные преобразователи (КРИП) в некоторой степени позволяют решить вышеуказанные проблемы в силовой электронике. Известно, что этот тип преобразователей, по сравнению с традиционными, обладает большим КПД, меньшими массой и габаритами, лучшими динамическими характеристиками и рядом других положительных качеств. Таким образом, применение КРИП позволяет улучшить параметры электротехнических систем.

Несмотря на все достоинства, квазирезонансные преобразователи имеют некоторые недостатки, которые препятствуют повсеместному внедрению КРИП в народном хозяйстве. К таким недостаткам можно отнести: более сложную систему управления, чем в широтно-импульсных преобразователях, необходимость применения высокочастотных силовых ключей, использование частотно-импульсной модуляции (ЧИМ).

Развитие мировой и отечественной полупроводниковой промышленности содействует разработке и выпуску новых типов и моделей мощных транзисторов и модулей, способных работать на повышенных частотах вплоть до десятков мегагерц. Современные микроконтроллеры и программируемые логические интегральные схемы позволяют без существенных затрат реализовывать сложные системы управления.

В настоящее время актуальной остается проблема снижения пульсаций выходного напряжения КРИП, что связано с использованием ЧИМ. Недостаток частотно-импульсного управления проявляется в увеличении пульсаций выходного напряжения и тока при широком диапазоне регулирования. В точном электроприводе это приводит к возрастанию пульсаций частоты вращения вала электродвигателя. Для решения этой проблемы в КРИП применяют выходные фильтры, настроенные на подавление пульсаций с минимальной рабочей частотой. Такой подход приводит либо к увеличению массы и габаритов преобразователя (при глубоком регулировании минимальная частота может оказаться порядка нескольких килогерц, в то время как максимальная – единицы мегагерц), либо к сужению динамического диапазона регулирования. Данная статья посвящена поиску иных путей решения вышеуказанной проблемы.

Для успешной разработки и использования новых преобразователей необходимо понимание сути происходящих в них электромагнитных процессов. Анализ электромагнитных процессов в КРИП по постоянной составляющей был проведен в [1]. Более строгий анализ для квазирезонансного преобразователя, переключаемого при нулевом токе (КРИП-ПНТ), с учетом переменной составляющей, для статической нагрузки выполнен в [2], а для динамической нагрузки (двигатель постоянного тока) – в [3] и [4].

В настоящее время КРИП разной мощности находят применения в различных отраслях народного хозяйства.

В [4] и [5] показано использование КРИП-ПНТ в прецизионном электроприводе постоянного тока, что позволяет уменьшить пульсации скорости электропривода, снизить массу и габариты, повысить КПД, увеличить стабильность частоты вращения, а также снизить уровень электромагнитных помех, распространяемых по сети и в эфир. В [5] двухполупериодный реверсивный (мостовой) КРИП-ПНТ при мощности 150 Вт имеет КПД 90% и рабочий интервал частот преобразования 0,02–1,3 МГц. Комбинированный мостовой квазирезонансный преобразователь с переключением при нулевом токе и нулевом напряжении позволяет повысить КПД до 95%.

Система электропривода для аппарата точной магнитной записи на основе КРИП-ПНТ и цифровой системы управления с фазовой автоподстройкой частоты обеспечивает стабильность скорости вращения якоря двигателя за один оборот с погрешностью 0,01% в широком диапазоне изменения нагрузки и напряжения питания [5].

К положительным результатам приводит применение квазирезонансных преобразователей и в электродуговой сварке ([6] и [7]).

В [6] для питания сварочной дуги применен квазирезонансный мостовой конвертер с фазовым сдвигом и коммутацией при нулевом токе и нулевом напряжении на ключевом элементе. Использование КРИП позволило значительно уменьшить коммутационные потери (увеличить КПД), а также уменьшить массу и габариты. Экспериментальный сварочный источник мощностью 3,5 кВт имеет КПД 92% в диапазоне нагрузок от 24% до 100% номинальной. В качестве ключей использовались IGBT транзисторы типа IRGPC50U с частотой переключения, изменяющейся в процессе регулирования от 50 до 80 кГц.

Еще более убедительные результаты получены в [7], где отмечено, что на основе достижений современной промышленности в производстве полупроводников, конденсаторов, трансформаторов и в смежных областях стало возможным строить мощные КРИП с высоким КПД (0,95–0,98), малой массой [2–4 кг/(кВ*А)], малыми габаритами [2–4 дм³/(кВ*А)], для работы на высоких частотах (до 100 кГц) при мощностях, превышающих сотни киловатт. Для иллюстрации вышесказанного автор представил КРИП для аппарата электродуговой сварки на номинальный ток 175 А мощностью 5 кВт. Масса преобразователя 22 кг, рабочая частота преобразования 50 кГц.

В работе [7] приведена схема квазирезонансного преобразователя частоты для привода и компенсации реактивной мощности. Преобразователь собран на мощных тиристорах с частотой преобразования 50 кГц. Он позволяет питать двигатели мощностью до 1000 кВт переменным напряжением с регулируемой частотой от 0 до 16 кГц.

В [8] представлены источники электропитания на основе квазирезонансного инвертора для систем зажигания газотурбинных двигателей, а в [9] описывается квазирезонансный преобразователь постоянного напряжения для зарядки высоковольтных емкостных накопителей. Квазирезонансные ключи находят применение и в источниках питания бытовой аппаратуры (блоки питания персональных компьютеров, электронные балласты и др.).

Могут быть построены квазирезонансные преобразователи и другого назначения. Вышеприведенные примеры – лишь частичная иллюстрация возможных областей использования КРИП, но и они на практике подтверждают явные преимущества использования квазирезонансных преобразователей взамен традиционных, что еще раз говорит об актуальности задачи повышения качества КРИП.

КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ФИКСИРОВАННОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ

На сегодняшний день, как было отмечено выше, основным недостатком КРИП по сравнению с широтно-импульсными преобразователями, остается непостоянство частоты преобразования при регулировании выходного напряжения. Это происходит из-за необходимости использования частотно-импульсного регулирования в КРИП, так как длительность импульса в нем жестко привязана к параметрам резонансного контура, которые нелегко изменять оперативно. Перевод квазирезонансного преобразователя на регулирование выходного напряжения с применением ШИМ позволяет решить проблему непостоянства рабочей частоты КРИП.

Рассмотрим возможности реализации этого и других вариантов модернизации квазирезонансных преобразователей. Для наглядности возьмем один из классических КРИП, например понижающий двухполупериодный КРИП-ПНТ (рис. 1).

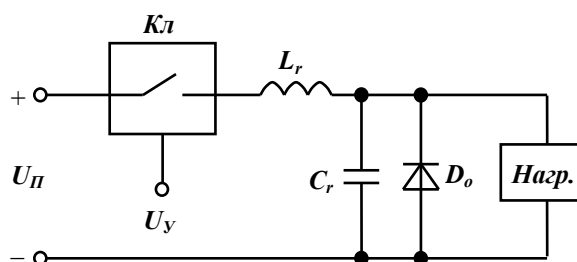


Рис. 1. Двухполупериодный КРИП-ПНТ

Работа такого преобразователя подробно рассмотрена в [1].

На рис.1 используются следующие обозначения: U_{π} – напряжение источника питания; U_{γ} – управляющий сигнал для ключа; K_{λ} – силовой ключ, может применяться транзистор или тиристор; L_r , C_r – индуктивность и емкость резонансного контура; D_o – диод для пропускания обратного тока нагрузки, которая, в общем случае, является реактивной (в состав нагрузки включен также фильтр выходного напряжения). В частных случаях нагрузка может быть полностью активной или активно-индуктивной (трансформатор, двигатель постоянного тока).

Временные диаграммы работы преобразователя с активно-индуктивной нагрузкой приведены на рис.2.

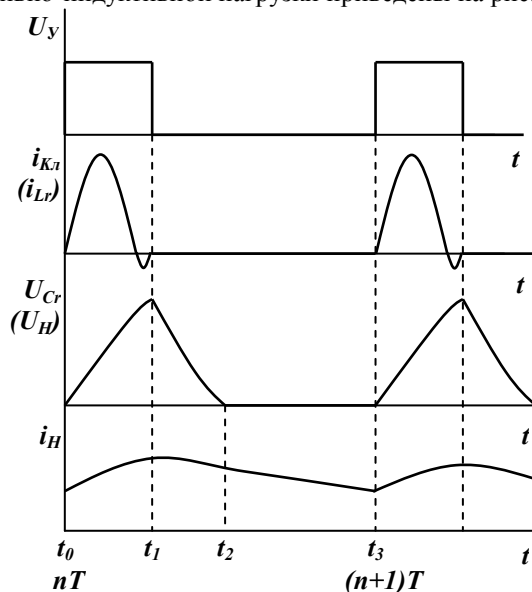


Рис. 2. Временные диаграммы работы КРИП-ПНТ

На рис.2 показан n -ый и начало $(n+1)$ -го периода установившейся работы КРИП. Для упрощения рисунка отдельно не отмечен интервал времени в начале периода переключения, на котором ток ключа ($i_{Кл}$) еще не достиг уровня тока нагрузки (i_H). На этом интервале продолжает проводить ток диод D_o , а напряжение на нагрузке (U_H) остается равным нулю. Ток ключа имеет колебательную форму, так как является суммой токов нагрузки и резонансного контура. Из условия работы КРИП параметры контура выбираются таким образом, чтобы падающая полуволна тока обязательно достигла нуля (иначе будет нарушен режим переключения силового ключа при нулевом токе). Это условие удовлетворяется, если

волновое сопротивление контура будет меньше сопротивления нагрузки:

$$\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \leq R_H. \quad (1)$$

Длительность импульса тока ключа $t_1 - t_0$ (рис.2) постоянная и определяется параметрами резонансного контура:

$$t_1 - t_0 = 2\pi\sqrt{L_r C_r}. \quad (2)$$

В зависимостях (1) и (2) не учитывается влияние паразитных параметров реальных элементов схемы. Выражения (1) и (2) используются для расчета индуктивности и емкости резонансного контура преобразователя.

Регулирование выходного напряжения классического КРИП осуществляется путем ЧИМ (изменяется интервал времени $t_0 - t_3$ что соответствует периоду работы T). Перевод работы квазирезонансного преобразователя из режима ЧИМ в ШИМ возможен при условии нахождения приемлемых путей оперативного изменения длительности импульса тока $i_{Кл} - t_1 - t_0$ или длительности импульса выходного напряжения $U_H - t_2 - t_0$. Регулирование первого интервала, как видно из выражения (2), возможно путем изменения индуктивности или емкости контура. Второй интервал состоит из двух подинтервалов: $t_1 - t_0$ и $t_2 - t_1$. На промежутке $t_2 - t_1$ происходит разряд конденсатора контура через нагрузку. Изменить его длительность можно путем изменения резонансного конденсатора или параметров нагрузки.

Проанализируем подробнее возможные варианты регулирования. Механическое изменение параметров резонансного контура (конденсаторы, переменная емкость, вариометры, электромеханические реле и т.д.) не устраивают по причине низкого быстродействия. Рассмотрим электрические способы оперативного изменения частоты резонансного контура. Нежелательно применение методов, основанных на внесении потерь в резонансный контур, так как это уменьшает КПД преобразователя. Идеальным решением поставленной задачи был бы элемент с изменяющейся под действием электрического сигнала индуктивностью или емкостью. Необходимо учитывать, что в резонансном контуре циркулирует реактивная мощность, сравнимая с мощностью нагрузки, поэтому элементы резонансного контура должны надежно работать при мощностях сотен и более ВАР.

Индуктивность классической катушки подстраивается изменением ее геометрических размеров или магнитных свойств сердечника. Электрическим методам доступно лишь изменение магнитных свойств сердечника путем введения постоянного подмагничивания. Недостаток такого метода – снижение КПД преобразователя, к тому же в КРИП в основном используются катушки без сердечников, и даже паразитные индуктивности монтажа и элементов схемы.

Предпочтительнее изменять частоту резонансного контура при помощи емкости, а не индуктивности. Для увеличения длительности импульса тока ключа (например, чтобы

скомпенсировать возросшую нагрузку преобразователя), емкость необходимо увеличивать, что приведет, исходя из выражения (1), к уменьшению волнового сопротивления контура. Следовательно, преобразователь сможет отработать больший диапазон изменения нагрузки без выхода из режима переключения при нулевом токе.

Элементы, изменяющие свою емкость под действием напряжения известны – это варикапы. Однако они работоспособны при условии, что постоянная составляющая на них значительно больше переменной, так как в них отсутствует отдельный управляющий вывод. Также варикапы не рассчитаны на большую реактивную мощность. В связи с этим в КРИП прямое использование варикапов в резонансном контуре для управления его частотой не представляется возможным.

Актуальной становится задача разработки варикапов, способных работать при больших реактивных мощностях и имеющих независимый вход управления емкостью. Решение этой задачи позволит построить квазирезонансный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией.

Возможно использование комбинированных схем преобразователей. Например, КРИП, работающий с ЧИМ, но имеющий несколько фиксированных частот резонансного контура. Частоты переключаются с помощью транзисторных ключей путем коммутирования дополнительных емкостей. Переключать последние необходимо на интервале работы КРИП с отсутствием напряжения на резонансном конденсаторе (интервал $t_2 - t_3$ на Рис.2). Это позволит осуществить быструю коммутацию с низкими потерями.

Следует отметить еще один способ регулирования выходного напряжения КРИП – фазоимпульсное управление (ФИУ). Его можно реализовать в мостовых квазирезонансных преобразователях, как с непосредственным включением нагрузки в диагональ моста, так и с включением последней через трансформатор. Преимущества этого метода проявляются на больших мощностях, когда трудно, а, чаще всего, невозможно реализовать ШИМ из-за отсутствия регулировочных элементов с необходимыми параметрами. При ФИУ в квазирезонансном мосту одновременно работают оба плеча с постоянной частотой и длительностью импульсов. Выходное напряжение изменяется благодаря фазовому сдвигу между импульсами обоих плеч.

Один из вариантов практической реализации фазоимпульсного управления в мощном мостовом квазирезонансном инверторе для электродуговой сварки рассмотрен в [6].

ВЫВОДЫ

Квазирезонансные преобразователи благодаря своим преимуществам являются перспективным видом преобразователей и сегодня находят применение в различных областях народного хозяйства. Перевод КРИП на работу с широтно-импульсной или фазоимпульсной модуляцией позволяет решить проблему возрастания

массогабаритных показателей преобразователя, связанную с непостоянством его рабочей частоты при больших диапазонах регулирования. Это позволит использовать преимущества КРИП и в системах с большим динамическим диапазоном управления, потеснив тем самым другие виды преобразователей.

Актуальной задачей на сегодня является поиск элементов, изменяющих индуктивность или емкость под действием электрического сигнала, способных выдерживать реактивную мощность, сравнимую с мощностью нагрузки преобразователя.

Наиболее целесообразно регулировать длительность импульса в КРИП при помощи емкости резонансного контура. В настоящее время ее можно изменять ступенчато, путем коммутации дополнительных конденсаторов.

Для мостовых квазирезонансных преобразователей больших мощностей предпочтительнее использовать фазоимпульсное управление, при котором длительность и частота импульсов остается постоянной, а регулировка выходного напряжения осуществляется посредством фазового сдвига двух серий импульсов с разных плеч моста.

[1] Ли Ф. К. Высокочастотные квазирезонансные преобразователи. ТИИЭР. Тем. вып. «Энергетическая электроника» / Под ред. В. А. Лабунцова, М.: Мир, – Т. 76.– 1988. – № 4. – С. 83-97.

[2] Денисов Ю. А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно-импульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями / – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2001. – 146 с.

[3] Денисов Ю. А., Ревко А. С. Анализ электромагнитных процессов в системе квазирезонансный импульсный преобразователь, переключаемый при нулевом токе – двигатель постоянного тока // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2000. – Ч. 4. – С. 29 – 33.

[4] Денисов А.И., Ревко А.С. Квазирезонансные импульсные преобразователи в системах прецизионного электропривода малой мощности // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2004. – Ч. 2. – С. 79 – 82.

[5] Денисов Ю.А., Ревко А. С. Реверсивный квазирезонансный импульсный преобразователь с цифровой системой управления. //Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 4. Київ, 2005, С. 50 – 53.

[6] Mecke H, Fischer W, Werter F. Квазирезонансный инверторный источник для электродуговой сварки. http://valvolodin.narod.ru/schems/Soft_switch.html.

[7] Чванов В.А. Преобразователи с дозированной передачей электроэнергии // Электричество. – 2005. – №6. – С.46 – 53.

[8] Волков И.В., Губаревич В.Н., Спирин В.М. Источники электропитания на основе квазирезонансного инвертора для систем зажигания газотурбинных двигателей // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – 2000. – Ч 4. С

[9] Буранов С. Н., Горохов В. В., Карелин В. И., Репин П. Б. Квазирезонансный преобразователь постоянного напряжения для зарядки высоковольтных емкостных накопителей // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – №2. – С. 84–87.

Рекомендовано к публикации д.т.н. Денисовым А.И.