

ПРОБЛЕМЫ И МНЕНИЯ. ПРИГЛАШАЕМ К ДИСКУССИИ

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАКОПИТЕЛЕЙ И СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Р.Н. ШУЛЬГА, к.т.н., начальник отдела

ФГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина» (ФГУП ВЭИ), 111250, г.Москва, ул.Красноказарменная, 12

Аннотация. Выполнен анализ современных накопителей электроэнергии разного типа в виде топливных элементов, суперконденсаторов, молекулярных конденсаторов, аккумуляторов. Для преобразования и передачи электроэнергии от накопителей в нагрузку применяются статические преобразователи, параметры полупроводниковых вентилях которых даны на современном этапе и в перспективе.

Ключевые слова: накопители электроэнергии, топливные элементы, аккумуляторы, суперконденсаторы, молекулярные конденсаторы, статические преобразователи.

Применение постоянного тока ПТ начало расширяться в электроэнергетике с учетом внедрения ФЭС, накопителей электроэнергии НЭЭ [1] в большую (ГАЭС) и малую энергетику, внедрением электродвижения во все виды транспорта. Ранее в литературе были показаны преимущества транспорта ПТ, особенно в магистральных воздушных линиях и кабелях, для связи энергосистем с помощью вставок, которые были реализованы в нашей стране, а в последние годы за рубежом особенно в Китае, Индии и др. Значительное продвижение ПТ в электроэнергетику связано с освоением технологии ядерного синтеза (ЯС) в токамаках (ИТЭР) и предполагаемых генераторах холодного ЯС (в виде технологических установок 80-х годов Вачаева А.Б. [2] и современные генераторы E-CAT, предлагаемые Росси (Италия)).

Проблема повышения энергоэффективности в значительной мере может быть решена широким внедрением НЭЭ, которые развиваются благодаря прогрессу технологий, особенно в области водородной энергетики [3] и топливных элементов (ТЭ)[4], наряду с которыми ниже рассмотрены суперконденсаторы СК, молекулярные конденсаторы С, аккумуляторы АБ.

В настоящее время, по нашему мнению, наиболее перспективным НЭЭ является основанный на применении ТЭ. Существует целый ряд разновидностей ТЭ в основу классификации которых положен тип элек-

тролита (жидкий, газообразный, твердый) с характеристиками, приведенными в табл.1 [5].

Вид электролита определяет тип химической реакции, рабочую температуру, мощность и КПД ТЭ. Наиболее распространенным ТЭ является PEM на основе протообменной мембраны толщиной примерно 0,2 мм, которая заключена между двумя электродами (анодом и катодом), с которых снимаются, соответственно, электроны и ионы, поступающие во внешнюю цепь (в нагрузку). По закону Фарадея электрохимический потенциал $H = 1,48$ В. В ТЭ происходит синтез H и O при температуре 25 °С, которые превращаются в воду H_2O , создавая потенциал $U=1,23$ В. Разница потенциалов между электродами PEM – 0,95-1В (из-за потерь на поляризацию). Конструктивное напряжение на ТЭ составляет 0,75 В (в пределах 0,6-0,8В). Таким образом, средняя эффективность (к.п.д.) ТЭ – $0,75В/1,48В=50\%$.

На сегодня известен НЭЭ на ТЭ мощностью 250 кВт, выдающий энергию в течение 8 часов. указанный ТЭ использует два бака с жидким электролитом емкостью 140 т. Площадь НЭЭ составляет 200 м², рабочая температура 5-40 °С, быстродействие менее 5мс. НЭЭ используется для стабилизации напряжения в энергосистеме 25 кВ при напряжении на выходе ТЭ – 480 В, длительности провала напряжения – 30 минут.

Таблица 1

Характеристики ТЭ

Тип ТЭ (электролит)	Рабочая температура, °С	Мощность на выходе, кВт	К.п.д., %	Особен- ности	Область применения
Алкалин (АFC)	90-100	10-100	60-70 электр.		Военная, космос
Полимерная или протообменная мембрана (PEM)	50-100	<250	50-60 электр.	Быстрый старт	Портативные устройства, транспорт, распред. генерация
Фосфорная кислота (PAFC)	150-200	50-1000 (250-модуль)	80-85 комбин. 36-42 электр.	Пластины больш. размера, чистый водород	Распред. генерация
Литой углерод (MCFC)	600-700	<1000 (250-модуль)	85 комбинир. 60 электр.	Гибкость, разные катализ.	Электроэнергет., большая распред. генерация
Твердые окислы (SOFC)	650-1000	5-3000	85 комбинир. 60 электр.	Гибкость, разные катализ., низкая коррозия	Вспомогательное питание, электро- энергетика, большая распред. генерация

Суперконденсаторы (СК) или ионисторы накапливают энергию в двойном электрическом слое на поверхности высокопористой структуры серии СК имеют емкости от 10 до 12000 Ф рабочим напряжением 1-15 В. Удельная энергия приборов 10кДж/л, удельная мощность – 3 кВА/л.

По типу электролита СК подразделяются на:

- жидкостные;
- твердотельные;
- полимерные (наиболее распространенные);
- на основе биологических объектов.

Запасаемая энергия и мощность СК определяются соответственно формулами $E=CU^2/2$, $W=U^2/4R$, где С - емкость СК, U - напряжение на электродах СК, R - эффективное последовательное сопротивление.

Типичные характеристики СК (например, для модельного ряда GSI компании CAP-XX) имеют значения:

- максимальное и номинальное напряжения - 2,5 и 2,3В;
- максимальный импульсный ток – 30 А;
- рабочие температуры – (-30 °С)+(+75 °С);
- диапазон емкостей 0,47÷48 Ф;
- диапазон емкостей ±20% (при 20 °С);
- размеры корпусов, мм (диаметр, высота) 6,3/11-18/40;
- ESR при 1 кГц, 20 °С – 0,1÷7,0 Ом.

Стоимость MC 2600 составляет 27 долл. при объеме продаж 1 млн. шт. Стоимость 1 Ф равна 1 центу (планируется за 5 лет снизить стоимость в 2 раза).

Сравнительные характеристики источников тока на основе АБ приведены в табл.2.

СК в отличие от ИТ (табл.2) имеют удельную мощность, которая может на 4 порядка превышать значения АБ в виде свинцово-кислотных аккумуляторов.

Характеристики источников тока

Источники тока (ИТ)	Энергетическая мощность, (Вт.час/кг)	Срок службы (число циклов заряд-разряд)
Свинцово-кислотные аккумуляторы	30	300
Никель-кадмиевые	40-60	1500
Никель-металлгидридные	75	500
Ионно-литиевые	100	500
Полимерно-литиевые	175	150

Сравнение удельных показателей различных накопителей НЭЭ приведено на рис.1, где по оси ординат отложены удельная мощность [Вт/кг], а по оси абсцисс – удельная энергия (Вт.ч/кг), причем СК – суперконденсаторы, С – электролитические конденсаторы, АБ – аккумуляторы, ТЭ – топливные элементы.

Из анализа графика рис.1 следует, что СК имеют наибольшую удельную мощность и выполняют цикл заряд-разряд за 5-60 с, АБ – за время единицы-десятки минут, ТЭ – за время единицы-десятки часов.

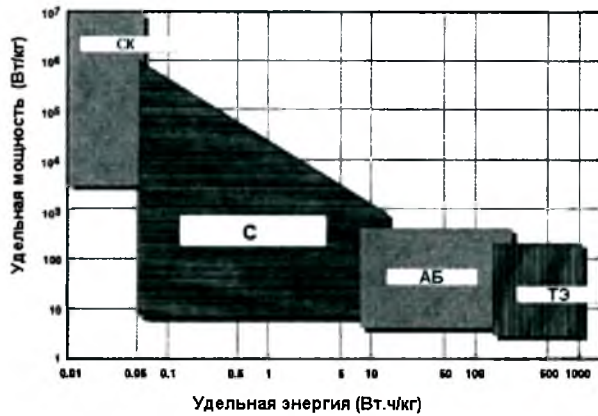


Рис.1. Удельные показатели различных накопителей (НЭЭ).

Потери на постоянном токе носят активный характер и обусловлены резистивными элементами, потери на переменном токе обусловлены сдвигом фаз между током и напряжением из-за наличия паразитных индуктивностей и емкостей, приводящих к потерям реактивной мощности на сетевой частоте. Для электромашин эти потери учитываются значением $\cos\phi$, для ВЛ и КЛ определяются их зарядной мощностью, для ком-

пенсации которой используют средства продольной или поперечной компенсации.

Для переменного тока используют низкую сетевую частоту 50 (60) Гц, так как с ростом частоты потери в оборудовании пропорционально растут, в магнитных системах за счет гистерезиса и вихревых токов, причем последние растут пропорционально квадрату частоты. В диэлектриках (изоляция) потери пропорциональны $\tan\delta$, в проводах ВЛ появляются потери на корону, которые зависят от метеоусловий и др. факторов и пропорциональны квадрату напряжения относительно порогового значения.

Основные потери в электротехническом оборудовании обусловлены нагревом элементов, коронированием при напряжениях, дуговым разрядом и др. явлениями. На переменном токе дополнительно высокий уровень потерь из-за неконтролируемых перетоков реактивной мощности, особенно в системах с кабельными линиями. На постоянном токе указанные потери отсутствуют, но могут появляться потери на низких частотах в области звуковых гармоник, которые должны быть отфильтрованы.

Для оценки потерь и выявления дефектов в электрооборудовании используются различные методы, чему посвящена многочисленная литература, отраженная, например, в [6] для анализа методов и средств измерения температур. Последние могут измеряться как контактными методами с помощью термометров, терморезисторов, сенсоров и др., так и бесконтактными методами (радиометрия, пирометрия и термография), которые относятся к оптоэлектронным мето-

дам, связывающим температуру объекта с длиной волны его излучения.

В [6] для оценки потерь и диагностики оборудования приведены гистограммы различных объектов по температуре, которые позволяют по мощности тепловыделения оценить уровень дефектов по сравнению с эталонным образцом с минимальной температурой.

Для аппаратов ВН с конденсаторной изоляцией используется значение $\text{tg}\delta$, определяющее уровень тепловых потерь из-за ухудшения изоляции.

Для обнаружения частичных разрядов и короны изоляторов и проводов ВЛ, где термографические методы ограничены из-за низкого уровня тепловыделения, используются ИК и УФ методы. Интенсивность УФ излучения примерно пропорциональна пятой степени приложенного послепорогового напряжения и расположена в области мягкого УФ излучения (200-300 нм) и ВИ излучения, давая линейчатый спектр с более чем 66 полосами и наибольшей интенсивностью на длине волны ВИ 337 нм.

Потери и дефекты контактных соединений составляют наибольшую часть повреждений и характеризуются превышением температуры контакта на единицы градусов до 5 °С. При превышении температуры до 35 °С необходим ремонт контакта.

Для силовых трансформаторов определяющим являются потери на нагрев обмоток, а также вихревые и гистерезисные потери в стали.

Для статических преобразователей, являющихся важнейшим элементом передач постоянного тока, частотных приводов, накопителей и др. оборудования определяющими являются потери на нагрев и коммутационные потери.

Анализ характеристик вентиляей указанных преобразователей и потерь в них дается ниже.

Характеристики вентиляей и потери в них.

На рис.2 в соответствии с [7] приведено сравнение приборов СПП и ВВП различных типов по их мощности и полосе частот. Приборы СПП включают тиристоры Т и управляемые светом тиристоры LTT, тиристоры GTO и IGCT, биполярные транзисторы IGBT, маломощные ВЧ транзисторы MOSFET. Там же пунктиром нанесены характеристики приборов ВВП для электроннолучевых вентиляей ЭЛВ 4/40 и ЭЛВ 50/100, выпускаемые ОАО НПП «Контакт» (г.Саратов). Сопоставление характеристик показывает, что приборы ЭЛВ 50/100 приближаются по мощности к приборам IGBT, а по полосе пропускания частот примерно в 40 раз их превосходят.

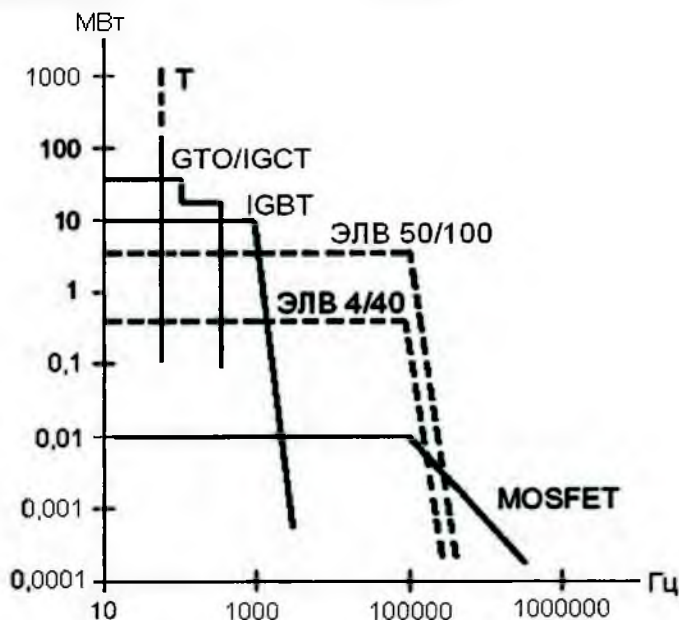


Рис.2. Сравнение приборов СПП и ВВП разных типов.

Таблица 3

Характеристики приборов СПП и ВВП (ЭЛВ)

Тип	Прибор	U _{макс.} кВ	I _{макс.} кА	t _{выкл.} мкс	f _{макс.} Гц	Упрям. В	Тип управ.	Мощн. управ. снабжение	Мощн. прибора Рв, МВт	Упрям. U _{макс} %
СПП	Тиристор Т	9	4	50	50	4	ток	низкая	36	0,05
	Свет. тиристор LTT	7,5	3,5	35	50	4	свет	очень низкая	26	0,05
	GTO	4,5	4	10	500	4,5	ток	очень высокая	18	0,1
	IGCT	4,5	4	5	1000	2,5	напря- жение	низкая	18	0,05
	IGBT	5,2(6,5) ABB	2(3,6) EUPEC	2	1000- 5000	4,5	напря- жение	очень низкая	10,5 (20)	0,1
	MOSFET	1	0,1	0,3	(20- 200)10 ³	0,5-5	напря- жение	очень низкая	0,1	0,05- 0,5
ЭЛВ	4/40	60	0,008	1	200·10 ³	600	напря- жение	очень низкая	0,5	1,0
	50/100	120	0,05	1	200·10 ³	1100	напря- жение	очень низкая	6	1,0

В этой таблице U_{макс}, I_{макс} – соответственно максимальные значения напряжений и токов, t_{выкл} – время выключения, f_{макс} – максимальная частота, Упрям – падение напряжения во включенном состоянии, Рв – мощность прибора. Там же указан тип управления и мощность управления и снабберов.

Технология производства тиристорov Т на шайбе 125 мм позволяет выпускать их на напряжение 9 кВ, ток 4 кА (мощность 36 МВт), частоту 50 Гц. Близкие показатели дают LTT мощностью 26 МВт частотой 50 Гц. Тиристоры GTO и IGCT имеют на порядок более высокую полосу частот (до 0,5-1 кГц) и мощность 18 МВт. Еще большую полосу частот имеют IGBT (до 5 кГц), однако их мощность достигает 10,5 МВт (в перспективе 20 МВт); однако их прямые потери Uпр/Uмакс=0,1% (вдвое выше, чем для IGCT).

Приборы MOSFET применяются для преобразователей на частоты до 200 кГц и имеют сравнительно малую мощность до 0,1 МВт.

Приборы ЭЛВ отличает очень высокое обратное напряжение (до 120 кВ), очень ма-

лый ток (до 50А), высокая полоса частот (до 200 кГц), приемлемая сравнительно с IGBT мощность (до 6 МВт), сравнительно высокие прямые потери Uпр/Uмакс=1%.

В табл.3 приведены характеристики различных типов приборов СПП и ВВП.

Влияние потерь приборов и частоты модуляции на КПД преобразователя.

Влияние длительности коммутации (tw) и уровня номинального тока на полные потери тиристорov при скорости коммутации di_r/dt=50 А/мкс приведено на рис.3 в виде значений потерь энергии Eп [Вт·с] по данным [8]. Рабочая область преобразователя с частотой ШИМ fm=1 кГц обведена кружком и соответствует tw=10³ мкс. При токе i_{тм}=10³А значение Eп=2~3 Вт·с.

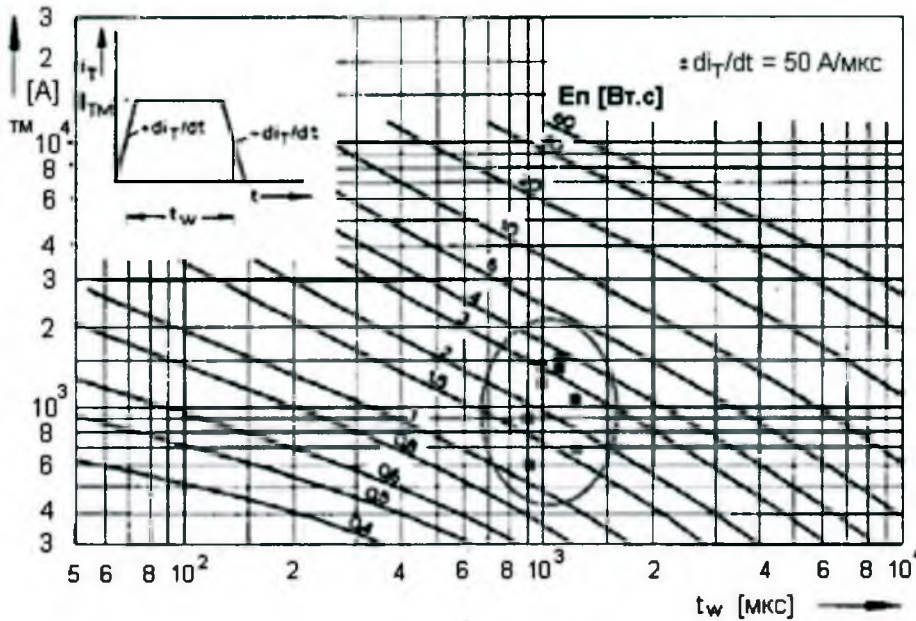


Рис.3. Полные потери тиристоров в цикле коммутации.

Распределение потерь проводимости 1 МВт и коммутационных потерь 2 [МВт] при разной частоте модуляции f_m приведено на диаграмме рис.4 для разных схем: 3 – инвертор напряжения (ИН) на IGBT, 4 – циклоконвертор, 5 – вставка ПТ на двух ИН. Сверху вниз частота модуляции f_m составляет 500 Гц, 450 Гц, 950 Гц, 1950 Гц соответственно (9, 19 и 39 гармоники), т.е. охватывает весь интересующий нас частотный диапазон 500-2000 Гц.

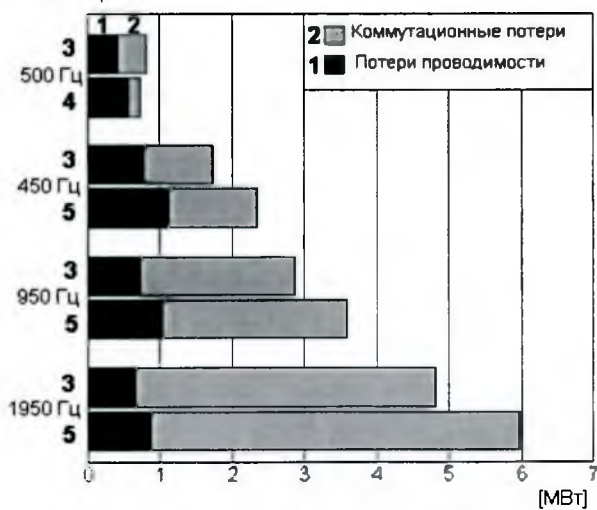


Рис.4. Распределение потерь при разной частоте модуляции.

В табл.4 приведено распределение потерь полных и коммутационных приборов IGBT,

диодов и тиристоров Т 930S в циклоконверторах в зависимости от частоты модуляции $p=9, 19, 39$ [9].

Внизу табл.4 приведена зависимость потерь и КПД преобразователя в зависимости от частоты модуляции p . При частоте $p=39$ КПД составляет 94,6%, а при снижении $p=9$ повышается до 98% (на тиристорах циклоконвертора КПД еще выше и равно 99,2%).

Наиболее мощный НЭЭ построен на Аляске в г.Фербенгск (США) [10] с выдаваемой мощностью 27 МВт в течение 15 мин. (интервал до запуска резервного генератора). При форсировке система может выдавать до 46 МВт за меньший интервал времени.

Система может работать в семи различных режимах:

- компенсации реактивной мощности;
- горячий резерв;
- стабилизатор напряжения энергосистемы;
- автоматическое диспетчерское управление;
- запланированный рост нагрузки;
- автоматическое управление выработкой электроэнергии;
- зарядка.

Основным режимом является регулирование частоты и напряжения, т.е. активной и реактивной мощности.

Распределение полных и коммутационных потерь приборов IGBT, диодов

ИН	Циклоконверторы 500 Гц	ИН (p=39)	ИН (p=19)	ИН (p=9)
Номинал IGBT, ГВт	3.1	10.21	5.69	5.12
Полные потери, МВт	0.825	4.82	2.84	1.75
Полные потери IGBT, МВт	0.307	3.12	1.70	0.888
Коммутац. потери, МВт	0.290	3.00	1.56	0.736
Прямые потери, МВт	0.017	0.123	0.145	0.152
Полные диодные потери, МВт	0.519	1.70	1.14	0.860
Коммутац. потери, МВт	0.116	1.17	0.536	0.239
Прямые потери, МВт	0.403	0.528	0.603	0.621
	Циклоконверторы	B2B (p=39)	B2B (p=19)	B2B (p=9)
Количество тиристоров T930S	1200			
Номинал IGBT, ГВт		14.09	8.37	6.69
Полные потери, МВт	0.727	5.96	3.59	2.35
Полные тиристорные потери, МВт	0.727			
Полные потери IGBT, МВт		4.31	2.55	1.61
Коммутац. потери, МВт	0.164	3.83	1.97	0.928
Прямые потери, МВт	0.563	0.475	0.582	0.684
Полные диодные потери, МВт		1.65	1.04	0.736
Коммутац. потери, МВт		1.25	0.590	0.269
Прямые потери, МВт		0.404	0.451	0.467
Потери и к.п.д.	Циклоконверторы 500 Гц	ИН (p=39)	ИН (p=19)	ИН (p=9)
Полные потери, МВт	1.55	10.78	6.43	4.10
К.п.д., %	99.2	94.6	96.8	98.0

АБ системы BESS состоит из 13760 никель-кадмиевых элементов Saft SBH 920, которые собраны в 4 параллельные секции для обеспечения номинального постоянного напряжения 5 кВ и емкости 3680 А·ч. Элементы объединены в модули по 10 штук для установки в проходных стеллажах. Укомплектованная АБ весит 1300 тонн, размер зала – 120x26 м (примерно футбольное поле). Каждая секция состоит из 3440 последовательно подключенных элементов. Срок

службы АБ 20-25 лет, элементы могут выдавать 80% запасенной энергии в течение 20 мин.

Многофункциональная система контроля аккумуляторов измеряет, регистрирует и сообщает на информацию:

- напряжение модуля;
- ток секции;
- уровень электролита в элементе (элемент в каждом модуле);
- внутреннюю температуру элемента.

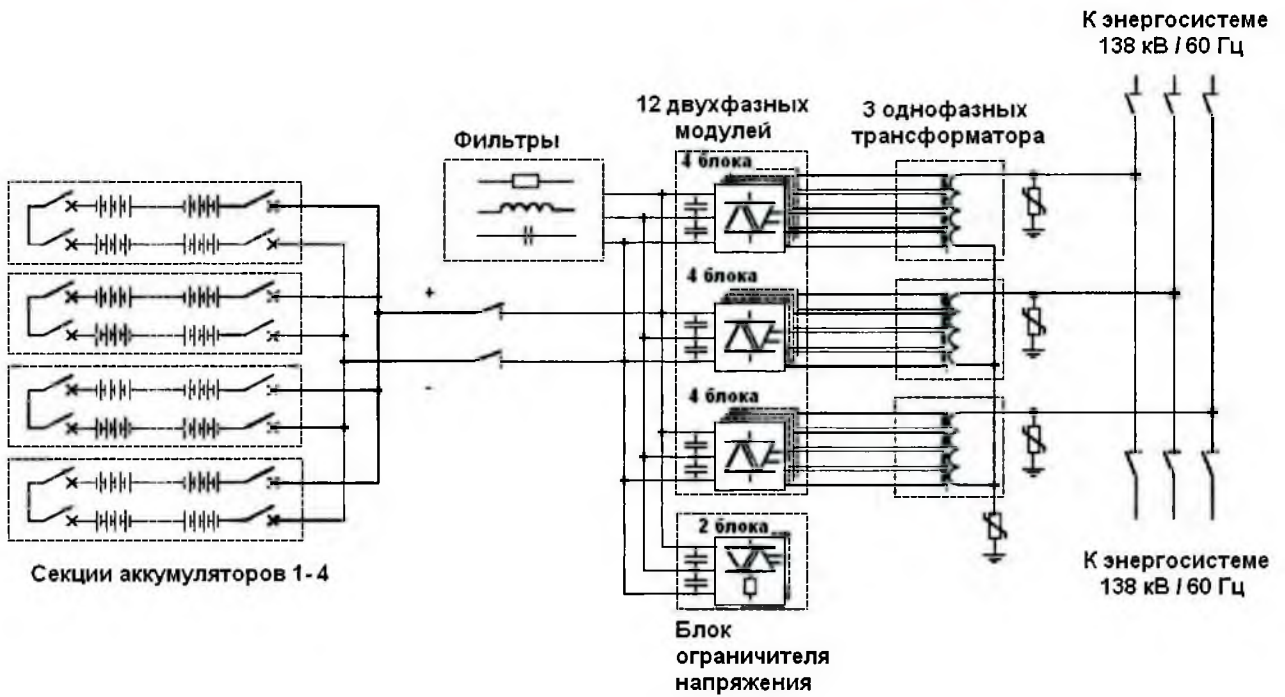


Рис.5. Упрощенная принципиальная схема АБ.

Сбор и передача информации организованы по иерархической схеме: от рядового блока на модуль среднего уровня, а от него на диспетчерский компьютер.

Упрощенная принципиальная схема АБ BESS приведена на рис.5.

Она содержит 4 секции АБ с возможностью расширения до 8 секций. Каждая секция может быть отключена от остальной системы с помощью выключателей постоянного тока. Кроме того, 2 разъединителя позволяют изолировать отключаемую секцию для технического обслуживания аккумуляторов. Фильтрующие элементы на шинах постоянного тока устраняют риск возникновения резонанса на ВЧ (при наличии нелинейной нагрузки). Преобразователь напряжения разработки АBB содержит 4 параллельных блока с общим числом двухфазных модулей 12. Один двухфазный модуль соответствует однофазному полумосту. На каждую фазу устанавливаются 4 полумоста (всего 12 мостов). Компонентный блок представляет два плеча трехуровневых инвертора, выполненных по NPC-схеме с фиксированной нейтралью на полностью управляемых вентилях IGBT, охлаждаемых

водой. Каждый мост соединен со своей выделенной обмоткой трансформатора, причем вывод от моста подается на среднюю часть обмотки трансформатора для улучшения формы выходного напряжения. Ограничители напряжения предотвращают броски напряжения, вызванные резким снижением нагрузки или КЗ на стороне энергосистемы. Преобразователь и трансформаторы рассчитаны на полную мощность АБ при расширении числа секций АБ до 8.

Выводы.

1. Накопление электроэнергии НЭЭ возможно лишь применением постоянного тока на основе топливных элементов ТЭ, суперконденсаторов СК, молекулярных конденсаторов С и аккумуляторов АБ.

2. Приведены характеристики указанных элементов и показаны преимущества ТЭ на твердых окислах в части длительности разряда, никель-кадмиевых АБ в части срока службы, а полимерно-литиевых в части удельной мощности.

3. Анализ потерь показывает преимущества в части потерь и повышения КПД при применении постоянного тока за счет исключения потерь реактивной мощности,

вихревых, гистерезисных, диэлектрических потерь, потерь на корону и частичные разряды.

4. Для преобразования и передачи электроэнергии от НЭЭ в нагрузку, а также в устройствах гибких электропередач применяются статические преобразователи на основе силовых полупроводниковых и вакуумных приборов, характеристики которых приведены в таблицах и графиках.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1989.

2. Вачаев А.В., Иванов Н.И. Энергетика и технология структурных переходов: Учебное пособие. - Магнитогорск: МГМА, 1994.

3. The VRB Energy Storage System. URL: <http://www.vrbpower.com> (Дата обращения: 27.04.2015).

4. Introduction to NAS Batteries. NGK Insulators Ltd, 2006.

5. Андреев В.М., Забродский А. Г., Кошовицкий С.О. Интегрированная солнечно-ветровая установка с накопителем энергии на основе водородного цикла // Альтернативная энергия и экология (АЭЭ). 2007. №2(46). С.99-105.

6. Завидей В.И. Оптоэлектронные методы неразрушающего контроля и технической диагностики (тепловой контроль): Учебное пособие. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.

7. Шульга Р.Н., Змиева К.А. Коммутационное и преобразовательное оборудование для цифровых подстанций // ЭЛЕКТРО. 2013. №2.

8. CIGRE WGB, Static Synchronous Series Compensator (SSSC), 2008.

9. Meier S., Noriga S., Nec H.-P. New Voltage Converter of Offshore Wind Farms. - NORPIE, 2004.

10. Девриес Т., Макдональд Д., Ульбрихт Н., Линхофер Г. Холодный запас // АBB Ревю. 01.2004. С.38-48.

CHARACTERISTICS ELECTRIC POWER STORES AND STATIC CONVERTERS

R.N. ShUL'GA, Ph.D. (Tech.)

Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Electrotechnical Institute named after V.I.Lenin" (FGUP VEI), 12, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia

Abstract. The analysis of modern electric power stores of different types in the form of fuel cells, supercapacitors, molecular capacitors, batteries. For conversion and transmission of electric power from electric power stores to load uses static converters. Parameters of semiconductor gates are given at the present stage and in the long term are used to transformation and transfer of the electric power from stores in loading.

Key words: electric power stores, fuel elements, accumulators, supercondensers, molecular condensers, static converters.

REFERENCES.

1. Astakhov Yu.N., Venikov V.A., Ter-Gazaryan A.G. Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemakh. - Moscow, Vysshaya shkola, 1989.

2. Vachaev A.V., Ivanov N.I. Energetika i tekhnologiya strukturnykh perekhodov: Uchebnoe posobie. - Magnitogorsk, MGMA, 1994.

3. The VRB Energy Storage System. URL: <http://www.vrbpower.com> (Data obrashcheniya: 27.04.2015).

4. Introduction to NAS Batteries. NGK Insulators Ltd, 2006.

5. Andreev V.M., Zabrodskii A. G., Koshovitskii S.O. Integrirovannaya solnechno-vetrovaya ustanovka s nakopitelem energii na osnove vodorodnogo tsikla // A'l'ternativnaya energiya i ekologiya (AEE), 2007, No.2(46), P.99-105.

6. Zavidei V.I. Optoelektronnye metody nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoi diagnostiki (teplovoi kontrol'): Uchebnoe posobie. - Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2011.

7. Shul'ga R.N., Zmиеva K.A. Kommutatsionnoe i preobrazovatel'noe oborudovanie dlya tsifrovyykh podstantsii // ELEKTRO, 2013, No.2.

8. CIGRE WGB, Static Synchronous Series Compensator (SSSC), 2008.

9. Meier S., Noriga S., Nec H.-P. New Voltage Converter of Offshore Wind Farms. - NORPIE, 2004.

10. Devries T., Makdonal'd D., Ul'brikht N., Linkhofer G. Kholodnyi zapas // AVV Revyu, 01.2004, P.38-48.