

Журнал «Энергия Единой сети», 2013 №1

Бердников Р.Н. (ОАО «ФСК ЕЭС»), Фортов В.Е. академик (ОИВТ РАН),
Сон Э.Е. член-корр. (ОИВТ РАН), Деньщиков К.К. д.т.н. (ОИВТ РАН),
Жук А.З. д.ф-м.н. (ОИВТ РАН),
Шакарян Ю.Г. д.т.н. (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»)

ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ЕНЭС НА БАЗЕ АККУМУЛЯТОРОВ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

В 2012 году по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (головной исполнитель) совместно со своими соисполнителями разработал, изготовил и провел экспериментальные исследования гибридного накопителя энергии на базе литий ионных аккумуляторов и наборных суперконденсаторов для ЕНЭС России. В работе принимали участие ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» (концепция использования гибридных накопителей энергии в ЕЭНС), ООО «НПО ССК» (разработка и изготовление батареи литий-ионных аккумуляторов), ЗАО «НПО «ТЕХНОКОР» (разработка и изготовление батареи суперконденсаторов), ООО «НПП «СПТ» (разработка и изготовление устройства сопряжения с сетью), ООО «Тепло и сил» и ООО «Независимые электростанции» (разработка испытательного стенда), ООО «ИНСО ЭНЕРГО» (патентное сопровождение проекта). Работа выполнялась при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» Министерства образования и науки: ГК № 16.526.12.6002,

В настоящее время во всем мире и в России наблюдается растущий интерес к бурно развивающемуся в последние годы направлению

преобразования электроэнергетических систем в так называемые интеллектуальные электроэнергетические системы (ИЭ).

Создание таких интеллектуальных электроэнергетических систем, которые трактуется во всем мире как реализация концепции инновационного развития электроэнергетики, кроме решения основной задачи обеспечения современного уровня качества энергоснабжения при всех существующих возмущающих воздействиях, позволит снизить потери энергии и существенно повысить безопасность и устойчивость национальной системы электроснабжения.

Технологическую платформу ИЭ составляют различные современные устройства и технологии на базе силовой электроники и в том числе системы накопления энергии.

В рамках настоящей работы впервые в России и Европе разработать разработан накопитель энергии для интеллектуальных электроэнергетических систем, которая является основой для производства номенклатурного ряда подобных устройств.

Базовой технологией накопителей энергии являются гибридные системы накопления энергии на базе долговременных накопительных систем – аккумуляторов и кратковременных накопительных систем – батарей суперконденсаторов, позволяющие повысить управляемость, надежность и экономичность функционирования ЕНЭС, в том числе при наличии в ее составе децентрализованных и нетрадиционных источников электроэнергии.

Гибридные накопители энергии предназначены для выполнения следующих функций:

- выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды избыточной электроэнергии и выдача в сеть в периоды дефицита);

- обеспечение в сочетании с современными устройствами силовой электроники повышения пределов статической и динамической устойчивости;

– демпфирование колебаний активной и реактивной мощности, снятие или существенное сокращение нерегулярных колебаний в межсистемных линиях электропередачи, повышение вследствие этого пропускной способности линий электропередачи;

– обеспечение бесперебойного питания как собственно подстанций и электрических сетей (собственные нужды), так и особо ответственных потребителей;

– обеспечение стабильной и устойчивой работы децентрализованных и нетрадиционных источников, работающих как автономно, так и в составе ЕНЭС.

Гибридные накопители энергии в ЕНЭС могут использоваться при решении следующих задач:

- **Покрытие** пиковых нагрузок/сглаживание графиков нагрузки при установленной мощности ГНЭ 1,5 МВт, 5 МВт, 20 МВт, 50 МВт и для длительности работы (3 ... 5) часов в сутки, что позволяет получить следующие преимущества:

- Снижение нагрузки на электросетевое оборудование путем накопления энергии вместо затрат по модернизации сетевой инфраструктуры

- Высвобождение мощности генерирующего оборудования в регионах с нехваткой энергии

- Увеличение надежности системы путем устранения состояния перегрузки

- Снижение операционных и эксплуатационных затрат

- **Использование** систем ГНЭ на подстанциях сетевой инфраструктуры в целях повышения качества электроэнергии и надежности энергосистемы, при установленной мощности ГНЭ (соответствующей мощности подстанции сетевой инфраструктуры) 5 МВА, 20 МВА, 50 МВА и для длительности работы до 2 часов в сутки, что позволяет получить следующие преимущества:

- улучшение качества энергии для ключевых конечных пользователей

- сокращение количества отключений и улучшение эксплуатационной надежности

- сокращение операционных и эксплуатационных затрат

- увеличение пропускной способности оборудования и линий электропередач.

- **Регулирование** частоты в энергосистеме/услуги по замещению вращающегося резерва поддержание диспетчерского графика нагрузки при установленной мощности ГНЭ (20 ... 40) МВт и для длительности работы от 1 минуты (регулирование частоты) до 1 часа (услуги по поддержанию диспетчерского графика) и до 2-х часов (услуги по замещению вращающегося резерва), что позволяет получить следующие преимущества:

- высвобождение мощности генерирующего оборудования в регионах с нехваткой энергии

- повышение качества энергии путем обеспечения оперативного резерва мощности с быстрым откликом и регулированием частоты

- снижение затрат на регулирование системы путем сокращения объема используемого топлива

- уменьшение выбросов от традиционных генерирующих источников

- снижение износа генерирующего оборудования.

- **Использование** в качестве резервного источника электроснабжения для особо важных потребителей и поддержка при перебоях в электроснабжении при установленной мощности ГНЭ 1 МВт и для длительности работы (3 ... 12) часов в сутки, что позволяет получить следующие преимущества:

- увеличение надежности энергоснабжения при отключениях.

- увеличение скорости реакции на отключение и сокращение длительности отключения

- снижение воздействия на окружающую среду в чувствительных областях, включая снижение выбросов и уровня шума

- размещение аварийного резерва в местах, где недопустимо хранение топлива для традиционных источников резервного электроснабжения.

- **Накопление** электроэнергии в период ее низкой стоимости/ выдача электроэнергии в период высокой стоимости при установленной мощности ГНЭ 1,5 МВт, 5 МВт, 20 МВт, 50 МВт и для длительности работы (6 ... 12) часов в сутки, что позволяет получить следующие преимущества:

- увеличение прибыли генерирующих компаний
- снижение затрат на сетевую и распределительную инфраструктуру
- снижение стоимости электричества для конечного пользователя
- высвобождение генерационных, трансмиссионных и распределительных ресурсов.

- **Интеграция** с генерирующим оборудованием ВИЭ (ветровой и солнечной) при установленной мощности ГНЭ (соответствующей мощности оборудования ВИЭ) 100 кВт, 500 кВт, 1 МВт, 5 МВт и для длительности работы (2 ... 6) часов в сутки, что позволяет получить следующие преимущества:

- улучшение стабильности сети и качества вырабатываемой электроэнергии

- обеспечение резервной мощности систем ВИЭ
- возможность вывода систем ГНЭ на рынок электроэнергии и мощности
- отсрочка капиталовложений на постройку новых / обновление существующих ЛЭП

- улучшение интеграции ВИЭ в системы передачи и распределения электрической энергии

- **Применение** систем ГНЭ конечными потребителями при установленной мощности ГНЭ (соответствующей объемам потребления) 500 кВт, 1,5 МВт, 5 МВт, 20 МВт и для длительности работы (1 ... 12) часов в сутки, что позволяет получить следующие преимущества:

- обеспечение аварийного резерва электрической энергии
- повышение качества электроэнергии

- снижение затрат на потребляемую электрическую мощность
- снижение затрат на обслуживание сети
- снижение средних затрат на электроэнергию посредством ее приобретения в периоды низких тарифов.

Применение в электрических сетях гибридных накопителей энергии большой энергоемкости является перспективной технологией, которая может найти широкое применение в электроэнергетических системах и электрических сетях России, обеспечивая повышение энергоэффективности, надежности, устойчивости и экономичности.

Принцип работы гибридного накопителя энергии.

Гибридный накопитель энергии представляет собой электротехнический комплекс, состоящий из подсистем накопления, согласования, потребления, генерирования электрической энергии и информационных связей между подсистемами. Подсистема накопления состоит из долговременного накопителя энергии - в данном проекте используются батареи литий –ионных аккумуляторов, и кратковременного накопителя энергии - батарея наборных суперконденсаторов.

Каждый накопитель энергии содержит также системы защит, контроля и мониторинга параметров батарей.

Подсистема согласования с сетью предназначена для преобразования постоянного тока накопителей энергии в переменный. Диапазон изменения напряжения постоянного тока обусловлен минимальным разрядным и максимальным зарядным напряжением, напряжение и частота переменного тока поддерживаются постоянными с возможным варьированием этих параметров в заданных пределах. В качестве приёмника электрической энергии (нагрузки) выступает потребитель, имеющий, в общем, достаточно большой разброс электрических параметров во времени, как мгновенных (токи, напряжения) так и

интегральных (мощность, спектр), обусловленных природой потребления и имеющих случайный характер.

Генератором служит сеть как бесконечной мощности (централизованное энергоснабжение) так и сеть с конечной мощностью, например, локальные генерирующие установки на основе дизель-генераторов, газовых турбин с порядком мощности, соизмеримой с устройствами согласования.

Для обеспечения взаимодействия всех основных подсистем гибридного накопителя энергии используются локальные управляющие контроллеры и контроллер верхнего уровня. Локальные контроллеры встроены в соответствующие элементы системы накопления: контроллер устройства согласования обеспечивает заданные режимы работы, связанные с компенсационными механизмами, стабилизацией параметров потребляемой электрической энергии, обеспечением надёжности снабжения; контроллер потребителя обеспечивает его защиту от превышения номинальных диапазонов, производит замеры электрических параметров, их учёт и архивирование; контроллер сети, генератора обеспечивает схожие функции как и для контроллера нагрузки; контроллер накопителя служит для его управления, обеспечения защитных функций его элементов, контроля параметров с их анализом и сохранением.

Общее управление гибридным накопителем энергии берёт на себя логический контроллер верхнего уровня, который предоставляет формальный механизм (протокол) для обеспечения взаимодействия между основными элементами накопителя. Физически же он выполняется либо в виде законченного модуля или отдельных конструктивных единиц, что более предпочтительно при реализации многоуровневой системы контроля мониторинга и управления с учетом существенного увеличения электромагнитных импульсных помех, требований к дополнительным защитам, отказоустойчивости и климатическим условиям.

Устройство согласования с сетью представляет собой автономный трёхфазный инвертор напряжения с выходным 14% реактором, 4.1% сглаживающей ёмкостью, согласующим трансформатором 1.48/1 и фильтром электромагнитной совместимости. Собственный коэффициент гармоник выходного тока не должен превышать 3% при работе на номинальную нагрузку или сеть без искажений.

Нагрузка (потребитель) подключается к первичной обмотке трансформатора непосредственно, без коммутационных элементов для обеспечения режима автономной работы от напряжения, формируемым инвертором. Между первичной обмоткой трансформатора и сетью имеется контактор переключения между режимом автономной работы и режимом работы на сеть.

Схема гибридного накопителя энергии ГНЭ-100.

Гибридный накопитель энергии ГНЭ-100 состоит из следующих модулей (Рис. 1.):

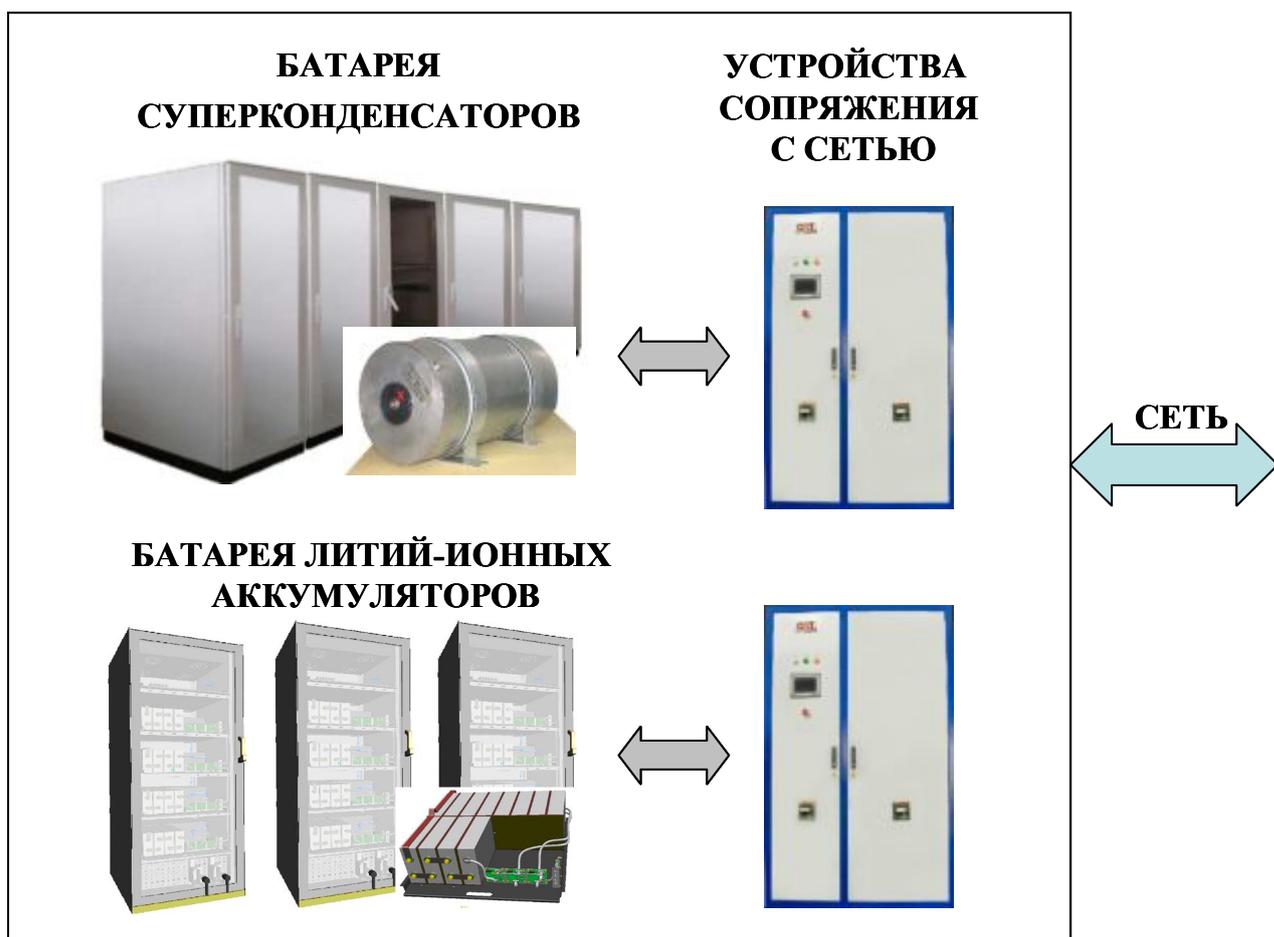


Рис. 1 Структурная схема ГНЭ-100

- Батарея литий-ионных аккумуляторов ЛИБ-100
- Батарея суперконденсаторов БСК-100;
- Устройств согласования с сетью УСС-100

Батарея литий-ионных аккумуляторов ЛИБ-100 предназначена для накопления электроэнергии из сети в период низкого спроса и отдачи ее в сеть или на нагрузку в период высокого спроса. Также ЛИБ-100 должна работать с сетью или другим источником электроэнергии параллельно на общую нагрузку.

ЛИБ-100 дополнительно снабжена устройством интеллектуального управления со следующими функциями:

- выравнивание напряжения на отдельных ячейках ЛИБ-100;
- коммутация модулей и их защиты по мгновенному значению тока с использованием контактора и быстродействующих предохранителей;

- контроль изоляции элементов.

Батарея суперконденсаторов БСК-100 предназначена для компенсации кратковременных (1 -5 сек.) колебаний напряжения сети и состоит из двадцати суперконденсаторов, электротехнического коммутационного и измерительного оборудования, а также двух блоков заряда суперконденсаторов.

Устройства согласования с сетью УСС-100 состоит из двух одинаковых блоков один для работы с ЛИБ-100, другой – с БСК-100 и представляет собой два преобразователя постоянного тока в переменный и наоборот с соответствующим согласованием уровней напряжений.

УСС-100 также осуществляет следующие функции системы управления ГНЭ-100, активного фильтра сети, корректора коэффициента мощности, с улучшением качества электрической энергии за счёт использования алгоритмов компенсации обратной последовательности по основной гармонике и компенсацией гармоник близких к основной (5,7,11,13,17) по каждой фазе, а также стабилизации выходного тока при возникновении перегрузки.

Технические характеристики ГНЭ-100 и его основных подсистем



Рис.2. Общий вид ГНЭ-100 и его подсистем.

Технические характеристики опытного образца гибридного накопителя энергии ГНЭ-100 с активной мощностью накопителя 100 кВт и энергоемкостью 100 кВт×ч. приведены в Таблице 1.

Технические характеристики опытного образца батареи литий ионных аккумуляторов ЛИБ -100 приведены в Таблице 2.

Технические характеристики опытного образца батареи суперконденсаторов БСК-100 приведены в Таблице 3

Технические характеристики опытного образца устройства сопряжения с сетью УСС-100 приведены в Таблице 4

Таблица 1

Номинальная активная мощность, (кВт)	100
Номинальное напряжение (3-ф, 50 Гц), кВ	380 ^{+10%} _{-15%}
Номинальный выходной фазный ток (А)	152
Диапазон напряжений звена постоянного тока	430...820
Коэффициент гармоник тока сети не более (%)	7
Энергоемкость (кВт×ч)	100
Время работы с полуторакратной перегрузкой по току сети (сек)	до 10
Время работы с номинальной нагрузкой (часы)	1,0
Диапазон регулирования реактивной мощности (квар)	(0 ÷ 100)
Ресурс, не менее (циклов заряд-разряд)	1500
КПД в цикле заряд-разряд, не менее (%)	75
Регулировка реактивной мощности отдельно по каждой фазе (кВАр);	0...33,3
Скорость обмена по RS-485 (кбит/с)	56
Скорость обмена по CAN (кбит/с)	250
Вероятность безотказной работы за весь срок службы	0,99
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее (лет)	5
Наработка на отказ, не менее (час)	25000

Таблица 2.

Номинальная активная мощность, (кВт)	100
Номинальное напряжение (3-ф, 50 Гц), кВ	380 ^{+10%} _{-15%}
Энергоемкость, (кВт-час)	100
Время работы в установившихся режимах с	1,0

номинальной мощностью, (час)	
Диапазон регулирования реактивной мощности (кВАр)	(0 ÷ 100)
Ресурс, не менее (циклов заряд-разряд)	1500
КПД в цикле, не менее (%)	85
Регулировка реактивной мощности отдельно по каждой фазе (кВАр);	0 ÷ 33.3
Скорость обмена по RS-485 (кбит/с)	56
Скорость обмена по CAN (кбит/с)	250
Вероятность безотказной работы за весь срок службы	0,99
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее (лет)	5
Наработка на отказ, не менее (час)	25000

Таблица 3

Номинальное статическое напряжение заряда, (кВ)	0,7
Напряжение при разряде, (В)	380 ^{+10%} _{-15%}
Номинальная динамическая активная мощность при разряде, (кВт)	100
Время работы в динамическом режиме с номинальной мощностью, в диапазоне, (сек)	5 ÷ 10
Ресурс, не менее. циклов заряд-разряд	150000
КПД в цикле, не менее (%)	85
Вероятность безотказной работы за весь срок службы	0,99
Назначенный срок эксплуатации, не менее, лет	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее, (лет)	5
Наработка на отказ, не менее, (час)	25000

Таблица 4.

Номинальная активная мощность, (кВт)	100
Номинальное напряжение звена постоянного тока (В)	400 -750
Коэффициент гармоник тока сети не более (%)	7
Номинальное напряжение (3-ф, 50 Гц), кВ	380 ^{+10%} _{-15%}
Время работы с полуторакратной перегрузкой по току сети	до 10 сек
Диапазон регулирования реактивной мощности (кВАр)	(0 ÷ 33,3)
Регулировка реактивной мощности отдельно по каждой фазе (кВАр);	0 ÷ 33.3
Скорость обмена по RS-485 (кбит/с)	56
Скорость обмена по CAN (кбит/с)	250
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого кап. ремонта, не менее (лет)	5

Испытательный стенд

Испытательный стенд для моделирования работы опытного образца гибридного накопителя энергии (далее – Стенд) предназначен для проведения экспериментальной лабораторной отработки гибридного накопителя энергии (ГНЭ) состоит из следующих подсистем (Рис.3):

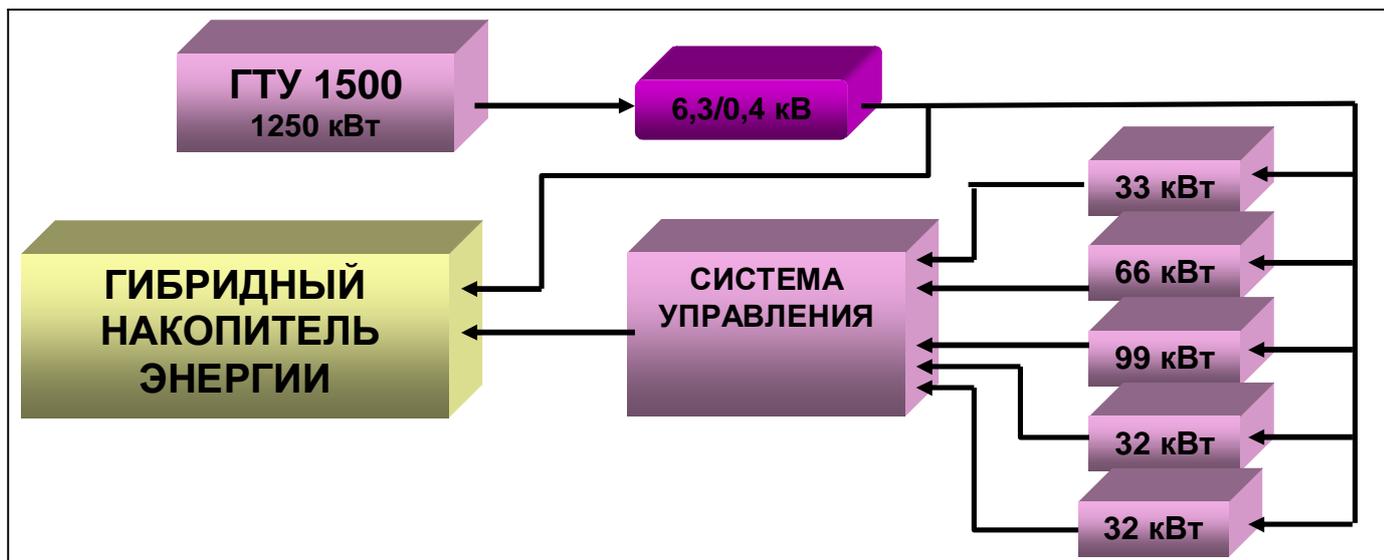


Рис.3. Структурная схема испытательного стенда

– газотурбинная электростанция (ГТЭ-1500) с напряжением 6,3 кВ и установленной мощностью 1250 кВА, имитирующая работу сетевой электростанции;

– понижающего трансформатора 6,3кВ/0,4кВ;

– набора активной и реактивной нагрузок для имитации возмущений в сети в соответствии с условиями моделирования:

- электрокалорифер мощностью 33 кВт;

- электрокалорифер мощностью 66 кВт

- электрокалорифер мощностью 99 кВт;

- два мотора-генератора в режиме холостого хода мощностью 32кВ

- блок коммутации нагрузки для реализации заданных возмущений сети;

- блок управления и измерений.

Газотурбинная электростанция ГТЭ-1500 с газоснабжением от отдельной газораспределительной подстанции через дожимной компрессор смонтирована в контейнере на базе газотурбинного двигателя и электрогенератора поставки ФГУП "Завод им. В.Я.Климова".

Блок управления нагрузкой кроме реализации заданных возмущений сети путем включения и выключения нагрузочных устройств включает в себя

защитно-коммутационные аппараты, предназначенные для коммутации силовых устройств, защиты их от перегрузки и токов КЗ.

Источник бесперебойного питания обеспечивает аварийное электроснабжение в случае пропадания основного питания для промышленного компьютера, концентратора Ethernet, конвертеров интерфейсов, а также, внешнюю линию питания для счётчиков внутри шкафа коммутации нагрузки, аккумуляторной батареи и модуля суперконденсаторов.

Испытания ГНЭ

Целью испытаний гибридной системы накопления при совместной работе аккумуляторной батареи и батареи суперконденсаторов является проверка специфических условий, налагаемых на накопительные батареи, оценка влияния компенсационных режимов работы на эффективность системы накопления в целом по гибридной и одиночной схемам, оценка эффективности использования гибридной схемы накопителя при работе с сетью и потребителем электрической энергии. На основе набора указанных ранее параметров и их граничных значений, можно составить множество действий, необходимых при испытаниях электротехнического комплекса с целью подтверждения или выявления полезных характеристик по различным критериям качества.

В ходе проведённых испытаний исследовалась параллельная работа преобразователей на звено постоянного тока с различными режимами работы. Исследовались режимы работы преобразователей с фиксированным напряжением звена постоянного тока равным 630В и с циклическим режимом при изменении напряжения от 420В до 720В. Были задействованы следующие режимы работы преобразователей:

- предзаряд ёмкостей звена постоянного тока преобразователей УСС-100-СК и УСС-100-ЛИБ;
- режим поддержания стабилизированного напряжения звена

постоянного тока преобразователем УСС-100-СК (источник питания) при работе от сети;

- режим автономной работы УСС-100-ЛИБ на холостом ходу (подача команд старт-стоп, сеть выключена);

- режим перехода с автономной работы под сетевое напряжение (сеть подключается), алгоритмы ФАПЧ и подстройки амплитуды, напряжение и частота в автономном режиме работы соответствует номинальным значениям;

- режим перехода с автономной работы под сетевое напряжение с использованием частоты 70 Гц и напряжения 115В для подтверждения работы системы ФАПЧ с произвольной частотой сети и амплитуды;

- включение преобразователя УСС-100-ЛИБ с подключённой нагрузкой под сетевое напряжение (переход из автономного режима работы в режим работы на сеть)

- переход преобразователя УСС-100-ЛИБ из режима работы на сеть в автономный режим работы с подключённой нагрузкой (бесперебойное питание нагрузки), при этом, коммутация производится при не нулевом задании на ток звена постоянного тока при работе от сети;

- генерация реактивной мощности в сеть с выключенной нагрузкой;

- генерация реактивной мощности в сеть с включённой нагрузкой;

- переходные процессы при мгновенном изменении сигнала задания на генерацию реактивной мощности в сеть при начальных условиях в виде сброса индуктивного или ёмкостного токов до нуля;

- переходные процессы при мгновенном изменении сигнала задания на реактивную мощность с переходом индуктивный ток — ёмкостной ток;

- отдельное управление потоком реактивной и активной мощности при включённой и выключенной нагрузке;

- переходные процессы при подключении/отключении нагрузки и заданной уставки на генерацию реактивной мощности;

- переходные процессы при переходе из автономного режима работы в

режим работы с сетью при различных уставках на ток звена постоянного тока;

- циклические режимы работы суперконденсатора, заключающиеся в стабилизации тока звена постоянного тока с различными значениями, при этом, напряжение на суперконденсаторе варьируется в диапазоне 420В...720В с автоматическим переключением «заряд/разряд».

В ходе экспериментов обнаружены дополнительные эффекты появления высших гармоник, связанные с режимами компенсации гармоник при параллельной работе преобразователей, проведены исследования динамических характеристик при переходных процессах, определены минимальные постоянные времени в регуляторах системы управления, при которых обеспечивается заданное быстродействие при изменении режимов работы преобразователя или коммутации нагрузки.

Все проведённые эксперименты представляют возможность реализации заявленных характеристик устройств согласования с сетью, сформулированы требования к внесению дополнительных изменений в систему управления комплексом, системы управления преобразователем и алгоритмам управления с целью повышения быстродействия и надёжности работы системы при возникновении нештатной ситуации.

На основании проведенных работ можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные программа и методика испытаний опытного образца секции ГНЭ-100 дают возможность оценки технических характеристик в реальных условиях эксплуатации как изделия в целом, так и его подсистем: ЛИБ-100, БСК-100 и УСС-100

2. При периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5 сек, 10 сек в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью суперконденсаторов. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки компенсируются полностью.

3. При периодическом изменении нагрузки с периодом более 10 сек в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью аккумуляторных батарей. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки указанного спектра компенсируются полностью.

4. При периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5, 10, 100 сек в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью гибридного накопителя: при этом возмущающие воздействия нагрузки высокочастотного спектра (с периодом 1-10 сек) компенсируются с помощью суперконденсаторов, а возмущающие воздействия нагрузки низкочастотного спектра (с периодом более 10 сек) компенсируются с помощью аккумуляторных батарей.

5. Испытания при отключении сети (островной режим работы) показало устойчивое электроснабжение потребителя от ГНЭ-100 – поддержание заданного уровня напряжения локальной нагрузки

6. Реализованный алгоритм работы ГНЭ-100 обеспечивает рекуперативный режим работы – компенсация возмущений за счет заряда суперконденсаторной батареи во время сброса нагрузки.

7. В ходе испытаний ГНЭ 100 установлены дополнительные преимущества использования гибридной схемы:

- ток заряда и разряда аккумуляторной батареи отличался плавным нарастанием и спадом по сравнению с ее работой в отсутствие суперконденсаторов, что благоприятно сказывается на системе балансировки аккумуляторных элементов;

- кроме компенсации кратковременных возмущений сети батарея суперконденсаторов позволяет реализовать режим стабилизации обратной последовательности и реактивной составляющей тока нагрузки, в том числе, скомпенсировать гармоники, вносимые в сеть.

Литература.

Научно-техническая и проектная документация по теме «Разработка гибридного накопителя электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов», ОИВТ РАН – Фортов В.Е., Сон Э.Е., Жук А.З., Деньщиков К.К., ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л., ООО «НПО ССК» - Колесников В.А., Ворошилов А.Н., Жораев Т.Ю., ЗАО «НПО «ТЕХНОКОР» - Голиков М.В., Герасимов А.Ф., Сергиенков С.П., ООО «НПП «СПТ» - Барзуков С.Н., Шиганов Д.А., Полников И.Г.