ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЗАЩИТЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА

АВТОРЫ:

Н.Ю. ГЕТМАНОВА,
ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

Л.Г. ЛИСИЦЫН,
ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

В.А. МЕСТЕРГАЗИ,
ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

Р.Н. ШУЛЬГА,
К.Т.Н.,
ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

Выборгская вставка постоянного тока — единственная в России вставка постоянного тока. Была построена для экспорта электроэнергии из СССР в Финляндию, эксплуатация началась в 1981 году. Передачу электроэнергии постоянным током выбрали по экономическим соображениям. Если бы использовалась обычная линия с переменным током, электрические системы СССР и Финляндии необходимо было бы синхронизировать, при этом затраты на синхронизацию превысили бы экономический эффект от экспорта.

Ключевые слова: вставка постоянного тока; преобразовательный блок; цифровая система управления блоком; фазовая автоматическая подстройка к частоте сети.

Современый вид Выборгской подстанции

Посвящается памяти главного идеолога и разработчика комплекса КУРБ Мазуренко Александра Константиновича

Цифровая система управления, регулирования и защиты для перспективных вставок постоянного тока должна отвечать требованиям интеллектуализации алгоритмов управления, обеспечивать высокий уровень программной реализации при минимальном объеме аппаратных средств, иметь развитый интерфейс отображения событий и процессов для передачи в системы управления верхнего уровня. Прототипом такой системы может служить микропроцессорный комплекс управления и регулирования мощным преобразовательным блоком (КУРБ), построенный по принципу мажорированного трехкомплектного резервирования. На основе комплексов КУРБ и цифрового комплекса регулирования мощности (КУРМ) была проведена цифровая модернизация всей системы управления Выборгской вставки постоянного тока, состоящей из четырех преобразовательных блоков общей мощностью 1500 МВт. Первые три блока комплектного высоковольтного преобразовательного устройства (КВПУ) на Выборгской вставке постоянного тока передачи СССР — Финляндия были введены в эксплуатацию еще в 1981–1983 годах. Регулирование, управление и защита преобразовательных блоков осуществлялись с помощью резервированных аналоговых регуляторов и устройств управления на «жесткой» логике. Опыт эксплуатации этих устройств показал их функциональную достаточность и аппаратную надежность. Однако строительство на Выборгской подстанции 4-го блока дало толчок началу полной модернизации с переходом на цифровое управление преобразовательными блоками и созданием цифровой АСУ ТП подстанции. Основываясь на опыте эксплуатации аналоговой аппаратуры, специалисты НИИПТ, Выборгской подстанции и ФГУП ВЭИ разработали алгоритмы цифрового регулирования, автоматики управления и защит блоков и подстанционного регулирования активной и реактивной мощности. Идея комплексной разработки цифровой системы управления преобразовательным блоком и основные технические решения принадлежат главному конструктору и разработчику КУРБа Александру Константиновичу Мазуренко (13 ноября 1941 г. — 3 марта 2011 г.).

Новаторский подход А.К. Мазуренко в комплексном решении всех проблем цифрового регулирования и управления на базе микропроцессорной техники позволил в кратчайшие сроки провести исследования критериев устойчивости дискретного регулирования и синхронизации цифрового процесса с сетью в статических и аварийных режимах работы вставки постоянного тока.

Впервые цифровое управление было опробовано и внедрено на новом, четвертом преобразовательном блоке КВПУ мощностью 350 МВт на базе опытного образца КУРБ в 2000 г. В 2003 г. был введен в эксплуатацию промышленный образец КУРБ, в 2005 г. была завершена цифровая модернизация всех преобразовательных блоков, подстанционного управления мощностью и автоматизированной системы управления (АСУ ТП) подстанции. Специалисты ФГУП ВЭИ, Энергосетьпроекта, НИИПТ и Выборгской подстанции внедрили АСУ ТП подстанции и систему регистрации аварийных событий, которые обеспечили полноценный анализ аварийных событий, развитый контроль и мониторинг работы оборудования с глубиной диагностики отказов до типового элемента замены.

Рис. 1
Общий вид передней панели одного из комплектов мажорированного комплекса КУРБ

Рис. 2
Унифицированный модуль восьмиканального программируемого АЦП с параллельным преобразованием фирмы Fastwell, Россия

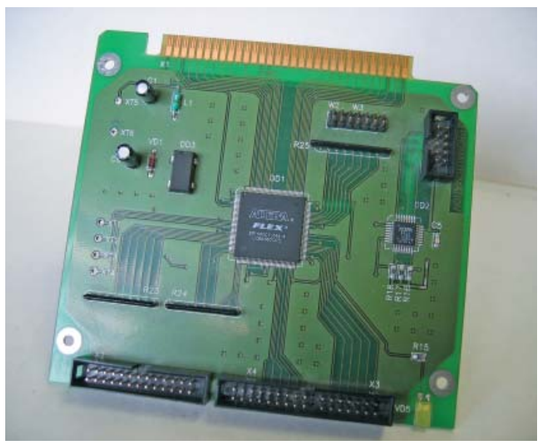


Рис. 3
Специальный программируемый модуль УСО на базе ПЛИС ALTERA для формирования вектора импульсов управления с контролем зон коммутирующих напряжений, разработанный ВЭИ совместно с ОАО «Промавтоматика»

Основой всех этих работ была разработка комплекса КУРБ, которая намного опережала свое время. Основная идея — комплексная программная реализация всех функций при минимальном объеме аппаратных средств.

При разработке комплекса КУРБ были использованы типовые унифицированные микропроцессорные контроллеры и модули УСО, включая перепрограммируемые многоканальные АЦП параллельного преобразования и др. В содружестве с ОАО «Промавтоматика» (г. Санкт-Петербург) в разработке и изготовлении были применены новейшие технологии конструирования и компоновки аппаратуры, позволившие отказаться от кассетного блочно-модульного исполнения и получить минимальное число сочленений и открытый доступ к аппаратуре.

На рис. 1 показан внешний вид передней панели одного из комплектов комплекса КУРБ, а на рис. 2 — унифицированный модуль восьмиканального программируемого АЦП с параллельным преобразованием производства фирмы Fastwell, Россия. На рис. 3 представлен специальный программируемый модуль УСО на базе ПЛИС ALTERA для формирования вектора импульсов управления с контролем зон коммутирующих напряжений, разработанный ВЭИ совместно с ОАО «Промавтоматика».

На рис. 4 показано табло на рабочем месте оператора системы АСУ ТП, отображающее текущее состояние одного из четырех преобразовательных блоков и режим работы всей подстанции.

Максимум программной реализации всех системных и технологических функций дал возможность в кратчайшие сроки провести эффективную доработку и усовершенствование алгоритмов работы комплекса в ходе испытаний на математической и физической моделях и непосредственно на объекте в составе преобразовательного блока. Программная реализация системных функций и технологических алгоритмов позволила провести эффективную доработку и усовершенствовать функционирование комплекса в ходе испытаний на математической и физической моделях и непосредственно в составе преобразовательного блока. Специалисты НИИПТ и Выборгской подстанции, проводящие скрупулезную проверку всех подсистем управления, регулирования и защит, не раз отмечали достоинства цифровой реализации комплекса КУРБ в плане мобильности внесения изменений и доработок алгоритмов.

Стоит еще раз подчеркнуть, что это стало возможным за счет максимальной реализации функций синхронизации, регулирования, фазоимпульсного управления и резервирования на программном уровне, что полностью исключило трудоемкую и затратную по времени доработку в случае реализации этих функций аппаратным способом.

Важным моментом в ходе испытаний была отработка взаимодействия комплекса КУРБ с подстанционным регулятором мощности типа КУРМ, также разработанным специалистами ФГУП ВЭИ во главе с Г.М. Цфасманом и изготовленным в ОАО «Элара» (г. Чебоксары).

Начиная с 2005 г., все системы цифрового управления, контроля и мониторинга Выборгской подстанции в полном составе введены в промышленную эксплуатацию и в настоящее время успешно отрабатывают график поставки электроэнергии в Финляндию.

Для оценки объема программной реализации всех функций комплекса КУРБ на рисунке 5 представлена структурная схема преобразовательного блока КВПУ и комплекса КУРБ.

Силовая схема блока включает тиристорные мосты М1-М4, четырехобмоточные преобразовательные трансформаторы с регуляторами напряжений РПН в сетевых обмотках трансформатора выпрямителя. На стороне выпрямителя и инвертора к обмоткам среднего напряжения подключаются датчики коммутирующих напряжений, в вентильные обмотки включены трансформаторы тока, которые формируют первичные сигналы для датчиков токов вентилей мостов. На стороне постоянного тока включены датчики выпрямленного тока блока.

Сигналы от трансформаторов напряжений на стороне выпрямителя и инвертора поступают на датчики вектора логических и аналоговых сигналов коммутирующих напряжений *Ukj*, сигналы от трансформаторов тока фаз — на датчики вектора токов вентилей *Ivi* и формирования огибающей фазных токов, сигналы от трансформаторов постоянного тока — на датчик выпрямленного тока блока *Id*. Указанные датчики реализуются в комплексе КУРБ аппаратным способом и включают устройства гальваноразвязки, логического преобразования и АЦП параллельного действия. К аппаратной реализации относятся также устройства усиления, мажорирования и контроля выходных импульсов управления и релейных сигналов. Программно-аппаратным способом с применением программируемых логических матриц типа ALTERA и с управлением от процессорной шины реализованы модуль измерения минимального угла отключения *Dlmin* и модуль синхронной выдачи вектора управляющих импульсов с контролем зон коммутирующих напряжений (см. рис.3).

Остальной объем системных и технологических функций реализован программным способом.

Комплекс КУРБ включает следующие подсистемы регулирования, управления и защит:

- регулятор тока блока РТБ как основной регулятор, задающий углы включения вентилей выпрямителя ALFA и обеспечивающий путем поддержания заданной уставки тока требуемую передаваемую мощность блока;
- регулятор углов отключения РУО, который в комплекте с программ-

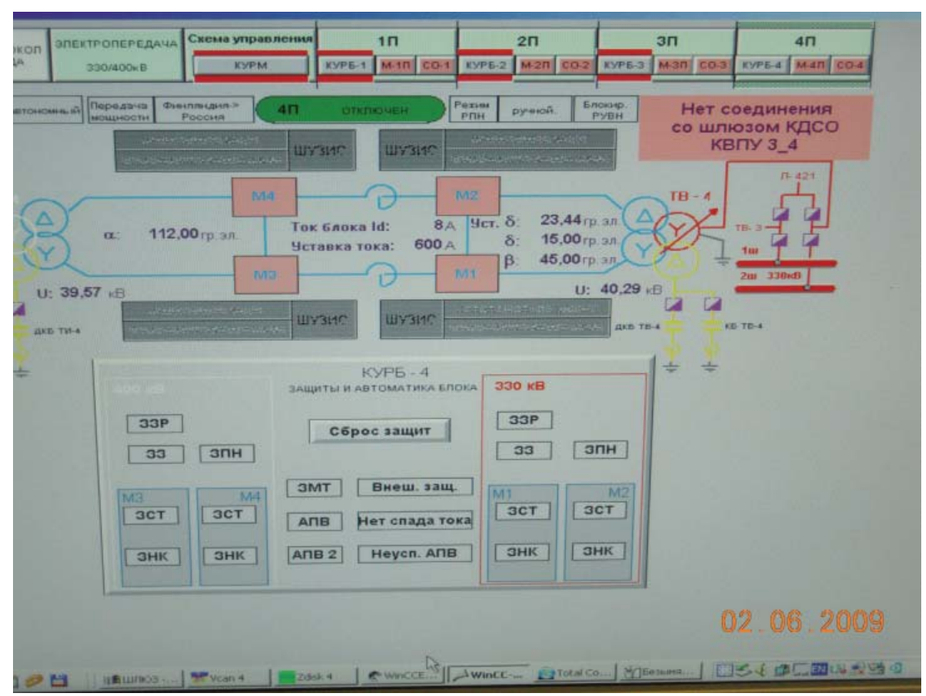


Рис. 4
Табло системы АСУ ТП на рабочем месте оператора, отображающее отключенное состояние четвертого преобразовательного блока

но-аппаратным измерителем углов отключения определяет текущий минимальный угол отключения из 12 углов двухмостового инвертора и воздействует на интегратор минимального ограничения угла опережения BETTA путем интегрирования рассогласования между минимальным углом отключения и заданной уставкой минимального угла отключения, которая в свою очередь задается от подстанционного регулятора КУРМ для корректировки перетока реактивной мощности и обеспечения устойчивой работы инвертора;

– регулятор минимального тока РМТ, позволяющий избежать резкого спада тока блока при выходе регулятора РТБ на минимальное ограничение угла ALFA за счет воздействия на увеличение угла BETTA на инверторе с целью снижения противо-э.д.с. инвертора. Это воздействие длится до момента изменения коммутирующего напряжения на выпрямителе за счет переключения отпаек РПН в сторону повышения напряжения;

– регулятор угла включения и напряжения РУВН, который отслеживает изменение напряжений сети на стороне выпрямителя и инвертора и с помощью переключения отпаек РПН преобразовательного трансформатора выпрямителя обеспечивает выравнивание коммутирующих напряжений, задавая оптимальные углы включения вентилей выпрямителя;

– автоматика управления блоком, которая реализует алгоритмы оперативного включения блока и оперативного и аварийного отключения блока с возможностью однократного или двукратного АПВ блока. Пауза перед повторным включением блока зависит от длительности аварии в линиях и времени восстановления нормальных коммутирующих напряжений. Автоматика блокирует повторное АПВ и производит отключение блока, если первое АПВ было связано с устойчивым нарушением коммутации вентилей из-за их отказа;

СТРУКТУРА СИЛОВОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО БЛОКА ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, РЕГУЛИРОВАНИЯ, ЗАЩИТ И АВТОМАТИКИ БЛОКА КОМПЛЕКСА КУРБ

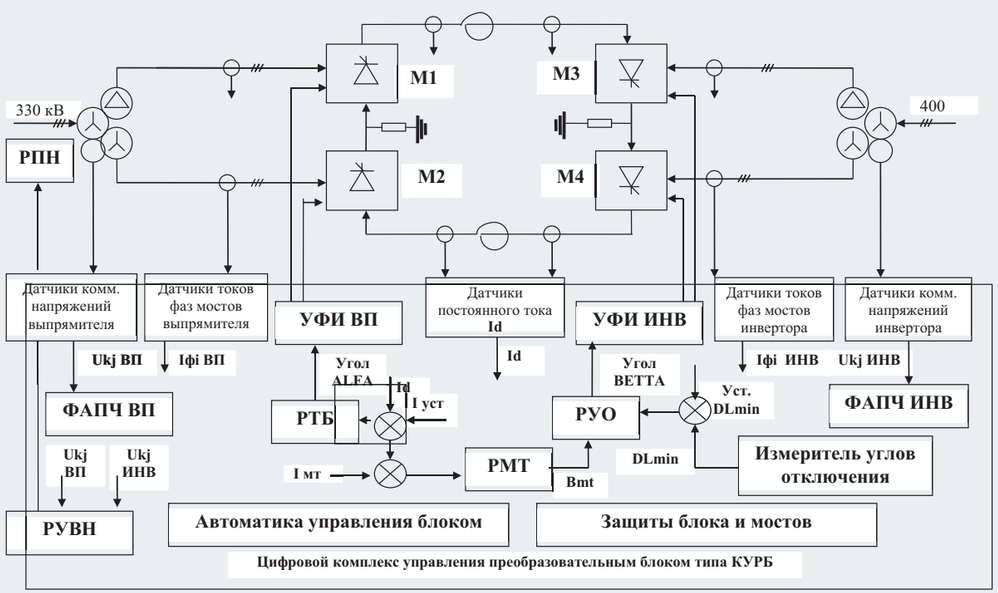


Рис. 5

– система защит блока, включающая защиты мостов от нарушения коммутации вентилей типа пропуск или пробой (ЗНК), защиты мостов от сверхтоков при коротких замыканиях полюс-полюс, полюс-фаза (ЗСТ), защиту от минимального тока блока (ЗМТ), при котором возникает опасность повреждения вентилей блока и нестабильность режима передачи мощности, защиты от зарегулированного режима управления на стороне выпрямителя и инвертора (ЗЗРВ и ЗЗРИ), защиту от замыкания на землю (ЗЗ) и защиту от повышения напряжения на инверторе (ЗПНИ);

– подсистемы непрерывного контроля работоспособности входного и выходного УСО комплекса, контроля отказа и отключения резервных комплектов с переводом комплекса в двухкомплектный режим работы, система ввода комплекта и перехода работы комплекса в мажорированный режим;

– подсистема внутреннего цифрового осциллографирования, которая является универсальным средством для отладки всего программного обеспечения комплекса, дает возможность отслеживать изменение цифровых параметров комплекса в графическом или цифровом формате представления на каждом такте работы комплекса. В листинге программы подготовлены массивы сигналов (16 сигналов на каждый массив) для отладки отдельных подсистем, в том числе и штатные массивы сигналов, которые осциллографируются при эксплуатации комплекса. Путем открытия массивов и перетрансляции программы на каждом комплекте можно задавать массивы для разных подсистем, что значительно увеличивает общий объем сигналов при отладке или испытаниях. В качестве сигналов осциллографирования можно задавать входные и выходные аналоговые и дискретные сигналы, ячейки флагов и состояний, расчетные значения и т.д. Осциллограммы записываются в буфер по факту срабатывания защит, по произвольным условиям или по командам с клавиатуры. При аварийных отключениях или АПВ блока осциллограммы с комплектов передаются в шлюз системы АСУ ТП, при останове комплектов записываются в файлы;

– подсистема обмена информацией с подстанционным регулятором мощности и задания режима автономного или группового режима управления блоком. Как звено высшей иерархии распределением мощности между блоками занимается подстанционный регулятор мощности. Поэтому одной из важных задач комплекса КУРБ является обеспечение надежного двухстороннего интерфейса с регулятором мощности и оптимизация переходных процессов при статических и аварийных перераспределениях мощности между блоками с учетом допустимых комбинаций отключений и включений блоков в процессе работы подстанции;

– подсистема обмена информацией с АСУ ТП подстанции. Комплекс должен отслеживать и передавать в АСУ ТП весь поток информации о текущем оперативном режиме блока, состоянии системы резервирования, информацию об отказах каналов УСО и резервных комплектов, аварийную информацию о срабатывании защит, АПВ блока или его аварийном отключении и др.

Комплекс КУРБ обеспечивает автоматическое и оперативное управление передачей мощности на уровне одного преобразовательного блока, основной задачей комплекса является поддержание оптимального режима работы блока в статических и аварийных режимах работы примыкающих асинхронных энергосистем России и Финляндии.

Все указанные задачи целиком реализованы программным способом

ИНФОРМАЦИЯ

ВЫБОРГСКАЯ ВСТАВКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

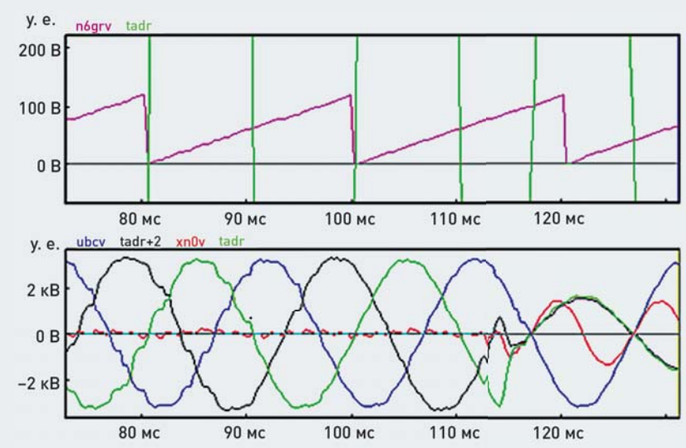
Линия электропередач соединяет подстанции Выборгская (400 кВ) с подстанциями Юлликкяля и Кюми (400 кВ). От ПС Каменногорская (г. Каменногорск) проложена ВЛ-330 кВ (W1D и W2D) до ПС Выборгская (пос. Перово), где переменный ток 330 кВ преобразуется в постоянный ток двухполюсной линии-вставки +/– 85 кВ (длиной порядка 200 м в пределах подстанции). На другом конце вставки постоянный ток инвертируется в переменный напряжением 400 кВ и уходит к потребителям в Финляндии. К трансформаторам, соединяющим высоковольтные линии с плечами выпрямителей и инверторов, добавлены обмотки 35 кВ, через которые подключены фильтры высших гармоник. Также на обеих сторонах подстанции к высоковольтным линиям подключены компенсаторы реактивной мощности: два по 100 МВАр на стороне 330 кВ, два по 160 МВАр на стороне 400 кВ. Станция состоит из 4 независимых тиристорных преобразовательных блоков, работающих на постоянном напряжении +/– 85 кВ. Мощность каждого блока — 355 МВт. На данный момент передаваемая мощность составляет 1400 МВт [2], что делает вставку самой мощной в мире [2].

при минимальном использовании аппаратных средств.

Для реализации программным способом перечисленных выше функций в комплексе применен ряд специальных структурных программно-аппаратных решений, к которым относятся:

1. ***Реализация асинхронных процессов управления на выпрямителе и инверторе на одном микропроцессоре.*** Функционально системы синхронизации, регулирования и фазоимпульсного управления должны разделяться на системы управления выпрямителем и инвертором. Это обусловлено разными задачами регулирования, а также наличием асинхронности примыкающих энергосистем переменного тока. Такое разделение легко реализуется на двух процессорах. Однако особенностью программно-аппаратной реализации КУРБ является как раз отказ от применения двух микропроцессоров, что значительно упрощает общую структуру программного обеспечения, особенно в плане работы с внешними системами и возможности использования унифицированных контроллеров и процессорных шин.
2. ***Совмещение тактовой дискреты с интервалом преобразования АЦП и формирование тактовых прерываний по факту готовности АЦП.***
Цифровая система управления в реальном времени реализуется с помощью тактовых прерываний. Интервал между тактовыми прерываниями задает цифровую дискрету работы системы.
В комплексе КУРБ тактовые прерывания используются от АЦП инвертора, поскольку система управления инвертором является базовой в обеспечении устойчивости всей системы управления блоком. По тактовым прерываниям от АЦП инвертора вызывается общая тактовая программа, в которой реализуются системы управления как инвертором, так и выпрямителем. Отличие системы выпрямителя состоит в том, что готовность АЦП выпрямителя определяется уже в теле программы такта по флагам готовности АЦП выпрямителя. Для уменьшения ухода от реальной точки формирования готовности флаг готовности АЦП выпрямителя считывается в двух разнесенных между собой точках программы. Считывание информации с АЦП инвертора в этом случае возможно прямо при входе в тактовую программу, а АЦП выпрямителя по факту готовности флага преобразования.
3. ***Синхронизация интервала между преобразованиями АЦП с частотой примыкающей сети.***
Особенностью цифровой системы управления преобразовательным блоком является необходимость фазо-частотной синхронизации с примыкающей на стороне выпрямителя и инвертора сетью, что обусловлено необходимостью выдачи сигналов управления тиристорами преобразовательных блоков в определенные моменты времени на интервале периода частоты сети. Система считается засинхронизированной, если от момента перехода через ноль опорного коммутирующего напряжения из отрицательного значения в положительное до следующего момента такого перехода, что как раз и составляет период напряжения частоты сети, укладывается заданное число тактов преобразования АЦП. Для комплекса КУРБ длительность такта задана 6 эл. град, что при частоте сети, равной 50 Гц, составляет 333,3 мкс, а число тактов за период равно 60. Таким образом, АЦП инвертора и выпрямителя загружаются разными интервалами преобразования или тактами дискретизации, которые рассчитываются и подстраиваются системами синхронизации, исходя из текущих значений длительности периода частоты сети на инверторе и выпрямителе.
4. ***Программная синхронизация по принципу фазо-частотного детектора.***
Синхронизация систем управления выпрямителя и инвертора реализуется программно по принципу фазо-частотного детектора ортогональных сигналов сети и внутреннего генератора систем управления выпрямителя и инвертора. Синхронизация осуществляется на каждом такте программы путем вычисления значения фазо-частотного детектора, преобразования его инерционным звеном, корректировки текущего значения интервала преобразования АЦП и загрузки интервала в регистр АЦП для отработки на следующем такте преобразования.
Таким образом, при медленном изменении частоты сети происходит плавное слежение за фазой и частотой сети. При скачках частоты система подстройки обеспечивает восстановление синхронизации в течение не более пяти периодов частоты сети. Алгоритм фазо-частотного детектора, вырабатывающий сигнал рассогласования внутренней и внешней частот, в комплексе КУРБ дополнен программой синхронизации высшего уровня, которая управляет процессом синхронизации в аварийных процессах в сети. Она контролирует уровень коммутирующих напряжений, уровень сигнала рассогласования детектора, организует процесс синхронизации при подаче на блок коммутирующих напряжений или после их поставарийного восстановления.
5. ***Особенности построения мажорированной системы резервирования.*** Построение мажорированной системы резервирования на основе программного межкомплектного обмена базовыми входными и расчетными параметрами выполняется с целью контроля степени расхождения этих параметров для принятия решения об отказе комплекта. За счет обмена все три комплекта имеют равные массивы входных и расчетных параметров, поэтому принимают однозначные решения об отказе комплекта. Отказавший комплект переходит на останов с записью в файлы всех буферов событий, кодов отказов и внутренних осциллограмм, одновременно при останове идет передача этой информации в шлюз АСУ ТП для возможности ее просмотра на АРМ инженерного персонала. Оставшиеся в работе комплекты блокируют обмен с отказавшим комплектом и переходят на работу в режиме двух комплектов с пониженной надежностью. Глубина диагностики отказов позволяет значительно сократить время поиска отказа и восстановления комплекта. Система резервирования предусматривает ввод отказавшего комплекта после восстановления и переход комплекса в исходный мажорированный режим. Процесс ввода и втягивания комплекта разрешается только в статических режимах работы блока, при возникновении переходных процессов процедура втягивания прекращается.
6. ***Принцип ведущего и ведомого комплектов.***
В комплексе реализован принцип ведущего и ведомого комплектов, который позволил упростить обработку аналоговой межкомплектной информации. Все технологические алгоритмы регулирования и автоматики управления блоком работают с использованием мажорированных значений сигналов. Поскольку мажорирование аналоговых сигналов имеет достаточно трудоемкий алгоритм, то в комплексе КУРБ прямое мажорирование заменено сравнительным контролем аналоговых сигналов, и в случае допустимого разброса рабочий сигнал берется от ведущего комплекта. В мажорированном режиме ведущим назначается первый комплект, при переходе в двухкомплектный режим работы — ведущим остается первый при отказе второго или третьего комплектов или второй при отказе первого комплекта.
7. ***Комплексное цифровое моделирование.***
С помощью условной трансляции технологическое программное обеспечение комплекса, включающее регуляторы, защиты, автоматику управления и систему выдачи управляющих импульсов, объединяется с цифровой моделью преобразовательного блока. Это позволило смоделировать, проанализировать, отладить и реализовать оптимальные процессы включения и отключения блока в оперативных и аварийных режимах работы блока на первичной стадии разработки программного обеспечения перед переходом к испытаниям на физической модели. Все расчетные параметры модели и комплекса регистрировались с помощью системы внутреннего осциллографирования, которая позволила наглядно оценить качество и устойчивость процессов регулирования и управления преобразовательным блоком в режиме виртуального реального времени. Внутрипрограммный интерфейс обмена путем прямого обмена массивами расчетных параметров ускорил взаимодействие работы модели

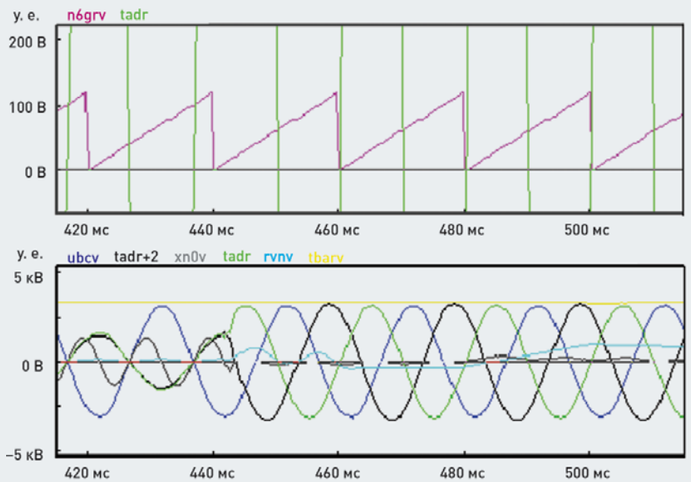
РАБОТА ФАПЧ В НОРМАЛЬНОМ И АВАРИЙНОМ РЕЖИМАХ



Представление сигналов: n6grv — номер такта выпрямителя (аргумент внутреннего ортогонального коммутирующего напряжения); tadr=Uab v — опорное коммутирующее напряжение; tadr+2=Uca v; xn0v — сигнал рассинхронизации

Рис. 6

СИНХРОНИЗАЦИЯ ТАКТОВ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ КЗ



Представление сигналов: n6grv — номер такта выпрямителя (аргумент внутреннего ортогонального коммутирующего напряжения); tadr= Uab v — опорное коммутирующее напряжение; tadr+2=Uca v; xn0v — сигнал рассинхронизации; rvnv — сигнал подстройки такта по сигналу xn0v

Рис. 7

и комплекса, обеспечив точное отслеживание реального времени в дискретах работы комплекса и модели.

В данной статье более детально рассмотрим работу системы синхронизации с сетью как основы стабильной работы всех подсистем регулирования и фазоимпульсного управления. В комплексе первичную задачу выявления рассогласования и подстройки синхронизации на стороне выпрямителя и инвертора выполняют программы фазовой автоматической подстройки частоты ФАПЧ.

Процесс синхронизации во времени с момента включения преобразовательных трансформаторов включает следующие этапы:

а) после получения нормальных коммутирующих напряжений по критерию допустимых уровней вызывается программа синхронизации, которая контролирует значения одного из коммутирующих напряжений для определения момента перехода через ноль отрицательной полуволны напряжения в положительную. На такте перехода напряжения через ноль программа устанавливает индекс такта [n] (тактовый аргумент внутреннего генератора сигнала косинуса) в начальное значение n = 0, задает временной интервал в тактах исходной частоты 50 Гц длительностью 5–6 периодов и разрешает работу ФАПЧ;

б) на заданном временном интервале идет переходный процесс работы ФАПЧ, которая подстраивает длительность такта дискретизации таким образом, чтобы период внутреннего генератора совпал по частоте и фазе с периодом частоты сети. В течение периода индекс такта увеличивается с 0 до 59 (для частоты 50 Гц задана длительность такта 6 эл.град. при числе тактов за период, равном 60). На такте с индексом 59 последний сбрасывается в 0. При точной синхронизации на этом такте как раз и фиксируется очередной переход напряжения через ноль. Значение рассинхронизации, вычисляемое ФАПЧ в этом случае, колеблется в зоне нуля;

в) по окончании заданного интервала контроля синхронизации программа, зафиксировав приближение рассогласования к нулю, устанавливает флаг успешной синхронизации. В противном случае программа повторяет цикл синхронизации заново, начиная с повторного поиска перехода опорного коммутирующего напряжения через ноль.

При авариях в сети, приводящих к значительному искажению или посадке коммутирующих напряжений, ФАПЧ формирует предельные значения рассогласования, по факту предельного рассогласования программа синхронизации блокирует работу ФАПЧ. Блокировка ФАПЧ может произойти и при контроле допустимых коммутирующих напряжений. При блокировке ФАПЧ подстройка тактов замораживается на текущей длительности и фазе такта. Это позволяет избежать выдачи неконтролируемой во времени последовательности управляющих импульсов, так как, несмотря на искажение или потерю коммутирующих напряжений, сеть реально сохраняет частоту и фазу.

Кроме того, искажения коммутирующих напряжений, как правило, приводят к срабатыванию защиты от нарушения коммутации вентилей и АПВ блока.

В течение паузы АПВ и отключенного состояния блока ФАПЧ остается в заблокированном состоянии до момента восстановления напряжений. После этого программа синхронизации выполняет полный цикл синхронизации, описанный выше, и только после успешной работы ФАПЧ производится включение блока. В противном случае процесс АПВ заканчивается аварийным отключением блока.

На рис. 6, 7 показана реакция ФАПЧ выпрямителя на КЗ в сети выпрямителя. На интервале от 70 мс до 110 мс наблюдается устойчивая синхронизация тактов дискретизации выпрямителя с сетью, что видно по переключению аргумента n6grv в 0 в момент перехода напряжения Uab v через 0. Сигнал рассинхронизации xn0v на этом интервале отслеживает незначительные искажения кривых напряжений и не влияет на подстройку текущей длительности такта. При аварии в результате искажений коммутирующих напряжений сигнал xn0v резко увеличивается и начинает изменяться с удвоенной частотой сети. Однако из-за превышения ограничения рассогласования воздействие ФАПЧ на интервал такта замораживается, и процесс изменения аргумента n6grv остается прежним.

Как показано на рис. 7 в зоне аварии ФАПЧ был заблокирован по факту превышения сигналом xn0v заданной уставки, поэтому длительность тактов и процесс изменения номера тактов выпрямителя n6grv сохранились доаварийными. При снятии КЗ коммутирующие напряжения восстановились без сдвига фаз, за счет чего сигнал рассогласования резко снизился, ФАПЧ разблокировался и стал формировать сигнал подстройки такта rvnv. По верхней осциллограмме видно, что уже в момент t=460 мс номер такта n6grv переключился вблизи перехода через ноль опорного напряжения Uab v. В течение пяти периодов наблюдается незначительный колебательный процесс, после чего устанавливается устойчивая синхронизация.

В заключение следует отметить, что для реализации рассмотренной системы управления требуется отказ от ряда преимуществ операционной системы, компоненты которых произвольно занимают процессорное время, например, работа видеоконтроллера и т.д., и, таким образом, нарушают заданную динамику обработки тактовой программы. Реализация тактовой программы на процессорах средней производительности также требует оптимального и экономного программирования, а именно, сокращения обращений к устройствам УСО, применение целочисленного математического аппарата с отказом от сопроцессора, запись информации в файлы только при останове системы. Программное обеспечение комплекса КУРБ целиком реализовано на ассемблере, что позволило оптимизировать и минимизировать код программы.

ВЫВОДЫ

1. Полностью цифровой способ управления и регулирования преобразовательными блоками на примере комплекса КУРБ доказал свою актуальность и преимущество как в плане устойчивости процессов регулирования, так и в плане реализации сложных интеллектуальных алгоритмов оперативного и аварийного управления.
2. Рассмотренная цифровая система управления преобразовательным блоком за годы эксплуатации показала надежность и высокое качество управления блоками подстанционного регулятора мощности в условиях динамически переменного графика передачи мощности и при различных аварийных ситуациях на подстанции, блоках и в сети.
3. Объем и скорость передачи информации в цифровом формате о текущих параметрах блоков, поток событий при оперативном и аварийном управлении обеспечивают диспетчерский и оперативный персонал полной информацией о текущем состоянии блоков.
4. Реализация на программном уровне основных алгоритмов управления, резервирования и контроля обеспечивает мобильность их доработки и модернизации на всех этапах отладки и внедрения в эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт внедрения микропроцессорной системы управления преобразовательными блоками на Выборгской подстанции / К.Б. Гусаковский, Е.Ю. Змазнов, С.В. Катанцев, А.К. Мазуренко, В.А. Местергази, Г.Г. Прочан, С.Ф. Фунтикова // Электрические станции. 2005. № 12.
2. Experience in the installation of a microprocessor system for controlling converter units of the Vyborg substation / K.B. Gusakovskii, E.Yu. Zmaznov, S.V. Katantsev, A.K. Mazurenko, V.A. Mestergazi, G.G. Prochan and S.F. Funtikova // Power Technology and Engineering. Vo. 40. N. 1. P. 65–70. DOI: 10.1007/s10749-006-0022-8.
3. New generation of control and protection system for HV converter units of Vyborg back-to-back HVDC link / V.D. Kovalev, I.S. Kubareva, A.K. Mazurenko, V.A. Mestergazi, L.P. Nosik. CIGRE, Catalogue of ELEKTRA papers; July 2006, 14-301_1994.
4. Р. Н. Шульга. К вопросу о возможности создания гибридной энергораспределительной сети ГЭРС с накоплением электроэнергии, Новое в российской электроэнергетике №12, 2015, с. 22.