

Сравнительный анализ и выбор входного каскада преобразователя

для автономной зарядной станции

В статье дается сравнительная оценка вариантов построения силовой части входного каскада для преобразователя зарядной станции и способов его управления. Преобразователь предназначен для заряда стартерных аккумуляторных батарей. Функционирует в составе как передвижных, так и стационарных зарядных электростанций. Электропитание от автономного электроагрегата или промышленной сети.

Валерий Поляков

promel2000@yandex.ru

При выборе структуры, электрической схемы и принципов управления преобразователя для автономной зарядной станции аккумуляторных батарей основными критериями являются электромагнитная совместимость с источником электроэнергии; КПД преобразования, габариты, функциональные возможности и надежность. Реализация необходимых функций и надежности требует модульной конструкции зарядного преобразователя [1–3]. Это позволяет повторно использовать готовые решения в преобразователях различной мощности. Каждый модуль производит заряд (или разряд) группы аккумуляторов по заданной программе.

Для обеспечения согласования напряжения питающей сети или электроагрегата возможны варианты построения преобразователя с общим сетевым согласующим трансформатором или промежуточным согласующим трансформатором (в каждом модуле), работающим на повышенной частоте. Второй вариант предпочтителен для преобразователей малой и средней мощности (единицы и десятки киловатт), поскольку снижаются габариты зарядного преобразователя.

Зарядные модули могут иметь общую шину переменного или постоянного тока. При использовании общей шины постоянного тока потребуются только один общий AC/DC-преобразователь, который будет питать несколько однотипных DC/DC-преобразователей. Такой подход представляется оптимальным, поскольку уменьшает количество и стоимость компонентов, а также повышается эффективность. Шина постоянного тока позволяет организовать энергообмен между преобразователями при организации контрольно-тренировочного цикла (КТЦ). Основным недостатком такого решения становится снижение надежности, поскольку выход из строя входного каскада означает выход из строя всей станции. Такая конфигурация целесообразна,

если в качестве входного каскада применен высоконадежный AC/DC-преобразователь — например, диодный выпрямитель. Однако в этом случае следует решать вопросы электромагнитной совместимости преобразователя с источником электроэнергии.

Качество электрической энергии в точке подключения регламентируется ГОСТ 32144-2013. Однако при подключении к промышленной сети возникают требования к ограничению гармонических составляющих потребляемого тока ГОСТ 30804.3.12-2013 (либо ГОСТ Р 51317.3.4-2006 для тока свыше 75 А на фазу). Согласно указанным ГОСТам, ограничение по суммарному коэффициенту гармонических составляющих СКГС (THD_v) потребляемого тока для сетей соизмеримой мощности (отношение короткого замыкания $R_{sce} = 33$) равно 13%. Этот показатель недостижим, например, у неуправляемого выпрямителя, чей наилучший СКГС достигает примерно 28%.

Следует иметь входной каскад, решающий вопросы снижения гармоник потребляемого тока и стабилизации напряжения на шине DC. В этом случае следует использовать активный выпрямитель (AB) с принудительным формированием кривой потребляемого тока (с коррекцией коэффициента мощности ККМ).

Анализ источников информации показывает, что только два базовых решения получили наибольшее распространение в промышленности (иная «экзотика» не прижилась) [1, 2, 4]. Это трехфазный мост на полностью управляемых ключах (AB1, рис. 1) либо выпрямитель Виенна (AB2). На рис. 2 изображена популярная схема выпрямителя Виенна с минимальным возможным числом силовых ключей.

Анализ работы имитационных моделей этих преобразователей позволил определить загрузку силовых ключей по току и напряжению, а также коэффициент мощности, СКГС (THD_v) потребляемого тока и СКГС (THD_v) напряжения в точке подключения.

Для управления использован классический ШИМ (подобно тому, как он реализован в [5]) и ШИМ с пассивной фазой.

Имитационное моделирование проводилось в среде Multisim при следующих условиях:

- сеть трехфазная: 380 В, 50 Гц;
- активное сопротивление фаз: 0,01 Ом;
- напряжение опыта короткого замыкания: $U_{кз} = 3\%$;
- индуктивность фазы: 0,2 мГн;
- выходная мощность: $P_d = 63$ кВт;
- выходное напряжение: $U_d = 720$ В;
- номинальный ток на выходе: $I_d = 88$ А;
- эквивалентное сопротивление нагрузки на выходе: $R_n = 8,15$ Ом;
- установленное минимальное линейное напряжение сети: 342 В (фазное 198 В);
- частота модуляции: 5 кГц.

При этом индуктивности реакторов и конденсаторы входного фильтра рассчитаны из условия реактивного падения напряжения 5% при условии, что частота модуляции в пять раз превышает резонансную частоту фильтра ($L = 0,3$ мГн, $C = 80$ мкФ). Для снижения добротности фильтра в цепь конденсатора фильтра установлен резистор 0,1 Ом. В качестве силовых ключей использованы идеальные ключи с активным сопротивлением в открытом состоянии 20 мОм. Модели диодов виртуальные. Для определения значений токов, напряжения, мощности и СКГС использовались измерительные средства Multisim.

Реализованы имитационные модели этих преобразователей с замкнутой системой ШИМ-регулирования тока в фазах для АВ1 и АВ2. Для стабилизации выходного напряжения использована система подчиненного регулирования, в которой контур тока подчинен задачам регулирования напряжения.

Структурная схема системы управления, реализованной в имитационной модели, приведена на рис. 3. Частота модуляции постоянная (синхронное управление). Опорная пила на выходе генератора ГП равноугонная. Сигнал с выхода регулятора напряжения РН перемножается с эталонным синусоидальным сигналом, формируемым блоком ФОС. Результирующий сигнал является заданием по амплитуде и фазе для соответствующего тока входного реактора. Этот сигнал поступает на регулятор тока РТ, инверсный вход которого подключен к датчику тока реактора. Выход РТ соединен с компаратором, на второй вход которого подается пилообразный сигнал с выхода ГП. Каждый из компараторов формирует управляющий сигнал для соответствующего драйвера полумоста АВ. Для реализации пассивной фазы каждый драйвер имеет дополнительный вход, соединенный с соответствующим выходом блока ФПФ.

Ток в реакторе формируется замкнутым контуром регулирования. Имеет место так называемое регулирование по среднему току. При управлении с пассивной фазой реализуется режим, когда каждый транзистор фазы отключен на время, соответствующее углу 60° в области максимального фазного тока, при этом коммутируются транзисторы двух других фаз. Осциллограммы, поясняющие работу АВ1 в этом режиме, представ-

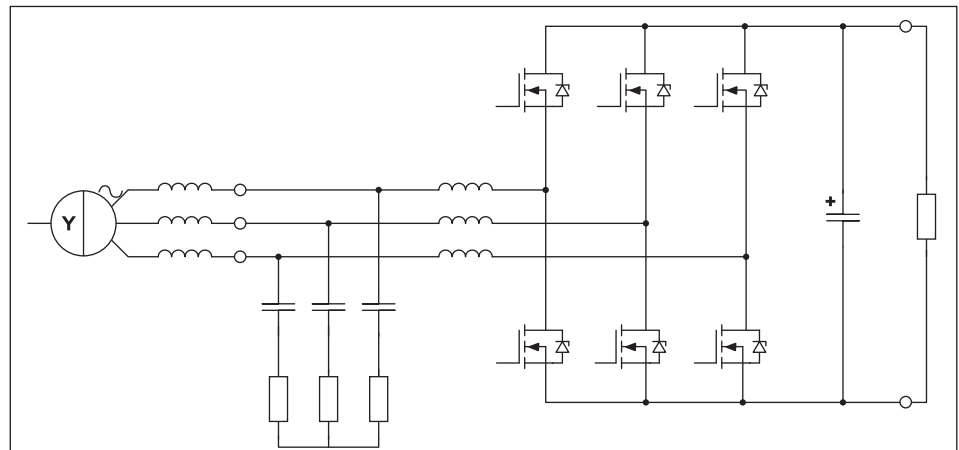


Рис. 1. АВ1 — трехфазная мостовая схема

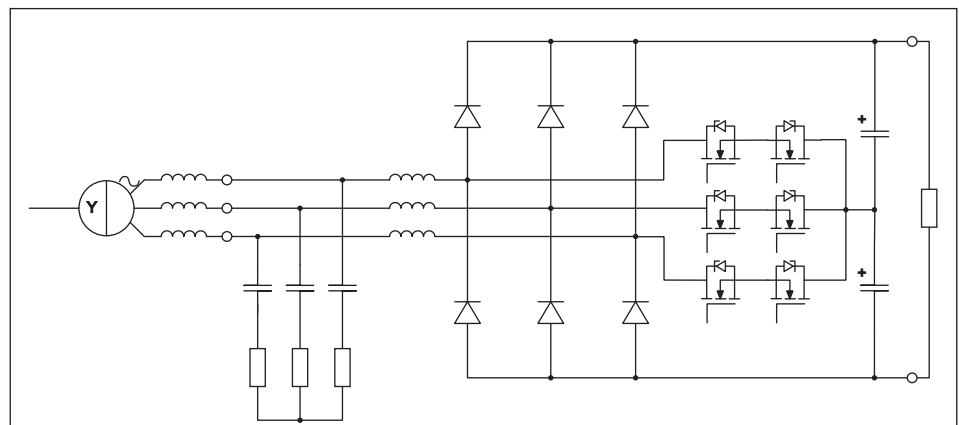


Рис. 2. АВ2 — выпрямитель Виенна

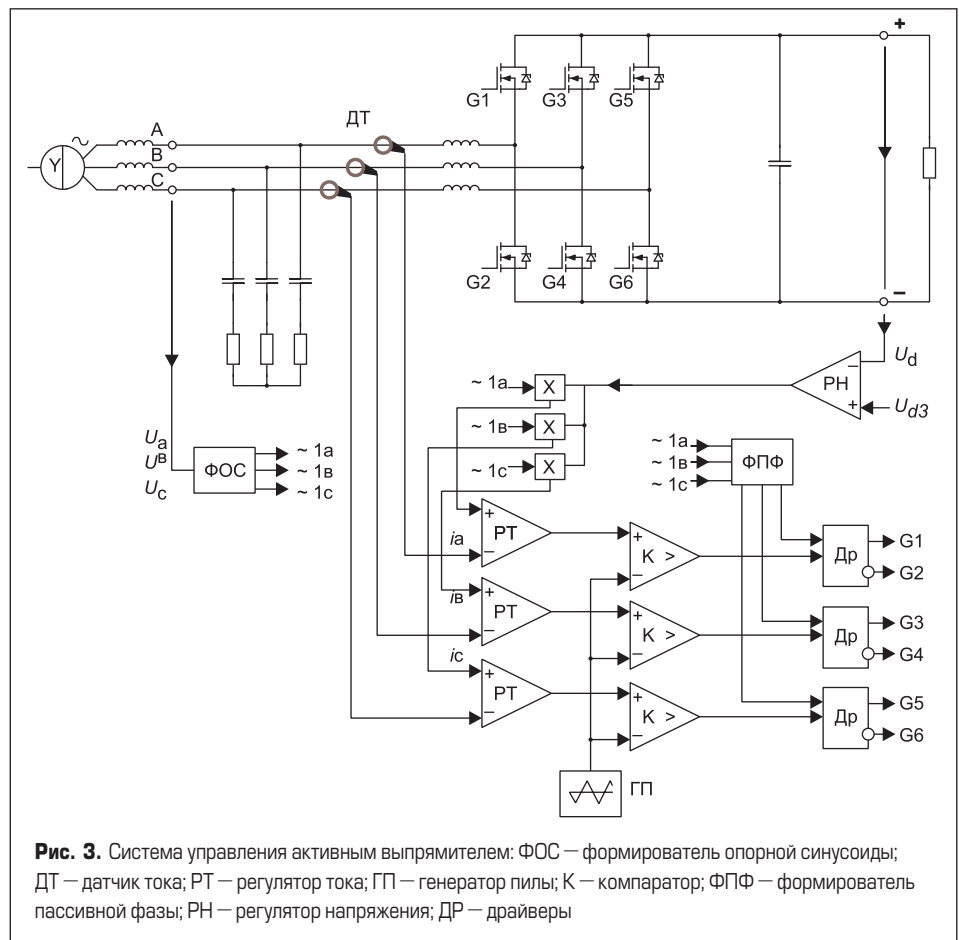


Рис. 3. Система управления активным выпрямителем: ФОС — формирователь опорной синусоиды; ДТ — датчик тока; РТ — регулятор тока; ГП — генератор пилы; К — компаратор; ФПФ — формирователь пассивной фазы; РН — регулятор напряжения; ДР — драйверы

лены на рис. 4. Такое управление эффективно, поскольку исключаются коммутации в области максимального тока фазы.

Осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках схемы приведены на рис. 5 для классической ШИМ и на рис. 6 для ШИМ

с пассивной фазой. Результаты измерения сведены в таблицу.

По результатам анализа были сделаны следующие выводы:

1. АВ1 в сравнении с АВ2 имеет меньшее количество полупроводниковых ключей (6)

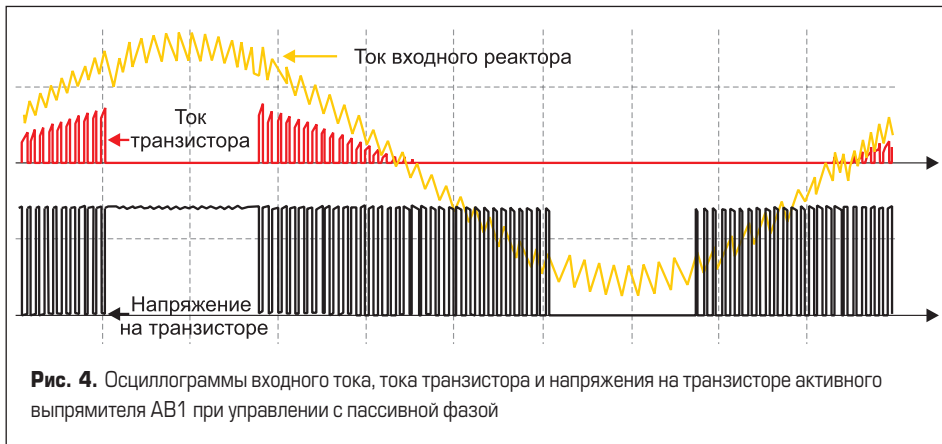


Рис. 4. Осциллограммы входного тока, тока транзистора и напряжения на транзисторе активного выпрямителя АВ1 при управлении с пассивной фазой

Таблица. Сравнительные характеристики активных выпрямителей при синхронном управлении

Активные выпрямители	АВ1 — трехфазная мостовая схема двунаправленное	АВ2 — выпрямитель Виенна
Направление передачи энергии		
Общее количество силовых ключей	6	12
Количество управляемых силовых ключей		6
Пиковое напряжение (U_{pic}) на управляемых силовых ключах в режиме переключения, В	U_d	$U_d/2$
*Расчетная мощность транзисторов управляемых силовых ключей, отн. ед.	2,47	1,68
*Расчетная мощность диодов управляемых силовых ключей, отн. ед.	4,73	3,32
*Расчетная мощность (суммарная) управляемых силовых ключей, отн. ед.	7,2	4,0
*Установленная мощность диодов, отн. ед.	—	4,2
Количество реакторов		3
** Действующий ток (RMS) реакторов, отн. ед.	1,25	
** Действующий ток конденсаторов выходного фильтра, отн. ед.	0,89	0,82
Коэффициент мощности		> 0,99
СКГС потребляемого тока (THDI), %	0,8	1,9
СКГС напряжения в точке подключения (THDU), %	0,87	0,58
Управление с пассивной фазой		
Коэффициент мощности	> 0,99	0,98
СКГС потребляемого тока (THDI), %	2,54	16,2
СКГС напряжения в точке подключения (THDU), %	1,2	3,7

Примечания. * Значение расчетной мощности дано по отношению к номинальной мощности выпрямителя — $(\sum U_{pic} \times I_{RMS})/P_d$.
 ** Значение тока дано по отношению к номинальному выходному току выпрямителя — I_{RMS}/I_d .

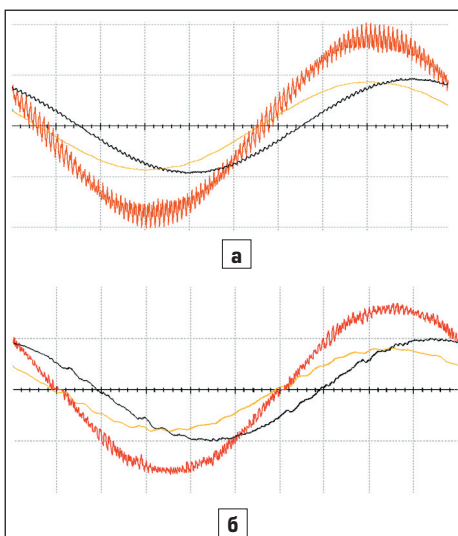


Рис. 5. Осциллограммы тока входного реактора (—), тока фазы (—), линейного напряжения (—) при классической ШИМ: а) в активном выпрямителе АВ1; б) в активном выпрямителе АВ2

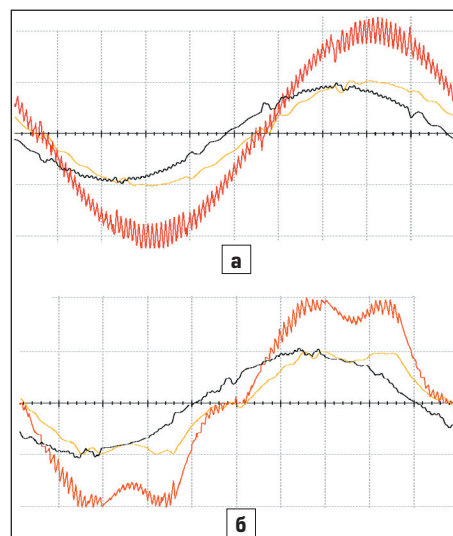


Рис. 6. Осциллограммы тока входного реактора (—), тока фазы (—), линейного напряжения (—) при управлении с пассивной фазой: а) в активном выпрямителе АВ1; б) в активном выпрямителе АВ2

и наименьшую суммарную установленную мощность силовых полупроводников (в 1,3 раза меньше, чем АВ2). Однако у АВ1 по сравнению с АВ2 выше расчетная мощность управляемых силовых ключей, соответственно, более высокие динамические потери и генерируемые помехи при классической ШИМ из-за повышенного (в два раза) напряжения на силовых управляемых ключах.

2. Для управления АВ1 рекомендуется управление с пассивной фазой, несмотря на некоторое увеличение искажения тока и напряжения в точке подключения. Такое управление позволяет уменьшить динамические потери в 1,5 раза и снизить уровень помехоэмиссии. Кроме того, АВ1 позволяет организовать двунаправленную передачу энергии, что целесообразно в случае работы преобразователя от промышленной сети.
3. АВ2 имеет в два раза больше силовых ключей, но меньшую расчетную мощность управляемых силовых ключей (примерно 1,48 раза меньше). Параметры электромагнитной совместимости АВ2 вполне хорошие, но только при классической ШИМ.
4. Управление с пассивной фазой в АВ2 не рекомендуется, поскольку ведет к недопустимому искажению потребляемого тока и напряжения в точке подключения. Это вызвано плохой управляемостью выпрямителя в области перехода фазного тока через ноль. Кроме того, действующий ток первой гармоники выходных конденсаторов пропорционального увеличивается, что требует значительного увеличения их емкости (в 4–5 раз [4]) для поддержания заданного уровня пульсаций напряжения.

Таким образом, сравниваемые выпрямители имеют паритетные характеристики. Решение остается за разработчиком. Однако по функциональным возможностям (возможность передачи энергии в сеть при разряде аккумуляторной батареи) для зарядного преобразователя предпочтительна трехфазная мостовая схема АВ1. Для АВ1 рекомендуется синхронное управление с пассивной фазой.

Литература

1. Особенности построения зарядных устройств на транзисторных модулях Infineon. www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2019/07/power-elec-mag-april-2019_article.pdf
2. Ramakrishnan H., Rangaraju J. Power Topology Considerations for Electric Vehicle Charging Stations // Application Report. Texas Instruments, 2020.
3. Поляков В. Д. Выбор и сравнительный анализ схем преобразователей для автономных зарядных станций стартерных аккумуляторных батарей // Силовая электроника. 2018. № 6.
4. Чаплыгин Е. Е., Тьинь В. М., Ан Н. Х. Виенна-выпрямитель — трехфазный корректор коэффициента мощности // Силовая электроника. 2006. № 1.
5. Плахтий А. А. Анализ энергетических характеристик активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности при работе с постоянной частотой модуляции // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. № 12.