

Анализ бортовых высоковольтных преобразователей однофазного переменного тока с повышенным коэффициентом мощности

СКОРОХОД Ю.Ю., ВОЛЬСКИЙ С.И.

Рассмотрены силовые схемы построения бортовых высоковольтных статических преобразователей электрической энергии, работающих от однофазной сети 3000 В переменного тока. В общем виде преобразователи имеют многоканальное выходное напряжение как переменного, так и постоянного тока. Представлены основные технические требования, предъявляемые к таким преобразователям. Приведена обобщенная структурная схема высоковольтных преобразователей с повышенным качеством потребления электрической энергии. Рассмотрены возможные силовые схемы построения входного блока высоковольтного преобразователя на базе устройств коррекции входного однофазного потребляемого тока. Предложены классификация и критерии сравнительной оценки возможных силовых схем таких устройств. Статья будет полезна специалистам занимающимся разработкой бортовых электротехнических комплексов с высоковольтными преобразователями при повышенных требованиях к качеству входного однофазного потребляемого тока.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высоковольтный преобразователь, однофазный переменный ток, устройства коррекции входного однофазного тока, силовые схемы, критерии оценки

К главному требованию, предъявляемому к любому бортовому высоковольтному преобразователю, относится снижение массы и габаритов устройства. Другим важным требованием, которое связано с обеспечением безопасности обслуживающего и эксплуатирующего персонала, является наличие гальванической развязки между входным высоковольтным и выходным значениями напряжения.

На современном этапе эффективное выполнение указанных требований достигается посредством высокочастотного преобразования электрической энергии с применением высокочастотных трансформаторов. Таким образом, в основу современного бортового высоковольтного преобразователя положено использование промежуточного звена повышенной частоты.

В обобщенном виде качество потребляемой устройством электрической энергии переменного тока определяет коэффициент мощности. В идеале его значение должно быть равно единице. В этом случае ток потребления преобразователя совпадает по форме и фазе с входным напряжением переменного тока.

Рассмотрены бортовые высоковольтные преобразователи с входным однофазным напряжением 3000 В, которые в общем виде имеют входные устройства коррекции входного тока и многоканальные выходные напряжения как переменного, так и постоянного тока.

Обобщенная структурная схема бортового высоковольтного преобразователя однофазного тока. С учетом приведенных факторов и анализа современных схемотехнических решений составлена и показана на рис. 1 обобщенная структурная схема бортового высоковольтного преобразователя с входным однофазным напряжением. На рисунке обозначено: $E1$ – источник входного однофазного напряжения переменного тока; M – число последовательно соединенных входных блоков ($A1.1–A1.M$) и соответствующих им однофазных инверторов ($A2.1–A2.M$) с выходными высокочастотными трансформаторами ($TV1.1–TV1.M$) и однофазными выпрямителями ($A3.1–A3.M$); Π – число выходных однофазных инверторов напряжения ($AU1.1–AU1.\Pi$); $I3$ – число выходных трехфазных инверторов напряжения ($AU3.1–AU3.I3$); K – число конверторов напряжения ($AK.1–AK.K$); $ZU1.1–ZU1.\Pi$ – однофазная нагрузка; $ZU3.1–ZU3.I3$ – трехфазная нагрузка; $ZK.1–ZK.K$ – нагрузка постоянного тока.

В предложенной структурной схеме входные блоки $A1.1–A1.M$ выполняют функции коррекции входного потребляемого однофазного тока и преобразования входного напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока.

Однофазные инверторы $A2.1–A2.M$ преобразуют выходное напряжение постоянного тока соответствующего входного блока в высокочастотное однофазное напряжение, которые трансформаторы $TV1–TV.M$ понижают до заданного уровня

вторичного напряжения. При этом одновременно трансформаторы обеспечивают развязку между значениями входного высоковольтного и выходного напряжения преобразователя.

Затем однофазные выпрямители $A3.1$ и $A3.M$ преобразовывают высокочастотное выходное напряжение соответствующего трансформатора $TV1.1–TV1.M$ в напряжение постоянного тока, которое поступает на входы трехфазных инверторов $AU1.1–AU1.П$, однофазных инверторов $AU3.1–AU3.И3$ и конверторов $AK.1–AK.K$.

Число M последовательно соединенных входных блоков $A1.1–A1.M$ обычно определяется максимальным значением входного напряжения источника $E1$ и допустимым значением напряжения на закрытых полупроводниковых приборах с учетом заданного показателя надежности. Числа $П$, $И3$ и K выходных инверторов и конверторов должны быть указаны в техническом задании на преобразователь.

Предложенная обобщенная структурная схема бортового высоковольтного преобразователя однофазного тока охватывает всю совокупность реализации возможных схмотехнических решений и в зависимости от поставленной конкретной задачи за счет исключения тех или иных звеньев способна трансформироваться к простому рациональному виду. При этом каждое составляющее звено (кроме

высокочастотного трансформатора) помимо непосредственного преобразования электрической энергии может выполнять функции регулирования и стабилизации выходного напряжения.

Устройства коррекции входного потребляемого тока. *Общие положения.* Необходимость выполнения принятых требований по качеству потребления электрической энергии определяет актуальность специальных исследований по разработке входных блоков силовой схемы высоковольтного преобразователя, которые в дальнейшем будем именовать как устройство коррекции входного тока (УКВТ).

В результате анализа литературы [1–15] рассматриваемые устройства разделены на три основных типа: параллельные УКВТ; вольтодобавочные УКВТ; последовательные УКВТ.

Параллельные устройства коррекции входного потребляемого тока. Они представляют собой простые и недорогие входные силовые схемы, нашедшие широкое применение в электроэнергетике. В первую очередь, к ним следует отнести УКВТ на базе компенсирующих конденсаторов [1–3], силовая схема представлена на рис. 2.

По принципу действия параллельные УКВТ на базе компенсирующих конденсаторов уменьшают только отстающую (индуктивную) составляющую входного потребляемого реактивного тока преобразователя.

Другим видом параллельных УКВТ являются устройства на базе компенсирующего реактора [1–4]. При этом компенсацию входного потребляемого тока осуществляют за счет регулирования тока реактора ($L1$), установленного либо непосредственно во входной цепи переменного тока, либо в цепи постоянного тока дополнительного управляемого выпрямителя. При этом ток реактора $L1$ регулируют изменением угла отпирания полупроводниковых приборов (обычно силовых однооперационных тиристоров) согласно заданному алгоритму, обеспечивающему уменьшение потребляемой реактивной мощности. Для примера на рис. 3 приведена силовая схема параллельного УКВТ с реактором, установленным во входной цепи переменного тока.

Принципиально параллельные УКВТ на базе компенсирующего реактора уменьшают только опережающую (емкостную) составляющую входного потребляемого тока преобразователя. Дополнительно рассматриваемые УКВТ вносят в спектр потребляемого тока высшие гар-

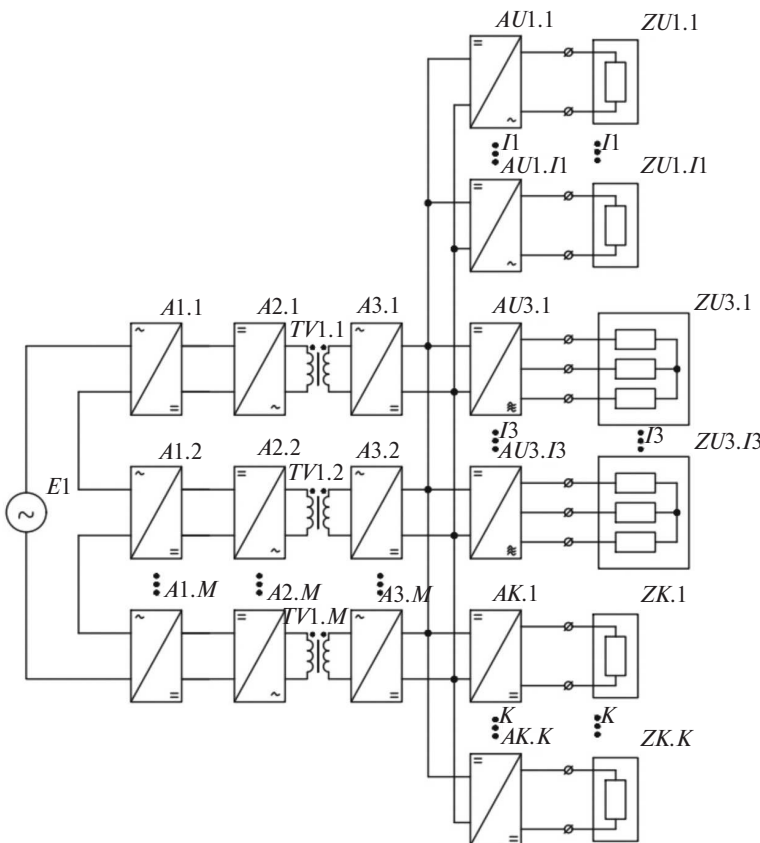


Рис. 1

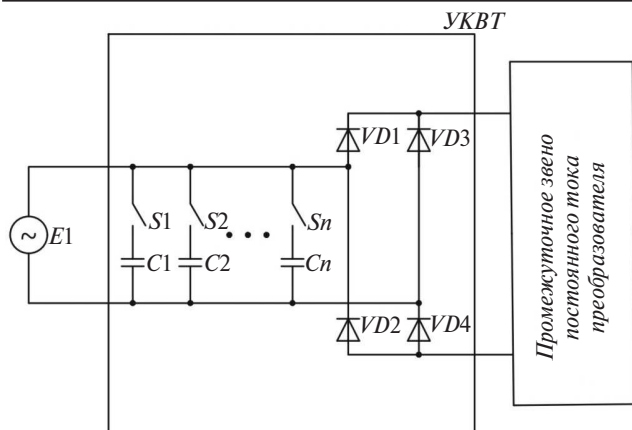


Рис. 2

монические составляющие нечетного порядка, обусловленные импульсным характером работы полупроводниковых приборов.

Универсальной возможностью уменьшения индуктивной и емкостной составляющих входного тока преобразователя обладают смешанные параллельные УКВТ [1–6], содержащие электрические ветви с компенсирующими конденсаторами и реактором.

К общим недостаткам параллельных УКВТ следует отнести:

отсутствие избирательности, вследствие чего рассматриваемые устройства снижают полную реактивную мощность магистральной сети, т.е. всех подключенных к ней потребителей электрической энергии;

низкие массогабаритные показатели реактивных элементов;

отсутствие возможности стабилизации напряжения без использования дополнительных силовых устройств.

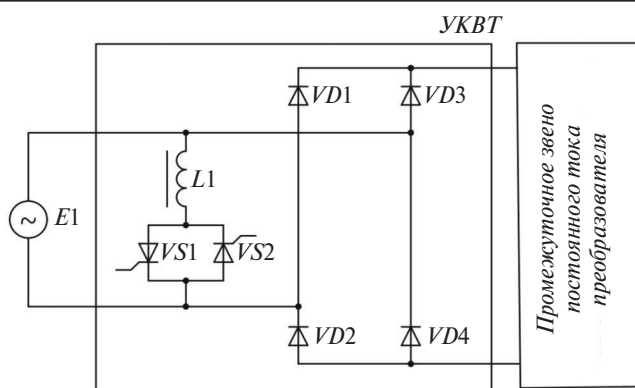


Рис. 3

В связи с этим применение параллельных УКВТ в бортовых высоковольтных преобразователях однофазного тока в качестве входных блоков коррекции потребляемого тока является весьма проблематичным.

Вольтодобавочные устройства коррекции входного потребляемого тока. Они представляют собой компенсирующий источник напряжения или тока, который функционирует в противофазе с искажающими воздействиями преобразователя [1–4, 6].

По принципу действия наиболее эффективными являются комбинированные вольтодобавочные УКВТ, сочетающие свойства компенсирующих источников напряжения или тока. Они подразделяются на вольтодобавочные УКВТ параллельно-последовательного и последовательно-параллельного типа. В качестве примера на рис. 4 представлен вольтодобавочный УКВТ параллельно-последовательного типа.

Оба типа УКВТ помимо уменьшения емкостной и индуктивной составляющих входного тока имеют возможность за счет последовательно включенного трансформатора стабилизировать напряжение про-

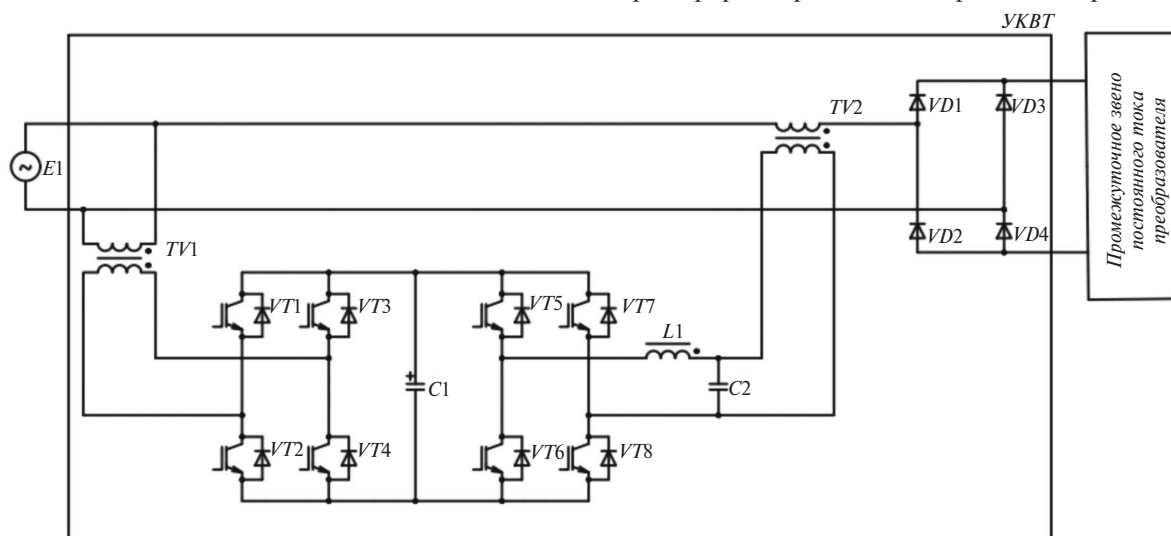


Рис. 4

межуточного звена постоянного тока преобразователя.

К существенному недостатку вольтодобавочных УКВТ в части совместного использования с бортовым высоковольтным преобразователем следует отнести низкие массогабаритные показатели, которые обусловлены применением низкочастотных трансформаторов ($TV1$, $TV2$) и реактивных элементов ($L1$, $C1$ и $C2$). Другим не менее важным недостатком вольтодобавочных УКВТ является отстающий характер синтезируемого воздействия, что связано с непредсказуемостью изменения спектра высших гармонических составляющих потребляемого тока преобразователя. Данное обстоятельство усложняет реализацию системы управления и приводит к сравнительно низкому быстродействию УКВТ.

Последовательные устройства коррекции входного потребляемого тока. Они содержат силовой реактор, выпрямительное звено, силовой ключ и накопительный конденсатор. При этом силовой ключ в замкнутом состоянии обеспечивает накопление электромагнитной энергии в силовом реакторе, а во время разомкнутого состояния передает электромагнитную энергию силового реактора в накопительный конденсатор и в нагрузку преобразователя.

Принцип действия последовательных УКВТ позволяет за счет возможности непрерывного регулирования тока силового реактора максимально приблизить форму и фазу входного потребляемого тока преобразователя к форме и фазе входного напряжения. При этом возможность коммутации силового ключа при значении частоты, существенно превышающем значение частоты входного напряжения, определяет малую массу и габариты данных УКВТ.

В зависимости от подключения силового реактора до или после выпрямительного звена рассматриваемые устройства условно разделены на два вида: последовательные УКВТ на базе реактора переменного тока; последовательные УКВТ на базе реактора постоянного тока.

К первому виду последовательного УКВТ следует отнести устройства, в которых силовой ключ расположен в цепи переменного тока [1, 6–15]. Такие устройства условно названы последовательными УКВТ на базе реактора переменного тока с коммутацией на стороне переменного тока (рис. 5). Силовой ключ $S1$ переменного тока имеет такой алгоритм коммутации, при котором обеспечивается протекание входного синусоидального тока через силовой реактор $L1$, совпадающего по форме и фазе с напряжением источника питания $E1$.

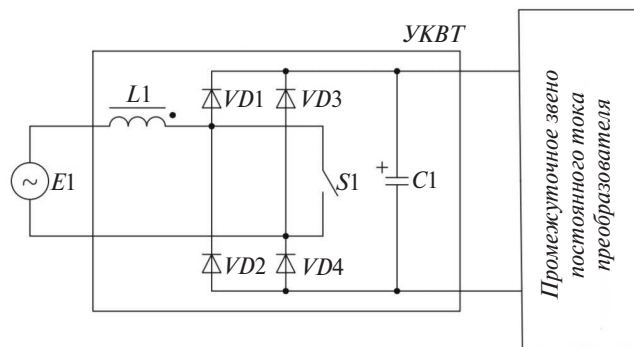


Рис. 5

Анализ [1, 6–15] показывает, что последовательные УКВТ второго вида на базе реактора постоянного тока можно условно разделить на устройства с прямым и обратным включением выходного диода. Для примера на рис. 6 представлена силовая схема последовательного УКВТ второго вида с прямым включением выходного диода.

Положительными качествами последовательных УКВТ являются:

- регулирование входного потребляемого тока во всем диапазоне изменения реактивной мощности преобразователя;
- преобразование электрической энергии на повышенной частоте;
- совмещенная функция выпрямления и коррекции входного тока;
- возможность стабилизации выходного напряжения;
- высокое быстродействие.

При этом все силовые схемы последовательных УКВТ имеют общий недостаток, обусловленный сложностью реализации алгоритма управления силовыми ключами. Однако с учетом тенденций современного развития микропроцессорной техники этот недостаток можно считать несущественным.

Следует заметить, что совмещение в одном устройстве функций коррекции и выпрямления входного потребляемого тока с возможностью стабилизации выходного напряжения при преобразовании электрической энергии на повышенной частоте определяет сравнительно малые массу и габариты по-

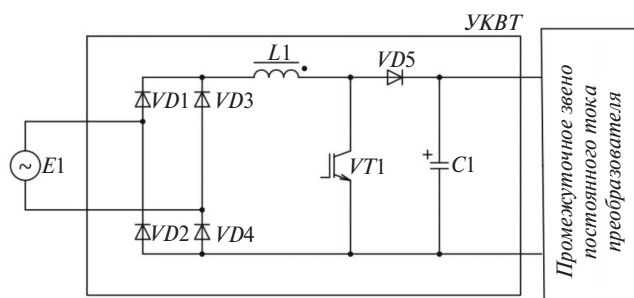


Рис 6

следовательных УКВТ, что является их существенным преимуществом.

Классификация силовых схем устройства коррекции входного тока. На основе анализа составлена классификация УКВТ. Разделение устройств по типам проведено в зависимости от способа подключения силовой схемы к преобразователю. Условно выявлены три основных типа УКВТ: параллельные; вольтодобавочные; последовательные. Для каждого типа выявлены свои виды и подвиды силовых схем, классификация которых раскрыта на рис. 7.

При анализе силовых схем последовательных УКВТ использованы следующие критерии:

число силовых транзисторов и диодов;

число токопроводящих полупроводниковых структур (в дальнейшем именуемые *n-n* структурами) при нарастании и спаде тока силового реактора;

значение максимального напряжения U_{VTmax} , прикладываемого к закрытому силовому транзистору, и обратного напряжения U_{VDmax} силового диода.

В первом случае косвенно характеризуются стоимостные показатели силовой схемы рассматриваемых УКВТ: чем больше силовых полупроводниковых приборов, тем выше стоимость проектируемого устройства. Число токопроводящих *n-n* структур при нарастании и спаде тока силового реактора качественно определяет потери мощности в силовых полупроводниковых приборах рассматриваемой схемы. С ростом числа *n-n* структур, по кото-

рым одновременно протекает силовой ток, увеличиваются потери мощности в силовых полупроводниковых приборах.

В третьем случае критерии качественно характеризуются как стоимостные показатели силовой схемы УКВТ, так и потери мощности при коммутации силовых полупроводниковых приборов: чем выше требования к рабочему максимальному напряжению на закрытом силовом транзисторе или максимальному обратному напряжению на силовом диоде, тем выше стоимость соответствующего полупроводникового прибора. При этом с ростом рабочего максимального напряжения на закрытом приборе повышаются коммутационные потери при переключении как в транзисторах, так и в диодах.

В таблице приведены результаты анализа силовых схем последовательных УКВТ в соответствии с выбранными критериями, где U_{as} – амплитудное значение входного напряжения; U_M – максимальное значение выходного напряжения УКВТ.

Как видно из таблицы, наименьшее число *n-n* структур, по которым одновременно протекает силовой ток, имеют последовательные УКВТ на базе переменного реактора с коммутацией либо на стороне переменного тока, либо на стороне выпрямительного звена. С другой стороны, указанные схемы имеют наибольшее число силовых полупроводниковых приборов, в том числе большее число силовых транзисторов, что для бортовых, особенно высоковольтных преобразователей, нежелательно.

Последовательный УКВТ	Число силовых транзисторов	Число силовых диодов	Общее число приборов	Характер тока реактора	Число <i>n-n</i> структур, одновременно проводящих ток	U_{VTmax}	U_{VDmax}
На базе реактора переменного тока с коммутацией на стороне переменного тока	2	6	8	нарастающий	5	U_M	U_M
				спадающий	4	U_M	U_M
На базе реактора переменного тока с коммутацией на стороне выпрямительного звена	2	6	8	нарастающий	5	U_M	U_M
				спадающий	4	U_M	U_M
На базе реактора переменного тока с коммутацией на стороне выпрямительного звена	2	6	8	нарастающий	5	U_M	U_M
				спадающий	4	U_M	U_M
На базе реактора переменного тока с коммутацией в цепи выпрямительного звена	4	6	10	нарастающий	5	U_M	U_M
				спадающий	4	U_M	U_M
На базе реактора переменного тока с коммутацией на стороне постоянного тока	1	5	6	нарастающий	7	U_M	U_M
				спадающий	6	U_M	U_M
На базе реактора постоянного тока с прямым выходным диодом	1	5	6	нарастающий	7	U_M	U_M
				спадающий	6	U_M	U_M
На базе реактора постоянного тока с обратным выходным диодом	1	5	6	нарастающий	7	U_M	U_M
				спадающий	2	$U_M + U_{as}$	U_M

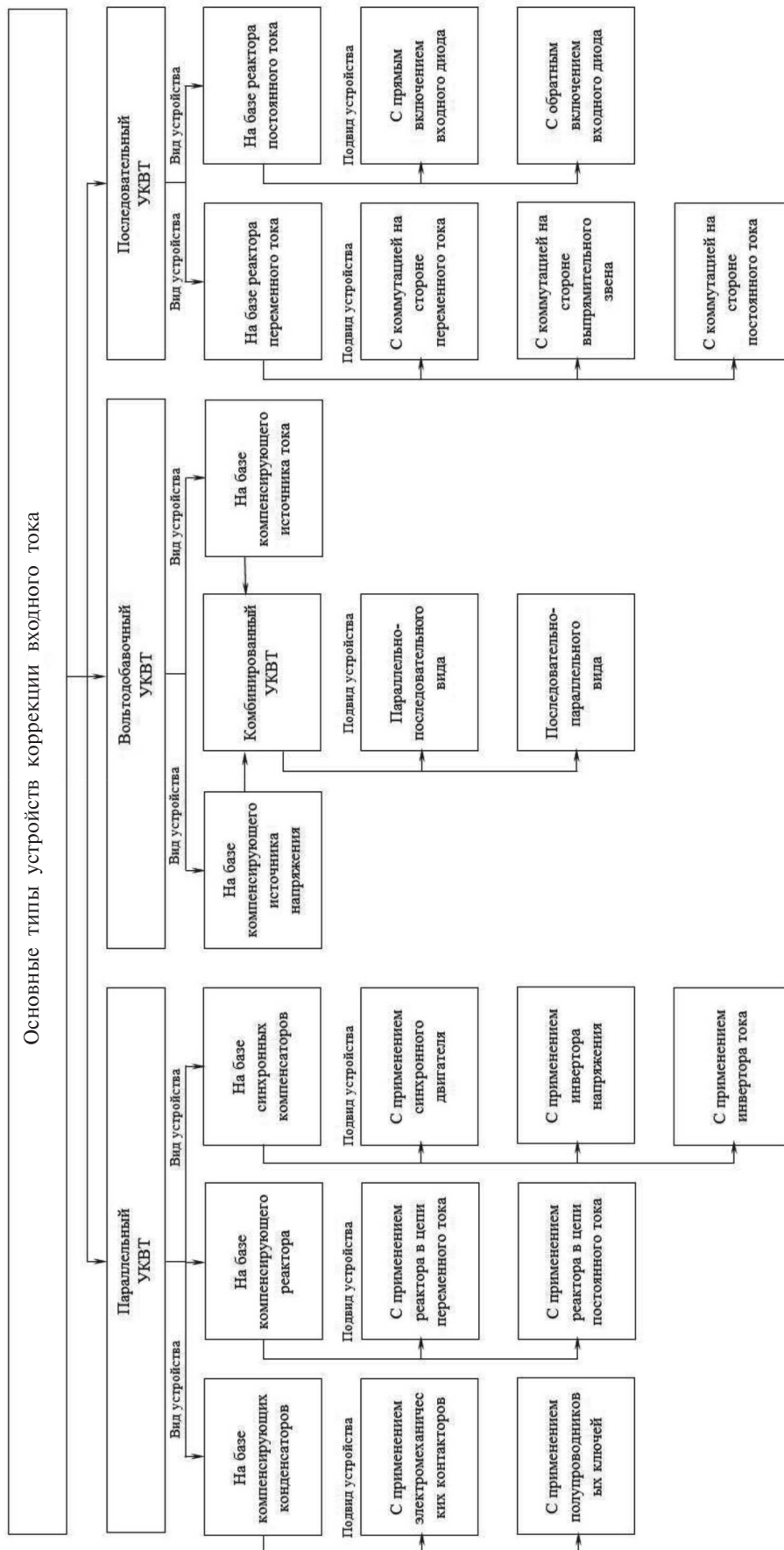


Рис. 7

Силовые транзисторы УКВТ на базе постоянно-го реактора с обратным выходным диодом имеют повышенные максимальные значения напряжения в закрытом состоянии. При этом согласно принципу действия для данного вида силовых схем УКВТ характерно низкое значение КПД. В связи с этим указанные силовые схемы применяются главным образом при относительно низком входном напряжении и малой выходной мощности.

Силовые схемы УКВТ на базе переменного реактора с коммутацией на стороне постоянного тока и на базе постоянного реактора с прямым выходным диодом имеют наименьшее число силовых транзисторов, что является существенным преимуществом при использовании их в бортовых высоковольтных преобразователях. Следует отметить, что в первом случае силовой реактор в отличие от силового реактора УКВТ, установленного на стороне постоянного тока, обеспечивает также защиту силовых диодов выпрямительного звена. Данный фактор определяет преимущества такого последовательного УКВТ.

Таким образом, применительно к высоковольтной области применения, когда требуется соединение нескольких последовательно соединенных УКВТ, наиболее предпочтительными являются силовые схемы последовательных УКВТ на базе переменного реактора с коммутацией на стороне постоянного тока.

Заключение. Анализ показывает, что применение параллельных УКВТ в бортовых высоковольтных преобразователях весьма проблематично. Во-первых, из-за отсутствия избирательности параллельных УКВТ, в результате чего при использовании рассматриваемых устройств снижается полная реактивная мощность всей магистральной сети, т.е. всех подключенных к ней потребителей электрической энергии, включая тяговый привод. Во-вторых, параллельные УКВТ имеют сравнительно большую массу и габариты реактивных элементов вследствие низкочастотного преобразования электрической энергии.

Вольтодобавочные УКВТ осуществляют преобразование электрической энергии на низкой частоте, что определяет применение реактивных элементов и трансформаторов сравнительно большой массы и габаритов. При этом вследствие отстающего характера синтезируемого воздействия вольтодобавочные УКВТ имеют сравнительно низкое быстродействие. Все вышеперечисленные факторы определяют проблематичность применения вольтодобавочных УКВТ в бортовых высоковольтных преобразователях.

Наиболее эффективным представляется применение в бортовых высоковольтных преобразователях последовательных УКВТ. За счет совмещения функций коррекции и выпрямления входного потребляемого тока при возможности стабилизации выходного напряжения и преобразования электрической энергии на повышенной частоте эти устройства потенциально имеют сравнительно малую массу и габариты. Последнее обстоятельство является решающим при выборе типа УКВТ для бортового высоковольтного преобразователя.

Вместе с тем, применительно к высоковольтным преобразователям, когда требуется соединение нескольких последовательно соединенных УКВТ, наиболее предпочтительными являются силовые схемы последовательных УКВТ на базе переменного реактора с коммутацией на стороне постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зиновьев Г.С.** Силовая электроника: Учебник. ч.1. М.: Юрайт, 2012, 671 с.
2. **Кабышев А.В.** Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012, 234 с.
3. **Основы современной энергетики/Под ред. Е.В. Амелистова.** М.: Изд. дом МЭИ, 2008, т. 2, 632 с.
4. **Михайлов В.В., Позднов М.В.** Математическое моделирование параллельного компенсатора мощности. Технические науки в России и за рубежом. – Материалы II Международ. науч. конф. (Москва, ноябрь 2012 г.). М.: Буки-Веди, 2012, с. 69–74.
5. **Gruundbau R., Utleryd J.** Grid flexibility.– ABB Review, 2005, vol. 4, pp. 21–24.
6. **Кочкин В.И., Нечаев О.П.** Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: НЦ ЭНАС, 2002, 248 с.
7. **Лукин А.В., Кастров М.Ю., Малышков Г.М., Герасимов А.А., Макаров В.В., Парфенов А.Н.** Преобразователи напряжения силовой электроники. М.: Радио и связь, 2004, 416 с.
8. **Сорокин Д.А., Вольский С.И.** Сопоставительный анализ схемотехнических решений трехфазных преобразователей AC/DC. – Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, № 5, с. 10–15.
9. **Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н.** Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005, 423 с.
10. **Мелешин В.И., Овчинников Д.А.** Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2001, 411 с.
11. **Иванов В., Панфилов Д.** Типовые схемы корректоров коэффициента мощности. – Chip News, 1997, № 9–10, с. 38–45.
12. **Volskiy S., Skorokhod Y., Nitkin D., Dykin S.** Double-loop controlled grid-connected inverter. – PCIM Europe Conf. Proceedings, Nuremberg, 2017, pp. 1654–1659.
13. **Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я.** Топологии корректоров коэффициента мощности в автономных системах электропитания. – Морской вестник, 2013, № 1(10), с. 37–40.

14. **Бурков А.Т.** Электронная техника и преобразователи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1999, 464 с.

15. **Карзов Б.Н., Кастров М.Ю.** Схемы коррекции коэффициента мощности с учетом фильтрации сетевого напряжения. – Практическая силовая электроника, 2009, № 2(34), с. 2–7.

[26.05.2020]

Скоруход Юрий Юрьевич – начальник конструкторского бюро на предприятии ООО «Трансконвертер».

Вольский Сергей Иосифович – доктор техн. наук, генеральный директор ООО «Трансконвертер», профессор НИУ «Московский авиационный институт», диссертацию защитил в 2002 г.

Electrichestvo, 2020, No. 10, pp. 44–51

DOI:10.24160/0013-5380-2020-10-44-51

An Analysis of On-Bord High-Voltage Converters of Single-Phase Alternating Current with Increased Miroelectric Power Factor

SKOROKHOD Yury Yu. (LLC «Transkonverter», Moscow, Russia) – Head of design bureau

VOL'SKIY Sehgey I. (LLC «Transkonverter», Moscow, Russia) – Director General, Professor of NRU «Moscow Aviation Institute», Cand. Sci. (Eng.)

The power circuit arrangements of on-board high-voltage static converters fed from a 3000 V AC single-phase network that in the general case produce multi-channel AC and DC output voltages are considered. The basic technical requirements posed to such converters are formulated. The general structural diagram of high-voltage converters with improved electric power consumption quality is given. Possible power circuit arrangements for the high-voltage converter input unit based on single-phase input current correction devices are considered. A classification and criteria for comparative evaluation of the possible power circuit arrangements of these devices are proposed. The information presented in the article will be of interest for specialists engaged in designing on-board electrical systems involving high-voltage converters that must comply with strict requirements for the quality of consumed single-phase input current.

К е у w o r d s: *single-phase AC high voltage converter, single-phase input current, power circuit, evaluation criteria*

REFERENCES

- Zinov'yev G.S.** *Silovaya elektronika: Uchebnik. ch.1* (Power Electronics: A Textbook, part 1). М.: Yurayt, 2012, 671 p.
- Kabyshev A.V.** *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatiy* (Compensation of reactive power in electrical installations of industrial enterprises). Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 234 p.
- Osnovy sovremennoy energetiki/Pod red. Ye.V. Ametistova** (Fundamentals of modern energy / Ed. E.V. Ametistov). М.: Izd. dom MEI, 2008, vol. 2, 632 p.
- Mikhaylov V.V., Pozdnov M.V.** *Matematicheskoye modelirovaniye parallel'nogo kompensatora moshchnosti. Tekhnicheskkiye nauki v Rossii i za rubezhom. – Materialy II Mezhdunarod. nauch. konf. (Moskva, noyabr' 2012 g.)* (Mathematical modeling of a parallel power compensator. Technical sciences in Russia and abroad. – Materials of the II Intern. scientific. conf. (Moscow, November 2012), 2012, pp. 69–74.
- Gruundbau R., Utleryd J.** Grid flexibility. – ABB Review, 2005, vol. 4, pp. 21–24.
- Kochkin V.I., Nechayev O.P.** *Primeneniye staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatiy* (On the use of static compensators of reactive power in electrical networks of power systems and enterprises). М.: NTS ENAS, 2002, 248 p.
- Lukin A.V., Kastrov M.Yu., Malyshkov G.M., Gerasimov A.A., Makarov V.V., Parfenov A.N.** *Преобразователи напряжения силовой электроники* (Power electronics voltage converters). М.: Radio i svyaz', 2004, 416 p.
- Sorokin D.A., Vol'skiy S.I.** *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ. (Electronics and Electrical Equipment of Transport)*, 2018, No. 5, pp. 10–15.
- Dmitrikov V.F., Sergeyev V.V., Samylin I.N.** *Povysheniye effektivnosti preobrazovatel'nykh i radiotekhnicheskikh ustroystv* (Increase of efficiency of converting and radio engineering devices). М.: Radio i svyaz', 2005, 423 p.
- Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A.** *Upravleniye tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii* (Control of transistor power converters). М.: Tekhnosfera, 2001, 411 p.
- Ivanov V., Panfilov D.** Typical power factor correctors. – Chip News, 1997, No. 9–10, pp. 38–45.
- Vol'skiy S., Skorokhod Y., Nitkin D., Dykin S.** Double-loop controlled grid-connected inverter. – PCIM Europe Conf. Proceedings, Nuremberg, 2017, pp. 1654–1659.
- Dmitriyev B.F., Galushin S.Ya.** *Morskoy vestnik – in Russ. (Marine Bulletin)*, 2013, No. 1(10), pp. 37–40.
- Burkov A.T.** *Elektronnaya tekhnika i preobrazovатели: Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta* (Electronic technology and converters: Textbook for universities railway transport). М.: Transport, 1999, 464 p.
- Karзов B.N., Kastrov M.Yu.** *Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical Power Electronics)*, 2009, No. 2 (34), pp. 2–7.

[26.05.2020]