Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/92TVN115 (<https://doi.org/10.15862/92TVN115>)

УДК 621.314.572

Коптяев Евгений Николаевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»

Российская Федерация, Северодвинск¹

Инженер по наладке и испытаниям 1 категории

Старший преподаватель

E-mail: evgenijkoptyaev@gmail.com

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=792304

Балашевич Вячеслав Михайлович

НИИ Энергетики ЮРГТУ

Российская Федерация, г. Новочеркасск²

Ведущий инженер

E-mail: bmashka@gmail.com

Атрашкевич Павел Васильевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»

Российская Федерация, Северодвинск

Инженер по наладке и испытаниям 1 категории

E-mail: bimfin@mail.ru

Душкин Юрий Владимирович

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»

Российская Федерация, Северодвинск

Заместитель главного инженера

E-mail: yuri.dushkin@yandex.ru

Кузнецов Иван Васильевич

ОАО «Производственное Объединение «Севмаш»

Российская Федерация, Северодвинск³

Мастер

Старший преподаватель

Аспирант

E-mail: fenix-north@ya.ru

¹ 164500, Северодвинск, Архангельской области, Архангельское шоссе, 34

² 346428, Ростовская область г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

³ 164500, Северодвинск, Архангельской области, Архангельское шоссе, 58

Статические полупроводниковые преобразователи с повышенной надежностью и электромагнитной совместимостью на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем

Аннотация. Проведен обзор современных статических преобразователей, а также различные способы преобразования частоты, в том числе с широтно-импульсной модуляцией. Сделан анализ их недостатков, ведущих к снижению надежности и электромагнитной совместимости оборудованием автономных ЭЭС. Выделен отдельный класс промышленных потребителей, требующих питания пониженной частотой без ее регулирования, в том числе системы депарафинизации и ряд других индустриальных потребителей. Описан новый тип непосредственного преобразователя частоты на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, позволяющий реализовать алгоритмы коммутации без разрыва кривой тока, что позволяет улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью и другим электрооборудованием, а также повышает надежность работы полупроводниковых вентилях. Проведен анализ его преимуществ и недостатков относительно других типов преобразователей частоты.

Ключевые слова: статический преобразователь; трехфазный; трансформатор с вращающимся полем; выпрямитель; пульсация; статический преобразователь; непосредственный преобразователь частоты; электро-магнитная совместимость; круговая обмотка; коммутация; igbt-модуль.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Коптяев Е.Н., Балашевич В.М., Атрашкевич П.В., Душкин Ю.В., Кузнецов И.В. Статические полупроводниковые преобразователи с повышенной надежностью и электромагнитной совместимостью на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/92TVN115

Основу современных автономных электроэнергетических систем во всем мире составляют генераторы трехфазного переменного напряжения 380В 50 Гц [1]. При этом конечные потребители требуют для своей работы преобразования одного или нескольких параметров: рода тока, напряжения и частоты. Для этого в настоящее время используются преимущественно полупроводниковые статические преобразователи. Все множество преобразователей электроэнергии можно разделить на несколько основных классов: выпрямители и преобразователи частоты. Статические выпрямители обеспечивают стабилизированным постоянным током соответствующие потребители, задача преобразователей частоты – плавный пуск двигателей различных механизмов, а также регулирование их частоты. Также существует отдельный класс промышленных потребителей, требующих питания пониженной частоты без её регулирования. К таким потребителям относятся, в частности, системы депарафинизации нефтяных скважин [2] и некоторые технологические процессы в металлургии [3]. Рассмотрим основные преимущества и недостатки современных статических преобразователей.

Основой классических преобразователей лежит трехфазная мостовая схема с двумя группами вентиля – катодной и анодной, которая обеспечивает высокое среднее выпрямленное напряжение при довольно малом коэффициенте пульсаций. Недостатком таких преобразователей является необходимость введения дополнительных обмоток типа треугольник и зигзаг для получения фазового сдвига, что связано с ухудшением массогабаритных показателей установки. Каждая вторичная обмотка подключается к своему трехфазному мосту, они соединяются последовательно или параллельно. Естественная коммутация вентиля без разрыва тока возможна только в неуправляемом режиме, введение угла регулирования приводит к коммутационным выбросам ЭДС.

В последние десятилетия полупроводниковой промышленностью было освоено производство мощных полностью управляемых вентиля с высокой частотой коммутации, что дало толчок к развитию схмотехники импульсных статических преобразователей, и поиску различных алгоритмов управления ими. Появление новых способов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволило создать выпрямители, инверторы и преобразователи частоты с улучшенными характеристиками – повышенным коэффициентом потребляемой мощности, качеством выходного напряжения и тока, сниженными массой и габаритами. Расплатой за эти преимущества стало повышение частоты коммутации полупроводниковых приборов, которая в десятки раз превышает частоту питающей сети и еще больше, – по сравнению с классическими преобразователями. Это привело к повышенному тепловыделению полупроводниковых приборов, ухудшению электромагнитной совместимости и снижению надежности их работы, поскольку процесс коммутации является самым напряженным режимом работы, сопровождаемым выбросами напряжения при разрыве кривой тока. Для примера можно сослаться на результаты испытания отечественного преобразователя частоты мощностью 1,4 МВт разработки ЦНИИ СЭТ с двухуровневым инвертором и ШИМ-модуляцией на холостом ходу, у которого уровень излучаемых промышленных помех был превышен на 25 дБ относительно требований ГОСТ Р 51317.3-99г. Таким образом, главной проблемой современной силовой преобразовательной можно признать процесс коммутации тока и снижение коммутационных выбросов.

Основой для нового класса статических преобразователей электроэнергии стали трансформаторы с вращающимся магнитным полем (ТВМП), как попытка улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью и качество выходного напряжения выпрямителей и инверторов на базе ТВМП [1, 4, 6, 7, 8, 9, 10]. Это привело к появлению вторичной круговой обмотки (КО), выполненной по типу якорной обмотки машины постоянного тока, и изменению схемы соединений полупроводникового коммутатора. Возможность получения большого числа пульсаций выпрямленного и ступеней

синусоидального напряжения за счет увеличения числа отводов КО – один из способов улучшения качества напряжения на выходе выпрямителей и инверторов на базе ТВМП. Дальнейшим развитием идеи управляемого статического преобразователя на базе ТВМП с КО стал непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) с напряжением, формируемым из фрагментов синусоиды основной частоты [5].

Конструктивно, магнитопровод ТВМП представляет собой цилиндрический шихтованный магнитопровод, с расположенными по окружности пазами, в которые укладываются первичная трехфазная и вторичная круговая обмотка. Создаваемое первичной обмоткой вращающееся магнитное поле наводит во вторичной замкнутой КО переменную ЭДС, при этом сумма ее во всех секция КО равняется нулю, а знак ЭДС при переходе геометрической нейтрали (точки максимума ЭДС) обмотки меняется на противоположный. Коммутируя отводы КО, совпадающие с геометрической нейтралью КО, получаем выпрямленное пульсирующее напряжение, а введя коэффициент скольжения – понижение частоты выходного напряжения. Подобные решения, несмотря на использование ТВМП, сохраняет недостатки классических статических преобразователей – разрыв кривой тока и соответствующие ему коммутационные выбросы ЭДС, что ухудшает электромагнитную совместимость с другим оборудованием и снижает надежность самого преобразователя.

Для решения этой проблемы можно использовать свойство симметричности вторичной КО ТВМП, что создает условия для реализации алгоритма плавной коммутации тока между вентилями.

Рассмотрим работу ТВМП с КО на 8 отводов (рисунок 1) с реверсивным коммутатором на выходе. Напряжение на отводах изменяется по мере вращении созданного первичной обмоткой магнитного поля так, что в зависимости от расположения вектора суммарной магнитной индукции, ЭДС на диаметральных выводах (например, ДК на рисунке 1) будет подчиняться синусоидальному закону, проходя через ноль с частотой, равной частоте питающей сети. То есть за счет числа отводов круговой обмотки, можно получить многофазную систему напряжений, число фаз которой определяется числом пар отводов, равным числу диагоналей обмотки.

Рисунок 1. ЭДС круговой обмотки с 8 отводами

Рисунок 2. Выход НПЧ на базе ТВМП при 6 отводах КО

Рисунок 3. Выход НПЧ на базе ТВМП при 8 отводах КО

При работе режиме неуправляемого выпрямителя, пары отводов, составляющих диагональ, коммутируются в моменты равенства ЭДС диагоналей – таким образом, ток переходит на смежную пару отводов без разрыва тока. Это свойство можно обобщить закон управления: любая коммутация должна производиться между парами отводов, составляющих две диагонали в момент равенства их ЭДС. Это гарантирует плавную передачу тока с вентиля на вентиль и отсутствие коммутационных выбросов ЭДС.

На основе такого закона управления можно строить различные виды преобразователей, в том числе непосредственные преобразователи частоты, с понижением частоты питающей сети. В этом случае необходимо обеспечить максимальное приближение выходного напряжения к синусоидальному и минимальный уровень высших гармоник, обеспечивая одновременно равенство ЭДС коммутируемых диагоналей КО. Это приводит к неравным периодам времени между коммутациями.

На рисунке 2 изображено формируемое выходное напряжение с пониженной в 2 раза частотой. Очевидно, что 6 отводов КО недостаточно для формирования плавной кривой на выходе НПЧ в начальный момент каждой полуволны. На рисунке 3 изображено выходной напряжение для случая 8 отводов КО, полуволна выходного напряжения формируется без снижения до нуля и с лучшим качеством синусоиды.

На основании сказанного выше, можно сделать следующие выводы:

1. Основная причина проблем электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей для автономных электроэнергетических систем – наличие разрыва тока при коммутации полупроводниковых вентилях.
2. Наибольший уровень промышленных помех создается при работе статических преобразователей с ШИМ-модуляцией, при этом увеличение несущей частоты ШИМ позволяет улучшить качество выходного напряжения, но одновременно ухудшает электромагнитную совместимость с другим оборудованием.
3. Основной причиной снижения надежности существующих статических преобразователей являются коммутационные выбросы ЭДС при разрыве кривой тока и увеличение тепловыделений с ростом несущей частоты ШИМ.
4. Преобразователи, выполненные на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем, позволяют реализовать алгоритмы коммутации без разрыва кривой тока, что улучшает электромагнитную совместимость, снижает уровень излучаемых помех и повышает надежность работы полупроводниковых вентилях.
5. Использование алгоритма плавной коммутации позволяет реализовать соответствующий ему преобразователь частоты, с дискретным значением коэффициентов деления, и минимально необходимым для формирования полноценной синусоиды выходного напряжения (без провалов в течение полупериода до нуля) числом отводов КО, равным 8 для случая деления частоты на два. При этом возможна частичная экономия коммутирующих вентилях за счет отводов КО, которые выпадают из последовательности алгоритма коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черевко А.И., Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Музыка М.М., Солуянов П.В. Судовые полупроводниковые преобразователи. – учебник, СПб: СПбГМТУ, 2011, 526 с.
2. Иванов А.Г., Арзамасов В.Л. Электросиловые установки для нагрева и депарафинизации нефти. – Электричество, 2012, №4, с.28.
3. Нехамин С.М., Бруковский И.П., Машьянов В.Г. Регулировочные характеристики источников питания пониженной частоты для промышленных рудовосстановительных печей – Электротехника, 1985, №10, с.12.
4. Черевко А.И., Музыка М.М., Лимонникова Е.В. Влияние силовых схем коммутаторов на качество выходного напряжения управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями – Электротехника, 2008, №10, с. 22.
5. Заявка на изобретение 2014110648 РФ, МПК Н02М 5/16. Понижающий преобразователь частоты – Коптяев Е.Н. и др., заявл. 20.03.2014.
6. Черевко А.И., Музыка М.М. Исследование влияния управляемых выпрямителей с трансформаторами вращающегося магнитного поля на питающую сеть – Электротехника, 2008, №12, с.13.
7. Черевко А.И., Музыка М.М. Исследование качества выходного напряжения, тока и энергетических соотношений автономных инверторов с трансформаторами вращающегося магнитного поля – Электротехника, 2009, №2, с. 56.
8. Грачев П.Э., Костырев М.Л., Мягков Ф.Н., Кунцевич П.А. Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов – Электротехника, 2005, №12, с. 24.
9. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем – Известия вузов, Электромеханика – 2005, №3, с. 44.
10. Гайтов Б.Х., Прасько Д.Г., Гайтова Т.Б. Разработка многофазных трансформаторов – Электротехника, 2000, №6, с. 42.

Рецензент: Каплин, зам. главного конструктора по специальной тематике, кандидат технических наук, НИИ Энергетики ЮрГТУ.

Koptjaev Evgenij Nikolaevich

JSC "Northern Industrial Association" Arctic"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: evgkop79@mail.ru

Balashevich Vyacheslav Mikhailovich

Energy Research Institute YURGPU
Russian Federation, Novocherkassk
E-mail: bmashka@gmail.com

Atrashkevich Pavel Vasilevich

JSC "Northern Industrial Association" Arctic"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: bimfin@mail.ru

Dushkin Jurij Vladimirovich

JSC "Northern Industrial Association" Arctic"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: yuri.dushkin@yandex.ru

Kuznetsov Ivan Vasilyevich

JSC "Industrial Association"Sevmash"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: fenix-north@ya.ru

Static semiconductor converters with improved reliability and electromagnetic compatibility on the basis of a transformer with a rotating magnetic field

Abstract. An overview of modern static converters, as well as different ways of frequency conversion, including pulse-width modulation. The analysis of their shortcomings, leading to a decrease in the reliability and electromagnetic compatibility of equipment autonomous EPS. Allocated a separate class of industrial users that require the power of low frequency without its regulation, including dewaxing system and a number of other industrial consumers. A new type of direct frequency converter based on a transformer with a rotating magnetic field, allowing to implement the algorithm switching without breaking the current curve, which improves the electromagnetic compatibility with the power supply and other electrical equipment, as well as increases the reliability of the semiconductor valves. The analysis of its advantages and disadvantages relative to other types of frequency converters.

Keywords: inverter; transformer with a rotating field; rectifier; pulse; inverter; direct frequency converter; electromagnetic compatibility; circular winding; switching; igbt-module.

REFERENCES

1. Cherevko A.I., Dmitriev B.F., Ryaben'kiy V.M., Muzyka M.M., Soluyanov P.V. Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli. – uchebnik, SPb: SPbGMTU, 2011, 526 s.
2. Ivanov A.G., Arzamasov V.L. Elektrosilovye ustanovki dlya nagreva i deparafinizatsii nefi. – Elektrichestvo, 2012, №4, c.28.
3. Nekhamin S.M., Brukovskiy I.P., Mash'yanov V.G. Regulirovочnye kharakteristiki istochnikov pitaniya ponizhennoy chastoty dlya promyshlennykh rudovosstanovitel'nykh pechey – Elektrotehnika, 1985, №10, c.12.
4. Cherevko A.I., Muzyka M.M., Limonnikova E.V. Vliyanie silovykh skhem kommutatorov na kachestvo vykhodnogo napryazheniya upravlyaemykh vypryamiteley, postroennykh na baze transformatorov s vrashchayushchimisya magnitnymi polyami – Elektrotehnika, 2008, №10, s. 22.
5. Zayavka na izobretenie 2014110648 RF, MPK H02M 5/16. Ponizhayushchiy preobrazovatel' chastoty – Koptyaev E.N. i dr., zayavl. 20.03.2014.
6. Cherevko A.I., Muzyka M.M. Issledovanie vliyaniya upravlyaemykh vypryamiteley s transformatorami vrashchayushchegosya magnitnogo polya na pitayushchuyu set' – Elektrotehnika, 2008, №12, c.13.
7. Cherevko A.I., Muzyka M.M. Issledovanie kachestva vykhodnogo napryazheniya, toka i energeticheskikh sootnosheniy avtonomnykh invertorov s transformatorami vrashchayushchegosya magnitnogo polya – Elektrotehnika, 2009, №2, s. 56.
8. Grachev P.E., Kostyrev M.L., Myagkov F.N., Kuntsevich P.A. Mnogoobmotochnye preobrazovateli energii dlya avtonomnykh ob"ektov – Elektrotehnika, 2005, №12, c. 24.
9. Gaytov B.Kh, Gaytova T.B., Kashin Ya.M. Perspektivnye konstruksii aksial'nykh mnogofaznykh transformatorov i regulyatorov s vrashchayushchimisya magnitnym polem – Izvestiya vuzov, Elektromekhanika – 2005, №3, c. 44.
10. Gaytov B.Kh, Pras'ko D.G., Gaytova T.B. Razrabotka mnogofaznykh transformatorov – Elektrotehnika, 2000, №6, c. 42.