

На правах рукописи

БОЙКО ВАЛЕРИИ СТЕПАНОВИЧ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
С ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ЕМКОСТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

Специальность 05.09.12 – Полупроводниковые
преобразователи электроэнергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1993

№ 27.10

Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электро-
техники" Киевского политехнического института

Официальные оппоненты:

- | | |
|------------------------------------|-------------|
| Доктор технических наук, профессор | Е.А.Карпов |
| Доктор технических наук, профессор | В.А.Барский |
| Доктор технических наук | Н.Н.Щрченко |

Ведущая организация - Научно-исследовательский, проектно-
конструкторский и технологический институт силовой полупроводни-
ковой техники "Преобразователь" (г. Запорожье).

Защита состоится "25" мая 1993г. в 14 час. на
заседании специализированного совета Д 016.30.03 при Институте
электродинамики АН Украины (252680, Киев-57, пр. Победы, 56, тел.
446-91-15)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан " _ " _____ 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор технических наук

В.С.Федий.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00802993 (V)

ЛНБ ім. В. Стефаніка з
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Техничко-экономический потенциал государства в значительной мере определяется уровнем его энерговооруженности, структурой электропотребления, надежностью, качеством и экономичностью энергоснабжения.

Диссертационная работа относится к области энергетики. Она посвящена проблеме энергосбережения, один из путей решения которой заключается в разработке и исследовании устройств силовой преобразовательной техники для тех отраслей, где используются мощные потребители электрической энергии на постоянном токе.

Работа выполнена в соответствии с разделами 1.9.2.2.1.3.1- ("Разработка и оптимизация мощных полупроводниковых преобразователей с конденсаторами в главных цепях") и 1.9.2.2.1.3.2- ("Разработка и оптимизация мощных регулируемых и нерегулируемых полупроводниковых компенсационных выпрямителей для цветной металлургии, химической и электродной промышленности") Координационного плана научно-технических работ по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" (на 1985-90 г.г.) АН Украины.

Проблема экономичного энергоснабжения потребителей постоянным током имеет несколько аспектов:

1. **Количественный.** В промышленно развитых странах мира после дополнительного преобразования потребляется 50-60% электроэнергии, а доля потребления на постоянном токе - примерно треть от общей выработки. На Украине около 70% электрической энергии потребляется в непреобразованном виде, что приводит к многомиллиардным убыткам.

2. **Энергетический** - основными составляющими которого являются коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

3. **Экологический** - как проблема электромагнитной совместимости преобразовательной установки с сетью электро-снабжения.

4. **Экономический** - одной из составляющих которого является проблема энергосбережения.

Разработка сформулированной проблемы ведется в течение нескольких десятилетий и наибольший творческий вклад в теоретическое исследование и практическое применение внесли такие уче-

ние, как Г.И.Бабат, В.А.Барский, В.И.Борисенко, Б.П.Борисов, О.Г.Булатов, В.А.Веников, И.В.Волков, Ю.Ф.Выдолоб, Т.А.Глазенко, С.Р.Глинтерник, Э.Н.Гречко, К.С.Демирчян, Л.А.Добрусин, В.Т.Долбня, А.В.Донской, Ю.И.Драбович, И.В.Жежеленко, Г.Г.Жемеров, В.Я.Жуйков, А.И.Зайцев, В.Н.Заширко, И.Л.Каганов, Е.А.Карпов, Р.П.Карташов, А.Р.Кобзев, М.П.Костенко, Е.А.Кудря, И.А.Курило, Ф.И.Ковалев, В.Г.Кузнецов, В.Д.Кулик, А.К.Кулиш, В.А.Лабунцов, К.А.Липковский, Г.Г.Магазинник, О.А.Маевский, А.Н.Милях, В.Н.Мишин, С.И.Недзельский, Л.Р.Нейман, Г.Г.Пивняк, А.В.Поссе, В.Г.Палванов, Ш.М.Размадзе, В.С.Руденко, А.А.Сакович, В.И.Сенько, Н.Х.Ситник, Я.Ю.Солодухо, Ю.Г.Толстов, В.Е.Тоикаль, В.С.Федий, М.Э.Хамуджанов, Ю.И.Хохлов, Э.М.Чехет, И.М.Чиженко, А.К.Шидловский, В.П.Шпилло, Б.М.Шляпошников, И.И.Эпштейн, Е.Л.Эттингер и др.

Углубляющийся энергетический кризис значительно обострил проблему энергосбережения и сейчас предусматривается ее решение на государственном уровне.

В соответствии с постановлением №12 от 4.05.1992г. Государственного Комитета Украины по вопросам науки и технологий разрабатывается Государственная программа "Развитие современной силовой электроники как средства энерго- и ресурсосбережения, повышения технического уровня продукции машиностроения" ("Силовая электроника"). Целью программы, как указывает ее координаторы (Институт электродинамики АН Украины, Институт проблем энергосбережения АН Украины и НИИ "Преобразователь"), является создание научно-обоснованных предпосылок построения нового поколения высокоэффективных устройств и систем преобразовательной техники, проведение безотлагательных мер по повышению удельного веса преобразования электроэнергии за счет насыщения отраслей Украины современной силовой электроникой, снижение на этой основе энергоёмкости национального дохода, экономия природных ресурсов, сырья, материалов.

Все предложенные автором и исследованные в работе компенсационные преобразовательные системы построены на принципе одноступенчатой емкостной коммутации.

Нельзя сказать, что интерес к проблеме компенсационных преобразователей всегда был стабильно высоким, а у сторонников компенсации реактивной мощности непосредственно в преобразователе не было оппонентов, исповедующих идеи компенсации с внешней

стороны за счет каких-либо дополнительных устройств, наиболее эффективными из которых в настоящее время считаются тиристорные компенсаторы реактивной мощности (ТКРМ). Эти, и другие направления, сейчас интенсивно развиваются и дополняют друг друга.

Исследования в области преобразователей с одноступенчатой емкостной коммутацией получили широкую известность, благодаря работам, выполненным в Киевском политехническом институте И.М.Чиженко. В 1962 году коллектив авторов под его руководством был отмечен Ленинской премией в области науки и техники за разработку, исследование и промышленное внедрение шестипульсных компенсационных выпрямителей нулевого типа. Работа, выполненная применительно к ртутно-выпрямительным установкам, продемонстрировала их высокую надежность и эффективность использования в народном хозяйстве.

Разработка и исследование компенсационных преобразователей ведется также и в Челябинском техническом университете под руководством Ю.И.Хохлова. Им разработана серия выпрямителей с емкостной коммутацией на пятой-седьмой и на одиннадцатой-тринадцатой гармониках. Выпрямители технологичны, идеология, заложенная в их схемотехническое решение, позволяет достаточно просто перевести обычный преобразователь в компенсированный режим с коэффициентом мощности близким к единице. Возможность генерирования реактивной мощности в сеть такими преобразователями, ограничена.

По отношению к указанному критерию компенсационные преобразователи, разработанные в Киевском политехническом институте и компенсационные преобразовательные системы, предложенные и исследованные в диссертационной работе, представляются более оптимальными, т.к. позволяют генерировать реактивную мощность в сеть и обладают возможностью регулирования ее величины.

Цель диссертационной работы - развитие обобщенной теории компенсационных преобразовательных систем с одноступенчатой емкостной коммутацией, как научной основы для создания и исследования нового поколения многофункциональных устройств с улучшенными технико-экономическими и энергетическими характеристиками, базирующейся на единых методических позициях и перспективной для анализа процессов при сложном алгоритме коммутации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- совершенствование существующей теории компенсационных

преобразователей за счет новых подходов, соответствующих более жестким требованиям к устройствам современной силовой электроники и разработка новых теоретических положений;

- разработка обобщенной методики численно-аналитического анализа электромагнитных процессов, оптимальной для преобразовательных систем нулевого и каскадного типа при различной пульсности преобразования;

- выбор оптимального диапазона режимных и параметрических характеристики исследуемых компенсационных преобразовательных систем;

- выработка стратегии блочно-модульной реализации преобразовательных систем с одноступенчатой емкостной коммутацией, ориентированной на достижение требуемых выходных характеристик за счет оптимизации по локальным критериям или по совокупности сочетающихся критериев;

- исследование способов регулирования выходных характеристик преобразовательных систем, или их параметрической стабилизации;

- реализация математических и физических моделей, а также моделирование расчетных режимов.

Методы исследования обусловлены спектром проблем, решаемых в диссертационной работе и представляют собой сочетание аналитических, графо-аналитических, численно-аналитических и численных методов или иначе, являются совокупностью математических методов и приемов, решающих задачу анализа с элементами режимного и параметрического синтеза при использовании процедуры оптимизации.

Анализ электромагнитных процессов выполнен на базе теории дифференциальных уравнений с использованием аналитических и численных методов. Формирование полных систем уравнений осуществлено на основе электротехнических законов, а алгоритм коммутации использован как механизм формирования неизменной структуры для определенного режимного интервала.

Коммутационные соотношения, алгоритм коммутации и алгоритм решения систем нелинейных уравнений использован для определения углов регулирования и коммутации при диодной реализации преобразовательных систем, а при тиристорной - метод секущих-хорд. Анализ коммутационных соотношений выполнен с использованием стандартных программ высокого уровня.

При определении параметрических и режимных характеристик

преобразовательной системы, исследовании электромагнитной совместимости последней с питающей сетью и при расчете баланса активной и реактивной мощности применен полный аналитический и графо-аналитический гармонический анализ на базе преобразования Фурье.

Научная новизна:

- развита обобщенная (для нулевых и каскадных систем различной пульсности преобразования) теория режима независимой коммутации, анализ электромагнитных процессов на основе которой позволил выявить ряд неизвестных ранее свойств компенсационных преобразовательных систем;

- впервые исследована многоэтапная одноступенчатая коммутация и создана теория режима наложения коммутаций через конденсаторы, которая совместно с обобщенной теорией режима независимой коммутации является теоретической базой для исследования компенсационных преобразовательных систем, исходя из единых методических позиций, перспективная для анализа процессов в режимах со сложным алгоритмом коммутации;

- впервые для исследования электромагнитных процессов в компенсационных преобразовательных системах предложено ввести коммутационные соотношения, выполнен их анализ, установлены свойства, показаны целесообразность и особенности практического применения;

- развит принцип блочно-модульной реализации компенсационных преобразовательных систем (КПС), положенный в основу разработки серии оригинальных схмотехнических решений;

- получены соотношения, являющиеся основой новой теории процессов преобразовательной системы, построенной на предложенном способе перезаряда коммутирующих конденсаторов при помощи тиристорного коммутатора, что позволяет снизить потери энергии в системе, улучшить ее массогабаритные характеристики, получить требуемое значение опережающего угла регулирования;

- установлен ранее неизвестный принцип параметрической стабилизации выходного напряжения тиристорной компенсационной преобразовательной системы, на базе которого разработаны теоретические основы процессов и доказана целесообразность практической реализации в устройствах с динамическим характером нагрузки;

- доказана ранее неизвестная возможность дополнительного повышения эффективности использования конденсаторной батареи

компенсирующего модуля за счет оптимизации режима его работы.

Практическая ценность. Использование новых научных положений, обоснованных в диссертационной работе, позволило: получить ряд оригинальных схемотехнических решений, защищенных авторскими свидетельствами, предназначенных для реализации в виде мощных преобразовательных систем, питающих энергоемкие потребители на постоянном токе; разработать оригинальный узел коммутации (защищен а.с.) компенсирующего модуля в виде тиристорного коммутатора; показать пути практической реализации компенсационных преобразовательных систем с параметрической стабилизацией выходного напряжения, основанных на способе, признанном изобретением.

Разработана методика анализа и синтеза предложенных компенсационных преобразовательных систем и создано ее программное обеспечение, позволяющее выполнять расчет режимных и параметрических характеристик по различным показателям качества электропитания.

Автор вносит на защиту:

1. Обобщенную теорию процессов в режиме независимой коммутации тока вентилями компенсационной преобразовательной системы.
2. Теорию коммутационных процессов в компенсационной преобразовательной системе совместно с теорией многоэтапной одноступенчатой емкостной коммутации.
3. Теорию процессов компенсационной преобразовательной системы в режиме наложения коммутаций через конденсаторы.
4. Развитие принципа построения компенсационной преобразовательной системы, как объекта блочно-модульной реализации и оригинальные схемотехнические решения, ориентированные на применение в качестве источников питания энергоемких потребителей на постоянном токе.
5. Способ перевода обычного преобразовательного модуля в компенсационный режим при помощи тиристорного коммутатора и основы теории преобразовательных систем, разработанных на базе указанного способа.
6. Способ параметрической стабилизации выпрямленного напряжения в тиристорной компенсационной преобразовательной системе и возможные варианты его реализации.
7. Элементы теории энергетического баланса в компенсационной преобразовательной системе.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и

практические результаты диссертационной работы использованы в ряде проектных заданий и технических решениях, направленных на повышение энергетических характеристик установок, совершенствование качества электроснабжения и его надежности, разработанных при участии автора в 1970-1990 г.г. по хозяйственным договорам с Днепровским алюминиевым заводом, Запорожским титано-магниевым комбинатом, заводом "Иркутсккабель", л/я М-5539 г. Калининград, Горловским ПО "Стирол", Запорожским ПО "Преобразователь", Сумгаитским алюминиевым заводом, Волгодонским ПО "Атоммаш".

Эффективность применения результатов диссертационной работы подтверждается актами внедрения, представленных Сумгаитским алюминиевым заводом и Волгодонским ПО "Атоммаш". Подтвержденный суммарный годовой экономический эффект составляет примерно 325 тыс. руб. в ценах 1990 г., из которых на долю автора приходится 50%.

Имеется акт о внедрении результатов исследований в учебный процесс.

Апробация работы. Основные теоретические положения, результаты и выводы диссертационной работы были доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и совещаниях: по компенсационным агрегатам и качеству электроэнергии на предприятиях цветной металлургии [Ташкент (1983, 1985, 1988), Москва (1984), Запорожье (1990)]; по проблемам силовой энергетики [Ленинград (1984), Тольятти (1984), Запорожье (1965), Киев-Чернигов (1987)]; по проблемам электромагнитной совместимости вентильных преобразователей с сетью [Москва (1988)], на семинаре "Электрические цепи с вентильными элементами" Научного Совета АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" [Киев (1986, 1993)], а также на ряде отраслевых совещаний Минцветмета и Минэлектротехпрома.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 33 статьях и докладах, 6 научно-технических отчетах, 2 учебных пособиях. Приоритет основных технических решений защищен 6 авторскими свидетельствами на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы из 105 наименований, содержит 292 страницы основного текста, 89 страниц рисунков и 42 страницы таблиц, а также 14 страниц, составляющих приложения к работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении определена научно-техническая проблема, решению которой посвящена работа, и обоснована ее актуальность, сформулирована цель работы, основные положения, выдвигаемые на защиту, дана информация о структуре работы, апробации, публикациях и практическом применении полученных результатов.

В первой главе дана информация о допущениях, применяемых в диссертационной работе, введена система базовых величин, определена терминология и используемые в тексте сокращения, указаны возможные способы перевода обычного преобразовательного модуля (ОПМ), в качестве которого рассматривается схема акад. В.Ф. Миткевича, в компенсационный режим, отличающиеся типом применяемого коммутатора: пассивного, полуактивного или активного.

Пассивным предложено считать коммутатор, выполняющий функции распределения тока по фазам конденсаторной батареи без изменения величины ее емкости. Пассивный коммутатор не оказывает прямого регулирующего воздействия на режим преобразования. Он может быть реализован в виде трехфазного уравнительного реактора.

Полуактивный коммутатор определен как устройство, которое кроме функций распределения тока по фазам конденсаторной батареи с целью ее перезаряда, имеет возможность влиять на режим работы преобразователя за счет изменения емкости батареи конденсаторов и (или) дополнительного регулирования процесса перезаряда. Очевидно, что здесь имеются различные варианты технической реализации. В качестве примера компенсационного преобразовательного модуля (КПМ) с полуактивным коммутатором рассматривается схема, в которой роль коммутатора выполняет трехфазная тиристорная группа.

Активный коммутатор, выполняя функции распределения тока и перезаряда конденсаторной батареи, принимает участие в преобразовании электрического тока. Поэтому он является вентильно-трансформаторным модулем. Примером схемы компенсационного преобразовательного модуля с активным коммутатором может служить каскадный преобразовательный блок (КБ) - условно-шестифазный каскадный компенсационный преобразователь.

Предложенная классификация коммутаторов, как одного из звеньев компенсирующего модуля (КМ), органично вписывается в обобщенную теорию КПС с одноступенчатой емкостной коммутацией, поскольку охватывает все многообразие их возможных вариантов.

В настоящее время большую известность имеют преобразовательные системы с пассивным коммутатором. Разработки автора в области преобразовательных систем с полупассивным коммутатором относятся к сравнительно новым, защищенным (в соавторстве) авторским свидетельством № 1175338. Предложены два варианта устройства; с одной трехфазной группой тиристоров и с двумя, первый из которых подробно исследован в настоящей главе.

Показано, что в компенсационном преобразовательном модуле с полупассивным коммутатором ток i_c в период коммутации зависит от величины сдвига между коммутациями в силовых вентилях и в тиристорах. Если тиристорное регулирование осуществляется в широких пределах (от 0 до 360 эл. град.), след.ет рассматривать шесть диапазонов задержки.

Первому диапазону задержки соответствует такой режим работы, при котором момент подачи управляющего импульса на тиристор T_1 совпадает с интервалом коммутации тока силовым вентиляем U_1 одноименной фазы, т.е. величина задержки коммутации $\Delta\psi = (0 + \gamma)$. В этом режиме практически мгновенная коммутация тока тиристором (ее длительность выбирается исходя из допустимого значения di/dt) совпадает с коммутацией в силовом вентиле. Закономерность изменения тока фазы конденсаторной батареи представляется в виде двух выражений, что соответствует двум подинтервалам в интервале коммутации.

При работе компенсационной преобразовательной системы на втором диапазоне задержки, коммутации в силовых вентилях и в тиристорном коммутаторе не совпадают, уравнение для контура коммутации, его решение и конечный результат соответствуют первому подинтервалу первого диапазона задержки.

Исследованиями доказана идентичность процессов на всех нечетных диапазонах задержки между собой, и на всех четных. Получены выражения мгновенного значения токов и напряжений элементов КПС, закономерность изменения тока вентиля в интервале коммутации и коммутационные соотношения (функции FU_1 и FU_2), используемые при вычислении углов регулирования и коммутации;

- для нечетных диапазонов задержки

$$FU_1 = -1 + n_2 + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_{\gamma}(\omega_{\alpha}^2 - 1)} + B_{1\alpha} \cos \omega_{\alpha}(1 - n_3)\gamma + B_{2\alpha} \sin \omega_{\alpha}(1 - n_3)\gamma;$$

$$FU_2 = AK - \frac{\sin \alpha}{X_{\gamma} \omega_{\alpha}^2} - \frac{\gamma}{2} + \frac{n_1 n_3 \gamma}{2} + \frac{(1 - n_3)\gamma}{2} \cdot n_2 + \frac{\sin(\gamma - \alpha) + \sin \alpha}{2 X_{\gamma}(\omega_{\alpha}^2 - 1)} +$$

$$+ [K'_{1a} \sin \omega_{\alpha} n_3 \gamma^* + K'_{2a} (1 - \cos \omega_{\alpha} n_3 \gamma^*)] / 2\omega_{\alpha} +$$

$$+ (B'_{1a} \sin \omega_{\alpha} (1 - n_3) \gamma^* + B'_{2a} [1 - \cos \omega_{\alpha} (1 - n_3) \gamma^*]) / 2\omega_{\alpha};$$

- для четных диапазонов задержки

$$FU1 = -1 + n_1 + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_{\gamma} (\omega_{\alpha}^2 - 1)} + K'_{1a} \cos \omega_{\alpha} \gamma^* + K'_{2a} \sin \omega_{\alpha} \gamma^*;$$

$$FU2 = AK - \frac{\sin \alpha}{X_{\gamma} \omega_{\alpha}^2} + \frac{n_1 \cdot \gamma^*}{2} + \frac{\sin(\gamma - \alpha) + \sin \alpha}{2X_{\gamma} (\omega_{\alpha}^2 - 1)} +$$

$$+ [K'_{1a} \sin \omega_{\alpha} \gamma^* + K'_{2a} (1 - \cos \omega_{\alpha} \gamma^*)] / 2\omega_{\alpha}.$$

Получены выражения и численные значения коэффициентов, входящих в приведенные соотношения.

Поскольку в КПМ с полуактивным коммутатором можно осуществлять регулирование процесса перезаряда коммутирующих конденсаторов, он обладает дополнительным положительным свойством, заключающимся в достижении наперед заданного значения опережающего угла регулирования при изменении тока нагрузки в широких пределах. Изменение тока нагрузки может сопровождаться и изменением напряжения питающей сети, если технологический процесс требует применения автотрансформаторного регулирования.

Аналогичные исследования, базирующиеся на тех же подходах, связанных с точным решением систем уравнений, описывающих электромагнитные процессы в компенсационных преобразовательных системах, выполнены для КПМ с пассивным коммутатором.

Несмотря на то, что в этом преобразовательном модуле процесс коммутации строго одноступенчатый и физический характер электромагнитных процессов имеет свои особенности, соотношения, описывающие основные режимные характеристики, весьма подобны аналогичным соотношениям, полученным при исследовании КПМ с полуактивным коммутатором.

Комплекс выполненных в главе исследований расширил представления о возможных способах повышения энергетических характеристик преобразовательных устройств, заложил основы теории процессов в компенсационной преобразовательной системе с полуактивным коммутатором, показал возможность синтеза режимных характеристик при различной реализации коммутатора компенсирующего модуля, подтвердил гибкость компенсационных преобразовательных систем в отношении получения требуемых энергетических характеристик.

Во второй главе исследованы электромагнитные процессы в компенсационных преобразовательных блоках, в качестве которых рассматриваются каскадный блок (КБ) и параллельный блок (ПБ) с пассивным коммутатором - компенсационные преобразовательные системы, имеющие шестипульсный режим преобразования.

Показано влияние сдвига питающих ЭДС, на характер электромагнитных процессов в каскадном блоке, за счет изменения условий перезаряда конденсаторной батареи.

Если фазировка обмоток питающего трансформатора и схема подключения его в сеть выполнены таким образом, что одновременно вступают в работу вентили одной фазы т.е. U_1 и U_4 , U_3 и U_6 , U_5 и U_2 , то ток нагрузки будет проходить через обмотки трансформаторов и вентили, минуя конденсаторы. В этом случае конденсаторы перезаряжаться не будут и вентильный блок не будет иметь компенсационный режим работы.

При любой несогласованной работе вентилях, т.е. когда имеется промежуток времени, в течение которого указанные выше пары вентилях одновременно не работают, через конденсаторы проходит ток нагрузки (или его часть). Алгоритм включения вентилях, обусловленный сдвигом по фазе ЭДС вентиляхных обмоток, свидетельствует об изменении направления тока в конденсаторах и перезаряде последних. На конденсаторах создается переменное напряжение, которое прикладывается к вентилям, осуществляя в них опережающую коммутацию тока. Аналогичный процесс имеет место в компенсационном преобразовательном модуле с полуактивным коммутатором, если рассматривать его с точки зрения возможностей регулирования величины и формы тока конденсаторной батареи при ее перезаряде.

Вместе с тем процесс в каскадном блоке имеет и существенные отличия:

- при коммутации тока вентилями катодной части блока учитывается ЭДС вторичной обмотки питающего трансформатора;
- контур коммутации в анодной и катодной части блока имеет одинаковые параметры.

Последнее обстоятельство не следует, однако, воспринимать как равенство углов коммутации в вентилях анодной и катодной части компенсационного блока. При симметрии параметров возможны несимметричные рабочие режимы.

При сдвиге питающих ЭДС на половину периода форма коммути-

рующего напряжения наиболее близка к синусоиде и является симметричной по отношению к обеим группам вентилей. Именно этот режим работы каскадного блока проанализирован в главе.

Исследованиями коммутационных процессов в каскадном и параллельном блоках подчеркнуто, что при одинаковом алгоритме коммутации и одинаковой пульсности преобразования условия перезарядки конденсаторов компенсирующего модуля отличаются. Различной будет форма и частота коммутирующего напряжения: в каскадном блоке оно имеет частоту сети, а в параллельном - в два раза больше.

Коммутационные соотношения, которые предложено использовать при вычислении углов регулирования и коммутации в случае диодной реализации блоков и модулей отличается лишь коэффициентом, характеризующим схему реализации; подобное отличие имеется и в коммутационном соотношении, используемом для расчета режимов блоков и модулей при их тиристорной реализации в случае применения регулирования со стороны системы управления.

Установлено, что зависимость свободно устанавливающегося опережающего угла регулирования от тока нагрузки близка к линейной и при увеличении собственной частоты контура коммутации при одном и том же токе нагрузки опережающий угол регулирования больше; угол коммутации мало зависит от собственной частоты контура коммутации и возрастает по мере увеличения тока нагрузки, если рассматривать режимы работы при диодной реализации; в различных режимах работы при тиристорной реализации и регулировании со стороны системы управления, все характеристики $\gamma = f(X_{\gamma})$ имеют полюс.

Исследованиями электромагнитных процессов подтверждена целесообразность точного решения относительно тока коммутации, поскольку погрешность квадратичной коммутации имеет тенденцию к росту по мере повышения собственной частоты контура коммутации, а возможность синтеза режимных характеристик позволила предположить эффективность реализации компенсационной преобразовательной системы в виде блочно-модульного объекта.

В третьей главе представлены схемотехнические разработки компенсационных преобразовательных систем различного назначения, оптимизированных по параметрическому и режимному критерию, предусматривающему минимум капитальных затрат на реализацию в сочетании с минимумом эксплуатационных издержек.

В качестве составляющих параметрического критерия, учитывались:

- соответствие схемы преобразования уровню токов и напряжений потребителя;
- экономичное использование трансформаторного оборудования (оптимальное соотношение между установленной мощностью и мощностью преобразования);
- эффективное использование вентильных модулей;
- упрощение конструкции компенсирующего модуля.

Составляющие режимного критерия, включает:

- соответствие схемы преобразовательной системы и ее нагрузочной характеристики требованиям технологического цикла;
- удовлетворение требованиям энергоснабжающих организаций по коэффициентам мощности и несинусоидальности;
- оптимизацию режима работы конденсаторной батареи в отношении формы тока и коммутирующего напряжения;
- снижение уровня потерь энергии в основном и вспомогательном оборудовании.

Казалось бы, широкий диапазон значений выпрямленных напряжений (от десятков вольт до сотен киловольт) и выпрямленных токов (от единиц до нескольких десятков килоампер) предоставляет немалые возможности в части схемотехнических решений, ориентированных на реализацию в качестве источников питания постоянным током энергоемких потребителей. Однако их большая мощность и высокая стоимость, а также ощутимый уровень воздействия на питающую сеть, указанные возможности ограничивают необходимость учета нескольких установившихся положений.

Первое положение определяет конфигурацию системы, которая во всех случаях будет содержать:

- трансформаторные блоки и модули;
- вентильные блоки и модули;
- компенсирующие модули;
- вспомогательное оборудование:
 - а) уравнивающие реакторы;
 - б) регулирующие устройства;
 - в) измерительную аппаратуру.

Второе - тип преобразовательной системы. В настоящее время имеется проверенное практикой положение, согласно которому, при

выпрямленных напряжениях до 450 В более перспективным считается применение нулевых схем преобразования. При более высоких выпрямленных напряжениях рекомендуется применять трехфазную мостовую схему. Это положение имеет тенденцию к повышению уровня выпрямленного напряжения для преобразовательных систем нулевого типа при совершенствовании параметров полупроводниковых приборов.

Третье - пульсность преобразования. Режим двадцатичетырехпульсного преобразования считается оптимальным для мощных преобразовательных установок как в мировой, так и в отечественной практике. Объясняется это тем, что затраты на повышение пульсности преобразования с 12 до 24 покрываются и дают ощутимый экономический эффект за счет нескольких факторов:

- снижения потерь энергии и повышения КПД установки;
- снижения коэффициента пульсаций в выпрямленном напряжении;
- улучшения электромагнитной совместимости преобразовательной системы с сетью;
- упрощения конструкции и более эффективного использования компенсирующего модуля.

Более высокая пульсность преобразования достигается при больших затратах и не дает столь эффективной отдачи. По этой причине основные схемотехнические разработки автора в области компенсационных преобразовательных систем посвящены режиму двадцатичетырехпульсного преобразования. Девять схем компенсационных преобразовательных систем, являющихся личной разработкой, защищены авторскими свидетельствами. Одна компенсационная преобразовательная система разработана в соавторстве и также защищена авторским свидетельством. На рис.1 приведен один из вариантов двадцатичетырехпульсной компенсационной преобразовательной системы, представляющей совокупность четырех шестипульсных преобразователей, (что тоже соответствует мировым тенденциям в развитии аналогичных образцов силовой электроники), высокие энергетические характеристики которой достигаются за счет соответствующего алгоритма коммутации, обеспечиваемого сдвигом трехфазных систем ЭДС вентильных обмоток трансформаторного блока.

В главе введено понятие о базовой компенсационной преобразовательной системе (БКПС), под которой предложено подразумевать систему, имеющую симметричный режим работы основных модулей и характеризующуюся фиксированной пульсностью преобразования. Эта

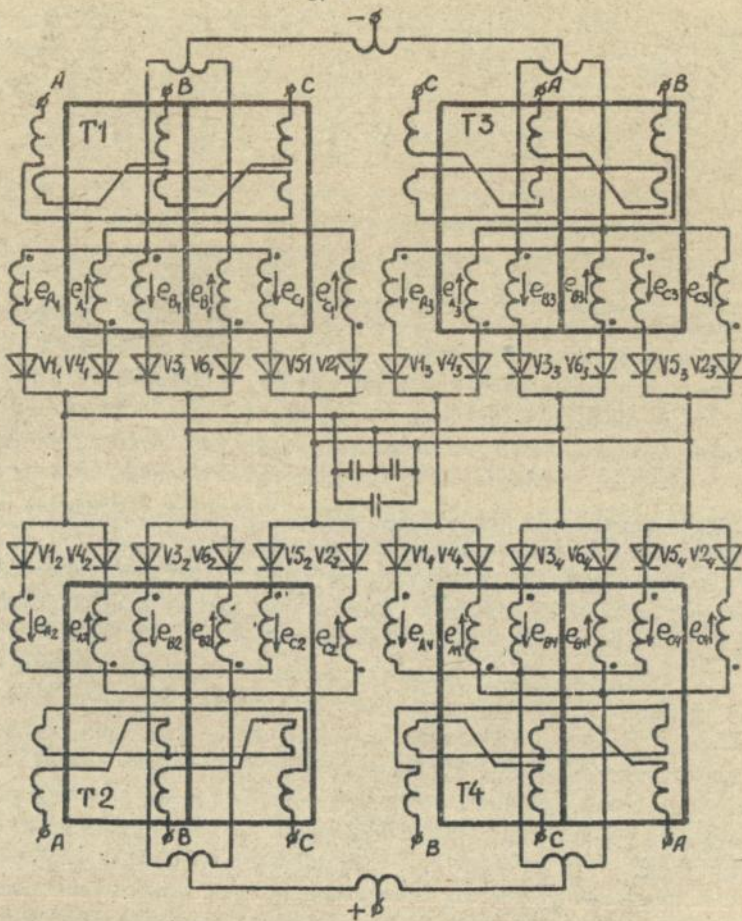


Рис. 1. Двадцатичетырехпульсная каскадная компенсационная преобразовательная система.

ЛНБ ім. В. Стефанива
АН України

преобразовательная система является основой симбиозных преобразовательных систем, которые условно могут быть представлены в виде обычной и компенсационной части, последняя и обеспечивает высокие энергетические характеристики в целом. Симбиозные или не базовые компенсационные преобразовательные системы (КПС) имеют более гибкие выходные характеристики, в частности можно получить заданное значение коэффициента мощности при регулировании выпрямленного напряжения в широких пределах (практически до нуля).

Описаны различные способы повышения энергетических характеристик компенсационных преобразовательных систем, включающие: схему трансформаторного блока, упрощение компенсирующего модуля и применение суммирующего трансформатора, изменение конфигурации КПС и др. Показана возможность получения дополнительных положительных эффектов за счет совместного действия нескольких факторов. Отмечены особенности электромагнитных процессов в различных компенсационных преобразовательных системах, показана перспективность их блочно-модульной реализации.

Приемлемый для производителя уровень технологичности подтверждается конструкторской проработкой двадцатичетырехпульсной КПС, изображенной на рис.1, выполненной на ЗПО "Преобразователь".

Четвертая глава посвящена дальнейшему развитию исследований режима независимой коммутации тока вентилями, на основании которого создана обобщенная теория процессов компенсационной преобразовательной системы, работающей в указанном режиме. Обобщение касается нулевых и каскадных КПС, а теория справедлива для диодных и тиристорных систем в режимах с любой пульсностью преобразования.

Получено универсальное выражение тока коммутации v -пульсной диодной компенсационной преобразовательной системы, работающей в режиме независимой коммутации тока вентилями:

$$i_{K\pi} = \frac{1}{2} + \frac{\cos(\beta - \alpha)}{K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} - \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} \right] \cos \omega_{or} \beta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{or} \cdot K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} \sin \omega_{or} \beta$$

Аналогичное универсальное уравнение тока коммутации в тиристорной компенсационной преобразовательной системе имеет вид:

$$i_{K\pi} = \frac{1}{2} + \frac{\cos(\beta - \alpha)}{K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} - \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} \right] \cos \omega_{or} \beta + \left(\frac{\omega_{or}}{1 + \cos \alpha} \right)^2 \left[\frac{2\sqrt{\epsilon}}{S_K} - \frac{\beta}{2} + \frac{\sin(\beta - \alpha) - \sin \alpha}{K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} \right] - \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{K_{\beta}(\omega_{or}^2 - 1)} \right] \frac{\sin \omega_{or} \beta}{1 + \cos \alpha} \sin \omega_{or} \beta$$

Несмотря на отличие форм коммутирующего напряжения в преобразовательных системах нулевого и каскадного типа, начальное значение коммутирующего напряжения, одна из важнейших его характеристик, с которой связана величина опережающего угла регулирования, может быть вычислена из соотношения

$$u_{cT}(0)_{*} = X_{T*} w_{os} \left(\frac{\gamma}{S_K} - \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{cT*} d\theta \right),$$

где S_K - схемный коэффициент, который равен:

$S_K=4.5$ - в компенсационном преобразовательном модуле с пассивным коммутатором;

$S_K=9$ - в шестипульсной КПС на базе параллельного блока;

$S_K=18$ - в двенадцатипульсной КПС на базе параллельного блока;

$S_K=3$ - в каскадном блоке;

$S_K=6$ - в двенадцатипульсной КПС на базе каскадного блока;

$S_K=12$ - в двадцатичетырехпульсной КПС на базе каскадного блока.

Во всех выражениях под w_{os} подразумевается собственная частота контура коммутации компенсационной преобразовательной системы.

Доказана универсальность коммутационных соотношений, используемых при расчетах диодных компенсационных преобразовательных систем:

$$FU1 = \cos(\gamma - \alpha) - \cos\alpha \cdot \cos w_{os} \gamma - \frac{1}{w_{os}} \sin\alpha \cdot \sin w_{os} \gamma - 0.5 X_{T*} (w_{os}^2 - 1) \times (1 + \cos w_{os} \gamma);$$

$$FU2 = \sin\alpha \cdot (1 - w_{os}^2 + \cos w_{os} \gamma - w_{os}^2 \cos \gamma) + \cos\alpha \cdot (w_{os}^2 \cdot \sin \gamma - w_{os} \cdot \sin w_{os} \gamma) + X_{T*} w_{os}^2 (w_{os}^2 - 1) \times (2 \pi / S_K - \gamma / 2 - \sin w_{os} \gamma / 2 w_{os}).$$

Применение этих соотношений показало, что расчет углов регулирования и коммутации диодных КПС с высокой пульсностью преобразования (12 и 24), имеет особенность, заключающуюся в получении неоднозначного решения. Это потребовало дополнительного исследования свойств функций FU1 и FU2, являющихся сложной зависимостью от нескольких взаимосвязанных факторов. При помощи метода численного анализа установлено, что закономерность изменения, представляемая коммутационным соотношением (функцией FU1), определяется собственной частотой контура коммутации и не зависит от типа преобразовательной системы и пульсности преобразования. Для коммутационного соотношения FU2 преобладающим является также указанный фактор, но зависимость от него выражена не столь определенно.

Этот вывод справедлив и для коммутационного соотношения

$$F_{\Sigma} = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_{\Sigma}(\omega_{os}^2 - 1)} - \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{X_{\Sigma}(\omega_{os}^2 - 1)} \right] \cos \omega_{os} \gamma + \\ + \left[\frac{\omega_{os}}{1 + \cos \alpha} \right] \left[\frac{2\pi}{3N} - \frac{\gamma}{2} + \frac{\sin(\gamma - \alpha) - \sin \alpha}{X_{\Sigma}(\omega_{os}^2 - 1)} \right] - \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{X_{\Sigma}(\omega_{os}^2 - 1)} \right] \frac{\sin \omega_{os} \gamma}{1 + \cos \alpha} \sin \omega_{os} \gamma,$$

применяемого при расчетах тиристорных компенсационных преобразовательных систем.

Для всех исследуемых КПС определен оптимальный диапазон значений собственной частоты контура коммутации, которая зависит от величины реактивности цепи переменного тока и емкости фаз батареи конденсаторов компенсирующего модуля. Для этого диапазона получены выражения мгновенных значений тока и напряжения всех элементов преобразовательных систем и выпрямленного напряжения.

Формула среднего значения выпрямленного напряжения, совместно с выражениями, позволяющими определять углы регулирования и коммутации, образуют систему уравнений, являющихся математическим описанием нагрузочной характеристики.

Для тиристорной БКПС указанная система уравнений имеет вид:

$$0 = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_{\Sigma}(\omega_{os}^2 - 1)} + K_{1s}'' \cos \omega_{os} \gamma + K_{2s}'' \sin \omega_{os} \gamma; \\ U_{дср} = A_{\gamma} \left(\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\gamma - \alpha)}{2} + X_{\Sigma} \omega_{os}^2 \left(\frac{2\pi}{3N^2} - \frac{\gamma}{N} + \frac{3\gamma^2}{8\pi} \right) + \right. \\ \left. + \left[\frac{\omega_{os}^2 \sin \alpha}{(\omega_{os}^2 - 1)} + X_{\Sigma} \omega_{os} K_{2s}'' \right] \left(\frac{3\gamma}{2\pi} - \frac{2}{N} \right) \right)$$

В диодной БКПС система будет состоять из трех уравнений:

$$0 = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_{\Sigma}(\omega_{os}^2 - 1)} + K_{1s}' \cos \omega_{os} \gamma + K_{2s}' \sin \omega_{os} \gamma; \\ \sin \alpha = X_{\Sigma} \omega_{os}^2 \left[\frac{\pi}{3N} - \frac{\gamma}{4} - \frac{\sin \omega_{os} \gamma}{4 \omega_{os}} + \frac{\sin \alpha (\cos \omega_{os} \gamma - 1)}{2 \omega_{os}^2 X_{\Sigma} (\omega_{os}^2 - 1)} + \right. \\ \left. + \frac{\sin(\gamma - \alpha) \sin \alpha - \frac{1}{2} \cos \alpha \sin \alpha}{2 X_{\Sigma} (\omega_{os}^2 - 1)} \right]; \\ U_{дср} = A_{\gamma} \left(\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\gamma - \alpha)}{2} + X_{\Sigma} \omega_{os}^2 \left(\frac{2\pi}{3N^2} - \frac{\gamma}{N} + \frac{3\gamma^2}{8\pi} \right) + \right. \\ \left. + \sin \alpha \cdot \left(\frac{3\gamma}{2\pi} - \frac{2}{N} \right) \right)$$

Два первых уравнения используются для вычисления углов ре-

гулирования и коммутации, которые затем, вместе с другими характеристиками компенсационной преобразовательной системы, подставляются в третье, откуда и вычисляется среднее значение выпрямленного напряжения.

Получены выражения для определения постоянных, используемых в расчетах, приведены значения коэффициента типа схемы А, который равен 1 и 0.5 в преобразовательных системах каскадного типа и нулевого соответственно, и значения коэффициента схемы $N = S_K / 3$.

Решена задача по определению критических значений углов регулирования и коммутации для диапазона нагрузок, при которых угол коммутации еще не достиг своего предельного значения.

В соответствии с положениями энергетической теории компенсационных преобразователей, разработанной акад. И.М.Чиженко, впервые получены оптимизационные уравнения режима независимой коммутации, используя которые, можно определить основные характеристики КПС, соответствующие условиям генерирования наибольшей реактивной мощности в сеть.

Выявлены энергетические возможности базовых компенсационных преобразовательных систем нулевого и каскадного типов. Впервые доказано, что эффективная работа с генерированием реактивной мощности для БКПС нулевого типа возможна лишь в режиме независимой коммутации, а базовые компенсационные преобразовательные системы каскадного типа способны генерировать реактивную мощность не только в указанном режиме, но и при наложении коммутаций через конденсаторы.

Пятая глава посвящена созданию теории процессов компенсационной преобразовательной системы, работающей в режиме наложения коммутаций через конденсаторы. Они имеют место при достижении углом коммутации значения $\pi/3 \cdot N$ и исследованы, в соответствии с выводами предыдущей главы, применительно к 12-и и 24-х пульсным преобразовательным системам каскадного типа.

В этом режиме процесс коммутации идет в три этапа, что иллюстрируется рис.2, причем наложение коммутаций имеет место только на первом и третьем этапах, а на втором - коммутация остается независимой.

Система уравнений для начального (1) этапа коммутации в первом контуре и заключительного (3) - во втором, имеет вид:

$$\omega L \frac{di_{K1(t)}}{d\vartheta} + \omega L \frac{d}{d\vartheta} (i_{K1(t)} - I_d) - \left[\frac{1}{\omega C_1} \int_0^{\vartheta} i_{c51} d\vartheta + u_{c1}(0) \right] = \sqrt{3} \cdot E_m \sin(\vartheta - \alpha);$$

$$\omega L \frac{di_{K2(t)}}{d\vartheta} + \omega L \frac{d}{d\vartheta} (i_{K2(t)} - I_d) + \left[\frac{1}{\omega C_2} \int_0^{\vartheta} i_{c52} d\vartheta + u_{c2}(0) \right] = \sqrt{3} \cdot E_m \sin(\vartheta - \alpha + \pi/N*3).$$

На втором этапе коммутация имеет место только в первом контуре и описывается одним уравнением такого же вида, как и независимая коммутация, исследованная в предыдущей главе:

$$\omega L \frac{di_{K1(t)}}{d\vartheta} + \omega L \frac{d}{d\vartheta} (i_{K1(t)} - I_d) - \left[\frac{1}{\omega C_1} \int_0^{\vartheta} i_{c51} d\vartheta + u_{c1}(0) \right] = \sqrt{3} \cdot E_m \sin(\vartheta - \alpha).$$

Второй этап коммутации заканчивается при $\vartheta = \pi/N*3$. Затем идет третий этап коммутации, длительность которого $\Delta\vartheta = \vartheta^* - \pi/N*3$. Он характеризуется наложением коммутаций через конденсаторы и отличается от первого этапа коммутации тем, что завершающий этап коммутации в первом контуре совпадает с начальным - в третьем. Система уравнений для третьего этапа коммутации имеет вид:

$$\omega L \frac{di_{K1(t)}}{d\vartheta} + \omega L \frac{d}{d\vartheta} (i_{K1(t)} - I_d) - \left[\frac{1}{\omega C_1} \int_0^{\vartheta} i_{c51} d\vartheta + u_{c1}(0) \right] = \sqrt{3} \cdot E_m \sin(\vartheta - \alpha);$$

$$\omega L \frac{di_{K2(t)}}{d\vartheta} + \omega L \frac{d}{d\vartheta} (i_{K2(t)} - I_d) + \left[\frac{1}{\omega C_2} \int_0^{\vartheta} i_{c52} d\vartheta + u_{c2}(0) \right] = \sqrt{3} \cdot E_m \sin(\vartheta - \alpha - \pi/N*3)$$

Во всех уравнениях за начало отсчета выбран момент начала коммутации с U5 на U1 (рис.1).

Совместное решение, использующее совокупность математических методов, дает закон изменения тока коммутации в виде трех уравнений следующего вида:

$$i_{K1} = 1 + \frac{(\omega_{op}^2 - 1) \cos(\vartheta - \alpha) - 0.5 \cdot \omega_{op}^2 \cos(\vartheta - \alpha + \pi/3N)}{(1 - 2\omega_{op}^2 + 0.75\omega_{op}^4) X_{r\theta}} + A_{1\theta} \cos \omega_{op}' \vartheta + A_{2\theta} \sin \omega_{op}' \vartheta + A_{3\theta} \cos \omega_{op}'' \vartheta + A_{4\theta} \sin \omega_{op}'' \vartheta;$$

$$i_{K2} = 0.5 + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{X_{r\theta} (\omega_{op}^2 - 1)} + K_{r\theta} \cos \omega_{op}' \vartheta + K_{2\theta} \sin \omega_{op}' \vartheta;$$

$$i_{K3} = \frac{(\omega_{op}^2 - 1) \cos(\vartheta - \alpha + \pi/3N) - 0.5 \omega_{op}^2 \cos(\vartheta - \alpha)}{(1 - 2\omega_{op}^2 + 0.75\omega_{op}^4) X_{r\theta}} - A_{1\theta} \cos \omega_{op}' \vartheta - A_{2\theta} \sin \omega_{op}' \vartheta + A_{3\theta} \cos \omega_{op}'' \vartheta + A_{4\theta} \sin \omega_{op}'' \vartheta.$$

Коммутационное напряжение также представляется в виде со-

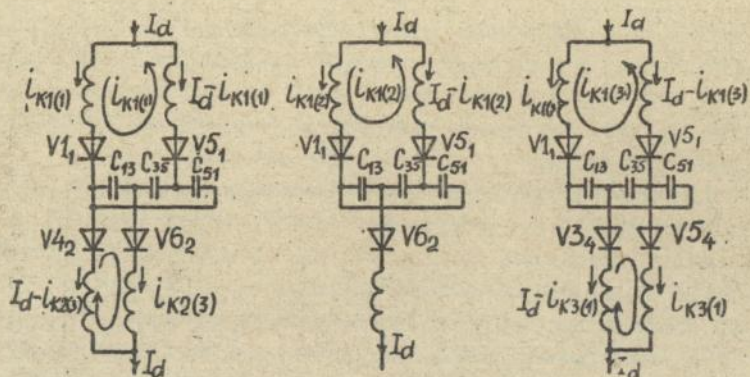


Рис. 2. Этапы коммутации

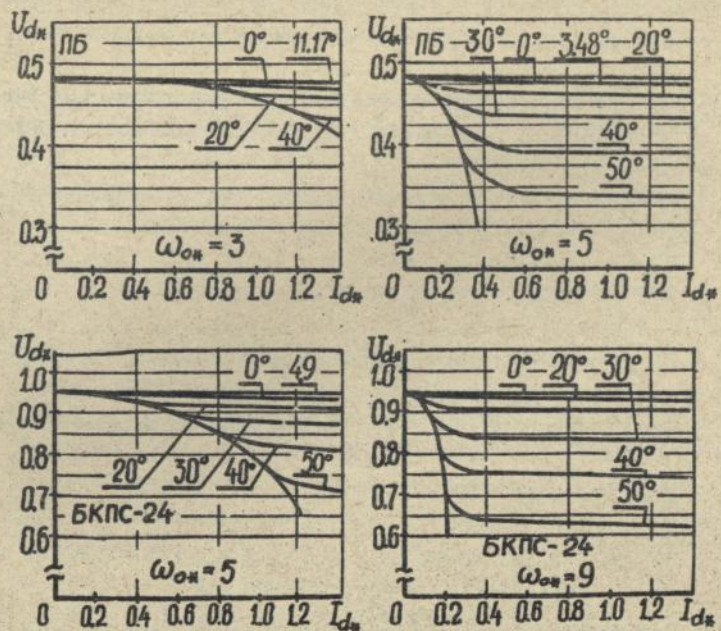


Рис. 3. Нагрузочные характеристики

вокупности трех уравнений, а напряжение коммутирующих конденсаторов, которое в двенадцатипульсовой преобразовательной системе имеет двухкратную частоту, а в двадцатичетырехпульсовой - четырехкратную, как и в режиме независимой коммутации, на половине периода своей частоты состоит из шести участков.

Получены коммутационные соотношения (функции FU1 и FU2), которые используются при расчетах режимов работы диодных компенсационных преобразовательных систем, и функция FU3 - для тиристорных. Выражения получились достаточно громоздкими и ограниченный объем автореферата не позволяет их привести.

Для исследуемых преобразовательных систем определен оптимальный диапазон значений собственной частоты контура коммутации и связанных с ней частот $\omega'_* = \sqrt{0.5} \cdot \omega_{os}$ и $\omega''_* = \sqrt{1.5} \cdot \omega_{os}$, соответствующих более высокому порядку контура коммутации при наложении коммутаций, для которого характеристическое уравнение является биквадратным. Для этого диапазона получены выражения мгновенных значений тока и напряжения всех элементов преобразовательных систем и выпрямленного напряжения.

Получено среднее значение выпрямленного напряжения, используемое при расчете нагрузочной характеристики:

$$U_{dвф} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\gamma - \alpha)}{2} + X_{\gamma} \omega_{os}^2 \left(\frac{\pi}{2N} - 3 \cdot \gamma_*^2 / 2N + 9 \cdot \gamma_*^4 / 8\pi \right) +$$

$$+ 3(F05(0.5 - 1.5F05) [\cos(\pi/3N - \alpha) - \cos(\gamma - \alpha) + \cos(\gamma - \alpha + \pi/3N) - \cos \alpha] / F01 + X_{\gamma} [A_{1\gamma} (1 - \cos \omega_{os}'(\gamma - \pi/3N)) - A_{2\gamma} \sin \omega_{os}'(\gamma - \pi/3N)]) / \pi -$$

$$- \frac{3\omega_{os}^2 \gamma_*}{\pi} \left\{ \frac{[0.5(N-1) - 1.5F05] [\sin \alpha + (3-N) \sin(\pi/3N - \alpha)]}{F01} + \right.$$

$$+ (3-N)(N-1) \sin(\pi/3N - \alpha) / 2F \left. \right\} +$$

$$+ \omega_{os}^2 \{ [0.5(N+1) - 3F05] \sin \alpha - [(N-2) - (N-3) \cdot 1.5F05] \sin(\pi/3N - \alpha) \} / NF01 -$$

$$- \omega_{os}^2 (N-2) \sin(\pi/3N - \alpha) / 4F + 6X_{\gamma} \gamma_*^2 [0.5(4-N) \omega_{os}' A_{2\gamma} + 0.5(N-2) \omega_{os}'' A_{4\gamma} +$$

$$+ 0.25(N-3)(N-1) \omega_{os}' (K_{1\gamma} \sin \omega_{os}' \pi/3N - K_{2\gamma} \cos \omega_{os}' \pi/3N)] / \pi -$$

$$- X_{\gamma} \{ [(8-N) \omega_{os}' A_{2\gamma} / N + (N-1) \omega_{os}'' A_{4\gamma} + (N-2) \omega_{os}' (K_{1\gamma} \sin \omega_{os}' \pi/3N - K_{2\gamma} \cos \omega_{os}' \pi/3N)] / N \}.$$

Подобно режиму независимой коммутации, при помощи численного анализа, получены оптимизационные уравнения режима наложения коммутаций через конденсаторы, позволяющие определить основные режимные характеристики компенсационной преобразовательной системы, соответствующие условиям генерирования наибольшей реактивной мощности в сеть.

Научные результаты настоящей главы, совместно с обобщенной

теорией режима независимой коммутации, являются теоретической базой для исследования компенсационных преобразовательных систем, исходя из единых методических позиций. Они перспективны для анализа режима повторной работы вентилей и процессов в режимах со сложным алгоритмом коммутации.

Исследованиями доказано, что особенности электромагнитных процессов в базовой компенсационной преобразовательной системе определяются, в основном, не ее типом, а собственной частотой контура коммутации.

В шестой главе, посвященной гармоническому анализу базовой компенсационной преобразовательной системы, дальнейшее развитие получили исследования: коммутационных процессов, динамики изменения мгновенных значений токов и напряжений отдельных элементов БКПС, условий эксплуатации блоков и модулей, электромагнитной совместимости преобразовательной системы с сетью.

Анализ аналитического выражения, представляющего ток коммутации, показывает, что ее гармонический состав содержит постоянную составляющую, первую гармонику с начальной фазой, равной свободно устанавливающемуся опережающему углу регулирования в диодной КПС или углу управления, задаваемому системой управления тиристорной КПС, и только одну высшую гармонику, номер которой равен собственной частоте контура коммутации, если частота контура - целое число. Если же $\omega_{\text{с.к}}$ число не целое, гармонический состав кривой содержит весь спектр гармоник, амплитуды которых убывают по мере повышения их частоты.

Из этого следует, что ток коммутации - часть синусоиды, частота которой равна собственной частоте контура коммутации.

В диодной компенсационной преобразовательной системе кривая $i_{\text{к.к}}(\vartheta)$ при $\vartheta = 0$ проходит через нулевое значение и начинает возрастать. В тиристорной КПС, точка, в которой функция, представляющая ток коммутации, изменяет знак своего приращения, сдвинута вперед и при $\vartheta = 0$ кривая $i_{\text{к.к}}(\vartheta)$ уже возрастает.

Это обстоятельство объясняет два момента:

- почему в тиристорной системе, при прочих равных условиях угол коммутации меньше, чем в диодной;
- почему отличается форма коммутационного выброса в БКПС, при диодной и тиристорной реализации последней.

Расчет величины угла коммутации в исследуемых базовых компенсационных преобразовательных системах показывает: при малой соб-

ственной частоте контура коммутации, когда и опережающий угол регулирования измеряется единицами эл. градусов, отличие между величиной угла коммутации в мостовом выпрямителе и в БКПС не превышает нескольких процентов; при повышении собственной частоты контура коммутации, угол коммутации уменьшается, и может почти в два раза отличаться от угла коммутации мостового выпрямителя.

Доказано, что в режимах работы диодной КПС при малых значениях собственной частоты контура коммутации, форма тока коммутации близка к квадратичной аппроксимации. При больших значениях собственной частоты контура коммутации и в режимах работы тиристорной БКПС, когда имеется задержка коммутации за счет системы управления, форма тока коммутации становится более линейной. Из этого следует, что в любой компенсационной преобразовательной системе при любом режиме ее работы граничными аппроксимирующими функциями для тока коммутации можно считать квадратичную и линейную. Рассчитана закономерность изменения амплитуд и начальных фаз наиболее существенных гармоник тока вентиля, в зависимости от величины угла коммутации. Приведены данные, позволяющие судить о величине погрешности, которая может быть допущена, если применяется аппроксимация тока коммутации какого-либо вида.

Результаты численного анализа показывают связь между гармоническим составом тока вентиля и тока сетевой обмотки трансформаторного блока а также иллюстрирует динамику изменения воздействия преобразовательной системы на питающую сеть при изменении тока нагрузки и при введении регулирования со стороны системы управления в тиристорных КПС.

При исследовании коммутационного напряжения показана аналогия с трехфазным мостовым выпрямителем, где оно является частью синусоиды с относительным значением амплитуды 0.5 и длительностью γ .

В базовой компенсационной преобразовательной системе функция $u_x(\vartheta)$ значительно сложнее; при отсутствии наложения коммутаций напряжению коммутации соответствует выражение:

$$u_{x*} = -\frac{\sin(\vartheta - \alpha)}{2(\omega_{ox}^2 - 1)} + \frac{\omega_{ox}^2 K_{1x}}{2} - K_{1x} \sin \omega_{ox} \vartheta + K_{2x} \cos \omega_{ox} \vartheta,$$

а при наложении коммутаций через конденсаторы - совокупность трех соотношений:

$$u_{x1*} = 0.5[F05\sin(\vartheta - \alpha + \pi/3N) - F\sin(\vartheta - \alpha)]/F01 - \\ - X_{\gamma*}[\omega'_* (A_{1*}\sin\omega'_*\vartheta - A_{2*}\cos\omega'_*\vartheta) + \omega''_* (A_{3*}\sin\omega''_*\vartheta - A_{4*}\cos\omega''_*\vartheta)]/2;$$

$$u_{x2*} = -0.5[\sin(\vartheta - \alpha)/F + X_{\gamma*}\omega''_* (K_{1*}\sin\omega''_*\vartheta - K_{2*}\cos\omega''_*\vartheta)];$$

$$u_{x3*} = 0.5[F05\sin(\vartheta - \alpha) - F\sin(\vartheta - \alpha + \pi/3N)]/F01 + \\ + X_{\gamma*}[\omega'_* (A_{1*}\sin\omega'_*\vartheta - A_{2*}\cos\omega'_*\vartheta) - \omega''_* (A_{3*}\sin\omega''_*\vartheta - A_{4*}\cos\omega''_*\vartheta)]/2.$$

Исследование формы кривой коммутационного напряжения различных диодных БКПС позволило сделать следующий вывод: в базовой компенсационной преобразовательной системе кривую $u_{x*}(\vartheta)$ можно аппроксимировать синусоидой, характеризующейся:

- частотой, равной собственной частоте контура коммутации;
- начальной фазой, равной нулю;
- амплитудой

$$U_{mx*} = \frac{\omega_{o*} \cdot \cos\alpha - \sin(2\frac{\pi}{2\omega_{o*}} - \alpha)}{2(\omega_{o*}^2 - 1)} - \frac{\omega_{o*} X_{\gamma*}}{4}$$

Коммутационное напряжение представляет собой начальную часть этой кривой в интервале от 0 до $\vartheta = \gamma$.

Расчеты показывают, что при $\omega_{o*} \gg 3$, амплитуда кривой $u_{x*}(\vartheta)$ на периоде частоты сети изменяется мало. При меньших частотах контура коммутации, указанному выше условию удовлетворяет первый полупериод кривой $u_{x*}(\vartheta)$.

Характеризуя форму коммутационного напряжения тиристорных БКПС при наличии задержки момента включения вентиля в работу за счет системы управления, отметим, что она зависит от двух факторов: собственной частоты контура коммутации и величины задержки относительно естественной емкостной коммутации. Достаточно обоснованным является предположение, что в управляемых режимах тиристорных БКПС коммутационный выброс по форме близок к прямоугольному.

Подчеркнуто, что приведенные характеристики формы коммутационного напряжения не зависят от типа преобразовательной системы.

В седьмой главе исследована роль вентиля в энергетических процессах в различных преобразовательных системах. Примененная методика базируется на гармоническом анализе. Разложение в ряд Фурье выполнено с использованием аналитических выражений и гра-

фо-аналитическим способом. Все исследование разделено на две части.

Сначала рассмотрен режим мгновенной коммутации и исследовано влияние управления на энергетические процессы в вентилях различных базовых компенсационных преобразовательных систем, что обосновано стремлением исключить из анализа факторы, обусловленные влиянием коммутационных процессов.

При анализе кривая обратного напряжения вентиля и его тока представлялись в виде суммы двух составляющих: трансформаторной и конденсаторной. Разложение в ряд Фурье применительно к компенсационному каскадному блоку показало, что первая гармоника конденсаторной добавки к обратному напряжению вентиля имеет начальную фазу, равную 120 эл. град., такую же, как и первая гармоника конденсаторной составляющей в токе вентиля.

Конденсаторная добавка к току вентиля в своем спектральном составе не содержит нечетно-третьих гармоник, в то время как в конденсаторной добавке к обратному напряжению вентиля отсутствуют четные гармоники, кроме кратных шести. Таким образом при вычислении мощности следует учитывать канонические гармоники шестифазного режима и гармоники кратные шести. Гармоники тока и напряжения последних находятся в противофазе, т.е. их активная мощность отрицательная. Для остальных гармоник наблюдается чередование между совпадением по фазе гармоник тока и напряжения (для $k=5, 11, 17, 23 \dots$) и противофазой для $k=7, 13, 19, 25 \dots$

Изложенное позволяет высказать предположение, что активная мощность конденсаторной добавки к кривым тока и обратного напряжения вентиля каскадного блока свидетельствует об "активном воздействии" коммутирующего звена на электромагнитный процесс в вентиле и во всей компенсационной преобразовательной системе в целом.

Под "активным воздействием" подразумевается влияние на электромагнитный процесс компенсационной преобразовательной системы, аналогичное тому, которое оказывает система управления на процесс в обычном выпрямителе. Это формальная аналогия, поскольку за счет системы управления можно лишь задержать момент коммутации, а за счет коммутирующего напряжения (конденсаторной добавки) - сдвинуть вперед.

Расчет для параллельного блока показал, что конденсаторная добавка к кривой обратного напряжения содержит все четные гармо-

ники, а из нечетных - только кратные трем. В то же время конденсаторная добавка к току вентиля содержит все гармоники, кроме нечетно-третьих. Поэтому конденсаторная добавка к вентилю имеет мощность всех четных гармоник. Причем четные гармоники тока и напряжения, кратные шести, находятся в противофазе, а все остальные - совпадают по фазе.

Этот результат совпадает с полученным при анализе каскадного блока: конденсаторная добавка к току и обратному напряжению вентиля характеризуется только активной мощностью.

Столь же подробно исследовано влияние на электромагнитные процессы в вентиле задержки коммутации со стороны системы управления, если преобразовательная система - тиристорная.

Гармонический состав кривых, характеризующий различные режимы работы вентиля параллельного блока и динамику процесса, сравнение его с процессами в трехфазном мостовом выпрямителе и в каскадном блоке, позволили сформулировать такой вывод.

Понятие о неуправляемом компенсационном выпрямителе, применяемое ранее в научных исследованиях, является не совсем строгим, поскольку компенсационная преобразовательная система не может быть неуправляемой: при диодной реализации она управляется коммутирующим напряжением конденсаторов и является моноуправляемой, при тиристорной (в случае задержки коммутации за счет системы управления) - биуправляемой. В этом смысле более точным будет понятие о диодной или тиристорной реализации, применяемое в диссертационной работе.

Этот вывод подтвержден исследованиями энергетических процессов в вентилях других базовых компенсационных преобразовательных систем.

Учитывая идентичность энергетических процессов в вентилях всех исследуемых БКПС, анализ процессов с учетом длительности коммутации выполнен применительно к обычному нулевому выпрямителю, компенсационному параллельному блоку и двенадцатипульсной преобразовательной системе каскадного типа.

Как в управляемом нулевом выпрямителе, так и в неуправляемом, баланс по активной мощности в вентиле при учете длительности коммутации, соблюдается, а по реактивной - нет. Энергетический процесс в вентиле характеризуется реактивной мощностью, положительной на первой гармонике, и отрицательной - на высших, которые представляют собой канонические гармоники шестипульсного

режима.

Указанная реактивная мощность является мощностью коммутации и сдвига. Это подтверждается данными расчетов, где представлен гармонический анализ коммутационного напряжения обычного мостового выпрямителя и расчет мощности отдельных гармоник для тех же условий, при которых анализируется энергетический процесс в вентиле. Сравнение показывает, что мощность высших гармоник вентиля - это мощность коммутации.

Мощность первой гармоники вентиля состоит из мощности коммутации, как и на высших гармониках, а также из мощности сдвига, как за счет коммутации, так и за счет воздействия системы управления.

Для базовых компенсационных преобразовательных систем показано, что при учете длительности коммутационного процесса, в мощности вентиля появляются составляющие, представляющие собой мощность коммутации и мощность сдвига реактивного характера. Причем, независимо от пульсности преобразования, в вентилях мощность на высших гармониках, являющихся каноническими гармониками шестипульсного режима, в точности совпадает с мощностью коммутации на этих же гармониках. Для остальных высших гармоник, так называемая реактивная мощность является мощностью сдвига, а на первой гармонике имеется и реактивная мощность коммутации, и мощность сдвига.

Отмечено также, что энергетические процессы в вентиле каскадного блока отличаются от процессов в вентиле других КПС.

В восьмой главе получены технические характеристики блоков, образующих компенсационную преобразовательную систему, показана динамика их изменения в зависимости от режима работы, составлен баланс мощности БКПС.

Для вентиляльного блока дана также оценка сформировавшемуся в технической литературе мнению относительно более тяжелых условий его работы в компенсационных выпрямителях. Отмечено, что учет только одного этого фактора, в отрыве от совокупности всех других условий работы преобразовательных систем компенсационного типа, приводит к искаженному восприятию последних, что является одной из причин, сдерживающих внедрение в промышленность данного вида техники. Вентильный блок КПС - элемент многофункциональный, и одна из его функций заключается в отделении компенсирующего модуля от сети.

Если перезаряд батареи коммутирующих конденсаторов осуществляется токами на частоте сети, как это имеет место в каскадном блоке, разделять компенсирующее устройство и сеть нет необходимости. В таком случае вентильный блок имеет облегченный режим работы в смысле величины обратного напряжения, что и проиллюстрировано расчетами и кривыми.

Во всех остальных БКПС коммутирующее напряжение двух- или четырехкратное по отношению к частоте напряжения питающей сети. Естественно, что в таком случае конденсаторы не могут быть включены в сеть непосредственно, а только через какое-либо согласующее звено, которым, "по совместительству", и является вентильный блок. При этом его напряжение может возрасти в два и более раз, но только в том случае, когда БКПС генерирует в сеть реактивную мощность, и такую преобразовательную систему можно представить как совокупность двух установок: выпрямителя и компенсатора. Последний использует все основное оборудование выпрямителя и может быть диодным, а не обязательно тиристорным.

В расчете трансформаторного блока обращено внимание, что суммарная активная мощность его сетевых обмоток равна суммарной активной мощности вентильных обмоток, которая, в свою очередь, равна активной мощности нагрузки. Равенство полных мощностей не наблюдается из-за мощности искажения и мощности коммутационных выбросов в вентильных обмотках. Расчет выполнен для нескольких режимов, в одном из которых получено такое отношение полной мощности обмоток к мощности нагрузки: для вентильной обмотки $S_2/P_d = 1.50854$, а для сетевой - $S_1/P_d = 1.01951$. Эти значения практически совпадают с часто приводимыми в технической литературе значениями 1.48 и 1.045 соответственно для вентильной и сетевой обмоток, вычисленных применительно к режиму мгновенной коммутации.

Считаем необходимым подчеркнуть, что соотношение между мощностью обмоток трансформаторного блока и мощностью нагрузки в БКПС зависит от режима работы последней. Определяющей в этом вопросе является величина реактивной мощности.

В случае компенсированного режима, когда сдвиг по фазе между током и напряжением на входе преобразовательной системы близок к нулю, мощность трансформаторного блока будет минимальной по отношению к мощности преобразования, поскольку сетевая обмотка разгружается от реактивных токов.

Подобный режим в обычных преобразователях невозможен, поскольку коммутационный процесс всегда приводит к увеличению мощности как сетевой, так и вентиляльной обмотки за счет реактивной составляющей.

В главе выполнен расчет и построение нагрузочных характеристик всех исследуемых в настоящей работе базовых компенсационных преобразовательных систем (некоторые из них для иллюстрации приведены на рис.3).

Начальный участок всех характеристик соответствует диодной реализации компенсационной преобразовательной системы, или тиристорной, если за счет системы управления задержки опережающей емкостной коммутации нет. В этом случае характеристика является падающей, а крутизна ее наклона зависит от собственной частоты контура коммутации.

При задержке коммутации в тиристорной БКПС, ее нагрузочная характеристика становится более жесткой, и в некоторых режимах почти прямолинейной. Переход от начального участка к близкого к прямолинейному происходит плавно и вид нагрузочной характеристики при этом зависит от величины задержки момента коммутации за счет системы управления.

Как отмечено ранее, во всех базовых компенсационных преобразовательных системах можно осуществить режим параметрической стабилизации выпрямленного напряжения, заключающийся во взаимосвязанном выборе собственной частоты контура коммутации и угла управления силовых тиристоров.

При этом выпрямленное напряжение будет наиболее высоким, что свидетельствует о компенсации реактивной мощности во всем диапазоне нагрузок.

Исследования энергетических процессов в базовых компенсационных преобразовательных системах показали, что наиболее высокая эффективность использования конденсаторной батареи может быть достигнута в том случае, когда компенсирующий модуль является звеном преобразовательной системы и максимально приближен к вентиляльному блоку.

Вопрос этот достаточно сложный и многогранный, поскольку эффективность использования конденсаторов в КМ компенсационной преобразовательной системы определяется рядом схмотехнических и режимных факторов.

К числу наиболее изученных относится вопрос о снижении

установленной мощности конденсаторной батареи за счет повышения частоты тока, осуществляющего ее перезаряд.

Исследование режимных факторов позволяет сформулировать положение, согласно которому в КПС, вентильный блок которой получает реактивную энергию на более высоких частотах, чем отдает, создаются условия для дополнительного генерирования реактивной мощности.

Именно по этой причине энергетический процесс в каскадном блоке, где коммутирующее напряжение имеет частоту сети, подобен процессу в обычных выпрямителях с конденсаторами в цепи переменного тока. Возможность дополнительного генерирования реактивной мощности не следует приписывать какому-либо одному элементу, например вентильному блоку или конденсаторной батарее. Это - свойство преобразовательной системы. Эффект умножения мощности достигается за счет совместной работы всех ее элементов, режим которых взаимосвязан.

Весь поток реактивной энергии проходит через вентильный блок только в том случае, когда частота коммутирующего напряжения отличается от частоты сети. В таких режимах вентильный блок является элементом, разделяющим компенсирующий модуль и сеть.

Имеется еще аспект, относящийся к эффективности использования конденсаторов компенсирующего модуля, который трудно оценить количественно. Он заключается в возможности формирования различных нагрузочных характеристик при реализации преобразовательной системы как совокупности компенсационных и обычных блоков и модулей, т.е. при блочно-модульной реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

При выполнении диссертационной работы достигнуты следующие основные результаты:

1. Дальнейшее развитие получили исследования компенсационных преобразователей, составившие обобщенную теорию процессов компенсационной преобразовательной системы, работающей в режиме независимой коммутации тока вентилями, справедливую для КПС нулевого и каскадного типов при любой пульсности преобразования и симбиозных преобразовательных систем при исследовании процессов в их базовых частях. На основе указанной теории изучены режимные и параметрические характеристики преобразовательных систем и до-

казано, что для исследования глубоких режимов преобразовательных систем необходимо создание новой теории, основанной на принципе многоэтапной одноступенчатой коммутации.

2. Получены оптимизационные соотношения по локальному критерию, предусматривающему генерирование в сеть максимальной реактивной мощности, подтвердившие целесообразность применения компенсационных преобразовательных систем каскадного типа в режимах работы при наложении коммутаций через конденсаторы.

На основе этих соотношений выполнена оптимизация режима работы преобразовательной подстанции Сумгаитского алюминиевого завода, позволившая существенно улучшить ее энергетические показатели.

3. Исследована многоэтапная одноступенчатая коммутация и создана теория режима наложения коммутации через конденсаторы применительно к 12-и и 24-х пульсным компенсационным преобразовательным системам каскадного типа, на базе которой получены характеристики их элементов, исследованы режимные и нагрузочные характеристики, определены энергетические возможности и получены оптимизационные соотношения по условию генерирования максимальной реактивной мощности в сеть.

4. Получены соотношения, являющиеся основой теории процессов преобразовательной системы, построенной на предложенном способе перезаряда коммутирующих конденсаторов при помощи тиристорного (полуактивного) коммутатора. Посредством результатов анализа коммутирующего напряжения показано, что в преобразовательной системе с полуактивным коммутатором можно получить наперед заданное значение опережающего угла регулирования при изменении нагрузки в широких пределах, даже если этот процесс будет сопровождаться изменением напряжения вентильных обмоток питающего трансформатора, что нередко имеет место в соответствии с требованиями технологического цикла.

5. Выполнен анализ и синтез коммутационных соотношений, которые предложено использовать при исследовании компенсационных преобразовательных систем, показаны их свойства и особенности применения при высокой пульсности преобразования и больших значениях собственной частоты контура коммутации, а также при диодной и тиристорной реализации.

6. Исследование коммутационных процессов и практически реализуемого алгоритма коммутации привели к дополнительному разви-

тив принципа построения компенсационных преобразовательных систем, как объекта блочно-модульной реализации, позволившему осуществить оптимизацию их возможных вариантов по обобщенному критерию, включающему в себя экономичность и технологичность. На основе указанного принципа предложена серия оригинальных схемотехнических решений компенсационных преобразовательных систем, предназначенных для реализации в виде источников питания энергоемких потребителей на постоянном токе.

7. Гармонический анализ всех элементов блоков и модулей компенсационной преобразовательной системы углубил физические представления о процессах в ней и использован при исследовании электромагнитной совместимости преобразовательной системы с сетью, что нашло практическое применение при разработке и расчете фильтров для защиты мощных обрабатывающих центров с ЧПУ зарубежного производства на Волгодонском ПО "Атоммаш".

8. Разработана методика анализа энергетических процессов в вентиле и в компенсационной преобразовательной системе в целом, основанная на методе гармонического анализа. Показано, что применяемое в теории компенсационных преобразователей понятие о неуправляемом выпрямителе, является не очень строгим, поскольку даже при диодной реализации, КПС не может быть неуправляемой, т.к. напряжение коммутирующих конденсаторов оказывает на ее вентильный блок воздействие, которое по своему физическому смыслу весьма подобно воздействию системы управления на вентильный блок обычного выпрямителя. При тиристорной реализации и применении задержки опережающей емкостной коммутации со стороны системы управления, вентильный блок подвергается двойному управлению.

9. Синтез режимных и параметрических характеристик, осуществленный на базе обобщенной теории процессов компенсационной преобразовательной системы при независимой коммутации и при наложении коммутаций через конденсаторы, позволил установить, что в случае тиристорной реализации все характеристики $\gamma = f(X_{\gamma})$ имеют полюс, а значит во всех КПС имеется возможность осуществления такого режима, при котором изменение тока нагрузки в широких пределах не приведет к изменению угла коммутации. Основываясь на этом положении сформулирован ранее неизвестный принцип параметрической стабилизации выходного напряжения тиристорной компенсационной преобразовательной системы, получены выражения для расчета характеристик, при которых возможна практическая реализация.

10. Разработана математическая и физическая модель компенсационной преобразовательной системы, методика инженерного расчета и создано ее программное обеспечение, ориентированное на использование ПЭВМ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Компенсационные выпрямители // в кн. Новые полупроводниковые преобразовательные устройства. К.: УкрНИИТИ, 1970, с.4-14/ Соавтор Чиженко И.М./

2. Исследование четырехмостового полупроводникового компенсационного выпрямителя // Сб. Устройства преобразовательной техники, вып.4, 1970, с.170-180/Соавтор Чиженко И.М./

3. Уточненное исследование процессов в полупроводниковых компенсационных выпрямителях большой мощности. /Сб. "О законченных научно-исслед. работах по эл. техн. в вузах УССР", Вища школа, 1972, с.6-7/Соавтор Чиженко И.М./

4. Некоторые особенности работы полупроводникового вентильного блока мощного выпрямителя // К.: Серия электроэнергетики N 10, 1973, с.20-24/ Соавторы Шевченко А.Я., Шуляк А.А./

5. Полупроводниковый компенсационный выпрямитель. //Сб. "О законченных научно-исслед. работах по эл. техн. в вузах УССР"/, Вища школа, 1974, с. 17-18 / Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А./

6. Двухмостовой полупроводниковый выпрямитель с улучшенными энергетическими характеристиками. //Сб. "О законченных научно-исслед. работах по эл. техн. в вузах УССР", Вища школа, 1975, с.12-13/Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А./

7. Исследование режимов преобразователя для питания вакуумных дуговых печей. /Сб. "О законченных научно-исслед. работах по эл. техн. в вузах УССР", Вища школа, 1976, с.16-17/ Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А./

8. Влияние преобразователей электрического тока на сеть электроснабжения промышленного предприятия. // "Энергетика и электрификация" N 2, К.:1976, с.32-34 / Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А./

9. Линейные электрические цепи и методы их анализа. //Учебное пособие, К.: 1979./ Соавтор Чиженко И.М./

10. Передача энергии постоянным током высокого напряжения. //Учебное пособие К.: 1982./ Соавторы Чиженко И.М., Курило И.А.,

Борисенко В.И./

11. Авторское свидетельство 1128356, Обратимый каскадный компенсационный преобразователь. /Опубл. Б.И. № 45, 1984./

12. Авторское свидетельство 1129707, Обратимый компенсационный преобразователь (его варианты). / Опубл. Б.И. № 46, 1984./

13. Компенсационные преобразователи с улучшенными технико-экономическими характеристиками. //Тез. докл. к совещанию "Преобразовательная техника в энергетике", М.: 1984, с.6-7/Соавторы Чиженко И.М., Рябчий В.П./

14. Каскадный компенсационный преобразователь.//Тез. докл. к Всесоюзн. НТК "Применение преобразоват. техн. в электротехнике, электроприводе и электротехнологич. уст.", Тольятти, 1984, с.196-197/Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А., Шуляк А.А./

15. Авторское свидетельство 1188837, Высоковольтный компенсационный преобразователь. / Опубл. Б.И. № 40, 1985./

16. Энергетическая преобразовательная установка для питания печей электрографитации.// Тез. докл. Всесоюзн. НТК "Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве", М: Информэлектро, 1985, с.56-58/ Соавторы Чиженко И.М., Кулькин Ю.Ф./

17. Авторское свидетельство 1175338, Компенсационный выпрямитель (его варианты), 1985./Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А., Шуляк А.А./ Опубл. Б.И. № 31, 1985./

18. Высоковольтные компенсационные преобразователи с улучшенными технико-экономическими характеристиками. //Сб. "Электропередачи и вставки постоянного тока", № 2091-эн, М.:, 1986./ Соавтор Чиженко И.М./

19. Оптимизация аппроксимирующей функции тока коммутации. // Тез. докл. Всесоюзн. НТК "Проблемы преобразовательной техники" / К.: 1987, с.37-39/

20. Проблемы качества электроснабжения предприятий цветной металлургии. //Тез. Всесоюзн. совещ. "Улучшение электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов", М.: Информэлектро, 1987, с.21-22/ Соавторы Чиженко И.М., Шуляк А.А./

21. Авторское свидетельство 1314897, Компенсационный преобразователь, 1987./Соавторы Чиженко И.М., Кудря Е.А., Кулькин Ю.Ф./ Опубл. Б.И. № 20, 1987./

22. Метод численного анализа компенсационного преобразова-

теля. // К.: Серия электроэнергетики N 25, 1988, с.78-84/ Соавтор Шуляк А.А./

23. Авторское свидетельство 1670682, Способ параметрической стабилизации выходного напряжения управляемого компенсационного выпрямителя. //Опубл. Б.И. N 30, 1991./ Соавтор Бойко В.В./

Личный вклад автора. Работы 11, 12, 15, 19 написаны автором самостоятельно. В работах 2, 4, 14, 16, 17, 20, 21 автором предложена идея и методика исследования, а также даны основные выводы. В остальных работах коллективно осуществлена постановка задачи и разработка основных теоретических положений при одинаковом личном вкладе автора и соавторов.

В. Бойко

Подписано к печати 01.04.1993г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ. лист 2,0 Уч.-изд. лист 2,0.
Тираж 100. Заказ 391. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

464787

AB 27.103

AB 27.103