ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

На правах рукописи

КЛИМАШ СТЕПАН ВЛАДИМИРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЦЕХОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы»

диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, Власьевский С.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ	
УСТРОЙСТВ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ	
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ	13
1.1. Современное состояние проблемы повышения качества	
электроэнергии	13
1.2. Анализ систем и способов регулирования и стабилизации	
переменного напряжения	14
1.3. Анализ способов и средств компенсации реактивной мощности с	
применением вентильных преобразователей	.21
1.4. Пути решения проблемы повышения качества электроэнергии	31
Глава 2. РАЗРАБОТКА КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С	Ο
СТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ	35
2.1 Принципы построения КРМСН и алгоритм формирования модуля и	ſ
аргумента вектора добавочного напряжения	35
2.2. Разработка защиты элементов ТП Φ от возможного обратного	
высокого напряжения	45
2.3.Подключение конденсаторов к системе компенсации реактивной	
мощности трансформаторных подстанций	47
Глава 3. РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ	
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В СРЕДЕ MATLAB	54
3.1 Разработка специализированных измерительных модулей	54
3.1.1 Модуль полной мощности и ее активной и реактивной	
составляющих	55
3.1.2 Модуль для вычисления основных энергетических	
показателей	57

КРМСН-ТП 70 4.1. Исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения 70 4.2. Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции с объединенной системой электропривода 76 4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК 84 Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП 88 5.1. Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП 88 5.2. Исследование коэффициентов искажения токов 92 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, 94 реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для 98 5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в	3.1.3 Модуль для вычисления коэффициента мощности через	
3.1.4 Модуль для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения (коэффициента гармоник)	коэффициенты искажения и сдвига фазы мновенного значения	
напряжения (коэффициента гармоник)	тока	59
3.1.5 Сравнение результатов измерения коэффициента мощности двумя методами 63 3.2 Разработка модуля транзисторных преобразователей с двухсторонним обменом энергии и их систем управления 65 Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ КРМСН-ТП 70 4.1. Исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения 70 4.2. Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции с объединенной системой электропривода 76 4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК 84 Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП 88 5.1. Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП 88 5.2. Исследование коэффициентов искажения токов 92 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии 98 5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в	3.1.4 Модуль для вычисления коэффициента несинусоидальности	
двумя методами	напряжения (коэффициента гармоник)	61
3.2 Разработка модуля транзисторных преобразователей с двухсторонним обменом энергии и их систем управления	3.1.5 Сравнение результатов измерения коэффициента мощности	
двухсторонним обменом энергии и их систем управления	двумя методами	63
Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ КРМСН-ТП 70 4.1. Исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения 70 4.2. Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции с объединенной системой электропривода 76 4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК 84 Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В 88 РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП 88 5.1. Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП КРМСН-ТП 88 5.2. Исследование коэффициентов искажения токов 92 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, 94 реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для 0ценки экономии электроэнергии 98 5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в 98	3.2 Разработка модуля транзисторных преобразователей с	
КРМСН-ТП 70 4.1. Исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения 70 4.2. Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции с объединенной системой электропривода 76 4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК 84 Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП 88 5.1. Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП 88 5.2. Исследование коэффициентов искажения токов 92 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, 94 реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для 98 5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в	двухсторонним обменом энергии и их систем управления	65
4.1. Исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения	Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ	
трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения	КРМСН-ТП	70
модуляцией в цепи высокого напряжения	4.1. Исследование особенностей работы вольтодобавочного	
4.2. Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции с объединенной системой электропривода	трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной	
объединенной системой электропривода 76 4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК 84 Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП 88 5.1. Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП 88 5.2. Исследование коэффициентов искажения токов 92 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии 98 5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в	модуляцией в цепи высокого напряжения	70
4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК	4.2. Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции с	
Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП	объединенной системой электропривода	76
РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП	4.3. Исследование диодно-контакторного пускателя БКК	84
5.1. Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП 88 5.2. Исследование коэффициентов искажения токов 92 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии 98 5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в	Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В	
КРМСН-ТП	РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП	88
5.2. Исследование коэффициентов искажения токов	5.1. Исследования энергетических показателей в системе	
 5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений 94 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии	КРМСН-ТП	88
 5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии	5.2. Исследование коэффициентов искажения токов	92
реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии	5.3. Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений	94
оценки экономии электроэнергии	5.4.Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р,	
5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в	реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для	
5.5. Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в		98
	системе КРМСН-ТП	101

5.6. Оценка влияния результата КРМСН-ТП на потери в питающей	
ЛЭП	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	110
СИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Применение современных технологий и новейших систем автоматизации в отечественной промышленности ставит новые требования к качеству электроэнергии и надежности электроснабжения предприятий. Электроэнергия рассматривается как предмет потребления и продажи и должна соответствовать нормам качества [15].

Вследствие значительной протяженности линий электропередач электростанций к потребителям и многоэтапной трансформации электроэнергии особенное значение имеет поддержание норм качества электроэнергии не на самих электростанциях, непосредственно на вводах потребителей электроэнергии. Решение этой задачи необходимо именно уровне распределительных сетей [6]. Большинство крупных потребителей требуют надежного поддержания установленного уровня напряжения на их вводах, поскольку другие критерии (форма и частота напряжения) больше влияют на потери энергии в линиях электропередач и оборудовании подстанций и, электроснабжающие соответственно, ИХ уменьшении заинтересованы организации [7, 50].

Основным возмущением, которое вызывает отклонение напряжения в распределительных сетях и на вводах потребителей является изменение режима узла электроснабжения по мощности (активной, реактивной, полной). Соответственно, для своевременного регулирования напряжения следует вводить регулировочное действие, прежде всего, изменяя режим распределения мощности через подстанцию, предотвращая отклонение напряжения в конце линии [25].

Такие выводы относятся в основном к реактивной мощности, транзит которой по линиям электропередач пытаются довести до экономически целесообразного значения, используя компенсационные устройства. Определение заранее значения потребляемой реактивной мощности потребителей позволит рассчитать мощность компенсационных устройств или других источников

реактивной мощности, необходимых для решения задачи комплексного регулирования напряжения [6].

Основными средствами регулирования напряжения в распределительных сетях являются силовые трансформаторы с устройствами регулировки под нагрузкой (РПН) (С ограниченным ресурсом количества переключений [32]). Ресурс механических контактов устройства РПН силового трансформатора сравнительно мал, поскольку приходится коммутировать рабочие токи. А связанные с ремонтом устройств РПН перерывы в электроснабжении приводят к тому, оперативный персонал подстанций проводит переключения ответвлений силового трансформатора как можно реже. Соответственно, качество напряжения значительно снижается, потери otнекачественного электроснабжение растут. Для улучшения режима системы электроснабжения по напряжению и повышения срока их эксплуатации указанные устройства нужно разгрузить от проведения излишних переключений, вызванных отклонениями напряжения вследствие сложного режима нагрузки, следующими резкими изменениями потерь активной и реактивной мощностей, изменениями режима системы электроснабжения по мощности (как преобладающего фактора установленного уровня напряжения в системе электроснабжения), используя дополнительные пути регулирования напряжения и потоков реактивной мощности.

Эффективным способом управления режимом системы электроснабжения мощности является применение батарей статических конденсаторов, компенсаторов [46], но вполне совместить и статических тиристорных автоматизировать управление устройствами РПН и, например, конденсаторов в пределах одной подстанции довольно сложно и такое Кроме регулирование рассматривается проводится отдельно. того конденсаторные батареи при их параллельном включении (установки поперечной компенсации) применяются как компенсирующие, поэтому для широкого диапазона регулировки баланса нужно иметь определенный избыток мощности

компенсирующих устройств, что приводит к соответствующим перерасходам. При последовательной компенсации за помощью батарей конденсаторов уменьшаются только потери реактивной мощности, но не меняется потребление последней из системы электроснабжения.

Так что вопрос разработки электротехнических комплексов (особенно с микропроцессорными системами управления) для регулирования напряжения и одновременного создания удовлетворительного режима системы электроснабжения по реактивной мощности, является актуальным как с технической точки зрения, что обеспечит гибкость в решении поставленных задач, так и с экономической стороны, поскольку присутствует направление на уменьшение потерь электроэнергии, и улучшения ее качества.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ отечественных и зарубежных: В.А. Веникова, Р.Р. Мамошина, Б.Н. Сергеенкова, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, Ф.Ф. Карпова, И.И. Карташева, В.А. Лабунцова, М.П. Бадера, К.А. Липковского, Ю.К. Розанова, Д.И. Панфилова, а также других учёных и специалистов.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения (КРМСН) с улучшенными энергетическими и массогабаритные показателями, высокой точностью и быстродействием для цеховых трансформаторных подстанций 6 /0,4 и 10/0,4кВ промышленного электроснабжения.

Задачи диссертации:

- 1. Анализ патентно-лицензионной ситуации по проблеме регулирования питающего напряжения и компенсации реактивной мощности трансформаторных подстанций.
- 2. Разработка принципов построения компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения для трансформаторных подстанций систем электроснабжения, обеспечивающих комплексное повышение

энергоэффективности в линиях электропередачи, у силовых трансформаторов подстанций и потребителей электроэнергии:

- разработка принципа компенсации реактивной мощности стабилизацией напряжения с нерегулируемой генерацией конденсаторами регулируемой системой, обеспечивает реактивной мощности и которая перераспределение потоков активной и реактивной мощности между сетью и потребителями через звено постоянного напряжения транзисторного преобразователя;
- разработка принципа формирования вектора добавочного напряжения электрической сети, способа и алгоритма регулирования его модуля и аргумента для компенсации реактивной мощности на входе и стабилизацией напряжения на выходе трансформаторной подстанции.
- 3. Разработка способа и устройства подключения конденсаторов к трансформаторной подстанции с регулируемой системой компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения.
- 4. Создание специализированных электротехнических модулей в среде MATLAB, дополняющих пакет SimPowerSystems, и на их основе разработка комплекса математических моделей для исследования оригинальной системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе трансформаторной подстанции;
- создание силовых модулей и их систем управления (транзисторного выпрямителя с ШИМ и опережающим входным синусоидальным током, транзисторного инвертора напряжения с формированием вектора добавочного напряжения электрической сети и регулированием его модуля и аргумента);
- создание измерительных модулей энергетических показателей электротехнических систем и комплексов;
- 5. Исследование переходных и установившихся режимов работы системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе трансформаторной подстанции с использованием специальных модулей.

Научная новизна:

- 1. Предложены принципы построения КРМСН с улучшенными энергетическими показателями и быстродействием.
- 2. Предложен алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков отклонения напряжения сети и реактивной мощности.
- 3. Предложены способ и оригинальное устройство для подключения конденсаторов к трехфазной сети, обеспечивающий плавность их заряда с формированием в процессе заряда синусоидальной формы напряжения и тока за счет изменения угла коммутации диодов.
- 4. На разработанной математической модели КРМСН выявлено свойство как регулируемой генерации, так и регулируемого потребления реактивной мощности. При недокомпенсации устройство быстрого реагирования дополняет действие дискретной ступени, а при перекомпенсации нейтрализует его действие, обеспечивая одновременно стабилизацию напряжения.

Практическая значимость работы:

- 1. Разработано новое устройство КРМСН
- 2. Предложены модули (силовые, управления, измерительные), на основе которых разработан комплекс программ для исследования установившихся и переходных режимов работы КРМСН.
- 3. Предложено техническое решение для построения защиты ТП от перенапряжений со стороны вольтодобавочного трансформатора.
- 4. Предложен электронно-электрический пускатель конденсаторов, позволяющий с высоким быстродействием производить пуск с плавным нарастанием напряжения и тока заряда конденсаторов.

Объектом исследования является электротехнический комплекс, включающий в себя трансформаторную подстанцию промышленного

предприятия под нагрузкой, подключаемую батарею косинусных конденсаторов, вольтодобавочный трансформатор и транзисторный преобразователь со звеном постоянного напряжения и двухсторонним обменом энергией.

Предметом исследования являются разработка принципов построения КРМСН и алгоритма формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения, оценка перетоков полной, активной и реактивной мощности и энергетических показателей в системе КРМСН-ТП во всех режимах работы.

Методы исследования базируются на фундаментальных положениях теоретических основ электротехники, преобразования и передачи электроэнергии в электрических сетях, методах математического и численного моделирования. В качестве основных математических средств использовано программное средство MATLAB Simulink.

Положения, выносимые на защиту:

- 1. Принципы построения компенсатора реактивной мощности сети со стабилизацией напряжения нагрузки КРМСН на основе ВДТ и ТПФ со специальным алгоритмом управления.
- 2. Комплекс программ для исследования установившихся и переходных режимов работы КРМСН и результаты исследования.
- 3. Техническое решение для построения защиты ТП от перенапряжений со стороны вольтодобавочного трансформатора.
 - 4. Способ и устройство подключения конденсаторов к трехфазной сети.

Достоверность научных положений и результатов подтверждается обоснованностью полученных выводов, базирующихся на строго доказанных и корректно используемых положениях прикладных и фундаментальных наук, а

также корректным использованием математического аппарата. Новизна технических решений, представленных в работе, подтверждается тремя патентами на изобретение.

Апробация работы. Материалы исследования докладывались на местных и международных конференциях и получили положительную оценку:

- Всероссийской научно-практической конференции творческой молодёжи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 20-22 апреля 2015 г., ДВГУПС)
- IOP Conference Series. Earth and Environmental Science (SCOPUS, WOS), 2017 No90.
- Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 20-21сентября 2018 г., ДВГУПС),
- заседании научно-технического совета электротехнического факультета (г. Комсомольск-на-Амуре, 25.09. 2019г., КнАГУ)

Личный вклад соискателя. Автору принадлежат следующие работы:

- участие в разработке принципов построения компенсатора реактивной мощности сети со стабилизацией напряжения нагрузки КРМСН.
- разработка алгоритма формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков отклонения напряжения сети и реактивной мощности.
- разработка способа и устройства подключения конденсаторов к трехфазной сети.
- разработка модулей (силовые, управления, измерительные), на основе которых разработан комплекс программ для исследования установившихся и переходных режимов работы КРМСН.

- проведение численного эксперимента.

Публикации. Основные научные результаты работы отражены в 15 печатных изданиях, из них 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 3 статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования, (Scopus, Web of Science), 3 патента на изобретение, 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 51 наименований. Текст диссертации изложен на 116 страницах, содержит 68 рисунков.

Глава 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

1.1 Современное состояние проблемы повышения качества электроэнергии

Повышение качества электроэнергии и эффективности её использования — одно из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Возрастание цен на энергоносители, в частности на электроэнергию, обуславливают детальное внимание к данной проблеме [23, 35]. Она отражена в государственных и отраслевых программах по энергосбережению России [47].

Питающее потребителей напряжение низкого качества отрицательно сказывается на работе всего электрооборудования, задействованного при выработке, передаче и потреблении электроэнергии (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1. Блок схема последствий от низкого качества напряжения

Одним из факторов, влияющим на снижение энергетической эффективности всей системы энергоснабжения является наблюдаемый за последние десятилетия физический и моральный износ энергетического оборудования [23]. Это обстоятельство особенно заметно на фоне обострения проблемы увеличения числа и вида приёмников электроэнергии, многие, из которых, как правило, с нелинейными, несимметричными и резкоизменяющимися нагрузками [23, 11].

Неотъемлемую часть этого круга нерешённых вопросов является несоответствие пропускной способности линий электропередач по активной составляющей полной мощности по отношению к реально требуемым значениям этой мошности.

Перебои в энергоснабжении связаны также со случайными переходными процессами в электрической сети, приводящие к всплескам, провалам, качанием и другим искажениям напряжения.

Отдельно следует сказать о метеоусловиях, в которых работает электрооборудование. Известно, что такие факторы как повышение или снижение температуры, влажность, атмосферное электричество также оказывают неблагоприятное влияние на стабильное энергоснабжение.

1.2 Анализ систем и способов регулирования и стабилизации переменного напряжения

В настоящее время в системах энергоснабжения, для устранения существующих недостатков нестабильного энергообеспечения, непосредственно для трансформаторных подстанций, предназначаются различные устройства, обеспечивающие поддержание требуемого режима напряжений у потребителей.

Существующие способы и системы, предложенные для регулирования напряжения силовых трансформаторов, согласно [40], можно свести в следующие группы:

1. Механические системы регулирования напряжения

- регулирование без возбуждения с полным отключением трансформатора (ПБВ);
- регулирование с переключением под нагрузкой контактными устройствами (РПН).
- 2. Тиристорно-механические системы регулирования напряжения
- непосредственное переключение регулировочных ответвлений обмоток основного силового трансформатора;
- косвенное переключение через дополнительный вольтодобавочный трансформатор (ВДТ).
- 3. Системы бесконтактного регулирования напряжения
- дискретного типа;
- с фазовым регулированием коэффициента трансформации;
- с высокочастотной коммутацией регулировочных ответвлений обмоток силового трансформатора.

Вопросы, связанные с развитием способов управления и совершенствованием механических и тиристорно-механических систем регулирования достаточно хорошо освящены в литературе [40].

Одно ИЗ направлений, связанное с развитием теории И практики бесконтактных напряжения, типов регуляторов сложилось основе ограниченных возможностей контактных переключающих устройств, вследствие низкой износостойкости контактных элементов (электроэрозионный износ) под воздействием электрической дуги в моменты переключений. Кроме того, низкое быстродействие таких систем и эксплуатационные характеристики не позволяют конкурировать с бесконтактными переключающими устройствами [16].

Первые работы по разработке бесконтактных переключающих устройств появились в середине второго десятилетия XX в., когда особую актуальность получили кривой напряжения, вопросы повышения качества выходного диапазона допустимых нагрузок и коэффициента мощности. Для решения этих задач на смену распространённым феррорезонансным стабилизаторам напряжения [29], а также стабилизаторам с передвижной короткозамкнутой катушкой [29] приходят более совершенные стабилизаторы напряжения, выполненные на регулируемых трансформаторах с подмагничиванием [40,29]

Работы в направлении создания схем бесконтактных плавно регулируемых (автотрансформаторов) и стабилизаторов трансформаторов напряжения улучшенными характеристиками велись в МЭИ с 60-х г. [29]. В дальнейшем с полупроводниковой развитием техники, резко активизировался научносистем технический интерес разработке на базе трансформаторно-ПО транзисторных и трансформаторно-тиристорных регуляторов обладающих более высоким быстродействием, меньшим весом и габаритами, по сравнению с магнитными регуляторами. В результате проведённых исследований по реализации данных регуляторов было решено много теоретических, прикладных и инженерных задач, но указанные регуляторы оставались с низкой надёжностью, особенно в аварийных режимах [29].

В период 60-80-х гг. появились работы, ориентированные на отыскание способов оптимального регулирования напряжения, с целью повышения качества и точности регулирования выходного напряжения на базе тиристорных и транзисторных систем [40, 29, 45], обеспечивающих дискретное или плавное бесконтактное изменение коэффициента трансформации с высоким быстродействием.

Наиболее существенный вклад в теорию и практику разработки систем регулирования переменного напряжения был вложен московской [33, 27, 11, 23] и киевской [3,11,12] школами электронщиков, поэтому рассмотрим более подробно основные направления этих регуляторов, предназначенных для применения:

1) бесконтактные регулируемые трансформаторы дискретного типа,

обеспечивают переключение регулировочных ответвлений в моменты перехода тока через нулевое положение.

Регулирование напряжения выполняется за счёт ступенчатого переключения по двоичному коду последовательно соединённых с помощью

тиристоров вольтодобавочных секций первичной и вторичной обмотки трансформатора.

Регуляторы дискретного типа, обеспечивая регулирование в определённом диапазоне, имеют достаточно большие искажения формы кривой выходного напряжения, а при проектировании получаются чрезвычайно сложными и дорогими [45,28];

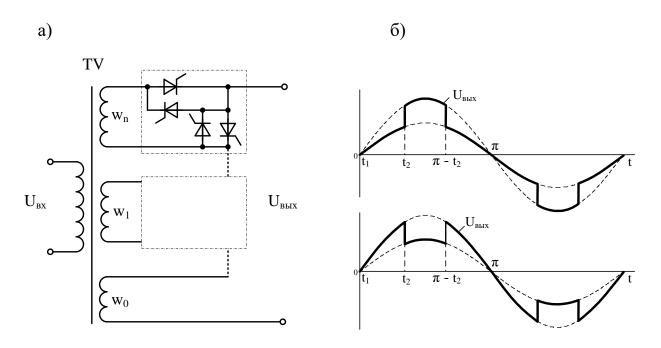


Рисунок 1.2. Пример регулируемого трансформатора дискретного типа (a), и временные диаграммы выходного напряжения (б)

2) трансформаторы с плавным фазовым регулированием коэффициента трансформации за счет смещения в пределах полупериода исходного переменного напряжения момента переключения регулировочных ответвлений, осуществляемого один раз за полупериод (схемные решения связаны с соединением отвода нижней ступени регулирования с нагрузкой через индуктивность или ёмкость) [40, 29].

Данные регуляторы обеспечивают безынерционное ограничение импульсных скачков выходного напряжения, но наличие дополнительного контура тока в регулировочной обмотке трансформатора при включенном

состоянии коммутатора высшей ступени регулирования увеличивает расчётную мощность всех элементов системы;

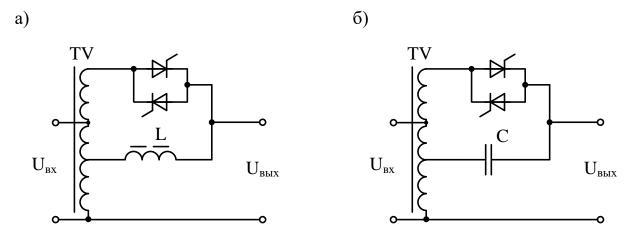


Рисунок 1.3. Регуляторы с использованием индуктивности а) и ёмкости (б) для подключения нижней ступени регулирования

3) трансформаторы с высокочастотной коммутацией регулировочных ответвлений и фазовым регулированием коэффициента трансформации в пределах многократно повторяющихся за полупериод исходного переменного напряжения регулировочных циклов [40, 29].

В этот класс регуляторов входят:

коэффициента регуляторы многократным переключением трансформации за полупериод переменного напряжения (и их разновидности автотрансформаторные схемы) [40, 29]. Принцип работы, которых основан на изменении в пределах каждого цикла переключений соотношения между интервалами работы с большим и меньшим коэффициентами трансформации. Ограничение применения таких регуляторов связано с наличием дополнительного оборудования, трансформаторного его работа на сетевой частоте И конструктивных изменения в схеме силового трансформатора.

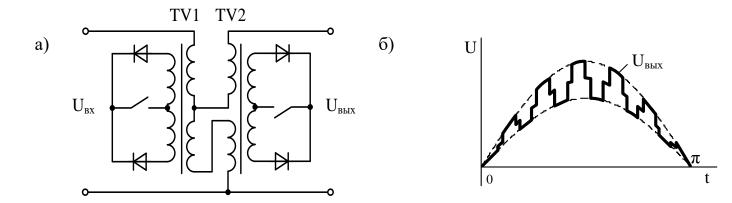


Рисунок 1.4. Пример регулятора с многократным переключением коэффициента трансформации (а) и кривая его выходного напряжения (б)

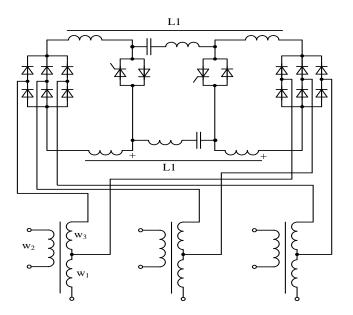


Рисунок 1.5. Пример автотрансформаторной схемы стабилизатора напряжения

б) регуляторы с фазовым регулированием выходного напряжения трансформатора с ёмкостным сглаживающим фильтром [40, 29]. Введение в такой регулятор обратного фазорегулируемого переключения в сторону уменьшения мгновенного значения выходного напряжения позволяет упростить структуру сглаживающего фильтра выходного напряжения, благодаря исключению силовых реакторов, необходимых для демпфирования скачкообразных изменений выходного напряжения при переключении в сторону увеличения. При этом в

регуляторе необходимо применять полностью управляемый коммутатор высшей ступени регулирования, что усложняет систему коммутации регулировочных ответвлений.

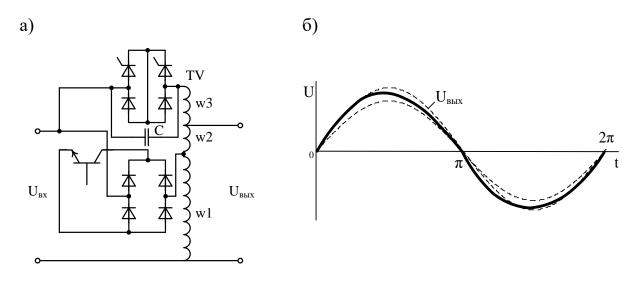


Рисунок 1.6. Регулятор с ёмкостным сглаживающим фильтром

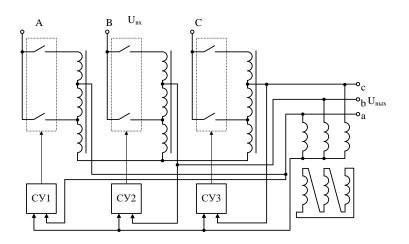


Рисунок 1.7. Схема трёхфазного стабилизатора напряжения с симметрирующим трансформатором

В настоящее время зарубежной промышленностью освоено производство отдельного класса регуляторов - <u>трехфазных электронных стабилизаторов компенсационного типа</u> серии Odyssey (50 кВА - 1000 кВА), Gemini (0,5 кВА - 10 кВА), Orion (2 кВА - 450 кВА), Sirius (30 кВА - 3500 кВА) обеспечивающих стабильность выходного напряжения в пределах \pm 2 % от номинального значения.

Выпускаются две модели с диапазонами стабилизации входного напряжения ± 15 % и 20 % / ± 10 % соответственно. Устройства оснащены статическими переключателями на IGBT транзисторах и вольтодобавочным трансформатором. Пример такого стабилизатора приведён на рисунке 1.8.

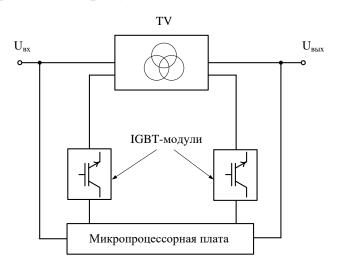


Рисунок 1.8. Блок-схема стабилизатора напряжения N-Power серии Odyssey

В этом техническом решении возможность регулирования напряжения в диапазоне до 20% с допустимыми искажениями, достигнуто за счет увеличения числа ключей, т.е. путем усложнения устройства и ухудшения его массогабаритных показателей.

1.3 Анализ способов и средств компенсации реактивной мощности с применением вентильных преобразователей

В последнее время применяют технические средства для осуществления местного регулирования напряжения, которые позволяют одновременно разгрузить сети (линии и трансформаторы) от реактивной мощности и улучшить режим напряжения [10, 11, 23].

Развитие теории и практики статических компенсаторов связано с именем проф. В.А. Веникова [2] начиная с середины 50-х г.г. В то время и было решено использовать управляемые вентили для регулирования мощности реактора и

конденсаторной батареи. Параллельно велись работы по регулированию реактивной мощности, потребляемой и генерируемой статическими компенсаторами, на базе преобразователей с искусственной коммутацией и систем с насыщающимися реакторами.

В МЭИ в начале 60-х гг. были разработаны принципы и созданы первые устройства, в которых управляемые вентили (тиристоры) использовались непосредственно для регулирования реактивной мощности реакторов и конденсаторных батарей. В процессе эксплуатации они получили название - источников реактивной мощности (ИРМ) [11]. В процессе совершенствования последних возникли и другие названия, из которых общепринятым стало название - статические компенсаторы реактивной мощности (или в англоязычной литературе - static var compensator - SVC) [16].

Основные типы существующих статических компенсаторов реактивной мощности, можно ввести к следующим группам [17]:

- 1. Ступенчато регулируемые коммутационной аппаратурой батареи конденсаторов (БК);
- 2. Шунтирующие реакторы, снабжённые коммутационной аппаратурой (ШР);
 - 3. Управляемые реакторы (УР);
- 4. Управляемые тиристорами шунтирующие реакторы статические тиристорные компенсаторы с реакторами (СТК (Р));
- 5. Управляемые тиристорами батареи конденсаторов статические тиристорные компенсаторы с конденсаторами (СТК (К));
 - 6. Компенсаторы реактивной мощности с искусственной коммутацией (ИК). Рассмотрим более подробно указанные типы компенсаторов:
- Ступенчато регулируемые коммутационной аппаратурой батареи конденсаторов [17,10, 11].

Схемы соединения компенсационных устройств, содержащих конденсаторные батареи, приведены на рисунке 1.9.

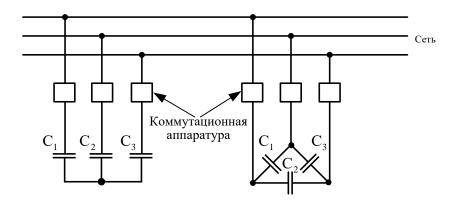


Рисунок 1.9. Схемы соединения конденсаторных батарей в трёхфазной сети: а) треугольником; б) звездой

Изменение величины генерируемой реактивной мощности в данном классе компенсаторов организовано путём ступенчатого изменения числа вступающих в работу батарей конденсаторов. Переключения осуществляются при помощи блоков автоматического управления и коммутационной аппаратуры.

К недостаткам данных типов компенсаторов относится слишком низкая скорость реакции на изменения реактивной мощности. Дополнительно в случае резкого изменении характера и величины нагрузки, строго ступенчатый способ регулирования не позволяет обеспечить заданное значение реактивной мощности. Вместе с тем ненадёжная коммутационная аппаратура существенно снижает надёжность таких систем.

- Шунтирующие реакторы, снабжённые коммутационной аппаратурой [17]

Рассматриваемые типы компенсаторов выполнены в виде катушки, обладающей малым активным сопротивлением, с изолированными друг от друга витками и от заземлённых частей. Подключение осуществляется напрямую к сетевым шинам на высокой стороне силового трансформатора подстанции, исключая понижающий трансформатор между реакторами и сетью.

Указанный тип компенсаторов, с точки зрения компенсации реактивной мощности, представляет собой практически нерегулируемый источник

реактивной мощности. Характерными особенностями его работы является четко фиксированные значения потребляемой реактивной мощности, равные по величине номинальной или близкой к ней. Это обстоятельство снижает его практическую применимость вследствие возникновения больших коммутационных перенапряжений.

- Управляемые реакторы [17]

Управляемые реакторы (магнитные ключи), выполненные совместно с батареей конденсаторов составляют отдельный класс компенсирующих устройств. Распространённый способ управления такими компенсирующими устройствами заключается в подмагничивании их магнитопроводов с целью увеличения или уменьшения потребления реактивной мощности. Известен и иной способ их регулирования - путём изменения воздушного зазора в сердечнике, влияющий непосредственно на значение магнитного потока в сердечнике этого устройства.

Независимо от способов управления указанные компенсаторы, позволяют достаточно широких пределах реактивную регулировать мощность напряжение в электрических сетях. Однако, низкое быстродействие магнитного ключа (около 2 сек.), не позволяет при резкопеременных нагрузках обеспечивать компенсацию реактивной энергии требуемой точностью. B составе энергосистемы такое регулирование вызывает значительные искажения тока, что является причиной дополнительных потерь в электрических сетях.

- Управляемые тиристорами шунтирующие реакторы – статические тиристорные компенсаторы с реакторами [17, 34, 10]

Объединяющим фактором для энергосистем, требующих компенсации ёмкостных токов, является применение нейтрализирующих реакторов. Для этого предназначаются компенсаторы реактивной мощности в виде реактора, последовательно с которым, включены встречно-параллельные тиристоры (рисунок 1.10, а). Временные диаграммы токов сети при различных значениях углов отпирания тиристоров а и кривая напряжения на низкой стороне понижающего трансформатора, приведены на рисунке 1.10, б.

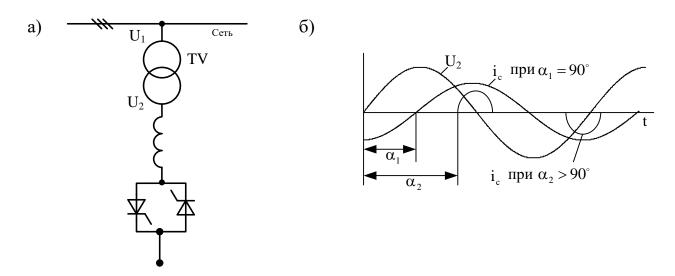


Рисунок 1.10. Схема компенсатора реактивной мощности с реактором и тиристорами

В процессе регулирования углов отпирания тиристоров α, происходит изменение первой гармоники тока компенсатора. Эта зависимость носит нелинейный характер и при плавном изменении углов отпирания тиристоров, позволяет регулировать ток реактора.

Среди критериев надёжности и относительной простоты конструкции, анализируемого типа устройств, следует указать и явные недостатки. К ним относится искажение формы синусоидального тока сети В результате регулирования, что является причиной появления высших гармоник тока. По данным [17], в сети появляются высшие гармоники тока нечетного порядка 3, 5, 7, 9, 11..., что приводит к дополнительным электрическим потерям в сети, а низкое быстродействие и дополнительное трансформаторно-реакторное оборудование не позволяет конкурировать с существующими системами.

Возможность снижения гармонических составляющих тока в сетях или линиях электропередач, появилась у схем компенсаторов, содержащих управляемый выпрямитель и реактор. Примером такого компенсатора, может служить приведённая на рисунке 1.11, а, система, включающая понижающий трансформатор, трёхфазный управляемый выпрямитель и, подключенный в цепь постоянного тока реактор.

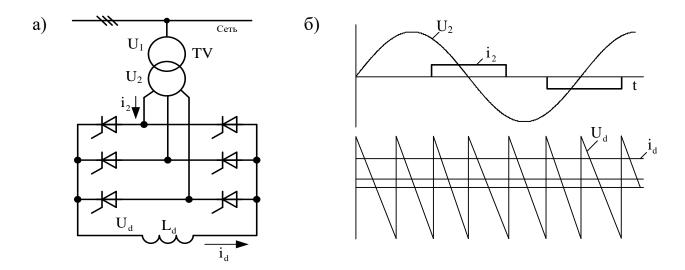


Рисунок 1.11. Схема компенсатора с реактором в цепи постоянного тока

На рисунке 1.11, б, представлены временные диаграммы работы компенсатора: напряжение на низкой стороне понижающего трансформатора, тока сети, кривых выпрямленных напряжения и тока.

Совместно с регулированием углов отпирания около 90° в таком компенсаторе происходит регулирование реактивного потребления. При значительной величине индуктивности, и практическим отсутствием активного сопротивления в цепи выпрямленного тока, влияние пульсаций носит менее выраженный характер, в связи, с чем несколько снижается генерация высших гармоник по отношению к 5, 7, 9, 11, ... гармоникам входного тока трехфазного мостового выпрямителя [34].

Несколько иные схемы компенсаторов были предложены зарубежными фирмами изготовителями. Фирма General Electric (США) разработала схему в виде выпрямительного моста, на полностью управляемых ключах с реактором. В этом схемном решении при повышении управляемости появляются дополнительные искажения, вносимые выпрямителем в кривую сетевого тока.

- Управляемые тиристорами батареи конденсаторов – статические тиристорные компенсаторы с конденсаторами [10,17,34]

Одно из направлений, связанное с повышением коэффициента мощности сложилось при использовании схемных решений на основе коммутируемых тиристорами конденсаторов. Разновидностями выполнения данной группы схем, является подключение их к сети непосредственно или через понижающий трансформатор. Коммутация в соединениях конденсаторов осуществляется при помощи встречно-параллельно соединенных тиристоров. Примером является компенсатор, приведённый на рисунке 1.12, а.

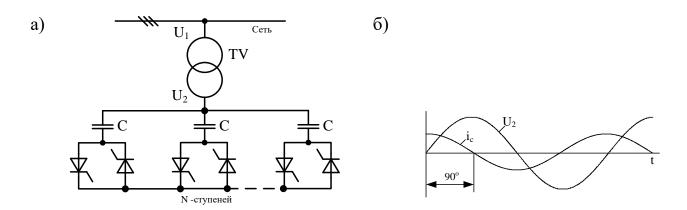


Рисунок 1.12. Схема компенсатора с конденсаторами и тиристорами

Применительно к таким компенсаторам реактивной мощности регулирование ёмкостного тока осуществляется в моменты переходов тока ёмкости через ноль, а именно в максимальные значения положительной и отрицательной полуволн тока. Как показано на временной диаграмме (рисунок 1.12, б), ёмкостный ток опережает напряжение сети на четверть периода. Для такого компенсатора характерно включение тиристоров в максимумы напряжения сети для устранения искажения сетевого тока.

В компенсаторах, относящиеся к этой группе, при осуществляемой ими генерации реактивной мощности остаются нерешёнными вопросы дискретного регулирования реактивной мощности, связанной с включением очередных конденсаторных батарей только при условии достижения напряжением сети своего максимального значения.

Другая возможность по компенсации отстающего, либо опережающего реактивного тока сети имеется у конденсаторно-реакторных компенсаторов реактивной мощности [34, 41, 10].

Эта составляющая часть компенсаторов содержит в себе конденсатор, параллельно которому, подключены индуктивная катушка и тиристоры по встречно-параллельной схеме.

Пример схемы такого компенсатора приведён на рисунок 1.13, а.

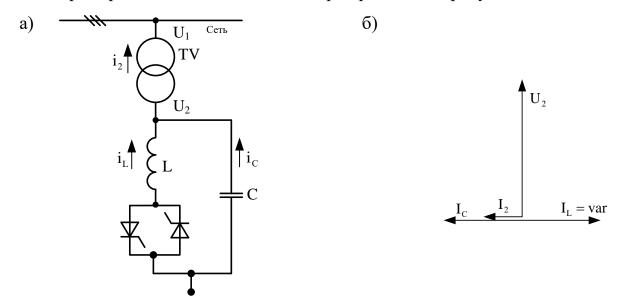


Рисунок 1.13. Схема конденсаторно-реакторного компенсатора реактивной мощности

Конденсаторная часть выполнена нерегулируемой, а реакторная часть - регулируемой. Совместное действие конденсаторной или реакторной частей компенсатора приводит к регулированию значения или вида реактивной мощности. Ориентация вектора тока сети по первой гармонике, как видно из векторной диаграммы (рисунок 1.13, б), зависит от преобладающего действия ёмкостных или индуктивных составляющих тока основной части компенсатора.

Аналогичная конструкция реактора выпускалась и зарубежной фирмой АСЕС (Бельгия). Такое же устройство типа УТР-ФК разработано и выпускалось в СССР (а.с. № 251662 СССР). Он спроектирован совместно с фирмой Nokia Engineering (Финляндия) и ВЭИ им. В.И. Ленина.

Компенсатор такого типа выпускался по лицензии рядом фирм: CGEC (Канада), Brown Boveri Cie (ВВС, Швейцария), АСЕС (Бельгия).

К недостаткам этой категории компенсаторов относится сравнительно небольшое быстродействие и неудовлетворительные массогабаритные показатели. Большие искажения, как выходного напряжения, так и входного тока, характеризуют низкую энергетическую эффективность данного класса устройств.

- Компенсаторы реактивной мощности с искусственной коммутацией

Улучшение энергетических характеристик, а также возможность компенсации реактивной мощности имеется у ряда систем, образованных при помощи вентильного преобразователя и реактивного элемента.

Данный класс устройств подразделяется по типу вентильного преобразователя, включенного совместно с реактивным элементом:

а) статические автономные инверторы тока (рисунок 1.14 а) и инверторы напряжения (рисунок 1.14 б) [17, 34];

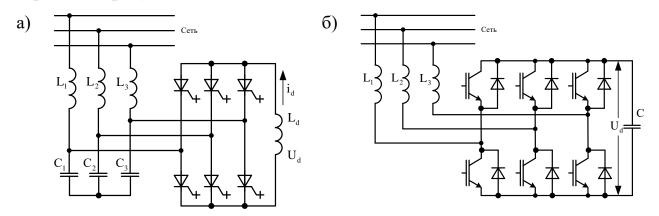


Рисунок 1.14. Схемы компенсаторов с вентильным преобразователем и реактивным элементом

Приведённые для примера компенсаторы, содержат преобразователи, которые выполнены на GTO-тиристорах и IGBT-транзисторах.

В процессе коммутации полностью управляемых вентилей основная гармоника тока на выходе компенсатора смещена на 90° относительно сетевого напряжения. Реактивная мощность компенсаторов в данном случае определяется: для инвертора тока – индуктивностью в цепи постоянного тока; для инвертора

напряжения — ёмкостью в цепи постоянного тока. Реакторы, включенные между сетью и преобразователем, предназначены для ограничения выходных токов компенсатора и снижения уровня высших гармоник в кривой напряжения преобразователей тока и напряжения.

Ярким примером компенсатора на базе трёхфазного инвертора напряжения является разработка фирмы AEG - Telefunken (Германия). Компенсатор типа «Варовертер», выполненный по данной схеме присоединяется непосредственно к сети или через трансформатор, с конденсатором в диагонали моста.

б) непосредственные преобразователи частоты с естественной (рисунок 1.15) или искусственной (рисунок 1.16) коммутацией [45];

Устройства подобного типа используют нерегулируемый генератор высокой частоты. Такой способ регулирования напряжения считается наиболее пригодными для систем с переменными нагрузками.

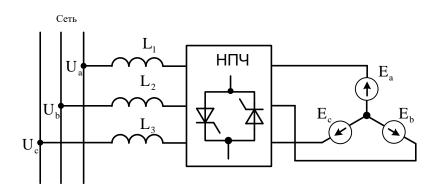


Рисунок 1.15. Схема компенсатора с НПЧ

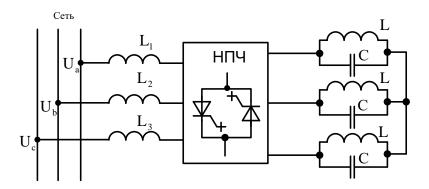


Рисунок 1.16. Схема компенсатора с НПЧ и LC-контурами

Генерация или потребление реактивной мощности зависит от соотношения напряжений в сети и напряжения на выходе компенсатора.

В случае применения искусственной коммутации применяется дополнительные индуктивно-ёмкостные элементы. Изменение знака тока в коммутируемых группах вентилей происходит за счёт напряжения конденсаторных блоков.

К недостаткам устройств подобного класса можно отнести ограниченные функциональные возможности по совмещению функций стабилизации напряжения и компенсации реактивной мощности. Наличие в общей структуре реактивных элементов, выполненных на полную реактивную мощность нагрузки, значительно увеличивает геометрические размеры таких устройств, что является фактором экономической нецелесообразности.

1.4 Пути решения проблемы повышения качества электроэнергии

На пути электрической энергии от генератора к потребителю ее параметры неоднократно претерпевают существенные изменения. Изменения параметров электроэнергии реализуются с помощью современных силовых полупроводниковых и электромагнитных устройств преобразовательной техники или при их комплексировании.

Наиболее распространенный вид функционального преобразования электрической энергии - изменение переменного напряжения. Рациональность использования для этой цели тех или иных методов и средств в значительной мере электрической необходимо определяется местом цепи, котором преобразовывать напряжение (шины генератора, центр питания, распределительный пункт, сеть низкого напряжения, зажимы электроприемника). В соответствии с поставленной задачей в настоящей работе внимание уделяется

устройствам, повышающим качество электроэнергии при питании отдельных электроприемников или их групп.

Существуют три основных подхода повышения качества электроэнергии [16].

В первую очередь, это рационализация средств электроснабжения. К этой группе относят повышение мощности сети, увеличение сечения провода, питание нелинейных потребителей повышенным напряжением и др.

Вторая группа предполагает совершенствование самих потребителей: номинальная загрузка двигателей, использование многофазных схем выпрямления, включение в состав потребителя корректирующих устройств и т.д.

Третья группа предполагает использования устройств коррекции качества или, иначе говоря, регуляторов одного или нескольких показателей качества электроэнергии или связанных с ними параметров потребляемой мощности.

Наиболее экономически предпочтительной сегодня является третья группа методов, так как изменение структуры сети или обновление всех потребителей приведет к значительным затратам. Конечно, проектирование новых сетей и потребителей необходимо вести с учетом современных требований к качеству, но для обеспечения надежной работы уже имеющегося оборудования необходима разработка регуляторов качества электроэнергии различных типов.

Отметим, что при выполнении конкретных проектов выявляется, как правило, не один, а несколько возможных путей повышения качества электроэнергии [16]. Поэтому для получения максимального эффекта необходим комплексный подход к решению этой задачи.

Общая постановка задачи повышения качества электроэнергии в единой системе электроснабжения предполагает рассмотрение ПКЭ не только на примере взаимовлияния электросети и потребителя, но и требует детального рассмотрения преобразователя электроэнергии как составной части энергосистемы.

К показателям качества преобразователя энергии, входящего в состав системы электроснабжения относятся: потери активной мощности ΔP ,

коэффициент искажения тока, потребляемого из сети, уровень потребляемой реактивной мощности Q и скорость ее изменения dQ_x/dt . Последние параметры определяют также показатели качества электроэнергии как колебания и отклонения напряжения.

Следует отметить, что практически любой преобразователь энергии имеет возможность управления параметрами потребляемой и преобразуемой энергии. Так, возможно регулирование потребляемой реактивной мощности в определенных пределах, управление параметром dQ_x/dt , регулирование гармонического состава тока и т.д.

По существу преобразователь энергии можно рассматривать как устройство с N каналами, обеспечивающими регулирование параметров потребления и преобразования энергии.

Задача управления энергетическими режимами преобразователей вытекает из следующего. Как правило, преобразовательное статическое устройство состоит из нескольких вентильных групп с соответствующими уровнями напряжения питания. Принципиально вентильные группы могут управляться независимо друг от друга, при этом каждая из групп фактически представляет собой независимый канал управления.

Помимо функциональных возможностей и показателей качества энергии к преобразователям энергии также предъявляются следующие технические требования [22]:

- способность поддержания требуемого значения напряжения на нагрузке при изменениях сетевого напряжения;
 - возможность компенсации реактивной мощности;
 - высокая точность поддержания требуемого напряжения на нагрузке;
 - малый вес и габаритные размеры;
 - высокий коэффициент полезного действия.

Известно также, что ключевые преобразователи улучшают качество своей электроэнергии за счёт ухудшения её качества у других потребителей. Поэтому

ещё одним требованием к преобразователям энергии является электромагнитная совместимость с сетью [16], которая в идеале означает потребление устройствами из сети тока синусоидальной формы, совпадающего по фазе с напряжением.

Глава 2. РАЗРАБОТКА КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

2.1 Принципы построения КРМСН и алгоритм формирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения

Наилучшие результаты повышения энергоэффективности от компенсации неактивных составляющих полной мощности (реактивной мощности, мощности искажений и асимметрии) достигаются вблизи потребителей на концевых трансформаторных подстанциях (6-10) / 0,4 кВ.

При этом силовые трансформаторы подстанций находятся в условиях колебаний и отклонений напряжения сети, изменения величины и характера нагрузки. В этих условиях коэффициенты мощности и полезного действия, собственно силовых трансформаторов, находятся на уровне значительно ниже их номинальных значений [41].

Предлагается изменить ситуацию за счет применения новых электронных систем и способов управления, которые позволяют убрать на низкой стороне силовых трансформаторов подстанции неактивные составляющие полной мощности, а на высокой стороне выровнять действующее значение питающего напряжения. При таких воздействиях трансформаторы подстанции будут работать с номинальными энергетическими и эксплуатационными показателями.

Одновременно, решая эту проблему для силового трансформатора со стороны питающей сети, улучшаются условия потребителей от стабилизации напряжения, а со стороны нагрузки (компенсации неактивной мощности на низкой стороне подстанции) снижается ток потребления, потери в силовом трансформаторе и в ЛЭП, улучшаются условия электропередачи полезной активной мощности. Таким образом, предложенные новые технические решения, относящиеся к FACTS технологиям, позволяют комплексно подойти к решению

проблемы, как у потребителей, так и в системах передачи и распределения электроэнергии [30, 31].

Такой комплексный подход в решении проблемы повышения качества и экономии электроэнергии согласуется с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» и рядом отраслевых программ.

Целью диссертации является создание электротехнической системы, обеспечивающей комплексное улучшение технико-экономических показателей при передаче, распределении и потреблении электроэнергии. К ним, прежде всего, отнесем повышение качества напряжения у потребителей и энергетических показателей электрооборудования подстанции и системы электроснабжения в целом, улучшение массогабаритных показателей и упрощение устройства.

Технический результат от достижения поставленной цели заключается в компенсации реактивной мощности на выходе и на его входе силового трансформатора подстанции, а также в стабилизации напряжения на входе подстанции и у потребителей, обеспечивая силовому трансформатору высокие коэффициенты мощности и полезного действия. В процессе компенсации реактивной мощности с одновременной стабилизацией напряжения применен алгоритм, позволяющий существенно упростить систему сравнению с прототипом. Введение дискретной ступени компенсации реактивной батареи мощности виде косинусных конденсаторов И возможность вольтодобавочного устройства действия дополнять конденсатора недокомпенсации или нейтрализовать его действие при перекомпенсации позволило снизить в два раза установленную мощность дополнительного трансформаторного оборудования и устройств силовой электроники. При монтаже предлагаемого устройства на высокой стороне подстанции существенно снижается трудоемкость монтажных работ и материалоемкость монтажного оборудования, что также можно отнести к улучшению массогабаритных показателей и упрощению устройства.

Применение технического решения позволит изменить ситуацию для силового трансформатора подстанции, Но, одновременно с этим достигается полезность и для потребителей и для электрических сетей. У потребителей поддерживается напряжение на заданном уровне и, следовательно, достигнуто рациональное энергопотребление, а в сетях снижается величина потребляемого тока и, следовательно, уменьшены потери при передаче электроэнергии.

Таким образом, технический результат заключается в комплексном повышении энергетической эффективности системы электроснабжения, упрощении устройства, улучшении массогабаритных показателей.

Предлагаемая система подстанции по схеме КРМСН-СТ приведена на рисунок 2.1. В устройстве КРМСН компенсацию реактивной мощности выполняют два блока. Это нерегулируемая батарея косинусных конденсаторов БКК, рассчитанная на компенсацию 50% среднестатистической реактивной мощности подстанции и регулируемый блок, содержащий транзисторный преобразователь фазы со звеном постоянного напряжения ТПФ и вольтодобавочный трансформатор ВТ, рассчитанный также на компенсацию 50% реактивной мощности подстанции.

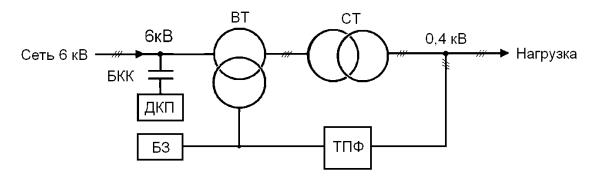


Рисунок 2.1. Функциональная схема силовой части трансформаторной подстанции с КРМСН

Регулируемый блок включен в высоковольтную цепь СТ и кроме компенсации реактивной мощности при помощи специального алгоритма управления выполняет стабилизацию напряжения на входе СТ и у потребителей. Совместная работа ВТ и ТПФ создает регулируемую составляющую реактивной

мощности, которая может быть как емкостной, так и индуктивной. Благодаря этому свойству устройство ТПФ-ВТ обладает возможностью дополнять действие БКК недокомпенсации, или нейтрализовать его действие перекомпенсации. В сравнении с косвенным принципом компенсации реактивной мощности на основе БКК и реактора с тиристорным регулированием, установленная мощность нерегулируемого и регулируемого блоков уменьшается, по крайней мере, в два раза. Кроме этого, компенсаторы, построенные по косвенному принципу, могут работать или в режиме поддержания напряжения, или в режиме поддержания реактивной мощности.

Предлагаемый преобразователь ТПФ-ВТ совмещает эти две функции в одном устройстве, которое имеет улучшенные массогабаритные показатели.

С учетом этих функциональных возможностей предлагается способ управления ТПФ-ВТ в полярных координатах и алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков отклонения напряжения нагрузки (ДОН) и реактивной мощности сети (ДРМ).

При изменении напряжения в сети и соответственно у потребителей, контроль отклонения напряжения производится при помощи ДОН в цепи нагрузки. При повышенном напряжении сигнал ДОН сети $\Delta U_{\scriptscriptstyle H} = U_{\scriptscriptstyle OC} - U_{\scriptscriptstyle 3I} \geq 0$ имеет положительный знак относительно U_{31} , отрицательный знак – при пониженном. При недокомпенсации реактивной мощности подстанции (индуктивный характер тока сети) сигнал Q_c с ДРМ имеет положительный знак, и отрицательный знак - при перекомпенсации (емкостной характер тока сети).

В соответствии с предлагаемым алгоритмом управление инвертором производится по двум каналам регулирования. Первый канал осуществляет регулирования модуля вектора добавочного напряжения изменением степени регулирования δ_u напряжения инвертора при помощи ШИМ, а второй канал

осуществляет регулирование аргумента вектора добавочного напряжения путем регулирования фазы выходного напряжения инвертора β_u .

Направление вектора добавочного напряжения на комплексной плоскости и регулирование его величины производится по знакам и величине $\Delta U_{\scriptscriptstyle H}$, $Q_{\scriptscriptstyle c}$ и производится изменением $\delta_{\scriptscriptstyle U}$, $\beta_{\scriptscriptstyle U}$ в соответствии с таблицей 2.1.

 Таблица 2.1. Алгоритм формирования и регулировании модуля и аргумента вектора

 добавочного напряжения

Знак	Знак	Функция	Увеличение	Уменьшение	Увеличение	Уменьшение
$\Delta U_{_{\scriptscriptstyle H}}$	Q_c	и знак $eta_{\scriptscriptstyle u}$	$\Delta U_{_{\scriptscriptstyle H}}$	$\Delta U_{_{\scriptscriptstyle H}}$	Q_c	Q_c
+	+	$-eta_u$	$eta_u \downarrow, \delta_u \uparrow$	$eta_u\uparrow, \delta_u\downarrow$	$eta_u \downarrow, \delta_u \downarrow$	$eta_u \uparrow, \delta_u \uparrow$
+	-	$+\beta_u$				
-	+	$-(\pi-\beta_u)$				
-	ı	$+(\pi-\beta_u)$				

В соответствии с таблицей 1 алгоритм управления обеспечивает работу устройству в четырех режимах и переход из одного режима работы в другие:

- вольтодобавка с генерацией реактивной мощности;
- вольтодобавка с потреблением реактивной мощности;
- вольтовычет с генерацией реактивной мощности;
- вольтовычет с потреблением реактивной мощности.

Структурная схема оригинального компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения трансформаторной подстанции 6/0,4 кВс предлагаемым алгоритмом двухконтурного подчиненного регулирования [30] приведена на рисунке 2.2.

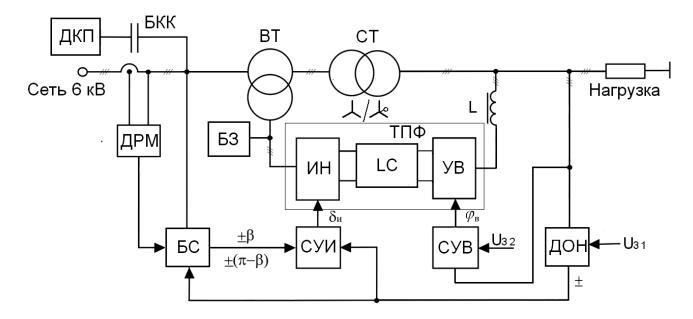


Рисунок 2.2. Структурная схема трансформаторной подстанции с КРМСН

В состав трансформаторной подстанции по схеме КРМСН-СТ входят следующие элементы: СТ и ВТ – силовой и вольтодобавочный трансформаторы; ИН – транзисторный инвертор напряжения с ШИМ системой управления СУИ; УВ – управляемый транзисторный выпрямитель с ШИМ системой управления СУВ;БС - блок синхронизации с сетью и выбора режима работы; ДРМ - датчик реактивной мощности сети; ДОН - датчик отклонения напряжения нагрузки; БКК – батарея косинусных конденсаторов; ДКП – диодно-контакторный пускатель конденсаторов; БЗ - блок защиты элементов ТПФ от возможного обратного высокого напряжения; U₃₁ и U₃₂ – напряжения задания необходимой величины.

На рисунке 2.3 приведена векторная диаграмма напряжений и токов силового трансформатора подстанции с КРМСН[30].

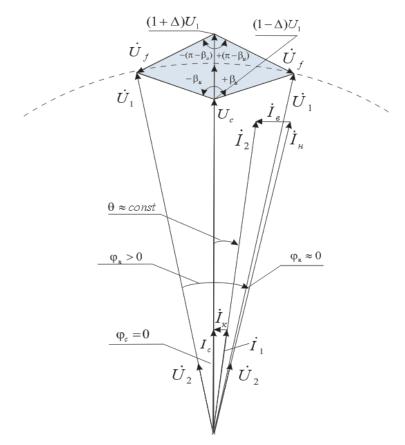


Рисунок 2.3. Векторная диаграмма напряжений и токов силового трансформатора подстанции с КРМСН

На векторной диаграмме используются общепринятые обозначения:

Uc , U_f - напряжение сети и напряжение вольтодобавки;

 $U_{\rm 1}$, $U_{\rm 2}$ - напряжения на первичной и вторичной обмотках силового трансформатора подстанции;

∆ - степень отклонения напряжения сети от номинального уровня;

 I_1 , I_2 - токи первичной и вторичной обмоток силового трансформатора;

 I_{c} , I_{n} - ток сети и ток нагрузки;

 $I_{\rm s}$, $I_{\rm \kappa}$ - ток активного выпрямителя и ток батареи косинусных конденсаторов;

 φ_c , φ_n - фаза тока сети и фаза тока нагрузки;

 θ - фазовый угол между напряжением сети и током нагрузки;

 β_{u} - фазовый угол напряжения вольтодобавки относительно напряжения сети.

Устройство работает следующим образом. Транзисторный преобразователь величины и фазы напряжения ТПФ, в состав которого входит управляемый выпрямитель с входным дросселем и инвертор напряжения с входным LC-фильтром и силовая часть выполнена на интеллектуальных модулях, из напряжения нагрузки U_2 формирует регулируемое напряжение $\dot{U}_f = U_2 \cdot \mathcal{E}(\delta_u) \cdot \mathcal{E}(\delta_s) \cdot \exp(j \cdot \beta_u)$, которое вольтодобавочным трансформатором увеличивается в k_{BT} раз и прибавляется к напряжению сети U_C , образуя напряжение питания $\dot{U}_1 = U_c + k_{BT} \cdot \dot{U}_f$ силового трансформатора и уменьшенное в k_{IT} раз напряжение нагрузки

$$\dot{U}_{2} = \frac{\dot{U}_{1}}{k_{TT}} = \frac{U_{c} + k_{BT} \cdot \mathcal{E}(\delta_{u}) \cdot \mathcal{E}(\delta_{s}) \cdot \exp(i \cdot \beta_{u}) \cdot \dot{U}_{2}}{k_{TT}}.$$
(1)

Здесь k_{IT} и k_{BT} - коэффициенты трансформации силового и вольтодобавочного трансформаторов; $\mathcal{E}(\delta_u)$ и $\mathcal{E}(\delta_e)$ - степени регулирования добавочного напряжения соответственно инвертором напряжения и активным выпрямителем; δ_u , δ_e - скважности при широтно-импульсной модуляции напряжения соответственно инвертора напряжения и активного выпрямителя.

С учетом отклонений напряжения в сети $\Delta U_c = \Delta \cdot U_c$ и падение напряжения на трансформаторах $\Delta \dot{U}_K = \left(\dot{\Delta}_{KB} \cdot k_{BT} / k_{TT} + \dot{\Delta}_{K\Gamma} \right) \cdot U_c = \dot{\Delta}_K \cdot U_c$ выражение (1) запишется в виде

$$\dot{U}_{2} = \frac{U_{c} \cdot (1 \pm \Delta - \dot{\Delta}_{K})}{k_{TT} - k_{BT} \cdot \mathcal{E}(\delta_{u}) \cdot \mathcal{E}(\delta_{s}) \cdot \exp(i \cdot \beta_{u})},$$
(2)

где Δ - степень отклонения напряжения сети от номинального уровня; $\dot{\Delta}_{{\scriptscriptstyle K}}$ - вектор относительного падения напряжения на трансформаторах.

Из выражения (2) и векторной диаграммы (рисунок 2.3) видно, что вектор напряжения нагрузки \dot{U}_2 регулируется по величине и фазе. Регулированием действующего значения напряжения на входе СТ \dot{U}_1 создается стабильное напряжение \dot{U}_2 у потребителей, а регулированием фазы вектора \dot{U}_1 и вместе с ним \dot{U}_2 достигается компенсация реактивной мощности в сети.

Посредством управляемого выпрямителя совместно с конденсатором LC-фильтра и дросселем отображается реактивная составляющая тока нагрузки, который в узле подключения управляемого выпрямителя с входным дросселем к нагрузке суммируются по первому закону Кирхгофа с током нагрузки, обеспечивая во вторичной обмотке силового трансформатора ток, максимально приближающийся по фазе к выходному напряжению подстанции. При выполнении этой функции происходит изменение $\delta_{\rm s}$, влияющее на величину входного напряжения инвертора, регулируемого напряжения $U_{\rm f}$ и величину выходного напряжения $U_{\rm 2}$. Стабилизация напряжения $U_{\rm 2}$ обеспечивается воздействием на канал широтно-импульсной модуляции системы управления инвертора напряжения сигналом обратной связи.

Регулирование фазы вектора \dot{U}_1 в сторону опережения при недокомпенсации и в сторону отставания при перекомпенсации (рисунок 2.3) позволяет совместно с батареей косинусных конденсаторов обеспечить прямую полную компенсацию реактивной мощности на входных зажимах подстанции.

Эту функцию выполняет система двухконтурного управления, построенной по принципу подчиненного регулирования. Системой управления инвертором напряжения регулирование δ_u производится по отклонению напряжения нагрузки, а регулирование величины и смена знака β_u по отклонению и направлению реактивной мощности сети.

При таком способе регулирования и соответствующем коэффициенте трансформации k_{BT} вольтодобавочного трансформатора векторы токов и напряжений соответствующих фаз питающей сети совпадают по фазе и это условие полной компенсации реактивной мощности трансформаторной подстанции практически сохраняется, вследствие того, что $\theta \approx \text{const}$ (рисунок 2.3) при четырехквадрантном формировании вектора добавочного напряжения, в соответствии со способом изменения β_u по знакам и величине сигналов,

снимаемых с датчиков отклонения напряжения нагрузки и реактивной мощности сети.

Целесообразной областью применения предлагаемого устройства являются трансформаторные подстанции предприятий всех отраслей промышленности.

К энергосберегающим системам относят также современные частотнорегулируемые электроприводы, в которых транзисторные преобразователи выполнены с двухсторонним обменом энергией между двигателями через звено постоянного тока и возможностью возврата избыточной энергии генераторного торможения в сеть.

На рисунке 2.4 представлен электротехнический комплекс, в котором система электроснабжения и система электропривода объединены звеном постоянного тока [14].

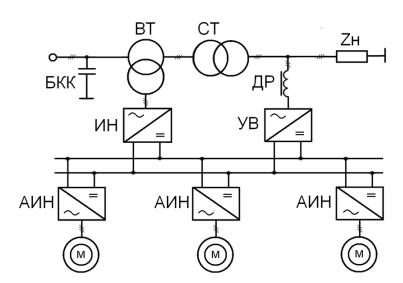


Рисунок 2.4. Структурная схема систем КРМСН-СТ цеховой подстанци с разделением потребителей постоянного и переменного тока

В систему входят силовой СТ и вольтодобавочный ВТ трансформаторы, дроссель ДР, блок косинусных конденсаторов БКК, инвертор напряжения ИН с синхронизированной с сетью системой ШИМ регулирования амплитудой и фазой

напряжения, управляемый выпрямитель УВ с синхронизированной с сетью системой ШИМ регулирования амплитудой и фазой тока.

Система электропривода содержит асинхронные двигатели М с индивидуальными автономными инверторами напряжения АИН и общим управляемым выпрямителем УВ. Обе системы могут работать как самостоятелно, так и в объединенном комплексе.

Объединение систем имеет высокую готовность к применению. Но, кроме этого, создается запас динамической устойчиваети, устраняется нестабильность напряжения на входах инверторов и срабатывание их индивидуальных защит от отклонений напряжения.

2.2 Разработка защиты элементов ТПФ от возможного обратного высокого напряжения

Далее на рисунке 2.5. представлена разработанная схема для пуска и защиты элементов $T\Pi\Phi$ от возможного обратного высокого напряжения на низковольтной обмотке ВДТ.

Здесь ВДТ - вольтодобавочный трансформатор с обмотками низкого ОНН и высокого ОВН напряжения; РК - реверсивный контактор с шунтирующим ШК и подключающим ПК контакторами; ИН, Ф, РВ - инвертор, фильтр и реверсивный выпрямитель транзисторного преобразователя; VS - симмисторы; Roн - резисторы для ограничения напряжения на ОНН; БУС - блок управления симмисторами; VD - стабилитроны; Rot - токоограничивающие сопротивления; ПН – понижающие трансформаторы (один трехфазный или три однофазных).

Зажимы a, b, c блока БУС в зависимости от применяемых ПН необходимо подключать к соответствующим отпайкам ОНН a, b, c. При этом, ПН должен понижать напряжение до (6 - 7) В, если на выходе инвертора 220В. В этом случае, стабилитроны VD выбираются на напряжение пробоя (15 - 16) В.

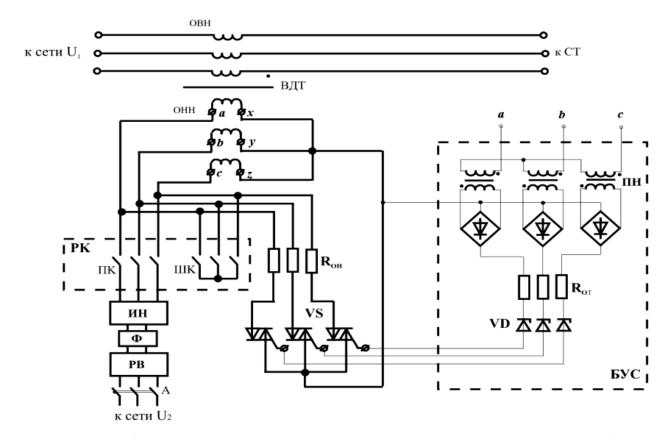


Рисунок 2.5. Разработанная схема для пуска и защиты элементов ТПФ от возможного обратного высокого напряжения на низковольтной обмотке ВДТ

При включении подстанции с КРМСН на сеть последовательная обмотка ВТ (ОВН) оказывается под напряжением. В этот момент обмотка низкого напряжения ВДТ закорочена включенным ШК, и напряжение на ней отсутствует. Контактор ПК разомкнут, инвертор не имеет соединения с ВТ. Когда инвертор готов к работе, его ШИМ напряжение сформировано - происходит ввод инвертора в работу путем переключения ШК на ПК. В момент переключения контакторов с ШК на ПК происходит повышение напряжения на ОНН, стабилитроны VD открываются, и включение обмотки производится сначала симмисторами на Rон, величина которых подобрана таким образом, чтобы фазное напряжение на ОНН равнялось 220В. После того, как контактор ПК встал в работу, симмисторы отключаются.

2.3 Подключение конденсаторов к системе компенсации реактивной мощности трансформаторных подстанций

Конденсаторные установки применяют в компенсаторах реактивной мощности (КРМ), которые наиболее эффективны при подключении их вблизи потребителей. Различают прямую и косвенную компенсацию реактивной мощности.

При прямой компенсации производят дискретное переключение конденсаторов для генерации необходимой реактивной мощности. Переключение ступеней производят тиристорными ключами со специальным управлением.

К недостатку принципа прямой компенсации относят большое количество тиристорных ключей. Также для достижения требуемой точности регулирования необходимо частое переключение конденсаторов, что крайне нежелательно с точки зрения надежности.

При косвенной компенсации помощью батареи \mathbf{c} косинусных конденсаторов генерируется постоянная реактивная мощность из расчета на максимально возможную реактивную мощность подстанции. Избыточную часть реактивной мощности при этом нейтрализуют с помощью регулируемого устройства (реактора), который рассчитан на то же максимальное значение мощности. реактивной Регулирование тока реактора производят подмагничиванием или при помощи тиристоров [41].

Недостатком принципа косвенной компенсации является большая установленная мощность нерегулируемого И регулируемого электрооборудования. Кроме этого, установки, построенные по этому принципу, могут работать или в режиме поддержания напряжения или в режиме поддержания реактивной мощности. Принцип косвенной компенсации не позволяет одновременно компенсировать отклонения напряжения у потребителей и реактивную мощность в сети.

Снизить установленную мощность и, соответственно, массу, габариты и стоимость конденсаторов и регулирующего устройства можно за счет изменения принципа регулирования.

Такой совмещенный принцип компенсации реактивной мощности и отклонений напряжения стал возможным благодаря построению и применению специального управляемого вольтодобавочного устройства ВДУ с непрерывным регулированием, обладающего расширенными функциональными возможностями [4].

Регулируемые и нерегулируемые составляющие реактивной мощности для сравнения двух принципов показаны векторными диаграммами на рисунке 2.6. На рисунке 2.6, а представлена диаграмма для принципа косвенной компенсации, а на рисунке 2.6, б для совмещенного принципа компенсации.

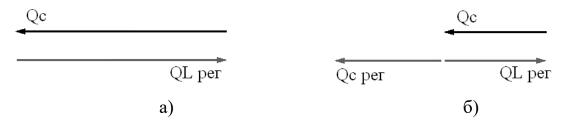


Рисунок 2.6. Диаграммы составляющих реактивной мощности

Из рисунков видно, что при неизменной величине компенсируемой реактивной мощности совмещенный принцип позволяет в 2 раза уменьшить ее регулируемую и нерегулируемую составляющие.

Принципы компенсации на высокой стороне трансформаторной подстанции (ТП) можно охарактеризовать балансом реактивной мощности в соответствии с выражениями:

для конденсаторов с регулируемым реактором

$$Q_H + Q_{PE\Gamma} - Q_C = 0; (3)$$

для конденсаторов с ВДУ

$$Q_H \pm \frac{1}{2} Q_{PE\Gamma} - \frac{1}{2} Q_C = 0. \tag{4}$$

Здесь Qн - реактивная мощность ТП с потребителями, Qper - регулируемая реактивная мощность, Qc- нерегулируемая реактивная мощность конденсаторов.

Преимуществом компенсатора на основе конденсаторов с ВДУ является то, что собственно ВДУ может обеспечить и прямую и косвенную компенсацию, обладая свойством, как генерировать, так и потреблять реактивную мощность. Благодаря этому при недокомпенсации ВДУ дополняет действие конденсаторов, а при перекомпенсации нейтрализует их действие. Кроме этого, в процессе компенсации реактивной мощности ВДУ может с высокой точностью и быстродействием регулировать вверх и вниз напряжение на входе ТП относительно напряжения сети, поддерживая его у потребителей на заданном уровне.

Функциональная схема трансформаторной подстанции с батареей конденсаторов и вольтодобавочным устройством представлена на рисунок 2.7. Подстанция с такой комплектацией, работая в условиях изменений напряжения в сети, величины и характера нагрузки, позволяет быстро и точно разгружать электропередачу от реактивной мощности и снабжать потребителей стабильным напряжением [14].

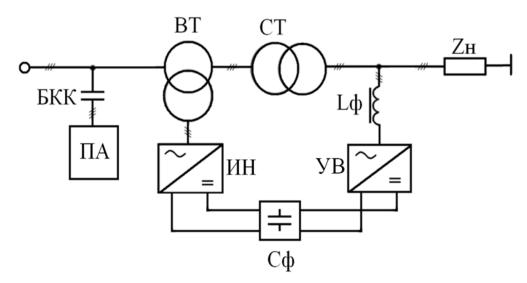


Рисунок 2.7. Функциональная силовая схема КРМСН в составе трансформаторной подстанции (6 -10) / 0,4 кВ

Здесь СТ и ВТ — силовой и вольтодобавочный трансформаторы, УВ - управляемый выпрямитель с L-фильтром, ИН - инвертор напряжения с С-фильтром, Zн — нагрузка, БКК — батарея косинусных конденсаторов, ПА — пусковой аппарат конденсаторов.

ВДУ состоит из вольтодобавочного трансформатора ВТ и транзисторного преобразователя со звеном постоянного тока и четырехквадрантным ШИМ регулированием выходного напряжения и входного тока, в состав которого входит управляемый выпрямитель УВ с входным L-фильтром и инвертор напряжения ИН с входным С-фильтром.

Батарея косинусных конденсаторов в системе генерирует постоянную реактивную мощность, а недостающую или избыточную ее часть генерирует или потребляет ВДУ.

Помимо снижения размера и мощности батареи косинусных конденсаторов при применении совмещенного принципа компенсации, предлагается также решить проблему ее подключения и отключения от сети.

Для управляемого пуска батарей косинусных конденсаторов предлагается применить сравнительно простые и надежные гибридные электронно-электрические аппараты. В отличие от широко применяемого реостатного пуска конденсаторов [31], предлагаемые способы мягкого пуска и аппараты для их реализации не создают бросков тока при включении и дополнительные потери на силовых полупроводниковых приборах при продолжительной работе после включения. Сочетание электронных и электрических аппаратов [37, 38] сохраняет достоинства и устраняет недостатки каждого из них.

Функциональные схемы КУ с аппаратами для подключения батареи косинусных конденсаторов к трехфазной сети приведены на рисунке 2.8. Схемы содержат трансформаторную подстанцию с нагрузкой ТП, высоковольтный выключатель ВВ, батарею косинусных конденсаторов БКК, разрядный резистор РР и контактор РК, короткозамыкатель К, тиристорный ключ ТК с системой

управления СУ (рисунок 2.8, а) или диодный выпрямитель ДВ с реактором Р (рисунке 2.8, б).

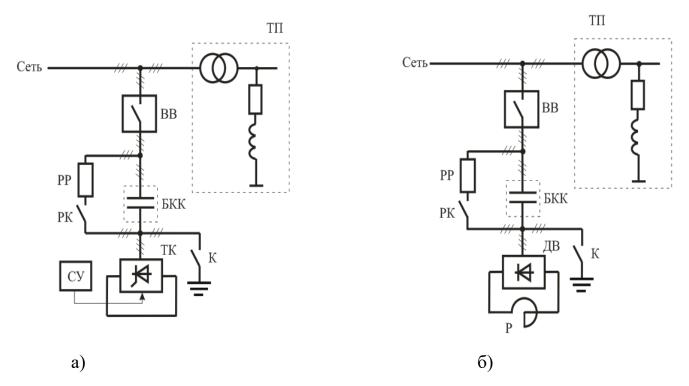


Рисунок 2.8. Схемы трехфазных КУ с аппаратами для подключения конденсаторов на промышленной ТП

с тиристорным ключом (а) и диодным выпрямителем (б)

Схема с тиристорным ключом, обладающая двухсторонней проводимостью тока (рисунок 2.8, а), предназначена для управляемого пуска конденсаторов, соединенных в звезду. При соединении конденсаторов в треугольник тиристорный ключ из трех пар встречно параллельно соединенных тиристоров включают между сетью и конденсаторами.

Схема с диодным выпрямителем и реактором в цепи постоянного тока (рисунок 2.8, б) обладает замечательным свойством. Она не зависимо от момента подключения конденсаторов к сети плавно увеличивает выпрямленный ток по экспоненциальному закону, который определяет процесс плавного нарастания амплитуды входного тока выпрямителя. У трехфазного мостового выпрямителя с RL-нагрузкой в процессе пуска происходит плавное и равномерное нарастание входных токов во всех фазах. Это свойство предлагается использовать для

мягкого подключения к сети трехфазного электрооборудования, включая его между сетевым автоматом и диодным выпрямителем (рисунок 2.8, б). После завершения пускового переходного процесса входные зажимы выпрямителя шунтируются контактором и через диодные ветви выпрямителя производится гашение электромагнитной энергии, накопленной в реакторе.

К недостатку тиристорного пускателя, как электронной части гибридного пускателя, следует отнести наличие микроэлектронной системы управления, снижающей надежность аппарата и системы электроснабжения в целом.

Наиболее надежным для систем электроснабжения и простым в эксплуатации является способ подключения трехфазной батареи конденсаторов к сети через диодный выпрямитель.

Схемы однофазных КУ с аппаратами для подключения конденсаторов приведены на рисунке 2.9. Они предназначены для систем поперечной компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока с тяговыми подстанциями 110 / 27,5 кВ. Схемы КУ содержат высоковольтный выключатель ВВ, подключающий батарею косинусных конденсаторов БКК между фазой А (правое плечо) или/и фазой В (левое плечо) вторичной обмотки тягового трансформатора и рельсом, который заземлен и к нему подключена фаза С. Кроме этого схемы содержат две разновидности гибридных электронно-электрических аппаратов ГА. В качестве электрического аппарата используется однофазный контактор К, а в качестве электронного аппарата диодно-тиристорный ключ с системой управления СУ (рисунок 2.9, а) или диодный выпрямитель с реактором Р (рисунок 2.9, б).

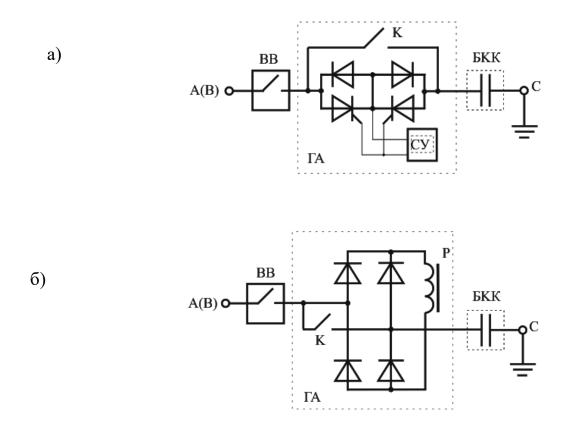


Рисунок 2.9. Схемы однофазных КУ с аппаратами для подключения конденсаторов на тяговой подстанции с диодно-тиристорным ключом (а) и диодным выпрямителем (б)

Результаты математического моделирования режимов работы КУ с аппаратами для подключения конденсаторов на подстанции с диоднотиристорным ключом и диодным выпрямителем приведены в главе 4.

Глава 3. РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В СРЕДЕ MATLAB

3.1 Разработка специализированных измерительных модулей

При исследовании физических процессов электротехнических систем, включающих электромагнитные устройства и компоненты силовой электроники, анализе их процесов энергообмена и оценке энергетических показателей в пусковых и стационарных режимах возникла необходимость в разработке укрупненных информационно-измерительных блоков и модулей в среде MatLabha основе элементов SimulinkLibrary.

В известных работах по математическому моделированию [9, 43, 44] рассмотрены блоки электротехнической библиотеки программного средства MatLab и примеры работы с этими блоками, в [18, 48] даны примеры моделирования силовых схем и систем управления устройств силовой электроники, электропривода, электроснабжения, показаны функциональные возможности отдельных блоков и модулей библиотеки Simulink в форме практикума с иллюстрациями результатов моделирования.

Вместе с тем, как в самом програмном средстве MatLab, так и в литературе по моделированию в этой среде не только отсутствуют математические блоки вычислителей энергетических показателей электротехнических систем, но вообще нет постановки вопросов, связанных с расчетами показателей качества электроэнергии и энергоэффективности.

Поэтому, для проведения исследования энергетическихпоказателей возникает необходимость в разработке специализированных измерительных модулей на основе элементов SimulinkLibrary.

3.1.1 Модуль полной мощности и ее активной и реактивной составляющих

Имеющиеся в библиотеке MatLabSimPowerSystems / measurements модули активной и реактивной мощности [9,44]производят вычисления только по первым гармоникам тока и напряжения и не предназначены для исследования электротехнических устройств с несинусоидальными величинами.

На рисунке 3.1, а приведен специализированный измерительный модуль SPQ, разработанный для определения численных значений полной S (BA), активной P (Вт) и реактивной Q (вар) мощностей, используя для этого сигналы мгновенных значений с датчиков напряжения и тока. Схема вычислителя SPQ приведена на рисунке 3.1, б.

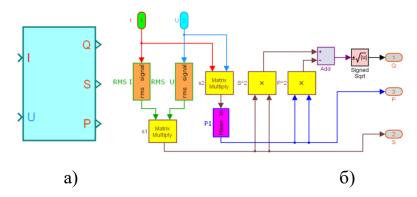


Рисунок 3.1. Модуль активной, реактивной и полной мощности (а) и его развернутая схема (б)

В схеме (рисунок 3.1, б) используются следующие блоки Simulink. RMS – блок вычисления среднеквадратичного значения, X – умножитель, ADD – вычетатель, MEAN – блок вычисления среднего значения, MatrixMultiply – блок для умножения мгновенных величин, SignedSqrt–блок вычисления квадратного корня

Среднеквадратичные (действующие) значения напряжения и тока, учитывающие их гармонический состав, определяются по формулам:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(\theta)^2 d\theta}; I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(\theta)^2 d\theta}, \qquad (5)$$

где $u(\theta)$, $i(\theta)$ - мгновенные значения напряжения и тока, $\theta = \omega t$.

В модуле (рисунок 3.1) численное значение полной мощности определяется через выражения (5), учитывающих их искажения:

$$S = U \cdot I, \tag{6}$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока.

Для определения полной мощности S был использован именно такой способ, потому что он позволяет просто и с минимальной погрешностью вычислить численное значение при любой форме тока и напряжения.

Для вычисления действующих значений тока и напряжения применен блок RMS. Этот блок вычисляет действующее значение сигнала независимо от его формы. Далее перемножение значений U и I выполняется блоком Matrix Multiply из библиотеки MatLab.

Значение активной мощности Р получено вычислением средней (среднеарифметической) величины мгновенного значения полной мощности с помощью блока Mean.

$$P = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} s(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} u(\theta) \cdot i(\theta) d\theta.$$
 (7)

Вычисление реактивной мощности Q в измерительном модуле SPQреализовано по формуле

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$
 (8)

Модель для испытания измерительного модуля SPQв среде MatLab приведена на рисунке 3.2, а. Она состоит из источника напряжения AC Voltage Source, к которому через трансформатор Transformer подключен мостовой диодный выпрямитель Universal Bridgec RL нагрузкой. В момент времени t, равном 0,1с ключ Breaker коммутирует электрическую цепь. Осциллограммы выходных сигналов модуля SPQ приведены на рисунке 3.2,6.

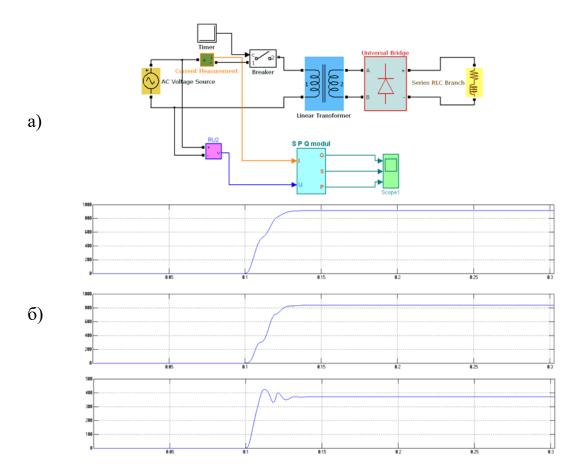


Рисунок 3.2. Модель для испытания измерительного модуля SPQ (a) и осциллограммы (б) реактивной (сверху), активной (снизу) и полной (в середине) мощностей

3.1.2 Модуль для вычисления основных энергетических показателей

Этот модуль приведен на рисунке 3.3, а. Он создан для вычисления основных энергетических показателей, характеризующих эффективность потребления и использования электроэнергии. Это коэффициенты мощности Кт, полезного действия η (КПД) и их произведение, получившее название коэффициента энергоэффективности Кэ системы. Коэффициент энергетической эффективности характеризует эффективность и потребления, и использования электроэнергии. Для вычисления энергетических показателей используются сигналы мгновенных значений с датчиков тока и напряжения на входе (I1 и U1) и на выходе (I2 и U2) системы (устройства). На входы модуля может подаваться как переменные напряжение и ток, так и постоянные. Схема модуля показана на рисунке 3.3, б.

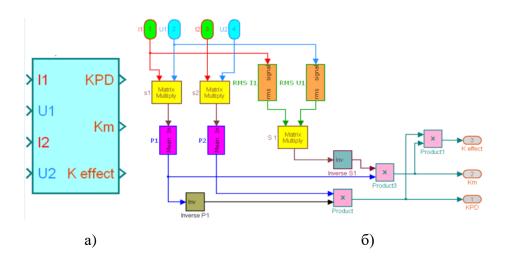


Рисунок 3.3. Модуль для вычисления энергетических показателей через мощности (a) и его развернутая схема (б)

На рисунке 3.3, б использованы следующие блоки Simulink. RMS — вычислитель среднеквадратичного значения, Invx — блок вычисления обратной величины 1/x, X —умножитель, MatrixMultiply — блок для умножения сигналов, MEAN — блок вычисления среднего значения.

Модель испытания измерительного модуля вычисления энергетических показателей приведена на рисунке 3.4. Она состоит из однофазного источника напряжения AC Voltage Source, к которому через трансформатор подключен мостовой диодный выпрямитель с RL-нагрузкой.

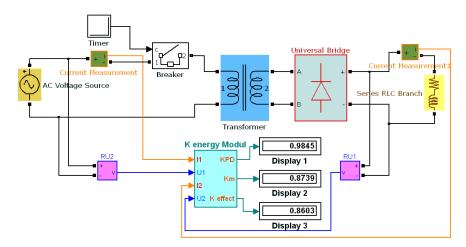


Рисунок 3.4. Модель испытания модуля вычисления энергетических показателей.

Модуль (рисунок 3.3, а) хорошо подходит для вычисления энергетических показателей на отдельных участках энегргосистемы. В его основу положен метод, учитывающий все параметры как входных, так и выходных токов и напряжений. К недостаткам данного модуля можно отнести наличие четырех входов, необходимых для вычисления КПД.

Вычисление КПД произведено по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.\tag{9}$$

Здесь P1 и P2 - значения активных мощностей на входе и выходе.

Вычисление Ктвыполнено по формуле:

$$Km = \frac{P_1}{S_1}. (10)$$

Данный метод вычисления Km учитывает несинусоидальность напряжения, фазовый сдвиг и искажения тока.

3.1.3 Модуль для вычисления коэффициента мощности через коэффициенты искажения и сдвига фазы мновенного значения тока

Следует отметить, что входной коэффициент мощности системы может быть определен другим методом через форму и фазу тока сети. Данный метод реализован в модуле, приведенном на рисунок 3.5, а. Схема измерительного модуля, составленного из элементов Library Browser среды MatLab, приведена на рисунке 3.5, б. Основным элементом здесь является блок, осуществляющий преобразование Фурье и выявляющий необходимую гармонику тока, ее амплитуду и фазу (Fourier). Данный блок в этой модели выполняет вычисление амплитуды и фазы первой гармоники тока.

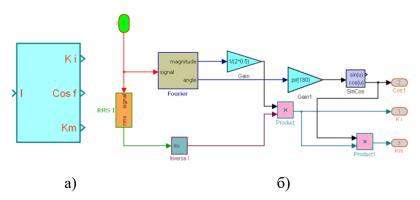


Рисунок 3.5. Модуль для вычисления энергетических коэффициентов через ток (a) и его развернутая схема (б)

На схеме (рисунок 3.5, б) используются следующие блоки Simulink. RMS – вычислитель среднеквадратичного значения, X – умножитель, Fourier – вычислитель амплитуды и фазы первой гармоники, Invx – блок вычисления обратной величины 1/x, SinCos – блок вычисления синуса/косинуса.

Модуль (рисунок 3.5, а) имеет всего один вход для сигнала мгновенного значения исследуемого тока. Такой принцип построения блока удобен при отсутствии несинусоидальности питающего напряжения или в пренебрежении искажениями формы напряжения в виду их малости, что характерно для источников большой мощности.

Определения коэффициента мощности указанным методом (через сигнал мновенного значения тока без контроля сигнала мновенного значения напряжения) стало возможным благодаря тому, что расчет в среде MatLab начинается от нуля напряжения источника (в трехфазной схеме - от нуля напряжения фазы A). Этот метод имеет ограничения при несинусоидальной форме питающего напряжения.

Коэффициент искажения тока определяется по формуле (11) как отношение действующего значения первой гармоники тока, выявленной модулем Fourier, к действующему значению всего тока:

$$v = Ki = \frac{I_{(1)}}{I}. \tag{11}$$

Данный коэффициент характеризует процентный состав первой гармоники тока относительно всех гармоник тока и при улучшении гармонического состава стремится к единице.

Коэффициент фазы тока $\cos \varphi$ вычислен с помощью блока SinCos из сигнала Angle модуля Fourier.

И, наконец, коэффициент мощности определен по формуле

$$Km = v \cdot \cos \varphi,$$
 (12)

из которой можно выявить причины снижения Km и направить мероприятия или на устранение искажений, или компенсацию реактивной составляющей тока (мощности).

Эта функциональная возможность вычислителя Km через параметры тока (рисунок 3.5) выгодно отличает его от вычислителя Km через мощности (рисунок 3.3).

3.1.4 Модуль для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения (коэффициента гармоник)

В основу этого вычислителя-оценщика (рисунок 3.8, а) положен метод, который без спектрального анализа исследуемого напряжения позволяет определить сумму всех высших гармоник и ее процент по отношению к первой. Сумма высших гармоник в процентном отношении к первой является показателем качества напряжения, характеризующим его несинусоидальность, и нормируется российским ГОСТ 13109-97 и международным IEEE 519-1992 стандартами.

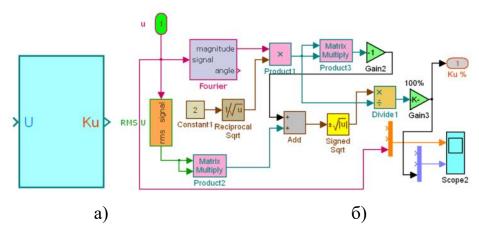
Коэффициент несинусоидальности напряжения

$$Ku = \frac{U_{\Sigma}}{U_{I}} 100\%. \tag{13}$$

Здесь $U_{\Sigma} = \sqrt{U^2 - U I^2}$ — действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения, которое определяется через U и U_1 — действующие значения исследуемого напряжения и его первой гармоники.

Из выражения (13) видно, что при улучшении гармонического состава напряжения Ки стремится к нулю.

Развернутая схема блока коэффициента ДЛЯ вычисления несинусоидальности напряжения приведена на рисунке 3.8, б. Проверка блока в действии выполнена в простейшей схеме, приведенной на рисунке 3.9, а. В ней три источника напряжения с разными амплитудами и частотами соединены нагрузке. последовательно подключены К Исследуемое напряжение И иллюстрирует осциллограмма, приведенная на рисунке 3.9, б.



Рисунке 3.8. Модуль для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения (a) и его развернутая схема (б)

На рисунке 3.8, б приведены следующие блоки Simulink.

X-умножитель, ADD -сумматор, Fourier— вычислитель амплитуды и фазы первой гармоники, RMS — блок вычисления среднеквадратичного значения, MEAN — блок вычисления среднего значения, Devide — блок деления, MatrixMultiply — блок для умножения сигналов, Sqrt — блок вычисления квадратного корня.

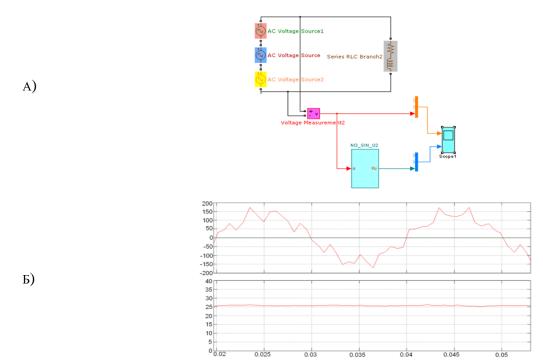


Рисунок 3.9. Модель для численного эксперимента по определению коэффициента несинусоидальности напряжения (а), осциллограмма (б) исследуемого напряжения (сверху) и ее коэффициент несинусоидальности (снизу)

В результате численного эксперимента определено, что коэффициент несинусоидальности исследуемого напряжения со сложной несимметричной формой (процент высших гармоник в исследуемой форме напряжения по отношению к первой гармонике) равен K_u = 25,2% .

3.1.5 Сравнение результатов измерения коэффициента мощности двумя методами

В данном опыте было произведено измерение коэффициента Кт двумя модулями, которые приведены на рисунке 3.3, а и рисунке 3.5, а. Модель с двумя измерительными модулями и результатами эксперимента на цифровых индикаторах приведена на рисунке 3.10, а. Осциллограммы исследуемой модели приведены на рисунке 3.10, б.

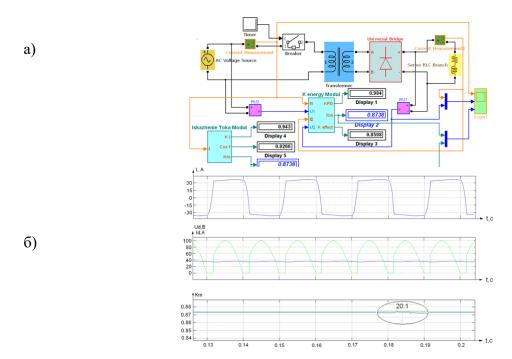


Рисунок 3.10. Модель для сравнительного анализа измерения Km двумя модулями (а) с осциллограммами (б) входного тока (сверху), постоянного тока и напряжения (в центре)и наложение осциллограмм двух вычислителей коэффициента мощности (снизу)

Сравнительный анализ численного эксперимента по определению коэффициента мощности двумя методами при помощи разработанных вычислителей выполнен в виде определения относительной погрешности, график которой представлен на рисунке 3.11.

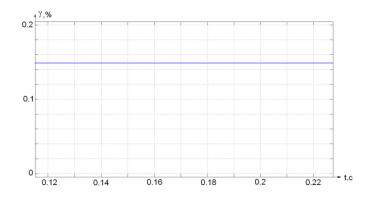


Рисунок 3.11. Временная зависимость относительной погрешности при сравнении результатов измерений коэффициента мощности двумя модулями

Погрешность измерения (рисунок 3.11) составляет всего 0,15%, что позволило убедиться в высоком классе точности разработанных измерительных блоков.

3.2 Разработка модуля транзисторных преобразователей с двухсторонним обменом энергии и их систем управления

При исследовании и разработке электротехнических комплексов и систем, включающих электромагнитные и электромеханические устройства, компоненты силовой электроники и микроэлектроники широкое распро-стронение получил метод математического моделирования с применением программного средстваМatLab с пакетом SimPowerSystem.

Обязательным условием при моделировании ставилось соответствие разработанных модулей реальным устройствам в структуре силовой схемыс выполнением системой управления способов регулирования напряжения и реактивной мощности.

Разработанный транзисторный модуль с ШИМ управлением может работать как в автономном, так и ведомом сетью режиме. Его также можно применять в синхронизированных сетью выпрямительно-инверторных качестве преобразователей и активных фильтров тока сети, автономных инверторов напряжения с регулируемой частотой и действующим значением выходного напряжения, а такжеинверторов напряженияведомом сетьюс регулируемой фазой действующим значением выходного напряжения. Модули всех этих преобразователей использовались при имирационном моделировании исследовании электротехнического комплекса [39], в состав которого входили две электротехнические системы, объединенные звеном постоянного напряжения (система электроснабжения и система электропривода).

Прототимом разрабатываемого вымрямительно-инверторного модуля был взят реальный модуль инвертора на 6-тиIGBT транзисторахРМ300CVA060 фирмы Mitsubishi мощностью 55кВт, напряжением 600В и частотой модуляции до 20кГц.

Далее на рисунке 3.12 изображен разработанный в MatLab выпрямительноинверторный модуль. Его шесть IGBT транзисторов соединены в трехфазную мостовую схему, цветная маркировка фаз A,B и C которой выполнена в соответствии со стандартом желтым, зеленым и красным цветом. Управляющие сигналы подаются с отдельного модуля системы управления через вход pulse. Также имеются информационные выходы, отображающие проводящее состояние каждого из ключей.

Справа приведены параметры каждого транзистора.

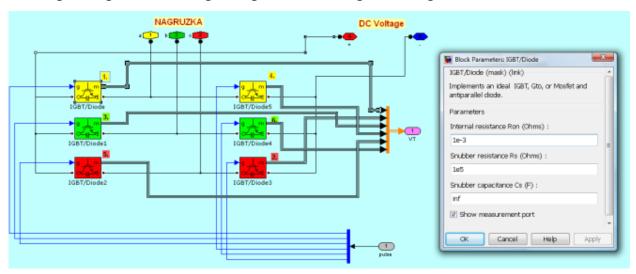


Рисунок 3.12. Схема модели силового модуля и значение параметров транзисторов в ключевом режиме работы

Формирование управляющих импульсов для ключей выполнено по принципу широтно-импульсной модуляции. Модель системы управления и осциллограмма формирования управляющих импульсов для одной фазы приведены на рисунке 3.13.

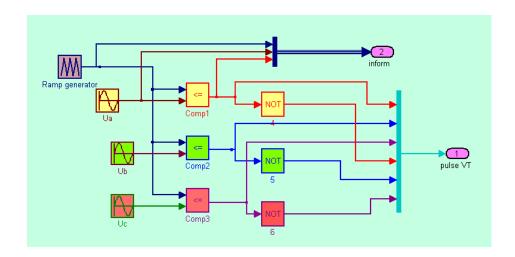


Рисунок 3.13.Схема модели системы управления инвертором напряжения (Ramp generator— генератор опорного напряжения треугольной формы, Ua, Ub, Uc-фазные генераторы синусоидальных сигналов управления, Comp — фазные компараторы, NOT —логические элементы инвертирования)

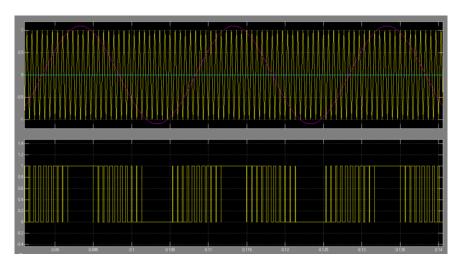


Рисунок 3.14. Осциллограммы входных сигналов (сверху) и выходных управляющих импульсов (снизу) системы управления инвертором

Система управления работает следующим образом. Опорное напряжение треугольной формы необходимой частоты сравнивается управляемым синусоидальным сигналом (рисунок 3.14, верхняя осциллограмма) с помощью компаратора. В данном случае моделирование проводится на частоте опорного напряжения 12кГц. Полученный при этом ШИМ сигнал (рисунок 3.14, снизу) является непосредственно сигналом управления ДЛЯ транзистора. Далее

сформированные сигналы управления в каждой фазе подаются соответственно на 1, 3 и 5 транзисторы, а инверсионные – на 4, 6 и 2 транзисторы.

Осциллограмма результирующего фазного напряжения на выходе инвертора представлена на рисунке 3.15 сверху. Оно имеет двухступенчатую модуляционною форму. Ток этой же фазы представлен на рисунке 3.15 снизу, при работе инвертора на активно-индуктивную нагрузку.

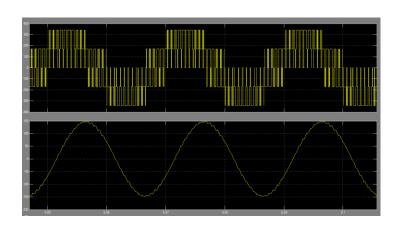


Рисунок 3.15. Напряжение и ток фазы A инвертора при работе на RL нагрузку

Регулирование выходного напряжения возможно импульсным способом. При изменении амплитуды синусоидальных сигналов в системе управления регулируется ширина управляющих ключами импульсов, что позволяет регулировать действующее значение выходного напряжения от нуля до максимума.

Постоянное напряжение и импульсный ток на входе инвертора тока иллюстрирует рисунок 3.16.

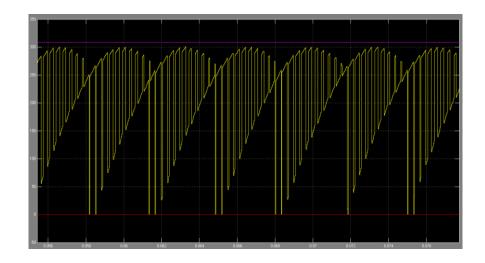


Рисунок 3.16. Постоянное напряжение и импульсный ток на входе инвертора.

Для проверки адекватности КПД разработанного модуля проведено моделирование, модель представлена на рисунке 3.17. За измеряемый параметр была взята разность активных мощностей на входе (Р1) и на выходе (Р2) инвертора, работающего с частотой ШИМ модуляции 20кГц при полной загрузке на RL – нагрузку с Км=0,84. При этом разность активных мощностей составила 656.51 Вт.

За реальный прототип взят модуль инвертор на 6 транзисторах PM300CVA060, 6 IGBT 600V 300A P1=55квт, F=20кГц. Разность активных мощностей (дельта P) по паспортным данным составляет 660 Вт.

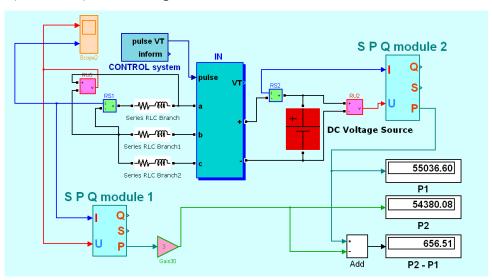


Рисунок 3.17. Модель для испытания модуля инвертора под нагрузкой

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ КРМСН-ТП

4.1 Исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения подстанции

В особенностей данной главе работы описано исследование вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения СТ подстанции для энергообмена изучения процесса В системе целью дальнейшего целенаправленного управления этим процессом.

На рисунке 4.1 представлена схема подстанции с ВТ и ИН, подключенному к отдельному источнику постоянного напряжения. При данном подключении устройства мощность, взятая из отдельного источника постоянного напряжения, создает мощность, передаваемую через ИН и ВТ в цепь высокого напряжения для компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения. В качестве источника постоянного напряжения могут быть использована сеть постоянного напряжения, выпрямитель, подключенный к вторичной цепи СТ той же или другой подстанции предприятия, дизель-генераторная установка с выпрямителем.

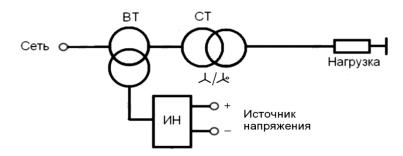


Рисунок 4.1. Схема для исследования инвертора при работе на ВТ

На схеме (рисунок 4.1) первичные обмотки ВТ и СТ соединены последовательно и подключены к сети. Вторичная обмотка ВТ соединена в звезду и подключена к выходу инвертора напряжения ИН.

Принцип регулирования напряжения пояснен следующей формулой.

$$\dot{U}_1 = U_c + k_{BT} \cdot \dot{U}_u \quad , \tag{14}$$

где U_I — напряжение на первичной обмотке СТ; U_c — напряжение сети; U_u — выходное напряжение инвертора; k_{BT} — коэффициент трансформации ВТ.

ВТ в данной схеме является масштабирующим силовым сумматором, позволяющим увеличить напряжение, сформированное инвертором и прибавить его к напряжению сети,

Когда U_c и $k_{BT} \cdot \dot{U}_u$ синфазны, то при их суммировании производится вольтодобавка, если находятся в противофазе — то производится вольтовычет.

Процесс потребления добавочной активной мощности при вольтодобавке или возврат излишней активной мощности при вольтовычете, производится в соответствии с выражением

$$P_{\rm BT} = U_f \cdot Ic \cdot Cos \,\beta_{\scriptscriptstyle \mu} \,, \tag{15}$$

где $P_{\rm BT}$ - мощность, поступающая от ИН через ВТ к СТ ; U_f – напряжение на обмотке высокого напряжения ВТ; I_I – ток в цепи высокого напряжения; $Cos \beta_u$ - косинус угла между добавочным напряжением и напряжением сети, задаваемого при формировании инвертором добавочного напряжения; β_u - фаза выходного напряжения инвертора относительно напряжения сети.

Так как ток в цепи высокого напряжения един, то согласно выражению (14) получим:

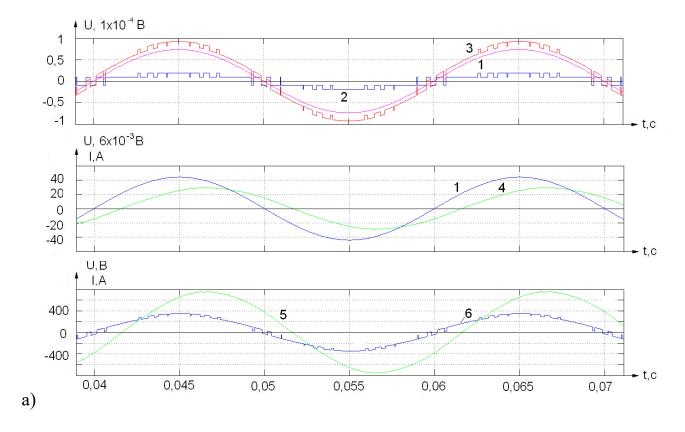
$$P_{\rm C} = P_{\rm CT} + P_{\rm BT} \,, \tag{16}$$

где Pc – активная мощность, потребляемая из сети; Pcт – активная мощность, потребляемая CT с нагрузкой.

Согласно выражениям 15 и 16 сделаем вывод, что Рвт будет дополнительно потребляться из источника постоянного напряжения при положительном $\cos \beta_u$,

т.е. при изменении $\beta_{\scriptscriptstyle u}$ от -90 до 90 градусов (режим вольтодобавки). При углах от 90 до 270 град. (режим вольтовычета) Рвт будет возращена в источник постоянного напряжения.

Рисунок 4.2,а иллюстрирует режим работы при угле $\beta_u = 0$, а рисунок 4.2,6 при угле $\beta_u = 180$. В первом случае режим вольтодобавки, во втором — вольтовычета.



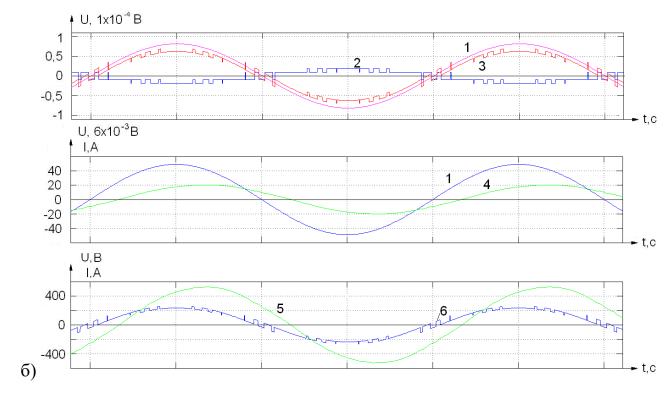


Рис. 4.2. Осциллограмма напряжений и токов при положительной (а) и отрицательной (б) продольной вольтодобавке с ШИМ: 1 — напряжение сети; 2 — добавочное напряжение; 3 — напряжение на входе СТ; 4 и 5 — токи в цепях высокого и низкого напряжения СТ; 6 — напряжение на нагрузке

Из осциллограмм видно, что напряжение на входе СТ (кривая 3) является суммой напряжения сети (кривая 1) и добавочного напряжения (кривая 2). Фаза φ тока как в цепи высокого, так и низкого напряжения сохраняет свое естественное значение, так как в рассматриваемой схеме (рис. 4.1) компенсация реактивной мощности не производилась.

Процесс регулируемой компенсации реактивной мощности производится в соответствии с выражением:

$$Q_{\rm C} = Q_{\rm CT} + Q_{\rm BT},\tag{17}$$

где Qc — реактивная мощность, потребляемая из сети; Qcт — реактивная мощность, потребляемая CT с нагрузкой; Qвт — добавочная регулируемая реактивная мощность, поступающая от ИН через BT к CT.

При регулировании инвертором напряжения величины и знака Qвт, возможна как генерация реактивной мощности, так и ее потребление.

$$Q_{\rm BT} = U_{\rm BT} \cdot Ic \cdot \sin \beta_{u} \,. \tag{18}$$

Здесь $Sin \beta_u$ - синус угла между добавочным напряжением и напряжением сети, задаваемого при формировании инвертором добавочного напряжения.

Согласно выражениям 17 и 18 сделаем вывод, что Qвт будет дополнительно потребляться из сети при положительном $Sin \beta_u$, при φ то 0 до 180 градусов. При углах от 180 до 360 град. будет происходить процесс генерации Qвт для нагрузки, тем самым снижая ее потребление из сети. Таким образом, генерируя реактивную мощность дополнительным устройством ВТ-ИН для СТ и нагрузки, не потребляем ее из сети (компенсируем реактивную мощность в сети).

Это достигается тем, что ток системы, определяемый величиной и характером нагрузки, совмещается с напряжением сети Uc за счет регулирования фазы вектора напряжения на входе CT (рисунок 2.3).

Рисунок 4.3 иллюстрирует режимы работы при углах $\beta_u = +90$ и $\beta_u = -90$ град. В первом случае (рисунок 4.3, а) реактивная мощность потребляется из сети, во втором (рисунок 4.3, б) — генерируется. Первый режим применяется при перекомпенсации сетевой батареей косинусных конденсаторов, второй - при недокомпенсации.

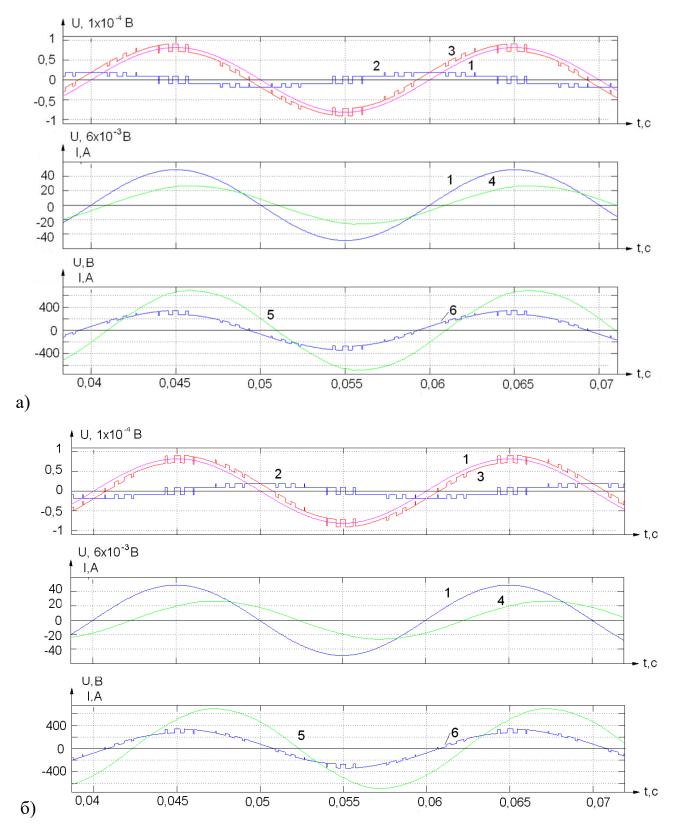


Рисунок 4.3. Осциллограмма напряжений и токов при опережающей (а) и отстающей (б) поперечной вольтодобавке с ШИМ: 1 — напряжение сети; 2 — добавочное напряжение; 3 — напряжение на входе СТ; 4 — ток в цепи высокого напряжения; 5 — ток в цепи низкого напряжения; 6 — напряжение на нагрузке

Из осциллограмм (рисунок 4.3) видно, что напряжение на входе СТ (кривая 3) является суммой напряжения сети (кривая 1) и добавочного напряжения (кривая 2). Действующие значения напряжений 1 и 2 в процессе регулирования не измены, а напряжения 3 при опережающем и отстающем регулировании изменяется одинаково.

Регулирования фазы тока сети относительно напряжения сети при помощи устройства ВДТ-ИН в сторону опережения или отставания эквивалентно подключению плавно регулируемой емкости конденсатора сети индуктивности дросселя. Такое регулирование реактивной мощности можно перевозбужденным сравнивать недовозбужденным И синхронным компенсатором соответственно, отмечая сравнении, при ЭТОМ высокое быстродействие предлагаемого устройства.

Таким образом, вольтодобавочное устройство по схеме ВТ-ИН обладает универсальными функциональными возможностями при регулировании реактивной мощности и напряжения. Оно может регулировать, как емкостную, так и индуктивную реактивную мощность при одновременном регулировании напряжения вверх и вниз относительно напряжения сети.

4.2 Исследование работы КРМСН в составе цеховой подстанции, объединенной по звену постоянного напряжения с системой частотно-регулируемого электропривода

К энергосберегающим системам относят современные частотнорегулируемые электроприводы, в которых транзисторные преобразователи выполнены с двухсторонним обменом энергией между двигателями через звено постоянного напряжения и возможностью возврата избыточной энергии генераторного торможения в сеть.

При рассмотрении цеховых подстанций с разноообразным содержанием нагрузок ввиду специфики их работы, разделим нагрузку цецовой подстанции на

два типа по роду тока: наргузка постоянного тока (в основном электропривод) и нагрузка переменного тока. В этом случае рационально подключить нагрузку постоянного тока к общим шинам постоянного напряжении, питающихся от УВ. На рисунке 4.4 представлена схема цеховой подстанции, где система электроснабжения и система электропривода объединены звеном постоянного напряжения.

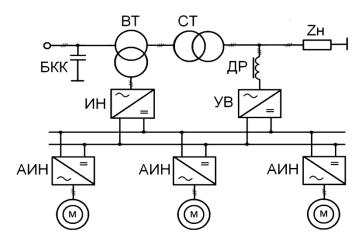


Рисунок 4.4 — Структурная схема цеховой подстанции с объединенной по звену постоянного напряжения с системой частотно-регулируемого электропривода

В систему электроснабжения с КРМСН входят силовой СТ и вольтодобавочный ВТ трансформаторы, дроссель ДР, блок косинусных конденсаторов БКК, инвертор напряжения ИН с синхронизированной с сетью системой ШИМ регулирования амплитудой и фазой напряжения, управляемый выпрямитель УВ с синхронизированной с сетью системой ШИМ регулирования амплитудой и фазой тока.

Система электропривода содержит асинхронные двигатели М с индивидуальными автономными инверторами напряжения АИН и общим управляемым выпрямителем УВ. Обе системы могут работать как самостоятелно, так и в объединенном комплексе.

Объединение систем [14] имеет высокую готовность к применению. Но, кроме этого, создается запас динамической устойчивасти, устраняется

нестабильность напряжения на входах инверторов и срабатывание их индивидуальных защит от отклонений напряжения.

На рисунке 4.5 приведена блочно-модульная модель цеховой подстанции, объединенной с системой частотно-регулируемого электропривода.

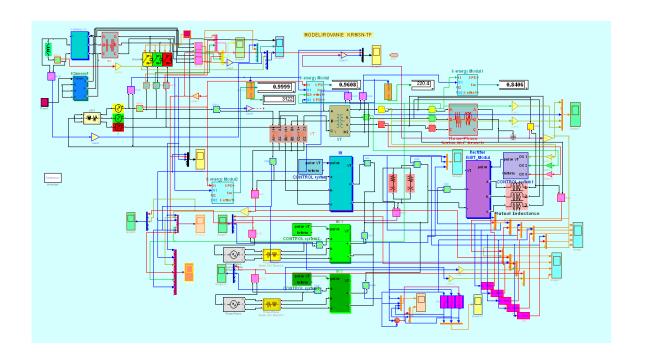


Рисунок 4.5. Модель цеховой подстанции с КРМСН, объединенной с системой частотно-регулируемого электропривода по звену постоянного напряжения

В состав математической модели комплекса (рисунок 4.5) входят силовой и вольтодобавочный трансформаторы, блок косинусных конденсаторов и дроссель.

Электронная часть комплекса содержит АТКП IGBT-модулей двухсторонним пропуском энергии и СУ силовыми модулями, обеспечивающими ШИМ напряжения на соответствующих частотах синусоидальным формированием токов. Два модуля ИН и УВ, входящие в состав системы электроснабжения, имеют предвключенные, синхронизированные сфазированние с сетью системы управления, а СУ для АИН имеют асинхронные системы с индивидуальной интенсивностью пуска в прямом или обратном порядке следования фаз.

Нагрузками имитационной модели комплекса являются основные RL-потребители, подключенные непосредственно к выходным шинам подстанции и дополнительные RL - потребители, работающие от общих шин постоянного тока через индивидуальные АИН в режимах потребления и генерации электроэнергии на разных частотах. Процесс генерирации энергии моделируется RL- нагрузкой с противо ЭДС, частота которой согласуется с выходной частотой инвертора.

В многофункциональном электротехническом комплексе все транзисторные преобразователи объединены шинами постоянного напряжения, через которые обмен происходит энергией между потребителями И источниками электроэнергии. Это прежде всего энергообмен между электроприводами, одни из которых работают в двигательном режиме, а другие в режиме генераторного Обмен торможения. энергией происходит также между системой электроприводов и преобразователями системы электроснабжения, которые меняют направление потоков активной и реактивной энергии при регулировании амплитуды и фазы входного тока УВ и действующего значения и фазы выходного напряжения ИН в процессе компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения нагрузки.

Процесс обмена энергией между двумя электроприводами через звено постоянного напряжения можно наблюдать на рисунке 4.6 по изменению токов на входе инверторов. Здесь осциллограммами показан процесс, когда один из двигателей, работая в режиме генераторного торможения на частоте 25 Гц, создает на входе инвертора отрицательный ток 50 A, а другой в двигательном режиме на частоте 50 Гц, создает на входе инвертора положительный ток 90 A. Видно, что в результате энергообмена через шины постоянного тока группа электроприводов потребляет ток 40 A., снижая потребление энергии из сети.

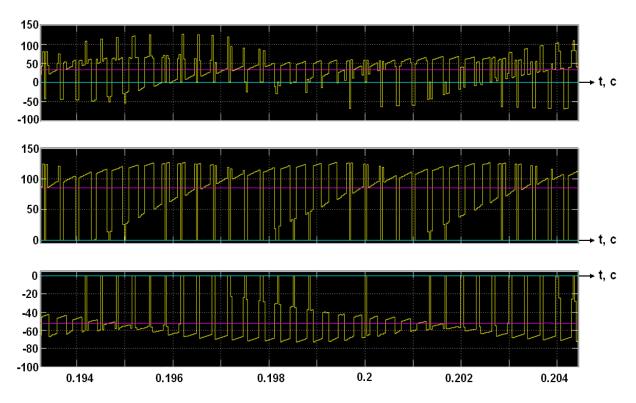


Рисунок 4.6. Мгновенные и средние значения токов на входах АИН при генерации энергии на частоте 25 Гц (снизу), потреблении энергии на частоте 50 Гц (в середине) и их суммарные значения при работе от общих шин постоянного напряжения (сверху)

На рисунке 4.7 осциллограммами иллюстрируются процессы на входе и выходе трансформаторной подстанции при компенсации реактивной мощности сети с одновременной стабилизацией напряжения нагрузки при пониженном напряжении в сети и номинальной RL-нагрузкой. Также нагрузкой являются и электроприводы

На рисунке 4.7, а показано формирование посредством ВТ и транзисторного ИН с ШИМ опережающего относительно сети напряжения на входе подстанции, а на рисунке 4.7, б формирование посредством транзисторного УВ с ШИМ опережающего тока относительно напряжения нагрузки.

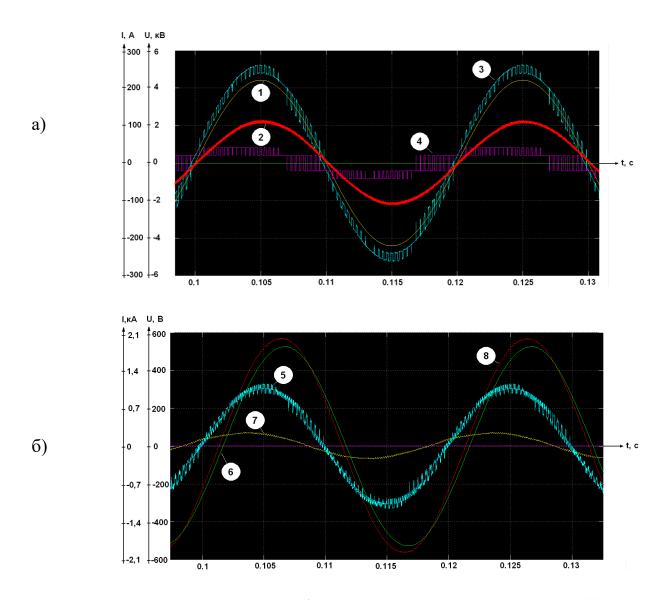


Рисунок 4.7 - Осциллограммы фазных напряжений и токов на высокой (а) и на низкой (б) стороне трансформаторной подстанции: 1 - напряжение сети; 2 - ток, потребляемый из сети; 3 — напряжение питания первичной обмотки СТ; 4 — напряжение на первичной обмотке ВТ; 5 - напряжение на вторичной обмотке СТ; 6 - ток нагрузки; 7 - ток на входе выпрямителя; 8 — ток вторичной обмотки СТ.

На рисунках 4.8 и 4.9 показаны осциллограммы напряжений и токов, полученные при моделировании системы КРМСН-ТП с объединенной системой частотно-регулируемых электроприводов в среде MatLab при вольтодобавке, на рисунках 4.10 и 4.11 показаны осциллограммы напряжений и токов при вольтовычете.

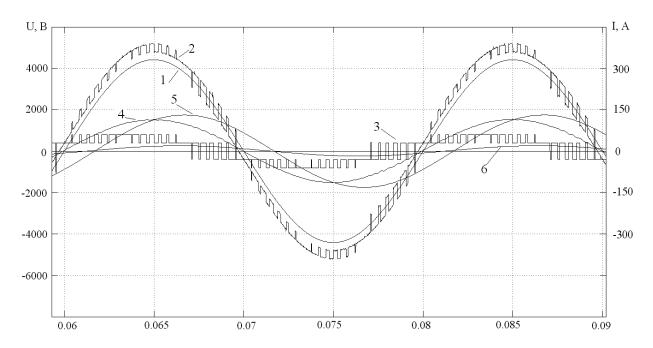


Рисунок 11. Осциллограммы фазных напряжений и токов системы КРМСН – ТП при пониженном напряжении сети: 1 и 2- напряжения сети и на входе СТ; 3 – напряжение на вторичной обмотке ВТ и на выходе ИН; 4 - ток, потребляемый из сети; 5 – ток первичных обмоток СТ и ВТ; 6 - ток вторичной обмотки ВТ и на выходе ИН, уменьшен в 15 раз

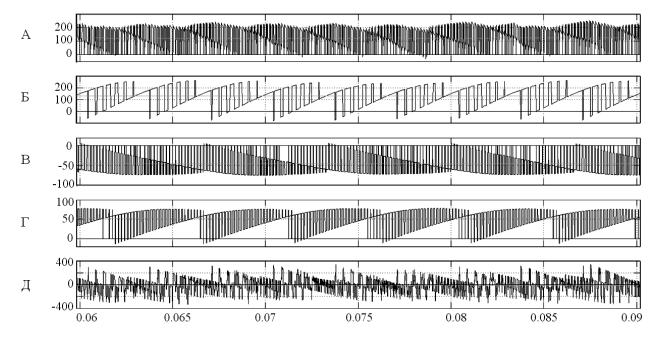


Рисунок 12. Токи в звене постоянного напряжения системы КРМСН-ТП при вольтодобавке: А - суммарный ток, Б – ток на входе ИН-ВТ (частота 50 Γ ц), B – ток на входе АИН –АД 1 (частота 25 Γ ц) в генераторном режиме, Γ – ток на входе АИН-АД 2 (частота 35 Γ ц) в двигательном режиме, Π – ток конденсатора в звене постоянного напряжения

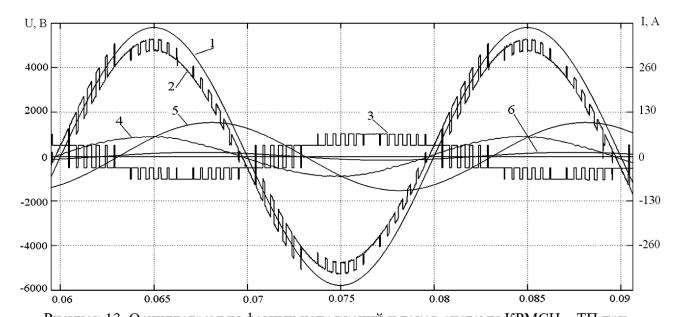


Рисунок 13. Осциллограммы фазных напряжений и токов системы КРМСН – ТП при пониженном напряжении сети: 1 и 2- напряжения сети и на входе СТ; 3 – напряжение на вторичной обмотке ВТ и на выходе ИН; 4 - ток, потребляемый из сети; 5 – ток первичных обмоток СТ и ВТ; 6 - ток вторичной обмотки ВТ и на выходе ИН, уменьшен в 15 раз

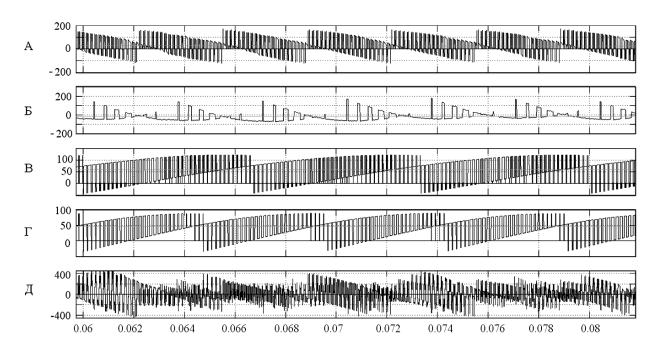


Рисунок 14. Токи в звене постоянного напряжения системы КРМСН-ТП при вольтовычете: A - суммарный ток, Б — ток на входе ИН-ВТ (частота 50 Γ ц), B — ток на входе АИН —АД 1 (частота 25 Γ ц) в генераторном режиме, Γ — ток на входе АИН-АД 2 (частота 35 Γ ц) в двигательном режиме, Π — ток конденсатора в звене постоянного напряжения

4.3 Исследование диодно-контакторного пускателя трехфазной батареи косинусных конденсаторов

Блочно-модульная модель пускателя, подключающего конденсаторы к трехфазной сети на высокой стороне трансформаторной подстанции [19], приведена на рисунке 4.12.

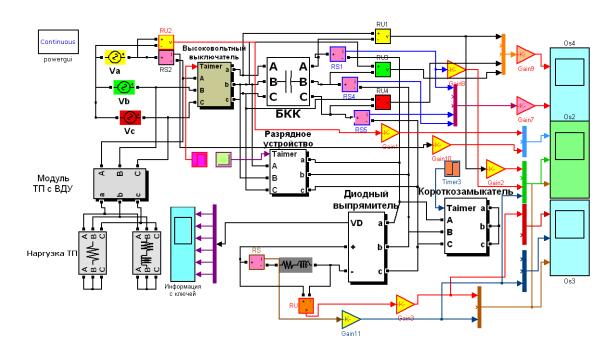


Рисунок 4.12. Модель для исследования процессов подключения конденсаторов к модулю трансформаторной подстанции с КРМСН

Переходные процессы в электронно-электрическом аппарате на конденсаторах и в сети иллюстрируют рисунки 4.13 и 4.13 [19].

Из осциллограмм на рисунке 4.13 видно, что после включения выключателя в 0.02 секунды напряжения и токи конденсаторов всех трех фаз плавно и быстро возрастают до номинальных значений по экспоненциальному закону. Для удобства сопоставления результатов численного эксперимента осциллограммы представлены в относительных единицах.

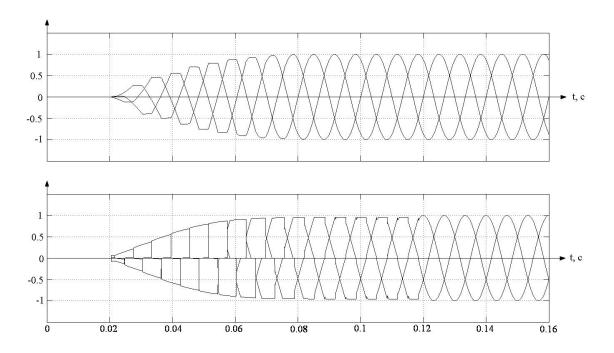


Рисунок 4.13. Осциллограммы трехфазных напряжений (сверху) и токов (снизу) конденсаторов при пуске

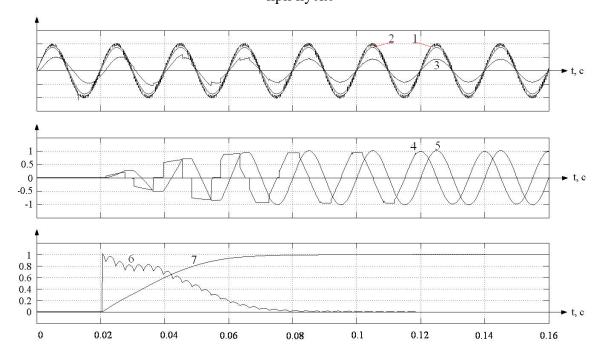


Рисунок 4.14. Осциллограммы напряжений и токов одной фазы сети (сверху), конденсатора той же фазы (в середине) и реактора (снизу)

На осциллограммах (рисунок 4.14) введены следующие обозначения: 1- напряжение на входе силового трансформатора подстанции, 2 и 3- напряжение и

ток сети, 4 и 5 — ток и напряжение конденсаторов одной фазы, 6 и 7 — напряжение и ток реактора.

В момент времени, равный 0.08 секунды конденсаторы во всех фазах (рисунок 4.13, рисунок 4.14) полностью зарядились и в 0.12 секунды электронная часть гибридного пускового аппарата, как выполнившая свою функцию, была зашунтирована короткозамыкателем и таким образом отключена от заряженных конденсаторов (исключена из системы электроснабжения цеха).

Численным экспериментом для одной фазы ТП показано (рисунок 4.14) изменение величины и фазы тока сети в процессе заряда конденсатора по закону изменения тока реактора в цепи выпрямленного тока диодного выпрямителя. Увеличенные два фрагмента осциллограммы (рисунок 4.14, сверху), рисунке 4.15. Здесь начальную представлены на стадию подключения конденсаторов иллюстрирует фрагмент слева, а завершающую стадию фрагмент справа.

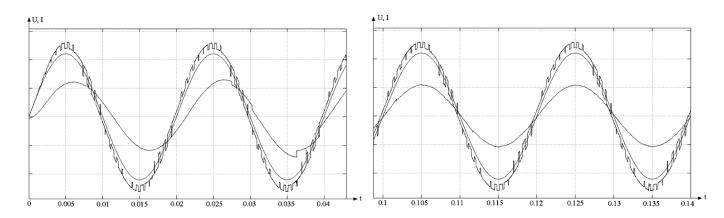


Рисунок 4.15. Фрагменты осциллограмм напряжения и тока сети, совмещенные с напряжением на входе ТП в процессе подключения конденсаторов

Из численного эксперимента видно, что после завершения процесса подключения конденсаторов ток в сети уменьшился и стал совпадать по фазе с напряжением сети. Уменьшение тока сети произошло пропорционально повышению коэффициента мощности.

Следует заметить еще одно свойство способа подключения конденсаторов к сети через диодный выпрямитель. Оно заключается в том, что в процессе нарастания по экспоненте тока реактора увеличивается угол коммутации диодов выпрямителя, постепенно превращая трапецеидальную форму напряжения и тока конденсаторов в синусоидальную [19].

Отметим, что при моделировании переходные процессы в пусковом аппарате не повлияли на напряжение питания подстанции и потребителей. Это обусловлено тем, что мощность источника в модели выбрана значительно больше, чем у нагрузки.

Глава 5. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРМСН-ТП

5.1 Исследования энергетических показателей в системе КРМСН-ТП

Одним из значимых технико-экономических показателей при рассмотрении применения устройств **KPMCH** целесообразности на трансформаторных энергоэффективность. подстанциях является Если точнее, полная характеристика как, несомненно, положительного, так и отрицательного влияния КРМСН на энергоэффективность устройств электроснабжения. Это вопросы, связанные с планированием и технико-экономическим обоснованием применения новой техники. Не навредитли КРМСН потребителю электроэнергии высокочастотными искажениями напряжения? Кокой процент искажений тока, потребляемого из сети и величина потерь электроэнергии в ЛЭП от этих искажений? Не будет ли в конечном итоге фактического возрастания, а не уменьшения энерго-потребления подстанцией? При положительном результате по экономии электроэнергии будет ЛИ срок окупаемости соответствовать нормативному?

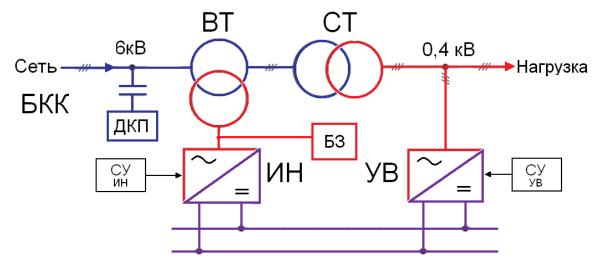


Рисунок 5.1. Структурная схема системы КРМСН-ТП

Решая проблему компенсации реактивной мощности в сети и стабилизации напряжения у потребителей в условиях отклонений, колебаний и скачков напряжения в сети, изменений величины и фазы тока нагрузки, КРМСН [5,14], воздействуя на напряжения и токи, оказывает влияние на их форму.

При проведении ряда численных экспериментов, в рамках основной направленности работы на повышение энергетической эффективности, ставится комплексная задача количественной оценки энергетических показателей и перетоков мощностей в системе КРМСН-ТП, а именно оценка во всех режимах работы следующих энергетических коэффициент и технико-экономических показателей, характеризующих повышение качества и экономию электроэнергии.

- 1) коэффициенты искажения токов сети Кіс, нагрузки Кін и выпрямителя Ків, подключенного к вторичной цепи силового трансформатора подстанции. При исследовании будем учитывать искажения, вносимые только работой КРМСН, а не сетью и нагрузкой.
- 2) коэффициенты несинусоидальности напряжения потребителей Кин, напряжения на высокой стороне силового трансформатора Кит и добавочного напряжения, сформированного инвертором напряжения с ШИМ и вольтодобавочным трансформатором Кид.
- 3) величины активной P, реактивной Q и полной S мощностей, а также коэффициенты мощности и полезного действия по штатной и новой схемам [30] ТП для оценки экономии электроэнергии от степени повышения новым устройством эффективности потребления и использования электроэнергии

Исследование проведено в среде МАТLAВ при помощи разработанного специализированного комплекса математических моделей [20]. Моделирование производилось при изменении напряжения питающей сети 6 кВ в пределах $\pm 10\%$ и коэффициенте мощности нагрузки 0,84. При этом напряжение на выходе подстанции поддерживалось на номинальном уровне 220В с точностью до $\pm 0,5\%$, а коэффициент мощности на входе подстанции на уровне $\pm 0,99$. Численные

эксперименты сопровождались осциллографированием и проводились в следующем порядке.

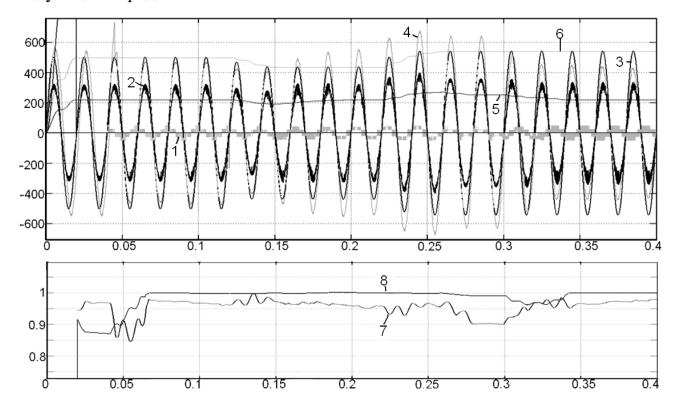


Рисунок 5.2. Осциллограммы работы системы КРМСН-ТП в динамике

1 — напряжение вольтодобавки, 2 — напряжение нагрузки, 3 и 6 — напряжение сети и его амплитудное значение, 4 — ток, потребляемый подстанцией из сети, 5 — действующее значение напряжения нагрузки, 7 — КПД системы КРМСН-ТП), 8 — Км на входе ТП

На интервале 0-0.04с произведен пуск модели, переходные процессы, связанные с принципами расчетов MATLAB, сбор информации интеграторами. БКК и КРМСН отключены, СТ с нагрузкой подключены сразу.

В момент времени 0.04с начато подключение БКК и КРМСН. Линейное напряжение питающей сети номинальное 6 кВ, напряжение на нагрузке 220В. Стабилизация напряжения не требуется, необходима только компенсация реактивной мощности. Поэтому фаза напряжения вольтодобавки 90 град относительно напряжения сети, режим компенсатора. Конденсаторами совместно с КРМСН выполнена полная компенсация реактивной мощности нагрузки, Км на входе подстанции 0,999.

Во время 0,12 с произошла просадка напряжения сети и, как следствие, снижение напряжения на нагрузке до 191В. Это привело к снижению тока, мощности и производительности потребителя.

На интервале 0.12 - 0.2 с система управления отработала на изменившийся режим. Изменено действующее значение и фаза напряжения вольтодобавки. Напряжение нагрузки восстановлено до 220В, Км на входе подстанции равен 0.999. Ток, потребляемый подстанцией из сети, при этом, увеличился. Это объясняется тем, что при понижении питающего напряжения сети нагрузка нуждалась в прежней активной мощности, которую вновь восполнил КРМСН.

Следует отметить, что при возникновении в энергосистеме дефицита электроэнергии в часы пика нагрузки (пониженное напряжение и повышенный ток) КРМСН сможет частично выполнять свои функции только при подключении выпрямителя к автономному резервному источнику питания, например, к дизельгенератору.

В момент времени 0.23 с произошло мгновенное повышение напряжения сети и, как следствие, скачек напряжения нагрузки до 270В. Такое высокое значение напряжения нагрузки обусловлено тем, что в момент скачка напряжения сети ВДУ работает еще в режиме вольтодобавки.

0.34 с — система управления отработала на изменившийся режим, изменено действующее значение напряжения вольтодобавки и его фаза относительно напряжения сети. Теперь она больше 90 градусов — произошел переход КРМСН в режим вольтовычета. Напряжение нагрузки было понижено до 220 В. Во время переходного процесса Км снижался с 0,999 до 0,9. Такая реакция измерителя коэффициента мощности вызвана как раз изменением фазы напряжения вольтодобавки, в переходное время изменялась его частота. Затем по завершении переходного процесса Км установился 0,9992.

Ток, потребляемый подстанцией из сети, при этом, снизился. Это объясняется тем, что при повышенном питающем напряжении сети нагрузка

нуждается в прежнем количестве активной мощности, излишек которой с помощью КРМСН и возвращается в сеть.

Решая задачи компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения КРМСН, воздействуя на напряжение и ток, оказывает влияние на их форму, внося свои искажения. Для того, чтобы далее адекватно оценить энергоэффективность подстанции при применении КРМСН были рассчитаны Кии Кі для всех кривых токов и напряжений в системе КРМСН-ТП при различных режимах работы.

5.2 Исследование коэффициентов искажения токов

Коэффициент искажения тока определяется по формуле (1) как отношение действующего значения первой гармоники тока к действующему значению всего тока:

$$v = Ki = \frac{I_{(1)}}{I}. (19)$$

Данный коэффициент характеризует процентный состав первой гармоники тока относительно всех гармоник тока и при улучшении гармонического состава стремится к единице.

На рисунке 5.3 сверху приведены осциллограммы тока, потребляемого активным выпрямителя Ів (1), тока потребляемого нагрузкой Ін (2) и тока вторичной обмотки силового трансформатора І2 (3), а снизу Кі этих токов, соответственно 1, 2 и 3.

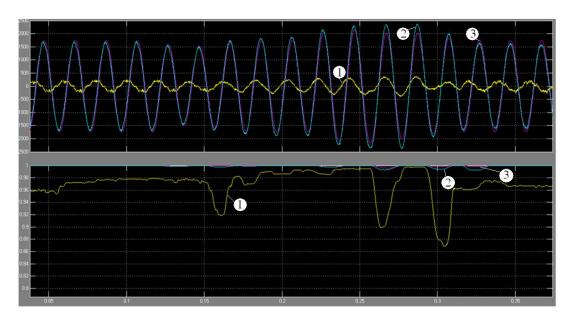


Рисунок 5.3. Осциллограммы исследуемых токов и их коэффициенты искажения

По этим данным можно сделать вывод, что Кі токов Ін и І2 стремится к 1, а это значит что работа КРМСН практически не вносит искажения в эти токи. Ток І2, являясь суммой токов Ін и Ів (с видимыми искажениями) в целом имеет незначилельные искажения. Также на осциллограмме видна частичная компенсация реактивной мощности нагрузки, І2 меньше Ін по амплитуде и немного его опережает по фазе. Что же касается тока Ів, то наивысшее значение его коэффициента искажения наблюдается в режиме вольтодобавки (в среднем 0,99), промежуточное значение в режиме компенсатора (в среднем 0,975) и наихудшее в режиме вольтовычета (в среднем 0,965).

Резкие просадки Кі токов на рисунке 5.3 (а также многих величин далее) объясняются изменением фазы тока и напряжения в системе УВ-ИН при изменении режима работы (переход КРМСН из вольтодобавки в вольтовычет и тд). В этих переходных периодах изменяется частота токов и напряжений в УВ и ИН, на что так и реагигуют все синхронизированные на частоту сети 50 Гц вычислители MatLab. Данные кратковременные искажения следует воспринимать как ошибку вычисления.

Рисунок 5.4 является увеличенным фрагментом с рисунка 5.3, при этом на участке с наихудшими показалелями Ki, а именно при работе КРМСН в режиме

вольтовычета на интервале времени от 0,34 до 0,39 с. Обозначения исследуемых токов и их Кі проиллюстрированы в соответствии с рисунком 5.4.

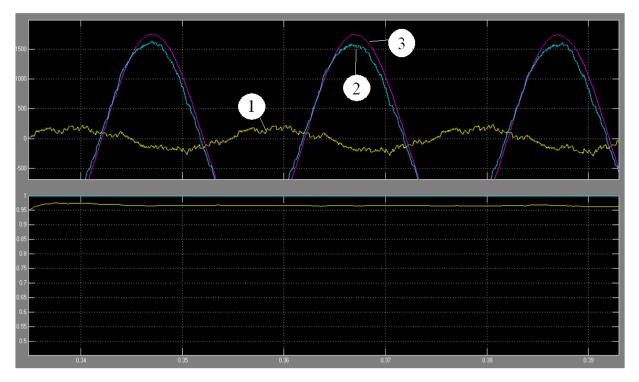


Рисунок 5.4. Фрагмент осциллограммы исследуемых токов и их коэффициентов искажения

5.3 Исследование коэффициентов несинусоидальности напряжений

В ходе проведения эксперимента были осциллографированы и исследованы: напряжение питающей сети Uc (рисунок 5.5 и 5.6, кривая 1), напряжение U1, приходящее на высокую сторону силового трансформатора (рисунок 5.5 и 5.6, кривая 2), добавочное напряжение Uин сформированного с ШИМ инвертором напряжения (рисунок 5.5 и 5.6 кривая 3), и напряжение на низкой стороне силового трансформатора U2, оно же напряжение питания потребителя (рисунок 5.7). Также на этих рисунках снизу приведены соответственно коэффициенты несинусоидальности этих напряжений.

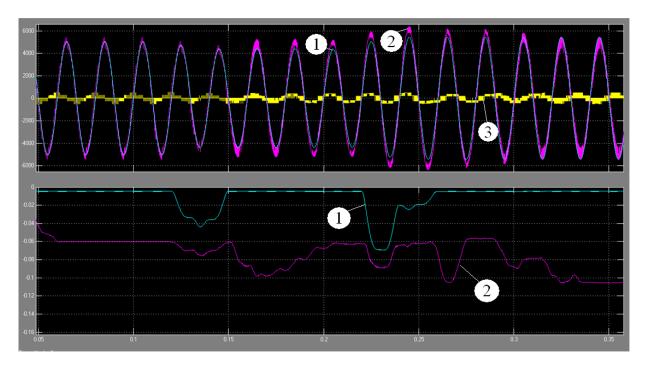


Рисунок 5.5. Осциллограмма исследуемых напряжений и их коэффициенты несинусоидальности

Сумма высших гармоник в процентном отношении к первой является показателем качества напряжения, характеризующим его несинусоидальность, и нормируется российским ГОСТ 13109-97 и международным IEEE 519-1992 стандартами.

Коэффициент несинусоидальности напряжения

$$Ku = \frac{U_{\Sigma}}{U_{I}} 100\%. \tag{20}$$

Здесь $U_{\Sigma} = \sqrt{U^2 - U1^2}$ — действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения, которое определяется через U и U_1 — действующие значения исследуемого напряжения и его первой гармоники.

Из выражения (20) видно, что при улучшении гармонического состава напряжения Ки стремится к нулю.

По сравнению с искажениями токов, исследуемые искажения напряжений оказались существенней. Причем их величина в устройстве КРМСН напрямую

зависит от диапазона регулирования напряжения. Избежать искажений напряжения инвертора возможно путем установки дросселя в цепь постоянного тока. Инвертор при таких условиях работает в режиме инвертора тока, в этом режиме напряжение на выходе инвертора определяется формой напряжения нагрузки.

Кривая 2 на рисунке 5.5 и 5.6 снизу показывает значение коэффициента несинусоидальности напряжения, приходящего на высокую сторону силового трансформатора. Исключая переходные процессы, наилучшим значением этого коэффициента является 0,06. Такое значение имеет место быть при нормальном и пониженном напряжении сети.

Но при работе подстанции от повышенного напряжения Ки кривой 2 достигает 0,1. Процент высших гармоник в этом случае увеличился из-за повышения амплитудного значения ШИМ напряжения Uин вслед за напряжением сети Uc.

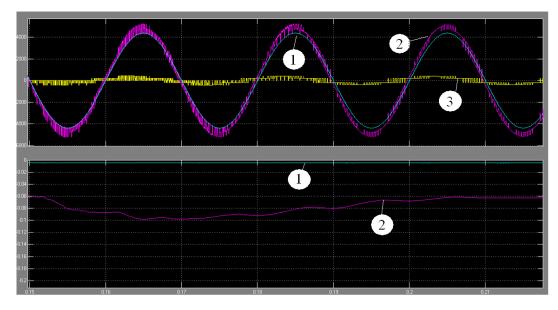


Рисунок 5.6. Укрупненный фрагмент осциллограммы исследуемых напряжений и их коэффициенты несинусоидальности

На рисунке 5.6 видно, как изменяется форма напряжения 2 и его значение коэффициента несинусоидальности при переходе КРМСН из режима компенсации реактивной мощности в режим вольтодобавки.

Коэффициент искажения кривой ШИМ напряжения инвертора на рисунке $5.5\,$ и $5.6\,$ не отображен ввиду его значительно большего значения, чтобы не измельчить масштаб диаграмм. Этот показатель варьируется в пределах 0,25-0,4. Прямого влияния на потребителя данные искажения не оказывают.

Но особое внимание следует уделить именно напряжению, питающему потребителя. Именно искажения этого напряжения будут напрямую влиять на питающиеся от подстанции устройства.

Однако, на устройства имеющие на входе выпрямитель с фильтром (блок питания, ИБП, частотный привод и т.д.) это влияние будет близко к нулю. На работу электронагревательных приборов искажения напряжения не повлияют вовсе. А зато пониженное напряжение снизит производительность некоторых устройств до 2-3 раз (как пример – СВЧ печь).

Мерцания освещения у светодиодных светильников по вине искажений напряжения не будет, исходя из принципа их действия, у ртутных ламп искажения сгладит дроссель и/или конденсатор. А, например, повышенное напряжение в разы сократит срок службы осветительных приборов и повысит их электропотребление.

Отдельно на рисунке 5.7 представлен укрупненный фрагмент осциллограммы напряжения питания потребителя. Проведенный численный эксперемент показал, что при диапазоне регулирования напряжения 10% коэффициент несинусоидальности напряжения питания потребителя варьируется в пределах от 0,05 до 0,11 в зависимости от различных режимов работы КРМСН.

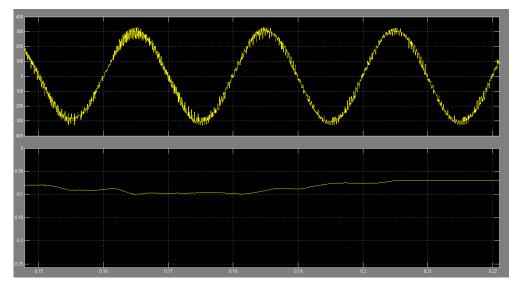


Рисунок 5.7. Осциллограмма напряжения питания потребителя и его коэффициент несинусоидальности

5.4 Исследование потребления системой КРМСН-ТП активной Р, реактивной Q и полной S мощностей потребителями и из сети для оценки экономии электроэнергии

Чтобы утверждать, что экономия электроэнергии реально происходит, необходимо чтобы полная мощность, потребляемая нагрузкой при номинальном стабильном напряжении, была меньше полной мощности, потребляемой подстанцией из сети. Результаты показывают, что с помощью установки на подстанцию КРМСН данный эффект происходит при всех режимах работы, что проиллюстрировано на рисунке 5.8.

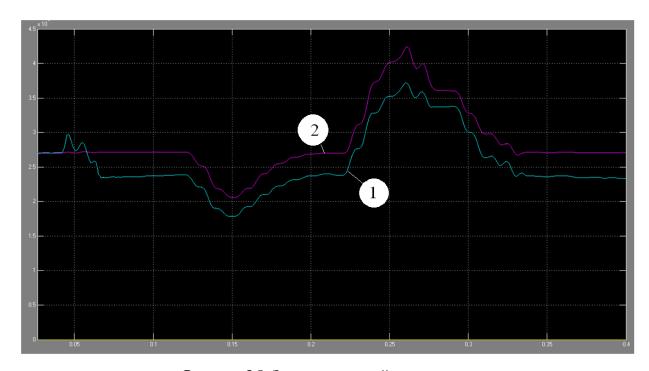


Рисунок 5.8. Значения полной мощности, потребляемой подстанцией из сети (1)и нагрузкой (2)

Снижение потребления полной мощности произошло за счет компенсации реактивной мощности нагрузки. Что касается активной мощности, то уменьшить ее потребление за счет установки на подстанции дополнительного оборудования принципиально невозможно. Это оборудование только понизит общий КПД подстанции, а это, несомненно, приведет к большему потреблению активной мощности.

Однако, в случае с КРМСН повышение потребления активной мощности в разы меньше, чем уменьшение потребления реактивной мощности из сети, что подтверждается диаграммами на рисунке 5.9 полной мощности (сверху), активной мощности (в центре) и реактивной мощности (снизу).

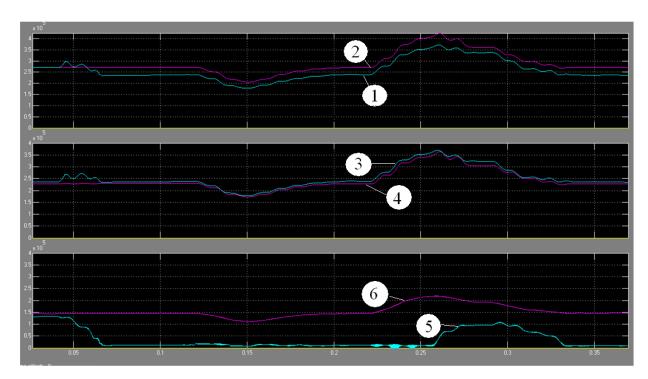


Рисунок 5.9. Диаграммы полной мощности (сверху), активной мощности (в центре) и реактивной мощности (снизу).

- 1 полная мощность, потребляемая из сети.
- 2 полная мощность, реально потребляемая нагрузкой.
- 3 активная мощность, потребляемая из сети.
- 4 активная мощность, реально потребляемая нагрузкой.
- 5 реактивная мощность, потребляемая из сети.
- 6 реактивная мощность, реально потребляемая нагрузкой.

На нижней диаграмме рисунка 5.9 видно, что реактивная мощность, потребляемая подстанцией стремится к нулю во всех режимах работы. Наблюдаемый всплеск реактивной мощности в момент перехода из вольтодобавки в вольтовычет в расчет брать не следует, так как является ошибкой вычисления, возникшей из-за изменения частоты ШИМ напряжения в переходном процессе.

На средней диаграмме рисунка 5.9 видно, что активная мощность, потребляемая нагрузкой меньше активной мощности, потребляемой из сети Эта разница как раз и есть величина потерь в вольтодобавочном трансформаторе и транзисторном преобразователе. В исследуемом преобразователе теряется 660Вт

на каждые 50кВт пропускаемой мощности, что соответствует реальным выпускаемым устройствам фирмы Mitsubishi.

5.5 Описание диаграмм полной, активной и реактивной мощности в системе КРМСН-ТП

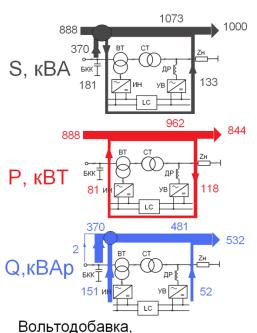
На математической модели системы КРМСН-ТП были промоделированы четыре возможных режима работы. Разработанные специализированные информационно-измерительные модули [20] позволили провести измерения полной, активной и реактивной мощности на каждом составном элементе системы КРМСН-ТП в каждом из режимов. В результате были построены диаграммы перетоков полной, активной и реактивной мощности в системе КРМСН-ТП в этих режимах работы.

Неизменная величина. относительно которой производились регулирование, во всех случаях это мощность нагрузки, равная 1000кВА. Неизменным также был характер нагрузки, активно-индуктивный. Коэффициент мощности нагрузки наглядно наблюдается на диаграммах Км=0,844. Также фазное напряжение питания потребителя как в режимах вольтодобавки, так и в режимах вольтовычета стабилизировано на отметке 220В. Можно сказать, что режим работы нагрузки не менялся. Во всех режимах нагрузка потребляла одну и ту же мощность, один и тот же ток при том же напряжении. Такая логика условий эксперимента позволила наглядно провести сравнительную оценку энергоэффективности разных режимов работы.

Режим вольтодобавки с недокомпенсацией.

Промоделирован режим работы системы КРМСН-ТП, когда напряжение питающей сети понижено на 10% и реактивной мощности БКК недостаточно для полной компенсации всей реактивной мощности нагрузки. Диаграммы мощностей в этом режиме представлены на рисунке 5.10.

Ведущей процесс является активная мощность. В режиме вольтодобавки в системе возникает контур циркуляции активной мощности (УВ-ИН-ВТ-СТ-УВ) с некоторым избытком мощности, проходящей через СТ. При этом часть активной мощности, 118-81=37 кВт, потребляется преобразователем. Это мощность



недокомпенсация

расходуется как на потери в преобразователе, так и на генерацию преобразователем реактивной мощности. Баланс активных мощностей сохраняется. Общая разность активных мощностей сети и нагрузки составила 44 кВт, КПД равен 95%.

Диаграмма реактивной мощности построена исходя из логики того, что преобразователь генерирует реактивную мощность, дополняя действие БКК.

Такое направление потоков подтверждают и величины реактивных мощностей на диаграмме.

Фактически УВ потребляет активно-емкостной ток, что аналогично действию конденсатора. Далее эта мощность переходит в звено постоянного напряжения, где понятие реактивной мощности отсутствует. Затем ИН из мощности постоянного тока при помощи принудительной коммутации ключей формирует уже необходимую по составу мощность переменного тока. Работа ИН в координатах реактивной мощности также аналогична действию конденсатора. Следует отметить, что реактивные мощности БКК и ИН суммируются не алгебраически, а векторно, так как в этих цепях напряжения находятся в разных фазах. В целом баланс реактивных мощностей сохраняется.

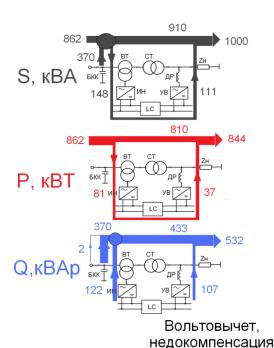
Что касается полных мощностей, то все они суммируются векторно, так как на всех составных элементах фазы напряжений и токов разные относительно друг друга. Поэтому затруднительно определить и направления потоков полной мощности.

При работе системы КРМСН-ТП в режиме вольтодобавки возникает контур циркуляции мощности (УВ-ИН-ВТ-СТ-УВ), что приводит к избытку мощности, проходящей через СТ. Трансформатор оказывается перегруженным на 7,3%. Требуемая мощность силового оборудования ВТ и ИН для реализации режима составляет 181кВА. Мощность УВ – 133 кВА.

Стоит отметить, что в этом режиме применение КРМСН на ТП принесло эффект экономии электроэнергии на 11,2%, так как для питания нагрузки, мощностью 1000 кВА из сети потребляется только 888 кВА, они же 888 кВт активной мошности.

Режим вольтовычета с недокомпенсацией.

Промоделирован режим работы системы КРМСН-ТП, когда напряжение питающей сети повышено на 10% и реактивной мощности БКК недостаточно для полной компенсации всей реактивной мощности нагрузки. Диаграммы мощностей в этом режиме представлены на рисунке 5.11.



рисунка видно, режиме ЧТО вольтовычета изменяется направление активной мощности. Возник дополнительный путь следования активной мощности из сети, через ВТ-ИН-УВ в нагрузку. При этом часть активной мощности, 81 - 37 = 44 кВт, потребляется преобразователем. Это мощность расходуется также потери как преобразователе, так И на генерацию преобразователем реактивной мощности. Баланс активных мощностей сохраняется. В

этом режиме разность активных мощностей сети и нагрузки (потери) составила 862-844=18 кВт, по сравнению с 44 кВт в режиме вольтодобавки. Также величины активной мощности УВ и ИН в режиме вычета меньше, чем в режиме добавки. Из

этого следует, что для понижения напряжения системе КРМСН требуется меньше мощности, чем для повышения. КПД системы КРМСН-ТП в этом режиме составил 97,9%.

Диаграмма реактивной мощности построена, исходя из логики того, что преобразователь генерирует реактивную мощность, дополняя действие БКК.

Такое направление потоков подтверждают и величины реактивных мощностей на диаграмме. Однако следует отметить, что в режиме вычета УВ сгенерировал большее количество реактивной мощности, чем в режиме добавки (107 к 52 кВАр), а ИН в режиме вычета – меньшее (122 к 151 кВАр).

Реактивные мощности БКК и ИН также суммируются не алгебраически, а векторно, так как в этих цепях напряжения находятся в разных фазах. В целом баланс реактивных мощностей сохраняется.

Ввиду того, что часть мощности протекает по пути сеть – ВТ – ИН – УВ – нагрузка, силовой трансформатор оказывается нагруженным на 91% при номинальной для него величине нагрузки. Возникает потенциальная возможность для большей загрузки подстанции. В этом режиме полные мощности также суммируются векторно, так как на всех составных элементах фазы напряжений и токов разные относительно друг друга. Требуемая мощность силового оборудования ВТ и ИН в таком режиме составляет 148кВА, мощность УВ – 111 кВА, что меньше, чем для реализации режима вольтодобавки (по сравнению со 181 и 133кВА).

В результате в этом режиме применение КРМСН на ТП принесло эффект экономии электроэнергии в 138 кВА, или 13,8%, что на 16 кВА или на 1,6% эффективнее, чем в режиме вольтодобавки.

Режимы вольтодобавки и вольтовычета с перекомпенсацией.

Режим перекомпенсации реактивной мощности в системе КРМСН-ТП возможен в случае, когда емкостная реактивная мощность дискретной ступени БКК превышает индуктивную реактивную мощность нагрузки. Наиболее

рациональным действием, при этом, следует отключение БКК. Однако данные режимы промоделированы и без отключения БКК, в этом случае для обеспечения полной компенсации реактивной мощности транзисторный преобразователь с вольтодобавочным трансформатором выступают в роли дополнительной регулируемой индуктивности.

Диаграммы мощностей в этом режиме представлены на рисунке 5.12.

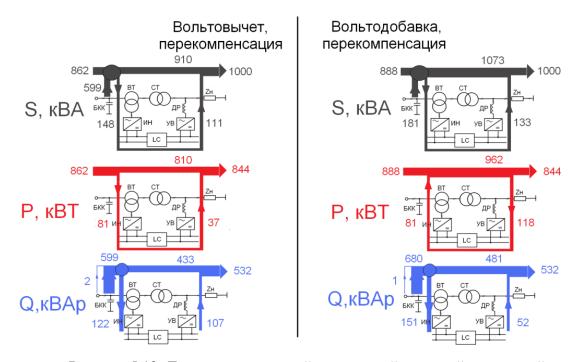


Рисунок 5.12. Диаграммы активной, реактивной и полной мощностей в режиме вольтодобавки и вольтовычета с перекомпенсацией реактивной мощности

Возможности математического моделирования позволили промоделировать данные режимы работы системы КРМСН-ТП при тех же условиях, что и предыдущие, для наглядной численной оценки. Различаются только направления потоков реактивной мощности (по сравнению с диаграммами для режимов с недокомпенсацией).

5.6. Оценка влияния результата КРМСН-ТП на потери в питающей . ЛЭП

Проведенные ранее исследования показали, что общий КПД подстанции при установке на ней дополнительного оборудования КРМСН составит 0,95 – 0,97 относительно штатной подстанции.

Однако, такое рассмотрение КПД не совсем верное, так как при этом не учитывается эффект снижения потерь в питающей высоковольтной линии электропередачи из-за снижения потребляемого тока.

В приведенной на рисунке 5.13 модели сверху в качестве RL-нагрузки промоделирована подстанция без КРМСН, а снизу — уже в качестве R-нагрузки подстанция с КРМСН. На рисунке видно одинаковое в обоих случаях питающее напряжение 6000В и та же потребляемая активная мощность 846,7 кВт. Расчет производился для одного километра одноцепной ВЛ-6кВ с изолированной нейтралью с проводами АС-50.

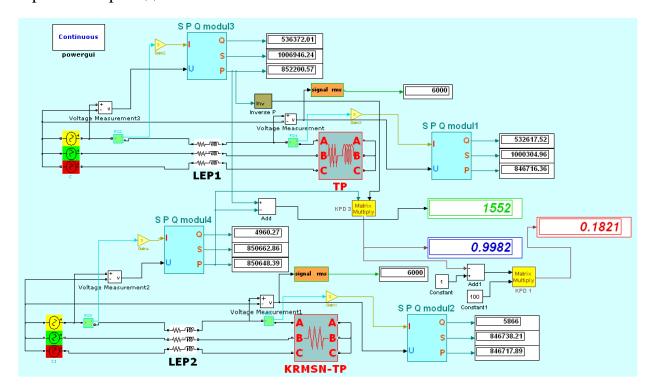


Рисунок 5.13. Модель для оценки снижения потерь мощности в 1 километре ЛЭП

Расчет показал, что при данной величине мощности подстанции с КРМСН в 1 км в питающей ЛЭП потери составили на 1552 Вт меньше, чем при питании штатной подстанции. В относительных единицах данная величина потерь составляет 0,1821% от мощности подстанции. Это значит, что каждый учтенный километр ЛЭП повышает оцениваемый КПД системы КРМСН-ТП в данном случае на 0,1821%. Например, при учете длины питающей ЛЭП, равной 10 км, КПД системы КРМСН-ТП повысится на 1,821%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Предложены принципы построения КРМСН на основе вольтодобавочного устройства и транзисторного преобразователя со звеном постоянного напряжения, обеспечивающие регулируемую генерацию или потребление реактивной энергии с одновременной стабилизацией напряжения у потребителей без искажения инвертором и выпрямителем тока в трансформаторах и сети. Регулируемая часть мощности подстанции пропорциональна требуемому диапазону регулирования модуля вектора добавочного напряжения.
- 2. Разработан алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков отклонения напряжения нагрузки и реактивной мощности сети КРМСН с предложенным алгоритмом позволяет обеспечить прямую полную компенсацию реактивной энергии сети с одновременной стабилизацией напряжения у потребителей электроэнергии независимо от жесткости внешней характеристики сети, а также величины и характера нагрузки.
- 3. Предложен способ регулируемого подключения конденсаторов к трехфазной сети при помощи диодного выпрямителя и реактора, обеспечивающий плавность заряда конденсаторов с формированием впроцессе заряда синусоидальной формы напряжения и тока за счет изменения угла коммутации диодов.
- 4. Создан комплекс программ в среде MatLab и математическая модель КРМСН с применением разработанных специализированных модулей (силовых, управления, измерительных). На этой базе проведены исследования КРМСН в установившихся и переходных режимах работы, по результатам которых методом энергетических диаграмм получено полное представление об энергообмене между сетью и нагрузкой, а также между электронными и электромагнитными устройствами системы в целом и дана оценка энергетическим показателям.

- 5. При отклонениях питающего напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального КРМСН обеспечивает стабильный уровень напряжения потребителей на уровне $220\pm0.4\%$.
- 6. Величина коэффициента искажения синусоидальности напряжения у потребителя в зависимости от режима работы подстанции с КРМСН составляет от 5 до 11%.
- 7. При активно-индуктивном характере нагрузки с Км = 0,84 КРМСН совместно с дискретной ступенью компенсации реактивной мощности (БКК) обеспечивают коэффициент мощности на входе подстанции в пределах от 0,99 до 0,999.
- 8. При снижении общего КПД подстанции за счет введения в ее состав КРМСН в среднем на 4% получаем повышение коэффициента мощности на входе подстанции на 16% по сравнению с той же подстанцией без КРМСН. Так среднее повышение энергоэффективности подстанции при применении КРМСН по данным эксперимента составило 12%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АИН – автономный инвертор напряжения

АТР – автотрансформатор

БЗ – блок защиты (от перенапряжений)

БКК – батарея косинусных конденсаторов

ВВ – высоковольтный выключатель

ВТ – вольтодобавочный трансформатор

ГА – гибридный аппарат

ДВ – диодный выпрямитель

ДКП – диодно-контакторный пускатель

ИН – инвертор напряжения

Км – коэффициент мощности

КРМСН – компенсатор реактивной мощности со стабилизацией напряжения

КПД – коэффициент полезного действия

КТП – комплектная трансформаторная подстанция

КУ – конденсаторная установка

СТ – силовой трансформатор

ОВН – обмотка высокого напряжения

ОНН – обмотка низкого напряжения

ПА – пусковой аппарат

ПБВ – переключение без возбуждения

РПН – регулятор под нагрузкой

СТАТКОМ – статический компенсатор мощности

СУ – система управления

ТП – трансформаторная подстанция

ТПФ – транзисторный преобразователь фазы

УВ – управляемый выпрямитель

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1. Бессонов Л. В.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст]: 10-е изд. / Л. В. Бессонов М.: Гардарики, 2001. 638 с.
- **2.** Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. Электрические системы, т. 2. Электрические сети. Под. ред В.А. Веникова. Учебное пособие для электроэнергетических вузов. М., Высш. школа, 1971.
- 3. Визначення технічних значень вхідної реактивної потужності для споживачі велектроенергії / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака, В. В. Вержук // Вісник ВПІ. 2007. № 5. С. 58–64.
- **4. Власьевский С.В., Климаш С.В.** Принципы построения электронных устройств для повышения качества и экономии электроэнергии в системах электроснабжения. / Материалы Всероссийской конференции, Вестник ИТПС, ДВГУПС, №12, 2016, с.9-12.
- **5.** Власьевский С.В., Климаш С.В. Принципы построения электронных устройств для повышения качества и экономии электроэнергии в системах электроснабжения. / Материалы Всероссийской конференции, Вестник ИТПС, ДВГУПС, №12, 2016, с.9-12.
- **6. Воротницкий В. Э.** Повышение эффективности управления распределительными сетями [Електронний ресурс] / В. Э. Воротницкий. // Энергосбережение. 2005. №10: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid = 3046
- **7. Герасименко А. А.** Передача и распределение электрической энергии : учеб.пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. 720 с. ISBN 978-5-222-13221-0.
- **8.** Герман Л.А. Двухступенчатая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А.С. Серебряков, Д.Е. Дулепов //М.: Электроника и электрооборудование транспорта, №1, 2011, с. 16-21.

- **9. Герман-Галкин С.Г.,** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. Пособие / С. Г. Герман-Галкин.-СПб.: Корона принт, 2001. 320с.
- **10.** Горбачёв Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/Под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 320 с.: ил.
- **11. Жежеленко И.В.** Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 128 с.
- **12.** Железко Ю. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях // Электричество, 1992, № 5, с. 6–12.
- **13. Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники. Учеб.пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. Новосибирск: Изд–во НГТУ, 2003. 664 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
- **14. Иньков Ю.М.** Исследование электротехнического комплекса в среде MatLab с применением специализированных модулей / Ю.М. Иньков, В.С. Климаш, С.В. Климаш, Е.А. Жемчужина // М.: Электротехника, № 9, 2017, с. 13-18.
- **15. Карташев И.И**. Управление качеством электрической энергии : монографическое издание / И. И. Карташев, В. Н. Тульс. М. : МЭИ, 2005. 320 с. ISBN 5-7046-1283-0.
- **16. Карташев И.И.** Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения/Под ред. М.А. Калугиной. М: Издательство МЭИ, 2000. 120 с., ил.
- **17. Карташев И.И., Чехов В.И. / Под ред. Ю.П. Рыжова.** Статические компенсаторы реактивной мощности в энергосистемах. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 68 с.
- **18. Климаш В.С**. Регулировочные свойства, энергетические показатели и математическое моделирование в среде MatLab выпрямителей и регуляторов переменного напряжения: учеб.пособие / В.С. Климаш.- Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО КнАГТУ, 2015.- 114 с.

- **19. Климаш С.В., Власьевский С.В.,** Способ и устройство подключения конденсаторов к регулируемой системе компенсации реактивной мощности трансформаторных подстанций/ Омский научный вестник, ОМГУ, №12, 2016, с.9-12.
- **20. Климаш С.В.** Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде MATLAB:/ С.В. Климаш, В.С. Климаш, С.В. Власьевский//Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова: Электротехнические системы и комплексы, №4, 2017, с. 11-16.
- **21. Кобзев А.В.** Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск, «Наука», 1979. 304 с.
- **22. Кобзев А. В.**, Лебедев Ю. М., Михальченко Г. Я. и др./ Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием.— М.: Энергоатомиздат, 1986. 152 с.
- **23. Колесников А.И.,** Федоров М.Н., Варфоломеев Ю.М. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: Учебное пособие/Под общ.ред. М.Н. Федорова.- М.: ИНФРА М, 2005. 124 с. (Среднее профессиональное образование).
- **24. Копылов И.П.** Электрические машины: Учеб.для вузов/ И.П. Копылов. -4 —е изд., испр. М.: Высш. шк., 2004. 607 с.
- **25.** Лежнюк П. Д. Оптимальное регулирование потоками мощности и напряжением в неоднородных электрических сетях: монография / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. Винница: УНІВЕРСУМ- Винница, 2004. 188 с. ISBN 966-641-083-4.
- **26. Липковский К. А.** Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наукова думка, 1983. 216 с.
- **27. Лыкин А.В.** Электрические системы и сети: Учеб.пособие. М.: Университетская книга; Логос, 2006. -254 с.

- **28. Мыцык** Г. С., Михеев В. В., Фридман П. М. Многоканальное построение преобразователей с промежуточным высокочастотным преобразованием // Электричество, 1992, № 4, с. 22–31.
- **29.** Окунь С.С., Сергеенков Б.Н., Киселёв В.М. Трансформаторы и трансформаторно-тиристорные регуляторы-стабилизаторы напряжения. М.: Энергия, 1969.
- **30.** Патент РФ на изобретение №2648690 Компенсатор реактивной мощности со стабилизацией напряжения трансформаторной подстанции. / С.В. Власьевский, С.В. Климаш (Россия) // Опубл. Б.И. №10, 28.03.2018.
- **31.** Патент № 2579437 РФ, МПК Н02М 5/00 Система автоматической стабилизации трехфазного синусоидального напряжения трансформаторных подстанций // Власьевский С.В., Климаш С.В. (Россия), 2016.
- **32.** Прогнозуванняя кості функціонування пристрої в регулювання під напругою трансформаторів в умовахнечітких результатів 100 випробовувань / Ю. О. Карпов, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, М. І. Пиріжок // Вісник ВПІ. 2007. № 2. С. 61–65.
- **33. Розанов Ю. К.** Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- **34. Розанов Ю.К.** Основы силовой преобразовательной техники: Учебник для техникумов. М.: Энергия, 1979. 392 с., ил.
- **35. Розанов Ю. К., Рябчинский М. В.** Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) // Электротехника, 1998, № 3, с. 10–17.
- **36. Розанов Ю. К**. Электронные устройства электромеханических систем [Текст] / Ю. К. Розанов, Е. М. Соколова. М.: «Академия», 2004. 272 с..
- **37. Розанов Ю.К.** Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов/ Под ред. Ю.К. Розанова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Информэлектро, 2001. 420 с.
- **38. Розанов Ю.К.** Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники: статья / Ю.К. Розанов// М.: Электричество, № 7, 2005, с. 52-61.

- **39.** Свидетельство РФ №2016616629 на комплекс программ для ЭВМ. Программный комплекс в среде MatLab для исследования систем тягового и промышленного электроснабжения с применением устройств силовой электроники на трансформаторных подстанциях. /С.В. Власьевский, С.В. Климаш (Россия) // Опубл. Бюл. №7, 20.07.2016.
- **40.** Сергеенков Б.Н. Электрические машины: Трансформаторы: Учеб.пособие для электромех. спец. вузов/ Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселёв, Н.А. Акимова, Под ред. И.П. Копылова. М.: Высш. шк., 1989. 352 с.: ил.
- **41. Солодухо Я.Ю.** Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для её компенсации. М.: Информэлектро, 1981. 81 с.
- **42.** Тонкаль В. Е., Мельничук Л. П., Новосельцев А. В., Дыхненко Ю. И. / Полупроводниковые преобразователи модуляционного типа с промежуточным звеном повышенной частоты. Киев: Наукова думка, 1981
- **43. Черных И. В.** "Simulink: Инструмент моделирования динамических систем". 2003. 252с.
- **44. Черных И. В.** "SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink"
- .**45. Шидловский А.К., Федий В.С.** Частотно-регулируемые источники реактивной мощности. К.: Наук.думка. 1980. 304 с.
- **46.** Электротехнический справочник : в 4 т. / под ред. Герасимова В. Г. .— М. : Изд-во МЭИ, 2004. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы . 448 с. ISBN 978-5-383-00082-3.
- **47.** Энергетическая стратегия России на период до **2020** года. Утверждена распоряжением правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г. № 1234 –р.
- **48. Demchenko Yu. S** Investigation of the energy characteristics of high frequency power factor correctors. Електроніка та звязок. 2014. Т. 19. № 6 (83). С. 34-37.

- **49. M. D. Manjrekar., R. Kieferndorf, G.Venkataramanan.** Power Electronic Transformers for Utility Applications.IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting Page 1 of 7 Rome, Italy, October 8-12, 2000.
- 50. Mogos E. F. A voltage regulation system for distributed generation / E. F. Mogos,
 X. Guillaud : Lab. d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, France.
 IEEE : Power Systems Conference and Exposition, 10-13 Oct. 2004. P. 787 794. ISBN 0-7803-8718-X.
- **51. Rogulina L.G.** Measurement of higher harmonics of current for rectifying devices by simulation modeling and MatLab.2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering/ Sedinin V.I., Fedosov E.V.- APEIE 2012 Proceedings 2012. C. 106-109.