

УДК 621.314.263

А. Г. Воронцов
ООО «НПЦ СЭС»В. В. Глушаков, М. В. Пронин
ПАО «Силовые машины»

Гибридные каскадные преобразователи частоты и особенности их управления

Предложены структуры и алгоритмы управления гибридных каскадных преобразователей частоты, содержащих мощные высоковольтные и менее мощные низковольтные блоки преобразования. В высоковольтных блоках используются диодные выпрямители и трехфазные автономные инверторы напряжения, работающие с низкой частотой ШИМ. В низковольтных блоках используются низковольтные активные выпрямители и однофазные инверторы напряжения, работающие с повышенной частотой ШИМ. Диодные выпрямители подключены к питающей сети через дроссели, активные выпрямители подключены к сети через трансформатор. Трансформатор выполнен на частичную мощность нагрузки, что позволяет улучшить массогабаритные показатели оборудования и уменьшить потери энергии. Низковольтные блоки преобразования частоты кроме передачи электроэнергии в нагрузку и ее рекуперации фильтруют токи фаз сети и нагрузки. Рассмотрен режим работы преобразователя и симметрирования токов нагрузки при аварийном отключении одного из низковольтных блоков преобразования частоты.

Трехуровневый преобразователь, каскадный преобразователь, гибридный преобразователь, диодный выпрямитель, активный выпрямитель, автономный инвертор напряжения, искажения токов, аварийный режим, моделирование

Высоковольтные полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ) применяются в энергетике, в горнодобывающей промышленности, при транспортировке газа, в электродвижении судов и т. д.

В мощных ветроэлектрических установках и в электропередачах применяются модульные многоуровневые преобразователи (ММПЧ) [1]–[3], которые могут выполняться без трансформаторов. Они содержат низковольтные транзисторно-конденсаторные блоки, включаемые последовательно в плечах выпрямительных и инверторных мостов. Низковольтные блоки можно резервировать и при неисправностях исключать из работы, что способствует повышению надежности и живучести установок. К недостаткам ММПЧ можно отнести сравнительно большое количество конденсаторов и транзисторных модулей, снижение работоспособности преобразователей при уменьшении частоты токов фаз.

Другое направление развития высоковольтных ПЧ – трехуровневые преобразователи (ТПЧ) на IGBT Press-Pack или на IGBT в изолированном корпусе [4]–[5]. В ТПЧ используется меньшее количество полупроводниковых приборов. ТПЧ

могут выполняться на напряжение до 6 кВ при использовании IGBT-модулей с напряжением 6.5 кВ. ТПЧ во многих случаях применяются без трансформаторов и имеют небольшие габариты. К недостаткам высоковольтных ТПЧ можно отнести низкую частоту широтно-импульсной модуляции (ШИМ) высоковольтных полупроводниковых приборов (300...600 Гц), значительные искажения токов и напряжений на входе и выходе ТПЧ, необходимость силовых фильтров.

Широкое применение в промышленности имеют каскадные ПЧ (КПЧ) [6]–[8]. КПЧ строятся при использовании низковольтных транзисторных блоков преобразования частоты (БПЧ) с однофазным выходом. В состав КПЧ обычно входит трансформатор (Тр), который имеет трехфазную первичную обмотку и несколько вторичных обмоток, количество которых равно числу БПЧ. Каждый БПЧ получает питание от индивидуальной вторичной обмотки Тр. В каждой фазе нагрузки КПЧ низковольтные БПЧ соединены последовательно и образуют высоковольтный трехфазный источник питания с регулируемым напряжением и частотой. Нагрузкой КПЧ могут

служить синхронные или асинхронные машины либо другие устройства. КПЧ выполняются обычно на напряжения 3, 6, 10 кВ. Существуют исполнения и на другие напряжения. КПЧ относятся к многоуровневым преобразователям и имеют следующие преимущества: небольшие искажения напряжений и токов на входе и выходе; возможность создания высоковольтных установок на низковольтных элементах; широкие возможности по резервированию элементов и поддержанию характеристик установок при выходе из строя части элементов.

В данной статье рассмотрены структуры гибридных каскадных преобразователей частоты (ГКПЧ), в которых сочетаются положительные свойства ТПЧ и КПЧ.

Структуры и особенности ГКПЧ. Ряд задач построения эффективной структуры ПЧ заключается в улучшении массогабаритных характеристик оборудования, в снижении его стоимости, в повышении КПД. Схема ГКПЧ, частично решающая эти задачи, представлена на рис. 1.

В рассматриваемой структуре ГКПЧ трехфазное нерегулируемое сетевое напряжение $u_{вх}$ преобразуется в регулируемое напряжение на выходе $u_{вых}$ несколькими БПЧ. Часть БПЧ подключена к сети через трансформатор Тр. Эти БПЧ выполнены низковольтными. Каждый низковольтный БПЧ имеет сравнительно небольшую мощность и содержит активный выпрямитель (АВ) и соединенный с ним по цепи выпрямленного тока автономный инвертор напряжения (АИН). АВ и АИН вы-

полнены трехуровневыми. В низковольтных БПЧ использованы IGBT-модули, которые работают с повышенной частотой ШИМ (4000 Гц и более).

Более мощный БПЧ подключен к питающей сети через трехфазный дроссель Др. Этот БПЧ содержит высоковольтный шестипульсный диодный выпрямитель ДВ и соединенный с ним по цепи выпрямленного тока трехфазный трехуровневый АИН. Инвертор выполнен на высоковольтных IGBT-модулях, работающих со сравнительно низкой частотой ШИМ (300...600 Гц).

В зависимости от используемой элементной базы, от мощности ГКПЧ, от напряжений на входе и выходе возможно применение трехуровневых и двухуровневых БПЧ, а также использование другого их количества.

В рассматриваемой структуре ГКПЧ электроэнергия передается из сети в нагрузку через параллельно работающие БПЧ. Основная часть энергии передается через БПЧ с ДВ, меньшая часть – через БПЧ с АВ. Через эти же БПЧ осуществляется рекуперация энергии из нагрузки в сеть. Выпрямленное напряжение ДВ больше выпрямленных напряжений АВ, что соответствует указанному распределению потоков энергии. Коммутационные процессы в ДВ приводят к снижению выпрямленного напряжения при увеличении нагрузки. Это ограничивает напряжение на выходе трехфазного АИН. Однако однофазные АИН, включенные последовательно с трехфазным АИН, позволяют устранить этот недостаток. При этом однофазные АИН можно рассматривать как вольтдобавки.

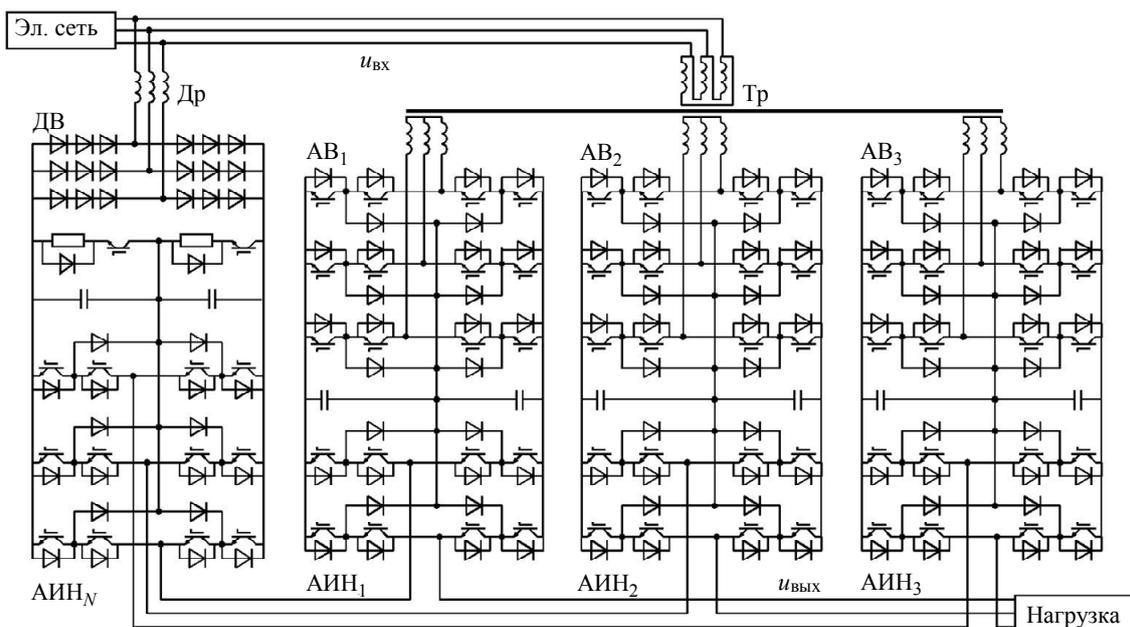


Рис. 1

Система регулирования нагрузки формирует трехфазную систему напряжений управления инверторами в целом на основной частоте нагрузки. Эти напряжения распределяются между трехфазным и однофазными АИН таким образом, чтобы обеспечивалась работа БПЧ без перегрузки и без перемодуляции. При этом АВ поддерживают заданное выпрямленное напряжение во всех активных БПЧ и работают с заданным коэффициентом мощности первичной обмотки трансформатора, например равным 1. Кроме выполнения указанных основных функций в системах управления АВ фильтруются токи фаз сети, выделяются неосновные составляющие и пропорциональные регуляторы токов в фазах формируют добавки к напряжениям управления фаз, которые подавляют неосновные составляющие в токах. Аналогично системы регулирования однофазных АИН подавляют неосновные составляющие в токах фаз нагрузки. Подобные алгоритмы управления описаны в публикациях [9].

Моделирование ГКПЧ в ComSim по взаимосвязанным подсистемам. Одна из моделей систем с ГКПЧ построена по схеме рис. 1, в которой питающая электросеть представлена трехфазным регулируемым источником напряжения, содержащим синусоидальные ЭДС e_{s1} , e_{s2} и e_{s3} и индуктивности в фазах L_s . Напряжения фаз сети u_{s1} , u_{s2} и u_{s3} , токи i_{s1} , i_{s2} и i_{s3} . Трехфазная нагрузка представлена активными сопротивлениями фаз R и индуктивностями L . Напряжения фаз нагрузки u_1 , u_2 и u_3 , токи i_1 , i_2 и i_3 .

Моделирование выполнено по методологии расчета установок по взаимосвязанным подсистемам [9]. В соответствии с методологией на начальном этапе силовая часть установки отделяется от системы управления и они связываются друг с другом сигналами датчиков и управляющих воздействий. Силовая часть установки разделяется на подсистемы, взаимосвязанные зависимыми источниками напряжения и тока. Осуществляется математическое описание подсистем и их связей. Полученные уравнения объединяются в общем алгоритме расчета. Алгоритм содержит внутренний цикл итерационного расчета. В нем в каждый момент времени определяются параметры взаимных связей подсистем. После выполнения заданного количества итераций осуществляется интегрирование дифференциальных уравнений, т. е. происходит переход к следующему моменту

времени, когда повторяется итерационный цикл, а затем – процедура интегрирования, и т. д.

Одна из операций, направленная на разделение расчетной схемы на взаимосвязанные подсистемы, заключается в замене фаз электросети зависимыми источниками напряжения

$$u_{sn} = e_{sn} - L_s \frac{di_{sn}}{dt}, \quad n = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где используются производные токов, найденные при расчете других подсистем.

Зависимые источники u_{sn} переносятся в фазы ДВ и Тр. При этом токи фаз и их производные, определенные в подсистеме с ДВ i_{dn} и в подсистеме с Тр i_{kn} , образуют зависимые источники тока i_{sn} , которые применяются в подсистеме питающей сети

$$i_{sn} = i_{dn} + i_{kn}, \quad \frac{di_{sn}}{dt} = \frac{di_{dn}}{dt} + \frac{di_{kn}}{dt}, \quad n = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Преобразование (1)–(2) позволяет представить исходную схему в виде подсистем, связанных друг с другом зависимыми источниками напряжения и тока, как изображено на рис. 2.

Другое преобразование исходной схемы заключается в замене емкостей в блоках преобразования частоты зависимыми источниками напряжения

$$\left. \begin{aligned} u_{cNn} &= \frac{1}{C_N} \int i_{cNn} dt, \quad n = 1, 2; \\ u_{cn1} &= \frac{1}{C_a} \int i_{cn1} dt; \\ u_{cn2} &= \frac{1}{C_a} \int i_{cn2} dt, \quad n = 1, 2, 3, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где C_N – емкость конденсаторов высоковольтного блока ПЧ; C_a – емкость конденсаторов низковольтного блока ПЧ, i_{cNn} , i_{cn1} , i_{cn2} – токи в конденсаторах.

Источники напряжения u_{cN1} и u_{cn1} переносятся в ветви схемы, сходящиеся в положительных полюсах цепей выпрямленных напряжений БПЧ. Зависимые источники напряжения u_{cN2} , u_{cn2} переносятся в ветви схемы, сходящиеся в отрицательных полюсах цепей выпрямленных напряжений БПЧ. В результате в каждом БПЧ в цепи выпрямленного напряжения выпрямитель оказывается соединенным с АИН одной точкой, через которую ток не протекает. Это позволяет разъединить выпрямители и АИН, как указано на рис. 2.

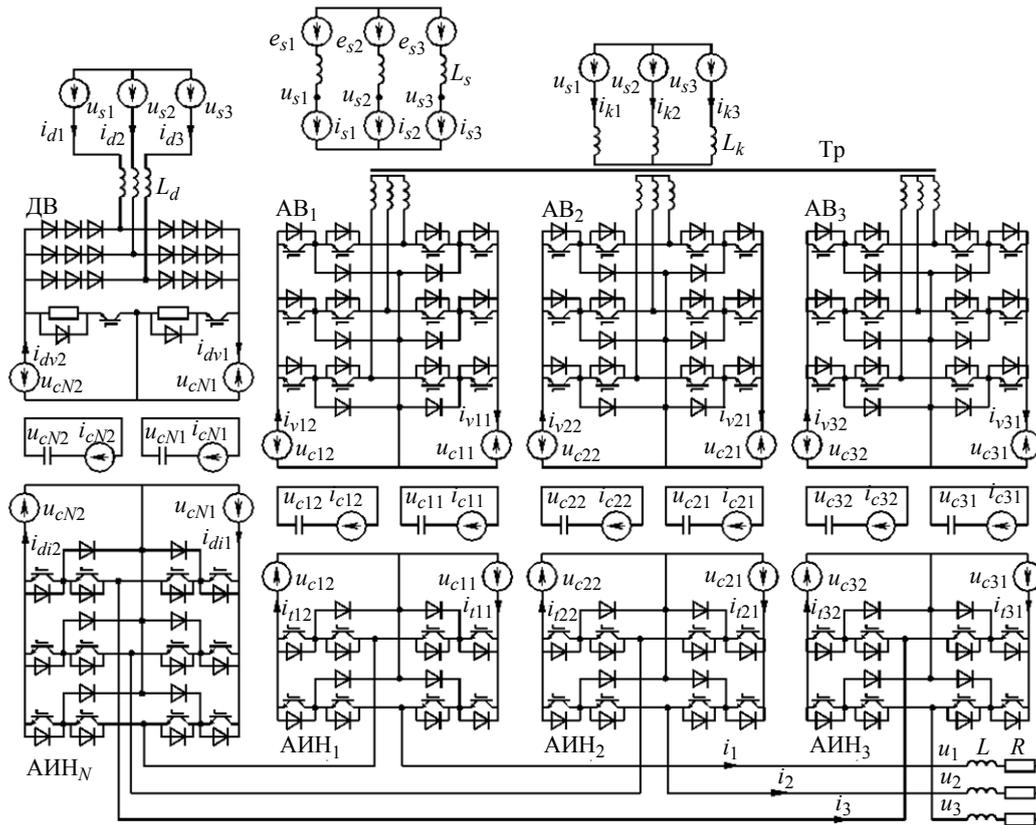


Рис. 2

Выпрямленные токи в положительных полюсах выпрямителей i_{dv1} , i_{vn1} и инверторов i_{di1} , i_{in1} образуют токи тех конденсаторов, которые подключены к положительным полюсам БПЧ:

$$i_{cN1} = i_{dv1} - i_{di1}, i_{cn1} = i_{vn1} - i_{in1}, n = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Выпрямленные токи в отрицательных полюсах выпрямителей i_{dv1} , i_{vn1} и инверторов i_{di1} , i_{in1} образуют токи конденсаторов, которые подключены к отрицательным полюсам БПЧ:

$$i_{cN2} = i_{di2} - i_{dv2}, i_{cn2} = i_{in2} - i_{vn2}, n = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Полученные в выражениях (4)–(5) зависимые источники тока использованы в подсхемах с конденсаторами, изображенных на рис. 2.

При дальнейшем описании силовой схемы наиболее сложные подсхемы также разделяются на части (используемые способы преобразования схем описаны в публикациях [9], [10]).

Особенности системы управления ГКПЧ.

Системы управления (СУ) АВ и АИН выполняют основные и дополнительные функции.

В модели рассматриваемой установки задаются напряжения сети и нагрузки, их частоты, мощность и коэффициент мощности нагрузки. По этим данным в начале расчета определяются активные сопротивления и индуктивности фаз нагрузки.

Основной функцией всех АИН является поддержание заданного напряжения нагрузки основной частоты. Для решения этой задачи в СУ АИН измеряются мгновенные напряжения фаз нагрузки, осуществляется их фильтрация и определяется действующее напряжение основной частоты. В ПИ-регулятор напряжения поступают сигналы по заданному и фактическому напряжениям нагрузки. На выходе этого регулятора формируются амплитуды основных составляющих напряжений управления высоковольтного и низковольтных АИН. Фазы напряжений управления формируются в результате интегрирования заданной угловой частоты напряжений нагрузки. Амплитуды напряжений управления распределяются между высоковольтным и низковольтными АИН с учетом соотношения выпрямленных напряжений блоков ПЧ таким образом, чтобы в АИН не возникла перемодуляция. Мгновенные значения основных составляющих напряжений управления фаз всех АИН формируются, исходя из заданных амплитуд напряжений и заданных фаз.

Основными функциями всех АВ являются поддержание заданных выпрямленных напряжений блоков ПЧ, обеспечение синусоидальной формы токов фаз, формирование их с заданным сдвигом относительно напряжений фаз (в частном случае сдвиг равен 0).

Дополнительные функции АВ и однофазных АИН заключаются в подавлении неосновных составляющих в токах фаз на входе и выходе ГКПЧ. Эта задача решается при использовании числовых фильтров токов. В результате фильтрации выделяются трехфазные симметричные составляющие прямой последовательности основной частоты. Они вычитаются из фактических токов, и таким образом определяются неосновные составляющие. В каждой фазе неосновные составляющие токов регулируются П-регулятором. При этом заданные неосновные составляющие токов равны 0. На выходе П-регуляторов формируются дополнительные составляющие напряжений управления АВ и однофазных АИН.

Основные и дополнительные составляющие напряжений управления складываются и полученные напряжения управления используются для сравнения с соответствующими опорными напряжениями для формирования импульсов управления транзисторами.

Модели ГКПЧ для расчетов в ComSim и в MatLab. Одна из моделей установки с ГКПЧ выполнена на языке программирования C++ для расчетов в среде собственной разработки ComSim. В этой модели математические описания подсхем и их связей в силовой схеме, а также описания работы устройств управления объединены в итерационном алгоритме вычислений с учетом дискретности измерений переменных, синхронизации их с опорными напряжениями, а также длительности обработки сигналов в цифровых системах управления и формирования управляющих воздействий, как указано в [9], [10]. Для обеспечения соответствия модели реальной установке токи сети и нагрузки измеряются несколько раз на каждом периоде ШИМ выпрямителей и инверторов и усредняются на соответствующих периодах. Дискретности работы блоков управления определяются длительностями периодов ШИМ раздельно в высоковольтном и низковольтных БПЧ. В ComSim предусмотрены возможности вывода результатов расчетов на дисплей, возможности записи результатов и их анализа.

Модели установок с ГКПЧ разработаны также в MatLab. Одна из моделей разработана для анализа совместной работы высоковольтного и низковольтных трехуровневых АИН на общую активно-индуктивную нагрузку. Другая модель разработана по полной схеме установки с ГКПЧ

рис. 1. В моделях кроме описания работы силовых устройств учтена работа СУ. Предусмотрена возможность расчета процессов в установке при аварийном отключении одного низковольтного БПЧ.

В моделях в ComSim и в MatLab использованы однотипные алгоритмы регулирования.

Расчеты процессов в ГКПЧ на моделях в MatLab. Для проверки алгоритмов совместного регулирования АИН различного типа при работе на общую трехфазную RL -нагрузку (см. рис. 1) в MatLab выполнены расчеты электромагнитных процессов в указанной схеме. Принято, что трехфазный высоковольтный АИН получает питание от источника постоянного напряжения 7000 В, три однофазных АИН получают питание от индивидуальных источников постоянного напряжения 2000 В. Мощность нагрузки – 3 МВт, коэффициент мощности – 0.95, напряжение – 6 кВ, частота – 50 Гц. Частота ШИМ трехфазного АИН – 400 Гц, частота ШИМ однофазных АИН – 4000 Гц. Модель построена таким образом, что до момента времени 0.1 с системы управления АИН выполняют только основные функции – обеспечивают заданные параметры нагрузки на основной частоте токов. С момента времени 0.1 с включается функция однофазных АИН по фильтрации токов фаз нагрузки. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, импульсы управления трехфазного и однофазных АИН формируются в результате сравнения пилообразных опорных напряжений с трехфазными напряжениями управления. В начале процесса (до момента времени 0.1 с) улучшение формы токов нагрузки посредством корректировки мгновенных значений напряжений управления не осуществляется. На этом участке процесса напряжения управления близки по форме к синусоиде, а коэффициент искажения синусоидальности токов фаз нагрузки равен 7.99 %. В момент времени 0.1 с включается алгоритм фильтрации токов нагрузки и подавления нежелательных составляющих воздействием на мгновенные значения напряжений управления однофазных АИН. При этом сравнительно быстро коэффициент искажения синусоидальности токов устанавливается на уровне 5.25 %, т. е. уменьшается в 1.5 раза.

Для проверки алгоритмов СУ ГКПЧ расчеты в MatLab выполнены также на модели, разработанной по полной схеме установки с ГКПЧ (см. рис. 1). Принято, что напряжение питающей электросети 6 кВ, частота 50 Гц, индуктивности

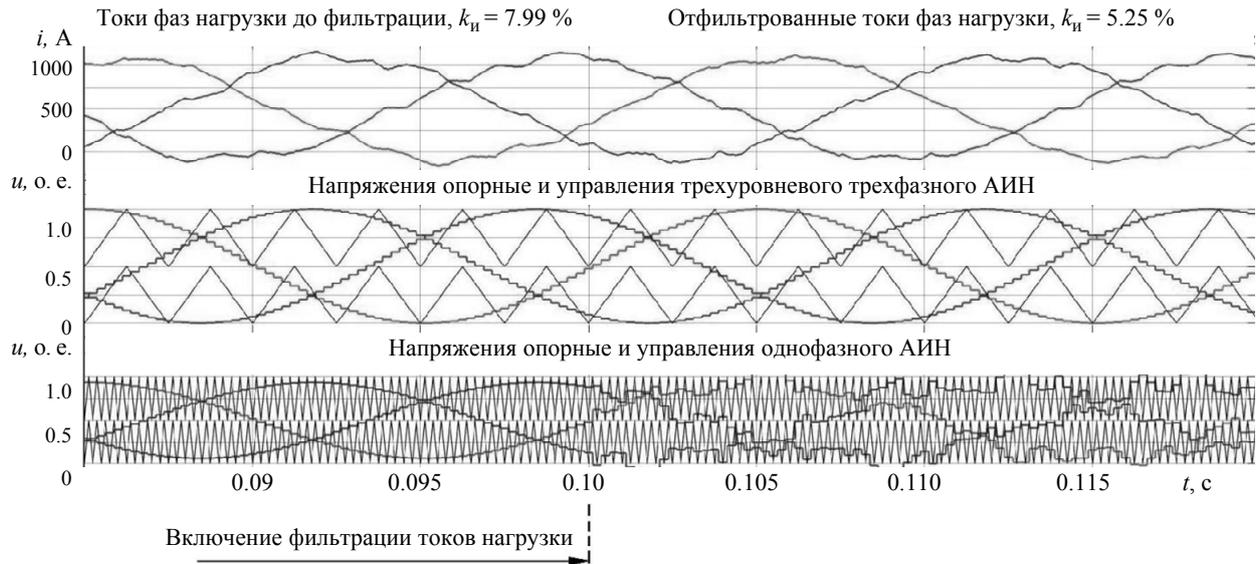


Рис. 3

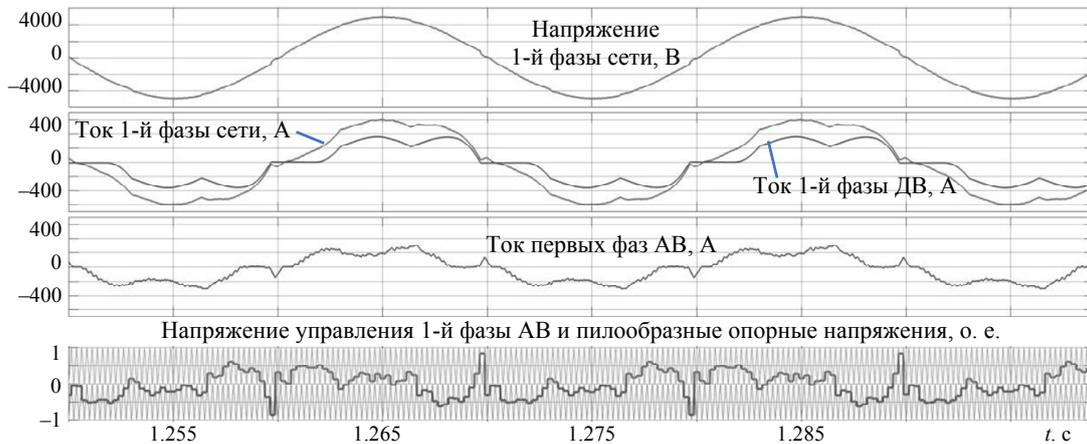


Рис. 4

фаз 0.5 мГн. Индуктивное сопротивление дросселя на входе ДВ 1.07 Ом. Мощность трансформатора 1000 кВ·А, коэффициент трансформации 6.25, напряжение короткого замыкания 5 %. Заданные выпрямленные напряжения АВ 2000 В. Частота ШИМ высоковольтного АИН 600 Гц, частота ШИМ низковольтных АВ и АИН 4000 Гц. Результаты расчета режима работы установки с ГКПЧ представлены на рис. 4, где изображены напряжение 1-й фазы питающей сети, ток 1-й фазы сети, ток 1-й фазы ДВ, ток 1-й фазы АВ, опорные напряжения и напряжение управления 1-й фазы АВ.

Из рис. 4 видно, что реализация в АВ дополнительных функций по корректировке токов фаз сети позволила сместить ток фазы в сторону опережения относительно токов ДВ и за счет этого обеспечить более высокий коэффициент мощности электроэнергии, потребляемой ГКПЧ.

Еще одно свойство ГКПЧ – повышенная живучесть при использовании на входе и выходе БПЧ

устройств, которые выключают БПЧ при неисправностях (предохранители и коммутационные аппараты на рис. 1 не указаны). На рис. 5 представлен результат расчета электромагнитных процессов в ГКПЧ при отключении одного из трех низковольтных БПЧ. Оставшиеся в работе два однофазных АИН выполняют функции вольтдобавки, симметрирования токов нагрузки и их фильтрации).

Как видно из рис. 1, оставшиеся в работе два однофазных низковольтных БПЧ обеспечивают удовлетворительную симметрию токов нагрузки. При этом изменяются взаимные сдвиги по фазе напряжений управления однофазных АИН (взаимный сдвиг по фазе напряжений управления 120° в нормальных режимах).

Расчеты процессов в ГКПЧ в ComSim. Расчеты электромагнитных процессов в MatLab выполняются с большими затратами машинного времени, что затрудняет подбор параметров устройств, настройку регуляторов. Это суще-

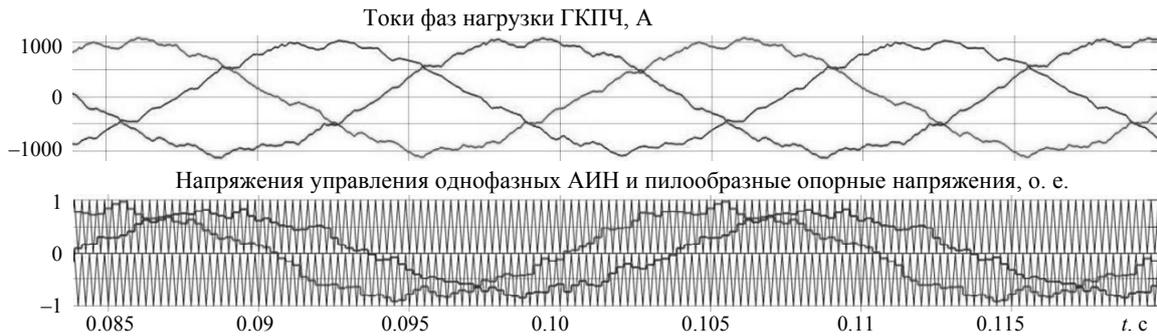


Рис. 5

Таблица 1

Переменные	$K_{и}, \%$	Частота, Гц	Значения	Фаза, ...°
Напряжение 1-й фазы сети Напряжение основной гармоники	1.30 (1.53)	50	3455.5 В (3464 В) 3455.2 В	179.3 (178.9)
Ток 1-й фазы сети Ток основной гармоники	8.34 (10.46)	50	393.5 А (41865 А) 292.5 А	168.2 (167.5)
Напряжение 1-й фазы ДВ Напряжение основной гармоники	13.0	50	3421.8 В 3392.6 В	175.4
Ток 1-й фазы ДВ Ток основной гармоники ДВ	27.3 (27.53)	50	228.2 А (238.8 А) 219.5 А	162.2 (161.8)
Выпрямленное напряжение АИН _N Выпрямленные напряжения АИН ₁₋₃	–		7739.2 В (7726 В) 2018.5 В (2000.3 В)	–
Суммарный ток первых фаз АВ ₁₋₃ Ток основной гармоники	49.4 (36.09)	50	181.5 А (–167.4) 157.8 А	–173.1
Напряжение 1-й фазы нагрузки Напряжение основной гармоники	33.3 (38.22)	50	3639.1 В (3429.5 В) 3430.5 В	–35.2 (210)
Ток 1-й фазы нагрузки Ток основной гармоники	5.8 (5.13)	50	301.5 А (316.6 А) 301.0 А	–53.4 (161.8)
Мощность низковольтных БПЧ Мощность высоковольтного БПЧ Мощность ГКПЧ	–		795 кВт (822 кВт) 2140 кВт (2362 кВт) 2934.8 кВт (3185 кВт)	–

ственно при большом количестве полупроводниковых приборов и высокой частоте их переключения [9], [10]. Поэтому окончательная настройка системы выполнена при расчетах в среде ComSim на быстродействующей модели, разработанной по методологии взаимосвязанных подсистем (рис. 2). При расчетах использованы те же основные параметры установки с ГКПЧ: напряжение сети и нагрузки – 6 кВ, частоты сети и нагрузки – 50 Гц, индуктивность сети – 0.5 мГн, сопротивление дросселя на входе ДВ – 1.07 Ом, мощность трансформатора – 1000 кВА, коэффициент трансформации – 6.25, напряжение короткого замыкания – 5%. Выпрямленные напряжения АВ – 2000 В. Частота ШИМ высоковольтного АИН – 600 Гц, низковольтных АВ и АИН – 4000 Гц. Результаты расчета представлены в табл. 1 и на рис. 6.

В табл. 1 представлены результаты анализа напряжений и токов в установившемся режиме. В скобках указаны значения переменных, рассчитанные в MatLab на модели, которая описана ранее.

На рис. 6 изображены: напряжение 1-й фазы сети; токи фаз сети; ток 1-й фазы ДВ; суммарный ток первых фаз трех АВ; напряжения фаз ДВ; опорные напряжения и напряжение управления 1-й фазы АВ; опорные пилообразные напряжения и напряжения управления высоковольтного и низковольтных АИН, напряжения и токи фаз нагрузки.

Для оценки эффективности предложенной структуры ГКПЧ существенное значение имеют настройки СУ, распределение нагрузок между БПЧ, запасы на регулирование. В представленных результатах расчета, в соответствии с табл. 2 по высоковольтному АИН и по АВ запас на регулирование по напряжениям управления составляет около 20%, по низковольтным АИН – около 10%. Указанные запасы достаточны для обеспечения работы ГКПЧ при длительных отклонениях напряжений сети и нагрузки.

Из табл. 1 следует, что фазное напряжение нагрузки по основной гармонике равно 3430.5 В, что соответствует линейному напряжению 5942 В. Дей-

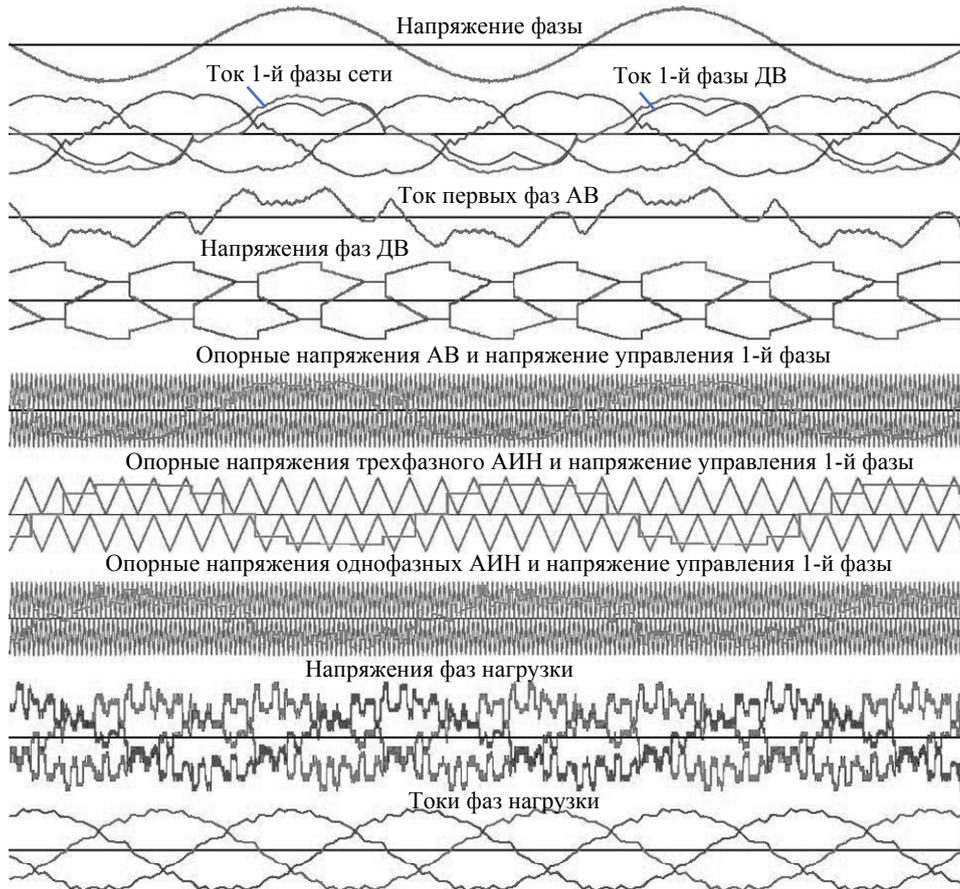


Рис. 6

Таблица 2

Переменные		Значения, %
Напряжение управления высоковольтного АИН	Действующее значение в целом	66.1
	Действующее значение основной гармоники	64.8
	Амплитуда кривой	81.5
Напряжение управления низковольтного АИН	Действующее значение в целом	48.8
	Действующее значение основной гармоники	45.5
	Амплитуда кривой	90.8
Напряжение управления АВ	Действующее значение в целом	59.0
	Действующее значение основной гармоники	56.2
	Амплитуда кривой	79.2

ствующее значение основной составляющей тока нагрузки равно 301 А. Эти параметры соответствуют полной мощности нагрузки 3098 кВ·А и активной мощности 2942 кВт (коэффициент мощности определяется из табл. 1 по разности фаз основных составляющих напряжения и тока). При этом через АВ передается около 800 кВт. С учетом реактивной мощности АВ и мощности искажения нагрузка трансформатора составляет около 1000 кВ·А.

Через трансформатор в нагрузку передается менее 30 % мощности. Большая часть мощности передается в нагрузку помимо трансформатора с минимальным количеством преобразований электроэнергии. Это способствует повышению КПД преобразователя.

Из табл. 1 видно, что 6-пульсный ДВ потребляет из питающей сети электроэнергию, которой соответствует коэффициент искажения синусоидальности тока ДВ $K_{\text{и}} = 27.3\%$. При этом коэффициент потребляемой ДВ мощности $\cos \varphi = 0.956$.

АВ частично компенсируют коэффициент мощности и высшие гармоники тока. Коэффициент искажения синусоидальности тока сети $K_{\text{и}} = 8.34\%$. При этом коэффициент потребляемой ГКПЧ мощности $\cos \varphi = 0.981$.

Оценка вариантов ПЧ по массе трансформаторно-дроссельного оборудования. Если ПЧ мощностью 3 МВт, напряжением 6 кВ выполняется по каскадной схеме, то на его входе должен

использоваться многообмоточный трансформатор мощностью около 3.5 МВ·А (с учетом КПД, коэффициента мощности и искажений токов). При исполнении трансформатора в защитном кожухе с медными обмотками его масса составит ориентировочно 9000 кг (каталог ООО «Электрофизика»).

В рассмотренном варианте ГКПЧ использован трансформатор мощностью 1 МВ·А. Его масса равна 3250 кг (каталог продукции ООО «Электрофизика»). При этом в ГКПЧ использован также трехфазный реактор на ток 228 А и напряжение 6 кВ, имеющий индуктивное сопротивление 1.07 Ом. Масса такого реактора ориентировочно равна 500 кг (ОАО ХК «Электростроитель»).

Таким образом, переход от КПЧ к ГКПЧ позволяет снизить массу трансформаторно-реакторного оборудования с 9000 до 3750 кг, т. е. в 2.4 раза.

Затраты машинного времени на расчеты в ComSim и в MatLab. Описанные расчеты выполнены в ComSim на модели, разработанной на языке программирования C++, а также на модели, разработанной в MatLab. Расчеты на различных моделях выполнены на одной ЭВМ. Длительность рассчитываемого процесса – 1.3 с, шаг расчета по времени – 1 мкс, шаг записи информации в файл результатов – 5 мкс. В ComSim расчеты выполнены с различным заданным числом итераций на каждом шаге интегрирования переменных. В данном случае заданное число итераций незначительно влияет на точность расчетов в связи с малым шагом интегрирования переменных. Вывод информации на дисплей выполнялся после завершения расчета. Результаты сравнения моделей по затратам машинного времени на расчеты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Заданное число итераций	Затраты машинного времени		Соотношение затрат времени MatLab / ComSim
	MatLab, с	ComSim, с	
3	775	11.2	70
7		13.6	57
11		15.5	50

Как видно из табл. 3, использование методологии моделирования установок по взаимосвязанным подсистемам в рассматриваемом случае позволяет сократить затраты машинного времени на расчеты в 50–70 раз. Аналогичные результаты были достигнуты и при расчетах других электроустановок [9], [10].

Выводы:

1. Гибридные каскадные преобразователи частоты с напряжением до 6 кВ по сравнению с каскадными преобразователями позволяют сократить массу, габариты и стоимость трансформаторно-реакторного оборудования ориентировочно в 2.4 раза при удовлетворительном качестве токов на входе и выходе преобразователя.

2. В гибридных каскадных преобразователях частоты часть электроэнергии передается в нагрузку через трансформатор, другая ее часть минует трансформатор. Это предполагает работу ГКПЧ с более высоким КПД по сравнению с каскадными преобразователями частоты.

3. Использование компьютерных моделей установок с полупроводниковыми преобразователями, построенных по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, позволяет сократить затраты машинного времени на расчеты в десятки раз и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dynamic impact of MMC controllers on DC voltage droop controlled MTDC grids / J. Freytes, P. Rault, F. Gruson, F. Colas, X. Guillaud // EPE'16 ECCE Europe. Karlsruhe, Germany: EPE ASSOCIATION, 2016. P. 1–10. URL: <http://www.epe2016.com/> (дата доступа 06.07.19).

2. A new modular multilevel converter for medium voltage high power oil & gas motor drive applications / P. Himmelmann, M. Hiller, D. Krug, M. Beuermann // EPE'16 ECCE Europe. Karlsruhe, Germany: EPE ASSOCIATION. 2016. P. 1–11. URL: <http://www.epe2016.com/> (дата доступа 06.07.19).

3. High-speed models of systems with AC generators and modular multilevel converters / M. V. Pronin, A. S. Grigoryan, V. V. Glushakov, A. G. Vorontsov // IECON-2017, Beijing, China, 2017. P. 2534–2539.

4. Ефимов А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / под общ. ред. проф. Р. Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.

5. A simple control method for neutral-point voltage oscillation reduction of three-level neutral-point-clamped inverter / C. Ja-Hwi, K. Nam-Joon, H. Ji-Tai, K. Rae-Young, H. Dong-Seok // IECON-2013. Austria, Vienna, 2013. P. 304–309.

6. Boonmee C., Kumsuwan Y. Control of single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter with modified MPPT for grid-connected photovoltaic systems // IECON-2013. Austria, Vienna, 2013. P. 564–569.

7. Carnielutti F., Pinheiro H. New Modulation Strategy for asymmetrical cascaded multilevel converters un-

der fault conditions // IECON-2013. Nov. 10–13. Austria, Vienna, 2013. P. 1072–1077.

8. Operation of a medium-voltage drive under faulty conditions / J. Rodríguez, J. Pontt, R. Musalem, P. Hammond // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52, № 4. P. 1–5.

9. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2017. 220 с.

10. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / ОАО «Электросила». СПб., 2003. 172 с.

A. G. Vorontcov
Ltd «NPC SES»

V. V. Glushakov, M. V. Pronin
PJSC «Power machines»

HYBRID CASCADE FREQUENCY CONVERTERS AND THE FEATURES OF THEIR CONTROL

Structures and control algorithms of hybrid cascade frequency converters are offered. These converters contain powerful high-voltage and less powerful low-voltage converter blocks. In high-voltage blocks are used diode rectifiers and three-phase VSI inverters working with low frequency PWM. The low-voltage active rectifiers and the single-phase inverters are used in low-voltage blocks which work with high frequency PWM. Diode rectifiers are connected to mains through choke, active rectifiers are connected to networks through the transformer. The transformer is executed on partial capacity of loading that allows to improve weight-dimensions properties of the equipment and to reduce energy losses. Low-voltage blocks of frequency converters, besides transmission of electrical energy to load and its recuperation, filter phase currents of mains and load. The operating mode of the converter and balancing of load currents is considered at emergency switching-off of one of low-voltage blocks of frequency converter.

3 level frequency converter, cascade multi-level converter, hybrid converter, diode rectifier, AFE, VSI, distortions of currents, emergency mode, simulation

УДК 519.71:62-50

Нгуен Дык Фу, В. В. Путов, Чу Чонг Шы
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Адаптивные системы управления жестким четырехзвенным манипуляционным роботом с электроприводами постоянного тока

Разработаны и исследованы адаптивные системы управления жестким четырехзвенным манипуляционным роботом с электроприводами постоянного тока. В условиях параметрических неопределенностей объекта в зависимости от степени разработанной математической модели и возможности измерения угловой скорости вращения звена манипулятора рассмотрены три подхода к настройке адаптивных систем, основанные на использовании регрессорной матрицы, прямого и модифицированного методов приближения функций. Проведены компьютерные исследования построенных систем в среде Matlab-Simulink. Показаны результаты исследований в условиях трехкратных изменений массоинерционных параметров в большую и меньшую стороны от средних значений. Проведен сравнительный анализ качества работы адаптивных систем при отработке ступенчатого и синусоидального сигналов, а также программ траекторий круговой формы. Проанализированы преимущества и недостатки трех выбранных подходов. Расчеты матрицы регрессора и уравнений Лагранжа, описывающих динамику четырехзвенного манипулятора, выполнены с помощью стандартного математического обеспечения пакета Mathcad.

Адаптивная система управления, жесткий четырехзвенный манипуляционный робот, электропривод постоянного тока, регрессорная матрица, метод приближения функций

На сегодняшний день манипуляционные роботы широко используются в различных отраслях

науки и техники [1]. Манипуляционный робот – это электромеханический объект, и его важной
