

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

БОХАН Александр Николаевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ РЕЗЕРВНОЙ ЗАЩИТЫ
И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ И
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЕТЯХ С ИСТОЧНИКАМИ
ВЫСШИХ ГАРМОНИК

05.14.02 - Электрические станции (электрическая
часть), сети и системы и управление ими

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

М и н с к 1981

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В одиннадцатой пятилетке предусматривается дальнейший рост производства электрической энергии. Выполняется ряд мероприятий, способствующих эффективному использованию установленных мощностей электрических станций. При этом ставится задача экономного использования топливно-энергетических ресурсов в народном хозяйстве.

Значительное снижение потерь электроэнергии в сетях может быть достигнуто за счет оптимального размещения компенсирующих устройств и увеличения их мощности. Установленная мощность конденсаторных батарей (КБ) в сетях Минэнерго СССР и у потребителей электроэнергии в 1976 году составляла 20 млн. кВар. Для компенсации реактивной мощности в десятой пятилетке изготовлено около 50 млн. кВар. статических конденсаторов. В этих условиях важное народно-хозяйственное значение приобретает задача эффективного использования КБ.

В связи с применением в современных технологических процессах промышленных предприятий таких электроустановок, как мощные преобразовательные устройства, сварочные агрегаты, электролизеры, электронагревательные и электроплавильные печи и т.п., наблюдается ухудшение качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. Опыт эксплуатации КБ показывает, что в условиях колебаний напряжений электрической сети и высокого содержания высших гармоник, интенсивность повреждений конденсаторов резко возрастает. При этом очевидно, что надежность КБ определяется не только конструктивными параметрами применяемых конденсаторов, но и конкретными условиями их эксплуатации. Отклонение условий эксплуатации конденсаторов от номинальных приводит к преждевременному их повреждению.

Одним из эффективных средств, способствующих повышению качества электроэнергии, являются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ). Их применение позволяет снизить содержание высших гармоник в напряжении электрической сети, а также способствует повышению коэффициента мощности. Отклонения параметров ФКУ от резонансной настройки не должны превышать допустимых значений. В противном случае может происходить усиление несинусоидальности напряжения в сети,

что, в свою очередь, может привести к перегрузке конденсаторов, в том числе находящихся в составе ФКУ. Указанные особенности эксплуатации КБ и ФКУ предъявляют повышенные требования к устройствам сигнализации и релейной защиты.

В связи с этим задача по разработке и исследованию более совершенных средств контроля состояния и релейной защиты КБ и ФКУ является весьма актуальной. Применение разработанных устройств позволит уменьшить количество внезапных отключений компенсирующих установок и тем самым повысить их надежность. При этом представляется необходимым исследовать условия возникновения и характер перегрузок КБ и ФКУ в сетях с искаженной формой кривой напряжения.

Цель работы заключается в исследовании работы КБ и ФКУ в различных эксплуатационных режимах и разработке более совершенных средств релейной защиты и сигнализации компенсирующих устройств в сетях с источниками высших гармоник.

При этом решаются следующие задачи:

разработка методики расчета режимов работы ФКУ с несимметричной расстройкой и математической модели для исследования работы КБ и ФКУ в условиях их загрузки токами высших гармоник;

разработка математических моделей для исследования переходных процессов в КБ и ФКУ при колебаниях напряжения в электрической сети и при повреждениях конденсаторных секций;

разработка комплекса программ для исследования на ЭЦМ характерных эксплуатационных режимов;

исследование принципов выполнения и разработка устройств релейной защиты от внутренних повреждений в КБ и перегрузки конденсаторов ФКУ;

разработка устройства контроля состояния последовательных конденсаторных рядов в батарее;

исследование различных режимов работы КБ и ФКУ и разработка методики определения надежности КБ, установленных в системах электроснабжения с несинусоидальным напряжением.

Методика проведения исследований. В работе использовались методы математического моделирования с воспроизведением математических моделей на ЦЕМ. При исследовании режимов загрузки КБ и ФКУ токами высших гармоник применялась математическая модель системы электроснабжения с представлением элементов схемы замещения в комплексной форме. Для исследования

переходных процессов в ФКУ использовалось математическое описание объектов моделирования на основе физических законов, связывающих мгновенные значения параметров режима с параметрами схемы замещения.

На физической модели КБ выполнены испытания разработанного комплекта защиты с целью оценки работоспособности и уточнения отдельных его параметров.

Новые научные результаты, полученные в работе:

разработана методика исследования загрузки КБ и ФКУ токами высших гармоник в несимметричных режимах;

разработаны математические модели для исследования переходных процессов при колебаниях напряжения в электрической сети и повреждениях конденсаторных секций в ФКУ, установленном в сети с изолированной нейтралью;

в результате исследования эксплуатационных режимов КБ и ФКУ определены условия возникновения и характер перегрузок конденсаторов при работе в сети с несинусоидальным напряжением и резких изменениях напряжения;

определены принципы выполнения устройств защиты от перегрузки;

разработано устройство для сигнализации состояния последовательных конденсаторных рядов в батарее;

разработаны более совершенные средства релейной защиты КБ от внутренних повреждений;

предложена методика расчета надежности КБ, установленных в сетях с искаженной формой кривой напряжения.

На защиту выносятся следующие основные положения:

методика исследования стационарных режимов ФКУ, позволяющая выявить условия возникновения перегрузки силовых фильтров при их несимметричной расстройке;

математические модели для исследования переходных процессов в ФКУ и КБ, установленных в сети с изолированной нейтралью;

результаты исследования, позволяющие установить условия возникновения и характер перегрузок КБ и ФКУ и обосновать принципы построения более совершенных средств релейной защиты;

новые принципиальные и схемные решения по средствам сигнализации и релейной защиты компенсирующих устройств;

методика определения надежности КВ, учитывающая особенности их эксплуатации в системах электроснабжения с источниками высших гармоник.

Практическая ценность. Посредством разработанных математических моделей и программы для расчета режимов работы КВ и ФКУ в сетях с источниками высших гармоник можно выявлять условия возникновения и характер перегрузок конденсаторов. Это позволяет обосновать конструктивные особенности компенсирующих устройств и допустимые отклонения их параметров.

Разработанные средства сигнализации и релейной защиты КВ и ФКУ обладают высокой чувствительностью. Они способствуют своевременному выявлению ненормальных режимов работы компенсирующих устройств, что позволяет оптимально планировать и быстро выполнять профилактические осмотры и ремонты. Это способствует уменьшению количества внезапных отказов конденсаторных установок.

Экономическая эффективность предложенных средств защиты и сигнализации в системах электроснабжения промышленных предприятий может определяться уменьшением ущерба вследствие внезапных отключений компенсирующих устройств. При этом ущерб определяется увеличением надбавки к тарифу на электроэнергию за компенсацию реактивной мощности для расчетного периода.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в Белорусском отделении института "Энергосетьпроект". Математические модели, алгоритмы и программы для исследования режимов работы КВ и ФКУ, а также технические решения, новизна которых защищена авторскими свидетельствами, переданы в Белорусское отделение института "Энергосетьпроект" для использования в практике проектирования.

Разработанный комплект защиты конденсаторной батареи установлен на подстанции IIO кВ "Брагин" РЭУ "Гомельэнерго". Опытная эксплуатация защиты в течение года показала ее высокую эффективность.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на XXXIII-XXXVI научно-технических конференциях Белорусского политехнического института в городах Минске и Гомеле (1977-1980).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в шести печатных работах.

Объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 131 стр. машинописного текста, иллюстрируется 42 рисунками на 31 с., состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 121 наименования и приложений на 9 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу условий работы и существующих средств защиты КБ и ДКУ в сетях с источниками высших гармоник.

Основными структурными элементами КБ, в значительной мере определяющими ее надежность, являются конденсаторы. Работы по повышению надежности силовых конденсаторов в нашей стране проводятся в ряде научно-исследовательских и проектных институтов. Ведущим институтом, занимающимся вопросами надежности и технико-экономической эффективности конденсаторов, является научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт конденсаторостроения. Работы сотрудников этого института в области пониженных характеристик диэлектриков конденсаторов, их термостойчивости, определения оптимальных конструктивных параметров способствовали созданию более надежных конденсаторов с высокими технико-экономическими характеристиками. Исследованиями установлено, что ожидаемый ресурс косинусных конденсаторов составляет около 30 лет. Но в практике далеко не всегда выдерживаются оговоренные в ГОСТ 1282-72 условия эксплуатации, что приводит к преждевременному повреждению конденсаторов. На работу конденсаторов влияет место их установки, условия охлаждения, коммутационные перенапряжения, уровни высших гармоник и т.п.

Вопросы надежности КБ исследовались в работах А.К.Чернонца. В результате исследований установлено, что надежность батарей, укомплектованных конденсаторами с параллельным соединением секций, защищенных индивидуальными предохранителями, выше, чем у КБ с конденсаторами, имеющими последовательно-параллельное соединение секций. При этом отказом батареи считается момент, начиная с которого из-за перегорания предохранителей напряжение на одном из последовательных конденсаторных рядов превысит номинальное более чем на 10%. Разработанная методика расчета надежности КБ с учетом резервирования и восстановления позволяет определить оптимальную структуру конденсаторных установок и рациональные приемы их экс-

плуатации. Тем не менее указанная методика не позволяет в полной мере учесть (при анализе надежности КБ) особенности эксплуатации конденсаторов в системах электроснабжения с искаженной формой кривой напряжения.

В настоящее время на промышленных предприятиях внедряются новые технологические процессы с использованием мощных потребителей электроэнергии. При этом наблюдается ухудшение качества электроэнергии в системах электроснабжения. Действующее значение напряжения всех высших гармоник в сети часто достигает 15%. Отрицательное воздействие токов высших гармоник сказывается на электрооборудовании промышленных предприятий, устройствах релейной защиты и автоматики.

Методика расчета токов и напряжений высших гармоник в электрических сетях изложена в работах М.С.Либкинда, Н.П.Костенко, Л.Р.Неймана, Г.Н.Бландзевича, Р.А.Лютера и Д.В.Тимофеева. Дальнейшее развитие, применительно к системам электроснабжения промышленных предприятий, она получила в работах И.В.Жежеленко, А.А.Федорова и ряда других авторов. Работы по снижению уровней гармонических составляющих в электрических сетях и исследованию их влияния на электрооборудование промышленных предприятий ведутся в ряде научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений (НИИЭТ, Энергосетьпроект, Тяжпромэлектропроект, ИЭД АН УССР, ЭНИН, ВНИИЭТ, Ддановский металлургический институт, МЭИ, Томский политехнический институт и др.).

Одними из первых были работы, посвященные расчету и анализу влияния высших гармоник на конденсаторы. Работа конденсаторов при несинусоидальном напряжении приводит к более интенсивному старению диэлектрика. Токи высших гармоник нередко являются причиной выхода из строя статических конденсаторов, которые устанавливаются в узлах сети. Эффективным средством снижения уровней высших гармоник в системах электроснабжения является установка фильтрокомпенсирующих устройств. ФКУ способствует повышению качества электроэнергии посредством увеличения коэффициента мощности и уменьшения несинусоидальности напряжения сети. Но отклонения параметров фильтра от резонансной настройки в процессе эксплуатации приводят к изменению частотной характеристики сети. Это, в свою очередь, может способствовать усилению высших гармоник тока и напряжения. При определенном отклонении параметров ФКУ может проис-

ходить увеличение тока фильтруемой гармоник, т.е. возникает режим антифильтрации.

В ряде работ производилась оценка влияния колебаний напряжения питающей сети на уровни высших гармоник и условия работы КБ. Исследования, выполненные на основе спектрального представления колебаний напряжения, показывают, что при колебаниях напряжения возрастают уровни основной и высших гармоник в сравнении с работой спокойной нагрузки той же мощности. При этом может возникать перегрузка конденсаторов. Тем не менее следует отметить, что указанная методика не позволяет в достаточной мере оценить влияние свободных составляющих переходного процесса на работу КБ и ФКУ.

Особенности эксплуатации конденсаторов в сетях с искаженной формой кривой напряжения приводят к необходимости применения более совершенных средств сигнализации и релейной защиты для КБ и ФКУ. Выполненный обзор средств защиты и контроля состояния КБ и ФКУ показывает, что наиболее чувствительными являются дифференциальные и балансные защиты. Большое количество технических решений по совершенствованию защит КБ от внутренних повреждений обусловлено тем, что каждая из защит допускает применение для вполне конкретных схем конденсаторных установок. В ФКУ целесообразно применение устройств, контролирующих отклонение параметров фильтра от резонансной настройки. Применение для КБ средств контроля состояния последовательных конденсаторных рядов позволяет оптимально планировать профилактические осмотры и ремонты батареи. Для защиты ФКУ от перегрузки, как правило, применяются максимальная токовая защита. Но она не в достаточной мере позволяет учитывать отрицательное воздействие токов высших гармоник на работу конденсаторов.

В соответствии с выполненным обзором научно-исследовательских работ представляется необходимым провести исследование условий возникновения и характера перегрузок конденсаторов в сетях с искаженной формой кривой напряжения, а также разработать более совершенные средства релейной защиты и сигнализации КБ и ФКУ. Необходимо разработать методику расчета надежности КБ, позволяющую учитывать особенности их эксплуатации в системах электроснабжения с источниками высших гармоник.

Во второй главе диссертации, на основании разработанных математических моделей, выполнено исследование работы

КВ и ЭКУ в условиях их загрузки токами высших гармоник и при колебаниях напряжения в электрической сети. Исследование выполнялось посредством программ, реализованных на алгоритмическом языке "ФОРТРАН" для ЦВМ серии ЕС.

В качестве объекта моделирования приняты конденсаторная батарея и фильтры 5-й, 7-й, 11-й, 13-й гармоник, установленные в распределительной сети с источниками высших гармоник. В математической модели сети цели нагрузки с нелинейной вольт-амперной характеристикой представлены в виде линейных активно-индуктивных звеньев с источником тока высших гармоник. Такое представление позволяет производить анализ влияния той или иной гармоники на работу КВ и ЭКУ как в стационарных, так и переходных режимах. Для исследования несимметричных режимов ток источника высших гармоник представляется суммой токов прямой и обратной последовательностей для соответствующих порядков гармоник.

Исследование режимов загрузки ЭКУ токами высших гармоник выполняется расчетным методом с представлением элементов схемы замещения в комплексной форме. Выполнены расчеты коэффициентов загрузки ЭКУ токами высших гармоник при характерных изменениях параметров фильтров, вызванных изменениями температуры, повреждением конденсаторов, а также при колебаниях частоты в системе.

Проведенный анализ результатов исследования показывает, что если для фильтруемой гармоники ЭКУ представляет емкостное сопротивление, а эквивалентное сопротивление системы с учетом силовых фильтров, настроенных на гармоники других порядков, носит индуктивный характер, то ток фильтруемой гармоники в ЭКУ превышает соответствующий ток источника гармоник. Аналогично, что если эквивалентное сопротивление системы для рассматриваемой гармоники имеет емкостный характер, то увеличение коэффициента загрузки происходит при индуктивной расстройке соответствующего фильтра.

Анализ режимов работы фильтров при наличии несимметрии в системе электроснабжения вызывает известные трудности в связи с необходимостью представления схемы замещения в трехфазном исполнении. Поэтому для анализа условий работы филтросимметрирующих устройств, а также ЭКУ с несимметричной расстройкой предлагается эквивалентное преобразование трехфазной схемы замещения для токов высших гармоник к соответствующим однофазным (рис. 1).

Пологая, что источник высших гармоник генерирует токи прямой

последовательности, приведенное сопротивление системы для фазы А можно определить по следующему выражению:

$$Z'_{\Sigma A} = \frac{Z_{FA}(Z_{\Sigma A}(Z_{FC} + Z_{\Sigma C} + Z_{FB} + Z_{\Sigma B}) + Z_{\Sigma B}Z_{\Sigma C} - \alpha Z_{\Sigma C}Z_{FB} - \alpha^2 Z_{\Sigma B}Z_{FC})}{Z_{FA}(Z_{FC} + Z_{\Sigma C} + Z_{FB} + Z_{\Sigma B}) + Z_{FB}(Z_{\Sigma C} + Z_{FC}) + (1 + \alpha^2)Z_{\Sigma B}Z_{FC} + \alpha Z_{\Sigma C}Z_{FB}}, \quad (I)$$

где Z_{FA} , Z_{FB} , Z_{FC} - комплексные сопротивления фильтра; $Z_{\Sigma A}$, $Z_{\Sigma B}$, $Z_{\Sigma C}$ - эквивалентные сопротивления системы; α - оператор угла поворота фаз.

При несимметричном источнике высших гармоник токи в ФКУ можно определять наложением токов от источников прямой и обратной последовательностей. Приведенные сопротивления для токов обратных последовательностей могут быть получены по выражениям, аналогичным приведенному выше, в которых произведена взаимная перестановка коэффициентов α^2 и α .

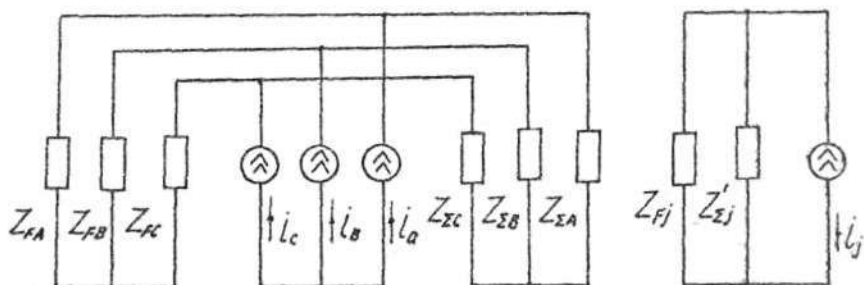


Рис. I. Схемы замещения электрической сети для анализа режимов работы компенсирующих устройств в несимметричных режимах

Исследование переходных процессов при колебаниях сетевого напряжения выполнялось посредством математической модели, составленной на основе физических законов, связывающих мгновенные значения параметров режима с параметрами элементов схемы замещения. В процессе разработки алгоритма, связанного с необходимостью приведения исходного математического описания к виду, удобному для решения численными методами, получено 29 нормализованных дифференциальных уравнений и 16 алгебраических. Система дифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка. На каждом шаге численного интегрирования решается система линейных алгебраических уравнений.

Выполненные расчеты показывают, что короткие замыкания вблизи шин подстанции, а также последующее их отключение вызывают в ФКУ значительные броски тока. При этом токи в ФКУ могут в течение 2-х-3-х периодов превышать установку токовой отсечки от междуфазных коротких замыканий, что ставит под сомнение целесообразность ее применения для защиты силовых фильтров.

Для оценки влияния резких изменений нагрузки на работу ФКУ предлагается использовать следующие параметры:

$$\Delta I_{gk} = \frac{I_{g\phi} - I_{n\phi}}{I_{n\phi}} \quad \text{и} \quad \Delta U_{gk} = \frac{U_{g\phi} - U_{n\phi}}{U_{n\phi}}, \quad (2)$$

где $I_{g\phi}$ и $U_{g\phi}$ - соответственно ток и напряжение на конденсаторах ФКУ ν -й гармоники в первый период после резкого изменения напряжения на шинах; $I_{n\phi}$ и $U_{n\phi}$ - номинальные рабочие значения тока и напряжения конденсаторов ФКУ в установившемся режиме.

Возможные увеличения тока в конденсаторах могут определяться по следующему выражению:

$$I_k = \sqrt{(I_{k1} + \Delta I_g)^2 + I_{\nu r}^2}, \quad (3)$$

где I_{k1} - максимальное значение рабочего тока первой гармоники в конденсаторах; ΔI_g - приращение действующего значения тока в конденсаторах вследствие переходного процесса при максимальных эксплуатационных изменениях напряжения на шинах; $I_{\nu r}$ - максимальное действующее значение токов высших гармоник, протекающих через конденсаторы.

При определении параметров ФКУ и оценке их надежности необходимо учитывать не только величины резких изменений напряжения на шинах, но и их чистоту.

Третья глава посвящена разработке средств защиты и контроля состояния КБ и ФКУ.

Для конденсаторов, работающих в составе силовых фильтров, напряжение не должно превышать номинальное, а длительно допустимое значение действующего тока составляет 130% от номинального. Полагая, что в ФКУ протекает ток первой и фильтруемой гармоник, можно определить условия возникновения и характер перегрузок конденсаторов, находящихся в составе фильтра. Критический режим конденсаторов, при котором одновременно действующие значения напряжения и тока достигают предельно допустимых величин, определяется следую-

щим выражением:

$$\xi_{кр1} = \sqrt{\frac{\nu_p^2 - C_i^2}{\nu_p^2 - 1}}, \quad (4)$$

где $\xi = U_3 / U_{н5}$ - напряжение на конденсаторах в относительных номинальных единицах; ν_p - номер резонансной гармоники ФКУ;

C_i - допустимая перегрузка конденсаторов по току.

При значениях $\xi < \xi_{кр1}$, первоначально наступает перегрузка по напряжению, а при $\xi > \xi_{кр1}$ - по току. ФКУ целесообразно выполнять таким образом, чтобы потери мощности в конденсаторах не превышали значения, определенного при воздействии номинального тока и напряжения первой гармоники. Критическое значение коэффициента при котором потери мощности в конденсаторах и ток достигают своих предельных значений, можно определить как

$$\xi_{кр2} = \sqrt{\frac{\nu_p - C_i^2}{\nu_p - 1}}. \quad (5)$$

ФКУ могут перегружаться как по току, так и по потерям мощности в конденсаторах. В соответствии с этим определяются требования к защите конденсаторов фильтра от перегрузки. Для того чтобы устройства релейной защиты реагировали на удельную перегрузку конденсаторов, целесообразно их выполнять на основе контроля и анализа напряжения на конденсаторах ФКУ. При этом может оказаться достаточным контролировать напряжения первой и фильтруемой гармоник. В тех случаях, когда требуется защита, контролирующая потери мощности в конденсаторах, ее можно выполнять в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\Delta P / C = \omega \cdot \lg \delta (U_i^2 + \nu_p U_{\nu p}^2). \quad (6)$$

На рис. 2 приведена структурная схема устройства релейной защиты, работающей в соответствии с приведенным выше алгоритмом. Напряжение на выходе квадратирующего блока 4 определяется следующим выражением:

$$U_{кв} = K \left\{ \frac{U_{m1}^2}{2} [1 + \cos(\omega_1 t + \varphi_1)] + \nu_p \sum_{\nu=\nu_{кр}}^n \frac{U_{m\nu}^2}{2} [1 + \cos(\nu \omega_1 t + \varphi_\nu)] \right\} + \sqrt{\nu_p} \sum_{\nu=\nu_{кр}}^n \frac{U_{m\nu} U_{m1}}{2} [\cos((\nu-1)\omega_1 t + \varphi_\nu - \varphi_1) - \cos((\nu+1)\omega_1 t + \varphi_\nu + \varphi_1)] + \quad (7)$$

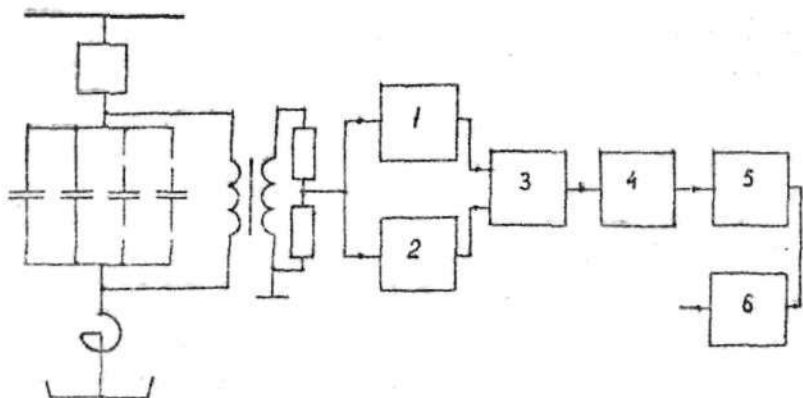


Рис. 2. Устройство релейной защиты БКУ от перегрузки: 1, 2 - соответственно фильтр основной и высших гармоник; 3 - сумматор; 4 - квадратирующий блок; 5 - фильтр нижних частот; 6 - пороговый элемент

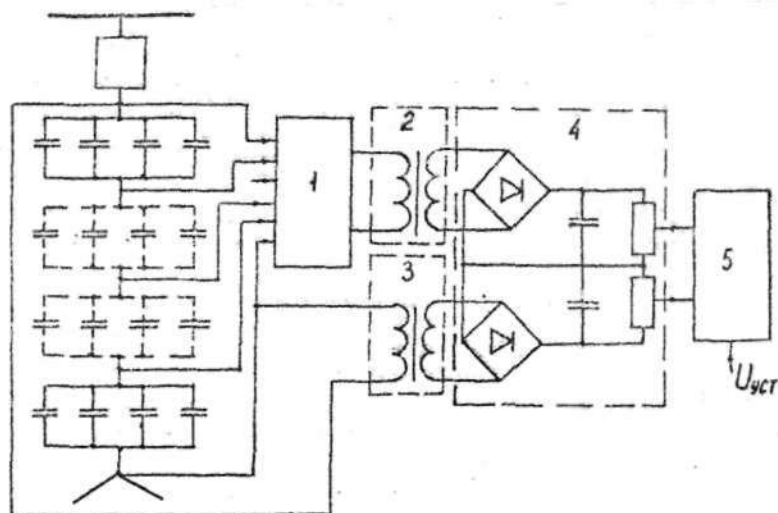


Рис. 3. Устройство контроля последовательных конденсаторных рядов: 1 - высоковольтный коммутатор; 2, 3 - трансформаторы напряжения; 4 - орган сравнения; 5 - пороговый элемент

$$+ \gamma_p \sum_{\substack{n \\ \kappa \neq \gamma_{\text{ср}} \\ \gamma = \gamma_{\text{ср}} \\ \kappa \neq \gamma}} \frac{U_{\text{пр}n} U_{\text{мк}n}}{2} [\cos((\nu - \kappa)\omega_p t + \varphi_{\nu} - \varphi_{\kappa}) - \cos((\nu + \kappa)\omega_p t + \varphi_{\nu} + \varphi_{\kappa})],$$

где $\gamma_{\text{ср}}$ - номер гармоники, определяющей частоту среза фильтра верхних частот.

В результате фильтрации полученного сигнала посредством фильтра 5 выделяется постоянная составляющая напряжения.

Для контроля состояния последовательных конденсаторных рядов предлагается устройство, выполненное на потенциале земли и содержащее минимальное количество трансформаторов напряжения.

Структурная схема его приведена на рис. 3. Устройство контроля содержит высоковольтный коммутатор 1, посредством которого трансформатор напряжения 2 может присоединяться к любому из последовательных рядов конденсаторов. Трансформатор напряжения 3 подключен на фазное напряжение батареи, к вторичным обмоткам трансформаторов напряжения подключена схема сравнения выпрямленных напряжений 4. Переменные сопротивления в плечах схемы сравнения выставляются таким образом, чтобы при номинальном напряжении на фазе батареи и номинальном напряжении на контролируемом ряду конденсаторов на выходе схемы сравнения сигнал отсутствовал. Производя периодические проверки состояния КВ, описанное выше устройство позволяет своевременно выявлять дефектные ряды КВ и быстро осуществлять замену поврежденных конденсаторов.

Для защиты КВ от внутренних повреждений предлагается аналоговая защита, обладающая универсальностью применения и позволяющая выявлять фазу батареи, в которой произошло повреждение. В названном устройстве защиты осуществляется сравнение параметров защищаемой батареи с ее аналоговой моделью. Аналоговая модель КВ выполняется на основе интегратора переменного тока. Приведенные расчеты показали, что для выбранных параметров моделирующего устройства обеспечивается его устойчивая работа. Структурная схема аналоговой защиты приведена на рис. 4.

Конденсаторные установки со схемой соединения в звезду могут защищаться балансной защитой, структурная схема которой приведена на рис. 5. Изменение проводимости одной из фаз батареи приводит к появлению напряжения небаланса на выходе сумматора 3. Указанное напряжение и напряжение фазы батареи, проводимость которой уменьша-

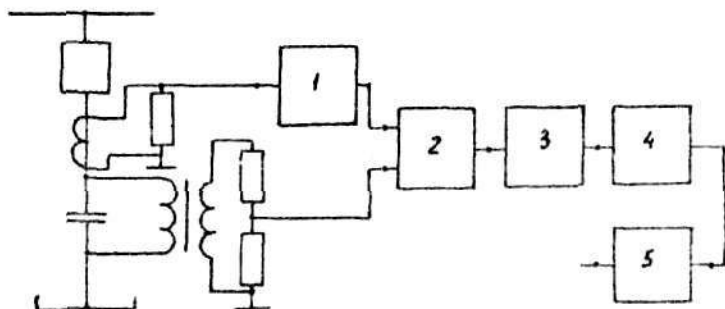


Рис. 4. Структурная схема аналоговой защиты КБ: 1 - моделирующее устройство; 2 - орган сравнения; 3 - фильтр верхних частот; 4 - выпрямительное устройство; 5 - пороговый элемент

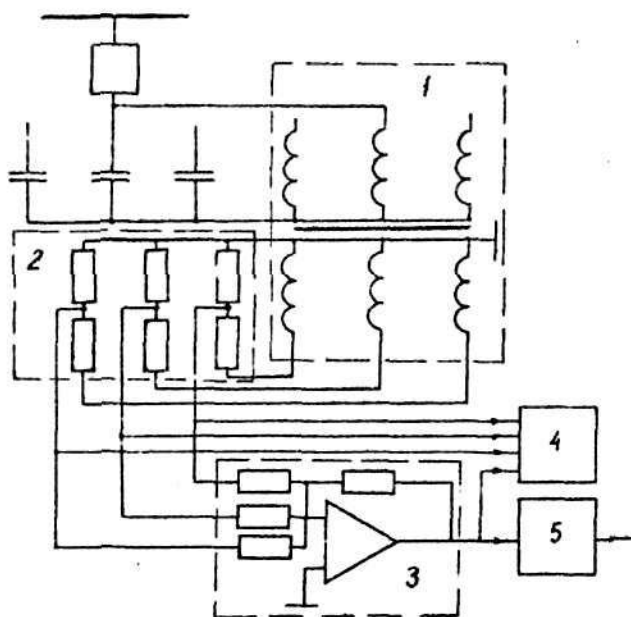


Рис. 5. Балансная защита КБ: 1 - трансформаторы напряжения; 2 - блок делителей напряжения; 3 - сумматор; 4 - фазочувствительное устройство; 5 - пороговый элемент

ется, имеют одинаковый угловой сдвиг. Это позволяет посредством фазочувствительного устройства 4 выполнить достаточно простую синхронизацию поврежденной фазы батареи.

В четвертой главе исследуется работа зашит от внутренних повреждений в КБ, а также рассмотрены вопросы надежности конденсаторных установок.

Для исследования переходных процессов при пробое конденсаторных секций разработана математическая модель ФКУ, установленного в трехфазной сети с изолированной нейтралью. На основе разработанного алгоритма составлена программа для расчета переходных процессов на ЦЕМ Минск-32. Расчетные значения токов и напряжения на КБ используются для анализа поведения зашит от внутренних повреждений.

Выполнены расчеты переходных процессов при устойчивом коротком замыкании в конденсаторном ряду и при замыканиях секций, отключаемых индивидуальными предохранителями, в предположении, что отключение предохранителя происходит в момент первого перехода тока короткозамкнутой секции через нуль. Результаты расчетов показывают возможность создания чувствительных и быстродействующих устройств релейной зашиты КБ, основанных на контроле фазных напряжений и токов. В балансной защите посредством контроля фазового сдвига напряжения небаланса на выходе сумматора можно выявлять фазу батареи, в которой произошло недопустимое изменение параметров.

Экспериментальное исследование аналоговой зашиты позволило оценить работоспособность разработанной зашиты и уточнить параметры основных ее органов. При резких изменениях сигнала на входе интегратора на его выходе возникают низкочастотные затухающие колебания напряжения. Амплитуда этих колебаний на выходе органа сравнения может значительно превышать амплитуду первой гармоники напряжения, для которой осуществляется балансировка устройства зашиты. В связи с этим предусматривается установка фильтра верхних частот, что позволяет обеспечить высокую чувствительность и быстродействие аналоговой зашиты. Результаты исследований показывают целесообразность выполнения в разработанном устройстве двух пороговых элементов. Один из них должен быть подключен к сглаживающему фильтру выпрямительного устройства, имеющему меньшую постоянную времени, а другой - к фильтру с большей постоянной времени. Указанные особенности выполнения устройства зашиты позволяют исключить ложные срабатывания зашиты при повреждениях конденсаторных секций,

отличающихся индивидуальными предохранителями, и предотвращают колебания релейного органа вблизи порога срабатывания. При этом КБ будет отличаться с минимальной выдержкой времени при устойчивых замыканиях в батарее.

На работу КБ в процессе эксплуатации влияют многочисленные факторы: температура окружающей среды, условия охлаждения, величина приложенного напряжения, наличие токов высших гармоник, колебания напряжения в сети и т.п. Учет всех перечисленных факторов при расчете надежности батареи затруднен. Поэтому представляется целесообразным при оценке надежности КБ, в зависимости от конкретных условий эксплуатации и устройства батареи, выделять параметр, оказывающий наиболее существенное влияние на интенсивность отказов конденсаторных секций (конденсаторов). Условиям работы КБ, находящихся под воздействием несинусоидального напряжения, в большей степени соответствует коэффициент ужесточения режима конденсаторных секций, определяемый по току протекающему через конденсаторы. Опыт эксплуатации КБ в распределительных сетях показывает, что, как правило, уменьшение емкости фаз батареи связано с увеличением напряжения на одном из последовательных рядов конденсаторов рассматриваемой фазы. При этом наблюдается уменьшение емкости одного из конденсаторов ряда. Принято считать, что отключение 6-10 секций приводит к отказу конденсатора. Интенсивность повреждений последующих секций возрастает вследствие ухудшения качества пропитывающего диэлектрика. КБ, устанавливаемые в распределительных сетях высокого напряжения промышленных предприятий, содержат небольшое количество конденсаторов в последовательных рядах. Отказ одного конденсатора при этом приводит к необходимости отключения батареи. Математическое ожидание количества взрывов конденсаторов в КБ находится в прямой зависимости от количества поврежденных секций за рассматриваемый период. Предполагается определить его по следующему выражению:

$$Y_B(t) = 3mn[\varphi_{нк}\lambda_c + (\Delta\varphi_{gp} - \Delta\varphi_{gк})\lambda_k]Q_{npt}, \quad (8)$$

где λ_k и λ_c - соответственно интенсивность отказов конденсаторов с параллельным соединением секций и интенсивность повреждений секций; n и m - соответственно, число конденсаторов в последовательном конденсаторном ряду и количество конденсаторных

рядов в фазе КБ; $Q_{нк}$ - номинальное количество секций в конденсаторе; $\Delta Q_{др}$ и $\Delta Q_{дк}$ - допустимое количество отключенных секций в конденсаторном ряду и конденсаторе соответственно; $Q_{пр}$ - вероятность отказа предохранителя.

Так как взрыв конденсатора приводит к отказу батареи, то вероятность безотказной работы КБ целесообразно определять с учетом двух типов отказов:

$$P_{кб}(t) = e^{-[3m\lambda_k t + Y_0]} \quad (9)$$

При изменяющихся условиях эксплуатации предлагается переводить реальное время работы КБ, для которого определяется вероятность безотказной работы, к условному времени при номинальном режиме эксплуатации:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n K_i t_i \quad , \quad (10)$$

где n - количество интервалов разбиения; K_i - коэффициент ужесточения режима работы КБ на рассматриваемом интервале; t_i - длительность интервалов разбиения. При этом надежность работы КБ может быть определена по выражению (9), посредством замены t на \bar{t} .

Применение устройств сигнализации выхода из строя конденсаторных секций позволяет исключить отказы батареи вследствие повышения напряжения на одном из последовательных рядов конденсаторов. Экономическая эффективность разработанных средств релейной защиты и сигнализации для компенсирующих устройств, установленных в системе электроснабжения промышленного предприятия, определяется из возможности снижения количества их внезапных отключений. Полагая, что внезапное отключение КБ приводит к увеличению потребляемой реактивной мощности при максимуме нагрузки энергосистемы, экономический эффект можно определить, исходя из уменьшения надбавки к тарифу на электроэнергию за компенсацию реактивной мощности для расчетного периода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты:

1. Предложен метод исследования стационарных режимов ΦCV и ΦKV с несимметричной расстройкой. Проведенные исследования позволяют выявлять условия возникновения перегрузок конденсаторов токами высших гармоник.

2. Разработаны алгоритм и программа для исследования переходных процессов в ΦKV , обусловленных колебаниями напряжения сети. Полученные результаты исследования позволяют учитывать увеличение действующих значений тока и напряжения конденсаторов ΦKV вследствие переходных процессов. Показана нецелесообразность применения токовой отсечки для защиты ΦKV от междуфазных коротких замыканий.

3. Предложены алгоритмы, на основании которых может выполняться защита ΦKV от перегрузки. Выполнение устройства защиты на основе измерения и анализа напряжения, приложенного к конденсаторам фильтра, позволяет контролировать их удельные перегрузки. Разработано устройство защиты, контролирующее параметр, пропорциональный потерям мощности в конденсаторах.

4. Предложенное устройство контроля состояния последовательных рядов конденсаторов, выполненное на потенциале земли и содержащее минимальное количество измерительных трансформаторов, позволяет своевременно выявлять дефектные ряды конденсаторов, на которых произошло недопустимое повышение напряжения. Применение указанного устройства совместно с устройствами телемеханики позволит эффективно эксплуатировать КБ на подстанциях без постоянного обслуживающего персонала.

5. Разработаны алгоритм и программа для расчета переходных процессов в ΦKV , установленных в сети с изолированной нейтралью, при повреждениях конденсаторных секций. Проведенные исследования позволяют определить принципы выполнения защит от внутренних повреждений в КБ.

6. Разработаны новые средства защиты КБ от внутренних повреждений и недопустимого изменения их параметров. При этом аналоговая защита батареи обладает высокой чувствительностью, быстродействием и может применяться при различных схемах соединения КБ и силовых фильтров. Для КБ со схемами соединения в звезду может найти применение разработанная балансная защита.

7. Выполненные экспериментальные исследования комплекта защиты КБ позволили уточнить параметры отдельных органов разработанного устройства. Полученные результаты исследования показывают целесо-

образность выполнения в устройстве аналоговой защиты двух пороговых элементов. Один из них, уставка которого определяется из условия недопустимого уменьшения емкости конденсаторного ряда, должен быть подключен к сглаживающему фильтру выпрямительного устройства, имеющему большую постоянную времени. Это позволяет обеспечить высокое быстродействие защиты при устойчивых замыканиях в батарее и четкое срабатывание релейного органа при повышении напряжения на одном из конденсаторных рядов сверх допустимого.

8. Разработана методика определения надежности КБ, установленных в распределительных сетях с источниками высших гармоник. Предложенная методика позволяет производить оценку надежности для КБ, находящихся в изменяющихся условиях эксплуатации. При расчетах надежности целесообразно выделять внезапные отказы КБ, обусловленные устойчивыми замыканиями в батарее, так как ущерб, связанный с этим видом отказов, может быть значительно большим, чем при отключениях, вызванных недопустимым повышением напряжения на одном из конденсаторных рядов.

9. Применение предложенных устройств защиты и сигнализации позволяет своевременно выявить ненормальные режимы КБ и фильтрующих звеньев и производить их профилактический ремонт в то время, когда их отключение вызывает наименьший ущерб. Разработанные математические модели, алгоритмы и программы для исследования режимов работы КБ и ФКУ, а также новые технические решения по совершенствованию средств релейной защиты и контроля состояния компенсирующих устройств приняты для использования в практике проектирования в Белорусском отделении института "Энергосетьпроект". Разработанный комплект защиты КБ установлен в опытную эксплуатацию на подстанции 110 кВ "Брагин" РЭУ "Гомельэнерго".

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Бохан А.Н., Евминов Л.И. Устройство для защиты от повреждения конденсаторной батареи. Авторское свидетельство СССР № 608221, БИ №19, 1978.

2. Бохан А.Н., Новач В.И. Устройство для защиты от перегрузки батареи конденсаторов фильтро-компенсирующего блока. Авторское свидетельство СССР № 640392, БИ № 48, 1978.

3. Бохан А.Н. Перегрузка конденсаторов фильтрокомпенсирующих устройств и средства защиты. "Известия вузов СССР - Энергетика",

1979 г., № 4, с. 101-104.

4. Новаш В.И., Бохан А.Н. Устройство для защиты конденсатора. Авторское свидетельство СССР № 686955, БИ № 36, 1979.

5. Бохан А.Н. Повышение надежности конденсаторных батарей в сетях с источниками высших гармоник. "Известия вузов СССР - Энергетика", 1979, № 8, с. 87-89.

6. Евминсв Л.И., Бохан А.Н., Лыков С.Д. Устройство для сигнализации повреждения секций конденсаторов. Авторское свидетельство СССР № 712894, БИ № 4, 1980.

Александр Николаевич БОХАН

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ И
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЕТЯХ С ИСТОЧНИ-
КАМИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

05.14.02 - Электрические станции (электрическая
часть), сети и системы и управление ими

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Корректор Г.В.Ширкина

Подписано в печать 27.07.81 г. АТ 13541.
Формат 60x84 1/16. Бумага т. № 2.
Офс. печ. Усл. печ.л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,91. Тир. 130.
Зак. 1320 Бесплатно.

Отпечатано на ротатрийте БПИ. 220027, Минск, Ленинский пр., 65.