

УДК 361.925.003

Алексеев А. К.¹, Трамбовецкий В.Н.², Савенко О.С.³

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В статье рассмотрены основные типы статических преобразователей. Произведен сравнительный анализ работы силовых цепей преобразователей частоты, указаны достоинства и недостатки непосредственных преобразователей частоты, преобразователей частоты и матричных преобразователей.

Ключевые слова: тиристор, коммутация, непосредственный преобразователь частоты, тиристорный преобразователь, выпрямительные группы, матричный преобразователь, электромагнитная совместимость.

Алексеев А.К., Трамбовецкий В.М., Савенко О.С. Експлуатаційні якості вентильних перетворювачів. У статті розглянуті основні типи статичних перетворювачів. Проведено порівняльний аналіз роботи силових ланцюгів перетворювачів частоти, вказані переваги і недоліки безпосередніх перетворювачів частоти, перетворювачів частоти та матричних перетворювачів.

Ключові слова: тиристори, комутація, безпосередній перетворювач частоти, тиристорний перетворювач, випрямні групи, матричний перетворювач, електромагнітна сумісність.

Alekseev A.K., Trambovetskiy V.N., Savenko O.S. Exploitation characteristics of valve inverters. The common types of static converters are considered. Operating modes of power switches in frequency converters are analyzed, advantages and drawbacks of VSI, CSI, cycloconverters and matrix converters are pointed out.

Keywords: thyristor, switching, direct frequency converter, thyristor converter, rectifier groups, matrix converter, electromagnetic compatibility.

Постановка проблемы. Использование двигателей переменного тока, в системах промышленного регулируемого электропривода, открывает широкие возможности для значительного повышения производительности механизмов и как следствие усовершенствования технологии производства, снижения себестоимости и повышения качества продукции. Наиболее эффективным, а в большинстве случаев практически единственно возможным способом регулирования скорости двигателя переменного тока является частотное регулирование. Электромашинные преобразователи с регулируемой частотой вследствие ряда свойственных им недостатков (большая установленная мощность оборудования, низкий к.п.д., инерционность и др.) не получили широкого распространения. Значительно более перспективными являются вентильные преобразователи частоты, которые при рациональном проектировании оказываются свободными от недостатков электромашинных.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах многих отечественных и зарубежных ученых рассматриваются возможности и перспективы использования статических преобразователей для частотного регулирования двигателей переменного тока. Весомый вклад в разработку этих вопросов внесли Е. Чаплыгин, И. Копылов, М. Чиликин, Е. Зимин, В. Михов, Э. Дыньков, А. Алешина, М. Кабаста, Л. Бойл, Р. Эрикссон, П. Вилер, Т. Липо, П. К. Суд, Д. А. Грант, Д. Клер, Д. Колар, М. Бауманн, М. Вентурини, С. Сантер, Х. Алтан, Д. Родригез, Е. Силва, Р. Бургоз и др. По мнению ученых, развитие вентильных преобразователей ведется в двух направлениях:

1) вентильные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором;

¹ канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

² ст. преподаватель, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

³ аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

2) вентильные преобразователи без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и цепи нагрузки.

Основная цель использования вентильных преобразователей – преобразование параметров электрической энергии с целью регулирования скорости вращения электрических машин переменного тока. Основными достоинствами использования вентильных преобразователей является уменьшение потерь энергии, меньшие габариты, простота обслуживания. На начальных этапах применения вентильных преобразователей серьезной проблемой было ухудшение качества сети, питающей эти преобразователи. На сегодняшний день проблемы высших гармоник тока и реактивной мощности успешно решаются путем применения новых топологий и методов управления преобразователями [3, с.35-40].

Цель статьи – на основе анализа основных типов статических преобразователей выделить основные достоинства и недостатки каждого вида.

Изложение основного материала. Для регулируемого электропривода на сегодняшний день наиболее распространенным решением проблемы энергоснабжения является применение вентильных преобразователей на базе тиристоров, транзисторов в различных исполнениях для управления двигателями постоянного и переменного тока.

Система тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д). Потери энергии в статических преобразователях, с учетом потерь в трансформаторах или токоограничивающих дросселях, составляют 3÷7% входной мощности, в электромашинных (приводной двигатель-генератор) - 10÷15%. Замена генератора с приводным двигателем статическим преобразователем позволяет экономить 10% потребляемой энергии, что существенно повышает энергетическую эффективность регулируемого электропривода [1, с.128-146].

Основными недостатками вентильных преобразователей являются потребление реактивной мощности, уровень которой определяется углом управления тиристором α ($\cos \varphi \approx \cos \alpha$), и наличием переменной составляющей в выпрямленном напряжении. Эти два недостатка требуют установки компенсирующих устройств на входе преобразователя для снижения уровня реактивной составляющей, отдаваемой в энергосистему, и фильтро-компенсирующих устройств настроенных, как правило, на 5 и 7 гармонику. Наличие переменной составляющей создает при малых нагрузках зону прерывистого тока, нарушая линейность механических характеристик системы тиристорный преобразователь-двигатель. С целью ограничения зоны прерывистого тока в силовую цепь двигателя постоянного тока (ДПТ) включают дроссель, что увеличивает потери на нагрев. На приводах большой мощности, чтобы снизить влияние переменной составляющей, устанавливают преобразователи с повышенным числом пульсации ($m=12 \div 24$). Указанные недостатки не являются доминирующими. Экономия электроэнергии порядка до 10%, отсутствие вращающихся элементов в источнике, снижение массогабаритных показателей, отсутствие фундаментов, высокое быстродействие. Все это обеспечило широкое внедрение полупроводниковых преобразователей для управления двигателями постоянного и переменного тока.

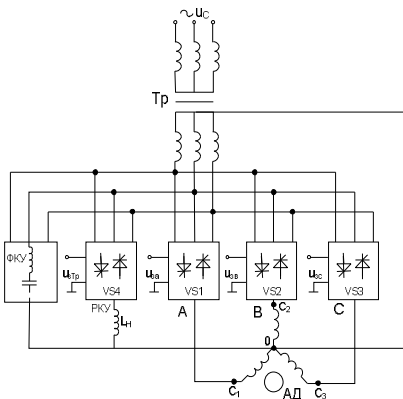


Рис.1 - Система непосредственный преобразователь частоты-асинхронный двигатель

Система преобразователь частоты-двигатель (ПЧ-Д). Реализация системы ПЧ-Д на базе синхронных и асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами, низкого и высокого напряжения, мощность которых ограничивает электромагнитная совместимость с энергосистемой, значительно повысила энергетическую эффективность регулируемого электропривода.

Преобразователи частоты различают по способу коммутации полупроводниковых вентилей.

Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ). Запирание тиристоров выполняет отрицательная полуволна питающего напряжения; такая коммутация является естественной. Система непосредственный преобразователь частоты-асинхронный двигатель (НПЧ-АД) (рис.1) включает три реверсивных преобразователя VSI=3, форму выходного направления задают сигналом задания: U_{3a} , U_{3b} , U_{3c} .

При синусоидальных сигналах и сдвинутых между собой на 1/3 периода регулируемой частоты на выходе НПЧ получим трехфазную систему напряжений, которая подается на обмотки статора. Регулирование частоты и амплитуды выходного напряжения определяют входные сигналы задания $U_{3(a,b,c)}$. Частота - скорость вращения поля статора, а амплитуда – уровень перегрузочной способности двигателя, т.е. критический момент.

При естественной коммутации реализуется простота схемотехники, отсутствие перенапряжений, однократное преобразование энергии, минимальная масса и габариты устройства. Это определило наиболее массовое применение таких систем в промышленности. Для приводов средней и большой мощности основными проблемами являются энергетические – взаимодействие электропривода с питающей сетью. Во многих случаях на выбор системы электропривода решающее влияние оказывают показатели качества энергопотребления.

Качество энергопотребления оценивается: 1) коэффициент мощности K_M : $K_M = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}$, где P и Q- соответственно активная и реактивная мощность по основной гармонике; 2) коэффициент сдвига первой гармоники тока K_C : $K_C = \sqrt{P^2/P^2 + Q^2} = \cos \varphi_1$, $\varphi_1 = \alpha + \gamma/2$, где φ_1 - сдвиг по фазе первой гармоники, α – угол управления, γ – угол коммутации вентиля; 3) коэффициент искажения K_H : $K_H = \sqrt{P^2 + Q^2}/\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}$ [3, с.156-170].

K_H можно оценить отношением первой гармоники тока $I_{1(1)}$ к действующему значению I_1 . $K_H = I_{1(1)}/I_1$. K_M характеризует эффективность электропотребления электроприводом, т.е. какая часть поступающей полной мощности преобразовывается в полезную мощность.

При пусках и набросах нагрузки резко возрастают уровни реактивной мощности, особенно в зоне малых напряжений, что нарушает работу других потребителей, в первую очередь, питающихся от той же секции. В этих случаях не всегда целесообразным является замена на мощных приводах системы генератор-двигатель (Г-Д) системой ТП-Д. Выбросы в питающую сеть значительной мощности искажения тоже негативно сказываются на работе устройств автоматики.

При реализации НПЧ на базе полностью управляемых вентилях один из выпрямителей всегда отключен, что исключает уравнивающий ток. Основная гармоника регулируемого напряжения имеет разрывы в зоне нулевых значений выходного напряжения, что вызывает перенапряжения в силовой цепи. Диапазон регулируемой частоты напряжения не превышает 0-25 Гц при питании от сети $f=50$ Гц. Расширение диапазона регулирования возможно повышением частоты питающей сети. Система НПЧ-Д используется для мощных приводов прокатных станов, цементных печей, толчковых двигателей на кораблях. В перспективе идет разработка для приводов меньшей мощности. Разработка серий для двухфазных АД позволит упростить схему НПЧ и расширить область применения НПЧ для маломощных приводов. На всех уровнях внедрения НПЧ-Д проблема улучшения энергопотребления должна решаться введением фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) для подавления главных искажающих гармоник и регулируемого компенсирующего устройства (РКУ).

Независимые (от сети) преобразователи частоты или автономные инверторы со звеном постоянного тока (АИ). На входе ПЧ устанавливают выпрямитель VD, который подает питание постоянного тока на вход инвертора И. Последний собран по трехфазной мостовой схеме инвертирования постоянного тока в 3-хфазный переменный ток.

Автономные инверторы обладают наилучшими характеристиками энергопотребления, благодаря отделению сети от инвертора звеном постоянного тока.

На рис.2 представлена однолинейная схема силовой части АИ. В состав преобразователя

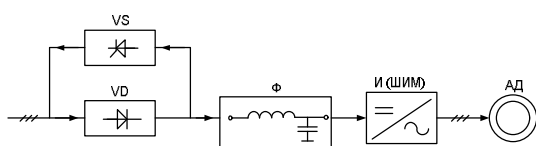


Рис.2 - Однолинейная схема силовой части АИ

входят: выпрямитель VD, фильтр Ф для сглаживания переменной составляющей выпрямленного тока, инвертор И - представляет 3-хфазный мостовой инвертор на полностью управляемых вентилях, включающий блок управления, на который поступает сигнал управления и обратные связи по частоте, току, выходному напряжению (на рис. не дано).

При необходимости регулирования амплитуды выходного напряжения VD заменяют управляемым выпрямителем, выходное напряжение которого регулируется блоком управления. На приводах, требующих инвертирования энергии в питающую сеть, встречно-параллельно VD включают VS, угол управления которого контролируется блоком управления.

Первые преобразователи имели инвертор на базе тиристоров с искусственной коммутацией. В тормозных режимах перенапряжения на конденсаторе приводят к пробоям последнего или к запиранию выпрямителя. Поэтому такие системы не получили широкого распространения. После разработки полностью управляемых полупроводников появилась возможность формировать выходное синусоидальное напряжение методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) частотой 1-2 кГц. Это практически устранило низкочастотные гармоники, а высокочастотные подавляются параметрами фазных обмоток и не оказывают заметного влияния на работу двигателя. Если в НПЧ регулируемая частота ограничена частотой питающей сети, то у АИ при тех же параметрах сети выходная частота регулируется до 400 Гц.

Установка на входе АИ управляемого выпрямителя VS с фиксированным углом инвертирования ($\alpha_{инв} = const$) встречно-параллельно VD обеспечивает торможение привода с отдачей энергии в сеть. Однако двукратное преобразование энергии и ограниченная мощность полностью управляемых вентилях ограничивают их установку приводами малой и средней мощности.

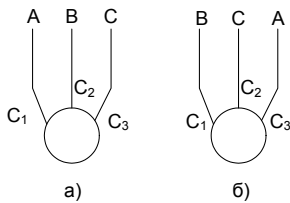


Рис.3 - Однолинейная схема силовой части АИ

Матричные регуляторы скорости двигателей переменного тока. Скорость двигателя переменного тока определяет частота вращения поля статора, которая зависит от частоты сети и числа пар полюсов ($\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f / p$). Зависимые и независимые инверторы регулируют частоту и амплитуду выходного напряжения. Сложные схемы силовых цепей, необходимость в компенсирующих устройствах, широкий спектр высших гармоник, что требует установки фильтров, все это определяет высокую стоимость и ограничивает широкое внедрения их в промышленность.

Если на статоре вращающегося двигателя, обмотки которого включены А-С₁, В-С₂, С-С₃

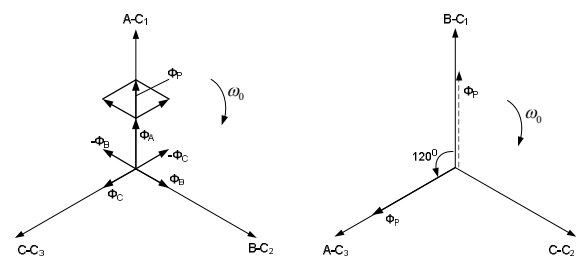


Рис.4 – Формирование результирующего потока

(рис.3а), переключить в обратном направлении фазы С-С₂, А-С₃, В-С₁ (рис.3б), то результирующий магнитный поток $\Phi_p = \Phi_{c_1} + \Phi_{c_2} + \Phi_{c_3}$ сместится на статоре в сторону отставания от ротора на 120° (рис.4). Результирующий поток Φ_p сохранит свою величину и равен $\Phi_p = 1.5 \cdot \Phi_m$, где Φ_m - амплитудное значение потока одной фазы (рис.4а).

В момент переключения скорость Φ_p становится меньше скорости вращения ротора, что создает тормозной момент на двигателе. Скорость ротора снижается.

Если переключения больше не выполнять, то вращающиеся поля статора в ту же сторону разгонят ротор до прежней скорости вращения. Если переключение выполнить с утроенной частотой, магнитный поток Φ_p будет перемещаться по статору в толчкововозвратном режиме в секторе обмоток $C_1C_4 - C_3C_6$. Средняя скорость двигателя снизится до нуля.

Если коммутацию фаз выполнить в сторону опережения: А-С₁, В-С₂, С-С₃ переключить на А-С₂, В-С₃; С-С₁ то опережение потока увеличит момент на валу двигателя и приведет сначала к разгону ротора, а затем возврату к исходному значению скорости.

На рис.5 представлена схема матричного конвертора. Основу МПЧ составляют 9 двунаправленных полупроводниковых выпрямителей S, обеспечивающих подключение фазных обмоток к любой из фаз питающего напряжения. Для снижения скорости по команде от блока управления происходит переключение фаз в обратном направлении на обмотках статора.

Частота переключений определяется требуемой средней скоростью вращения двигателя.

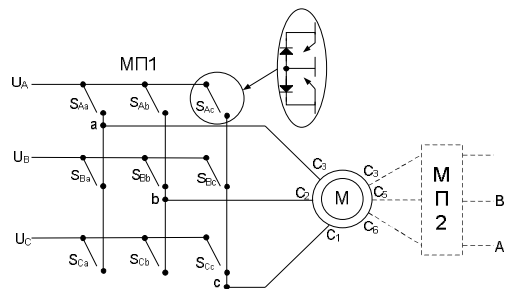


Рис.5 – Схема матричного конвертора

Величина колебаний зависит от момента нагрузки на валу двигателя и момента инерции привода [4, с.95-102].

Достоинством матричного конвертора является прямое включение двигателя в сеть, малый уровень высших гармоник. Однако большие толчки тока при переключении фаз для поворота вектора результирующего потока Φ_p на 120° и заметные колебания скорости при регулировании ограничили его широкое внедрение в промышленность.

В начале нашего десятилетия был предложен матричный преобразователь с углом поворота результирующего потока на угол 60° в сторону отставания, что снизило толчки тока при переключениях и уровень колебания скорости, обеспечивая регулирование в диапазоне от 0 до 100%. В момент коммутации скорость вращения поля снизилась, ротор за счет инерции вращается с прежней скоростью. Отставание поля статора переводит двигатель в генераторной режим торможения с отдачей энергии в сеть за счет отдачи ротором части запаса кинетической энергии. Если не производить переключения, то скорость вращения ротора восстановится на прежнем уровне. Поэтому, чтобы снизить среднюю скорость необходимо увеличивать число переключений. При частоте равной $f_{II} = 6 \cdot f_c$, где f_{II} - число переключений, f_c - частота сети, вращение потока прекратится. Он будет выполнять колебательные движения в секторе 60° , а средняя скорость будет равна нулю. Для реализации такого метода регулирования в схему включают второй матричный преобразователь МП2 (рис.5 пунктир).

Выводы

1. Статические преобразователи частоты в сравнении с электромашинными позволяют снизить потребление электроэнергии приводами порядка на 10%, а также стоимость строительных работ, эксплуатационные расходы, повысить быстродействие привода.
2. Сравнивая силовые цепи трех типов преобразователей (НПЧ, ПЧ, МП), наиболее простая схема у МП, состоящая из 18 ключей. Отсутствуют реактивные элементы, т.е. МП не потребляет реактивной энергии. При установке на мощных приводах упрощается решение вопроса электромагнитной совместимости привода и энергосистемы.
3. Системы МП-АД во всем диапазоне регулирования скорости обеспечивают постоянство перегрузочной способности. Коммутация вентилях МП в несколько раз меньше, чем у обычных ПЧ, что снижает потери на нагрев и габариты ключей.
4. Существенным недостатком МП является отсутствие серийного производства. Чтобы обеспечить высокую эффективность работы системы МП-Д, каждый преобразователь требует индивидуальной коррекции параметров системы управления в соответствии с данными объекта регулирования.

Список использованных источников:

1. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высш.шк., 2001. – 327с.
3. Бедфорд Б. Теория автономных инверторов / Б. Бедфорд, Р.Хофт. – М.: Энергия, 1969. – 280 с.
4. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 128 с.

Рецензент: И. В. Жежеленко
 д-р техн. наук, профессор ПГТУ

Статья поступила 14.04.2010