

А.А. Колб

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОВЫМ IGBT ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ОБЩИМИ ШИНАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Введение. Широкое применение мощных статических преобразователей напряжения и частоты для регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, а также рост нелинейных потребителей значительно обострили проблему обеспечения качества электроэнергии и таких его основных показателей: коэффициент мощности, гармонический состав, стабильность и симметрия напряжения и др. Причем тенденция развития силовой преобразовательной техники такова, что доля высших гармоник с каждым годом будет увеличиваться.

Электроприводы потребляют более 60 % вырабатываемой электроэнергии. Поэтому особое значение приобретают вопросы комплексного подхода к разработке и практическому применению методов и средств энергосбережения и гибкого управления качеством электроэнергии средствами промышленного электропривода, где имеются огромные резервы.

Анализ последних достижений и публикаций. Промышленное освоение мощных полностью управляемых полупроводниковых приборов создало реальную возможность независимого и раздельного управления качеством электроэнергии и движением электропривода с учетом требований технологического процесса [1...3]. Поставленная задача решается применением систем электропривода с общими шинами постоянного тока с емкостным накопителем энергии и группового IGBT преобразователя с двухсторонней проводимостью (рис.1). Приведенная функциональная схема содержит: групповой IGBT преобразователь с двусторонней проводимостью (активный выпрямитель АВ); дроссель Др; емкостный накопитель С для аккумуляции энергии при работе привода в режиме рекуперации; управляемый выпрямитель (УВ) для предварительной зарядки емкостного накопителя и поддержания напряжения на нем больше по величине, чем в звене постоянного тока инвертора. Указанные силовые элементы совместно с системой релейно-векторного управления образуют управляемый регулятор качества электроэнергии (УРКЭ).

В частотно-регулируемом асинхронном электроприводе силовой преобразователь в большинстве случаев выполняется на основе АИН с ШИМ и неуправляемого входного выпрямителя, который шунтируется ёмкостью для обеспечения двухстороннего обмена энергией. Такое построение силовой схемы позволяет управлять амплитудой и частотой выходного напряжения в одном инверторе и наиболее просто реализовать управление электроприводом. Однако при этом возможно реализовать лишь инверторное торможение без ре-

куперации энергии в сеть, что приводит к дополнительным потерям энергии, которая рассеивается в виде тепла на балластном сопротивлении. Реализация рекуперативного торможения требует усложнения силовой схемы и вместо неуправляемого выпрямителя использовать управляемый. Однако и в этом случае, вследствие двухсторонней циркуляции энергии между электродвигателем и сетью, возникают дополнительные потери в линии, трансформаторе и силовом преобразователе. Известны также негативные влияния пиковых нагрузок в динамических режимах работы электропривода на электротехническое оборудование, что требует увеличения его установленной мощности.

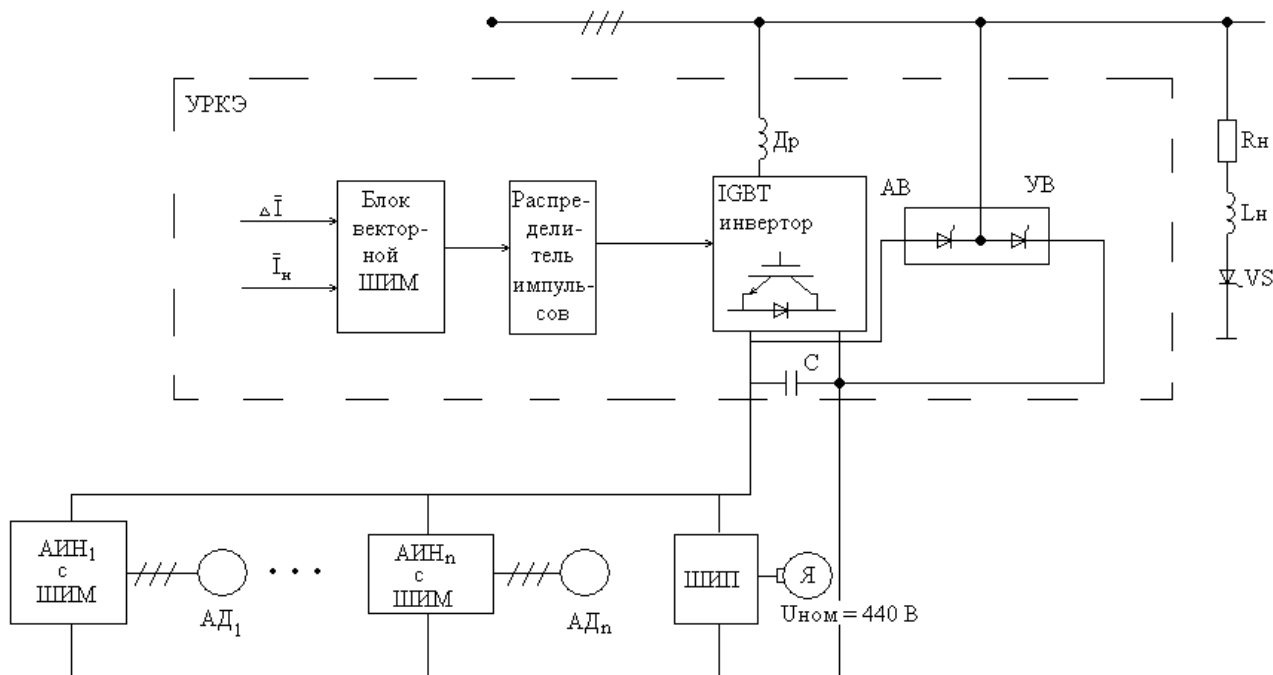


Рис.1. Функциональная схема коррекции качества электроэнергии на основе группового питания электроприводов с общим емкостным накопителем энергии: УРКЭ – управляемый регулятор качества энергии; УВ – управляемый выпрямитель; R_n , L_n , VS – нелинейная нагрузка; АВ – активный выпрямитель; $\Delta \bar{I}$, \bar{I}_n – вектора токовой ошибки и токовой нагрузки

Устранение отмеченных недостатков и возможность гибкого управления потоками энергии с целью регулирования качества электроэнергии достигается применением группового входного активного выпрямителя и общих шин постоянного тока с емкостным накопителем (рис.1). Система привода с общими питающими шинами постоянного тока имеет гибкую конфигурацию силовых модулей и модулей управления, позволяет снизить расходы на постройку и обеспечить высокую эффективность и экономичность при её использовании [4]. Энергия торможения одного из двигателей или группы двигателей может передаваться по сети постоянного тока на другие двигатели, работающие в режиме потребления, что исключает двухсторонний обмен энергией между двигателями и сетью и необходимость рассеивания накопленной энергии на балластном сопротивлении (исключаются тормозные модуль и устройства управления им).

Существенно, что энергия, накопленная в конденсаторе (рис.1) используется для коррекции качества электроэнергии [1 – 3].

Анализ электромагнитных процессов, режимов работы, а также синтез регуляторов и формирование управляющих воздействий для коррекции качества электроэнергии с помощью активного выпрямителя и емкостного накопителя энергии приведен в [1-3]. Система управления УРКЭ содержит в своей структуре замкнутый внутренний контур тока с гистерезисными регуляторами и внешний контур стабилизации напряжения в звене постоянного тока.

Целью работы является разработка эффективных алгоритмов пространственно-векторного управления активным выпрямителем (с учетом минимизации числа переключения силовых ключей) в системах электропривода с общими шинами постоянного тока и емкостным накопителем для гибкого управления потоками электроэнергии в задачах: компенсации реактивной мощности, включая мощность искажений; стабилизации напряжения; симметрирования нагрузки и устранения кратковременных провалов напряжения.

Материал и результаты исследования. Известно [5], что предельно достижимые динамические показатели систем регулирования с учетом имеющихся энергетических ограничений возможно обеспечить лишь в системах с релейными принципами управления. Кроме того с дискретной природой преобразователя лучше согласуются релейные регуляторы, в которых компенсация токовых ошибок и управление модуляцией напряжения осуществляется одними и теми же элементами. Релейные регуляторы имеют также ряд других преимуществ [6]: простота реализации, обусловленная двоичной природой входных и выходных переменных; приближающиеся к предельно возможным динамические показатели преобразователя, ограничивающиеся только входным напряжением и постоянной времени нагрузки; малая чувствительность к колебаниям параметров нагрузки; простота реализации системы управления.

Применение в системах коррекции качества электроэнергии релейных регуляторов тока, установленных в каждой фазе активного выпрямителя приводит к существенному завышению частоты коммутации ключей инвертора при уровне пульсаций тока (ширине токового коридора) 5...10%.

В последнее время все более широкое применение находят системы регулирования выходного тока инвертора с использованием обобщенных (результатирующих) векторов в неподвижной или вращающейся системах координат, что обеспечивает также лучшее использование входного напряжения преобразователя [6,7].

Принцип формирования векторов напряжения $\bar{U}_1... \bar{U}_6$ на выходе инвертора для компенсации токовых ошибок при коррекции качества электроэнергии иллюстрируется с помощью рис.2, на котором в неподвижной системе координат α, β изображены пространственные векторы токовых ошибок \bar{D} и напряжений \bar{U} , которые возможно получить на выходе инвертора при различных сочетаниях включенных ключей. Номера в квадратных скобках возле базовых номеров напряжения соответствуют тем силовым ключам К1...К6, на которые подано управляющее напряжение. При этом анодная (верхняя) группа силовых

ключей трехфазного инвертора обозначена К1, К3, К5, а катодная (нижняя) К4, К6, К2. Векторная диаграмма токовых ошибок разбита на шесть секторов 1...6 таким образом, что в каждом секторе сдвиг фаз между вектором токовой ошибки и базовыми векторами напряжения $\bar{U}_1... \bar{U}_6$ составляет $\pm 30^\circ$. Внутри каждого сектора указаны номера силовых ключей К1...К6 и обратных диодов Д1...Д6, которые могут проводить ток в соответствующем секторе.

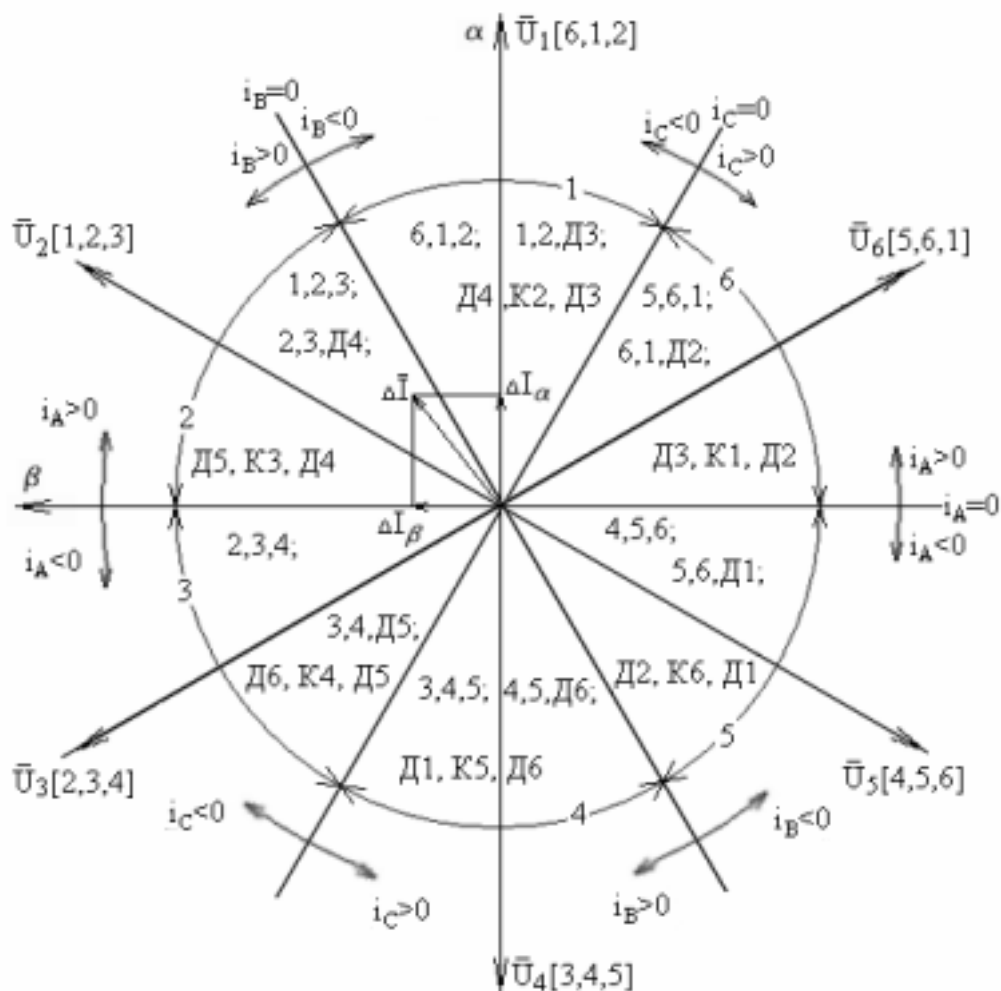


Рис.2. Пространственные векторы напряжения $\bar{U}_1... \bar{U}_6$ и секторы 1...6 токовых ошибок $\Delta \bar{I}$

Отсутствие однозначного соответствия между некоторыми комбинациями расположения вектора ошибки регулирования тока и пространственным положением выходного напряжения инвертора для компенсации этой ошибки затрудняет минимизацию частоты переключений силовых ключей и усложняет систему управления. Так, например, при расположении вектора токовой ошибки в первом секторе (рис.2) возможна ее компенсация с помощью векторов напряжения \bar{U}_1 и \bar{U}_2 , а также двух нулевых векторов напряжений, соответствующих включенным ключам анодной или катодной групп (верхних и нижних ключей). Подробный анализ различных вариантов разбиения пространственных

векторов токовой ошибки на сектора показал, что при разбиении их как показано на рис.2 всегда существует однозначная связь между положением вектора ошибки \bar{D} и вектором напряжения \bar{U} , компенсирующим эту ошибку. Причем номера секторов токовой ошибки и базовых векторов напряжения, компенсирующих ошибку совпадают. Таким образом, для компенсации вектора токовой ошибки нужно включать ключи, которые формируют ближайший к вектору ошибки базовый вектор напряжения. Исключение составляет лишь определение одного из нулевых векторов напряжения (\bar{U}_7 и \bar{U}_8), использование которых существенно уменьшает частоту коммутации силовых ключей при заданной ширине токового коридора.

Выполненный анализ показал, что нулевое состояние векторов напряжения при R-L нагрузке без противо-ЭДС возможно лишь тогда, когда вектора токовой ошибки \bar{D} и тока нагрузки \bar{I} находятся в противоположных секторах. В качестве примера на рис.3 показана векторная диаграмма, соответствующая расположению вектора \bar{D} в первом секторе, а вектора тока нагрузки \bar{I} в четвертом. При таком расположении векторов для компенсации токовой ошибки можно использовать либо вектор выходного напряжения инвертора \bar{U}_1 (совпадает с номером сектора \bar{D}), либо нулевое состояние \bar{U}_7 или \bar{U}_8 . В первом случае токовые ошибки трех фаз уменьшаются с большой интенсивностью, так как к соответствующим фазам, прикладывается напряжение обратной полярности. Во втором случае ошибки по току всех фаз будут также уменьшаться, но менее интенсивно, чем в первом случае, так как приложенное напряжение к нагрузке равно нулю. Это приводит к уменьшению частоты коммутации силовых ключей.

Электромагнитные процессы в системе при использовании нулевых векторов напряжения \bar{U}_7 и \bar{U}_8 протекают абсолютно идентично. Поэтому при выборе нулевого вектора напряжения необходимо исходить лишь из условия минимизации частоты коммутаций силовых ключей. Для чего необходима информация о предшествующем состоянии ключей инвертора, которую можно получить по наличию сигналов управления на ключах и положению вектора тока нагрузки. Зная сектор, в котором находится вектор тока нагрузки, а также возможные комбинации силовых ключей, проводящих ток в данном секторе (рис.2), можно по информации наличия управляющих импульсов на силовых ключах установить какой из них нужно запереть, чтобы получить нулевой вектор напряжения лишь при коммутации одного ключа.

Пусть вектор ошибки находится в первом секторе (рис.2), а вектор тока в четвертом. В этом случае возможно использование нулевого состояния вектора напряжения (замкнуты все анодные или катодные ключи). При таком расположении вектора тока нагрузки ток согласно рис.2 могут проводить ключи: К3,К4,К5; К4, К5, Д6 (поданы управляющие импульсы на К4, К5,К6) и Д1,К5,Д6 (импульсы поданы на К5, К6,К1). Следовательно, по информации о наличии управляющих импульсов можно однозначно установить, какой из ключей нужно запереть, чтобы реализовать алгоритм одиночного переключе-

ния для получения нулевого вектора напряжения. В первом случае нужно запереть К4, во втором – К5, а в третьем – К6, но при этом нулевой вектор напряжения образуется лишь когда Д1 закроется.

В случае отсутствия жестких требований к частоте коммутации ключей- построение системы регулирования значительно упрощается при использова-

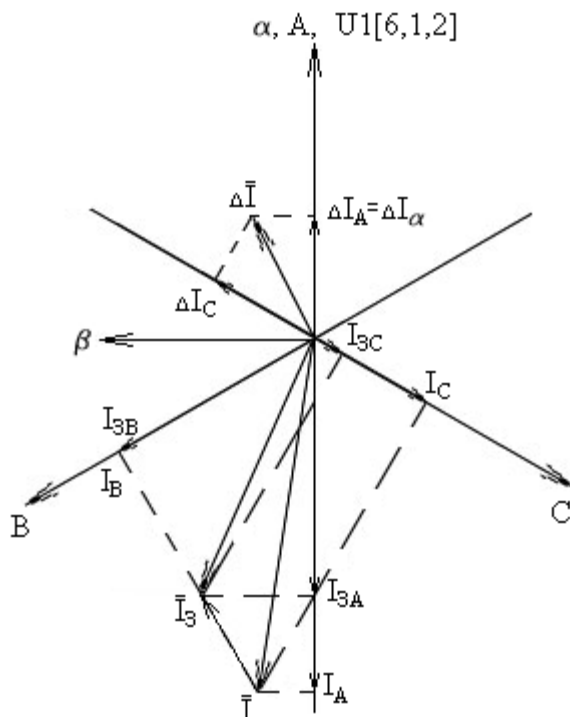


Рис.3. Векторная диаграмма токовой ошибки $\Delta \bar{I}$, токов задания \bar{I}_3 и нагрузки I_A, I_B, I_C при расположении вектора $\Delta \bar{I}$ в первом секторе, а вектора \bar{I} в четвёртом

нии релейно-векторного управления в неподвижных осях α, β . В этом случае используется лишь два релейных регулятора тока с гистерезисом по осям α и β . Установлено, что при положительных ошибках по току ΔI_α и ΔI_β нужно включить соответственно ключи К1 и К2, К3, а при отрицательных – К4 и К5, К6. При таком управлении инвертором лишь в секторах 1 и 4 используется другая комбинация включенных ключей, чем по предложенному выше алгоритму. Например, при расположении вектора ошибки ΔI в секторе 1 левее вектора напряжения \bar{U}_1 (рис.2), то вместо ключей К6, К1, К2, которые формируют ближайший к вектору ошибки вектор напряжения, включаются К1, К2, К3. При этом значительные по величине таковые ошибки в фазах А и С будут уменьшаться, а малая в фазе В увеличиваться. Это вызывает лишь некоторое увеличение частоты коммутации ключей, чем при включенных К6, К1, К2, обеспечивающих уменьшение токовой ошибки во всех фазах. Следует добавить, что при управлении инвертором в осях α, β нет необходимости выполнять функции обратного преобразования из двухфазной в трехфазную систему, что значительно упрощает построение системы управления.

Выводы. 1. При отсутствии противо-ЭДС управляемость контуром тока во всех режимах работы инвертора и выбор нулевого вектора напряжения (открыты все анодные или катодные ключи) для минимизации частоты коммута-

ций ключей достигается при управлении инвертором в функции положения векторов токов ошибки и тока нагрузки.

2. При разбиении пространственного вектора токовой ошибки на 6 секторов, сдвинутых по фазе на $\pm 30^\circ$ относительно базовых векторов напряжения инвертора, имеется однозначная связь между положением векторов токовой ошибки и напряжения, компенсирующего эту ошибку. При этом для компенсации токовой ошибки необходимо включать ключи инвертора, которые формируют ближайший к вектору ошибки вектор напряжения.

3. При расположении векторов токовой ошибки и тока нагрузки в противоположных секторах использование нулевого вектора напряжения для компенсации ошибки по току минимизирует частоту коммутации силовых ключей. Использование в этом случае соответствующего не нулевого вектора выходного напряжения инвертора приводит к увеличению производной токовой ошибки и, следовательно, увеличению числа переключений силовых ключей инвертора.

4. Предложенный пространственно-векторный алгоритм управления инвертором обеспечивает динамические показатели, близкие к предельно достижимым при заданном напряжении в звене постоянного тока и параметрах нагрузки, нечувствителен к изменениям параметров нагрузки и точности информации о взаимном расположении векторов токовой ошибки и нагрузки.

5. Применение двух релейных регуляторов с гистерезисом в системе неподвижных координат α , β существенно упрощает построение системы векторного управления контуром тока и исключается необходимость применения преобразователей фаз из двухфазной в трехфазную систему.

Список литературы

1. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии. // Вестник Кременчугского политехнического университета, вып.1. – 2003. - С. 135-143.
2. Воробьев А.А., Колб А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения. // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. Харьков, НТУ, № 10, С. 224-228.
3. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активного фильтра // Электротехника, 2002, № 12, - С. 40-48.
4. Белов И.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Сумников А.А. Автоматизированный электропривод - современная основа автоматизации технологических процессов // Электротехника, 2003, № 5, - С. 12-16.
5. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации управления. – М.: Наука, 1981. – 367 с.
6. Tilli A., Tonielli F. Sequential design of hysteresis current controllers for threephase inverters // IEE Transactions on Industrial Electronics. 1998, vol. 45, №5, P. 771-781.
7. Козаченко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // CHIP news, 1999, №1, - С. 2-9.
8. Виноградов А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками. – Электричество, 2003, №6, - С. 43-51.

