

Рекуперация электроэнергии в технических системах метрополитена

В статье рассматриваются технические решения по повышению энергетической эффективности тягового оборудования метрополитена за счёт использования электроэнергии, рекуперированной подвижным составом.

В настоящее время отмечается растущее внимание специалистов и городских властей к вопросам повышения энергоэффективности городского транспорта и, прежде всего, такого энергоёмкого как метрополитен. Причин тому несколько:

- необходимость снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при производстве электроэнергии, тем самым, внося вклад в улучшение экологической ситуации в мире;
- стремление максимально полно использовать энергетические ресурсы планеты,
- стремление снизить себестоимость эксплуатации городского рельсового транспорта.

В связи с этим всё более актуальным становится вопрос рационального (более полного) использования кинетической энергии, которая высвобождается при торможении поездов. В данной статье анализируются несколько вариантов максимального использования энергии торможения

The article discusses the technical solutions for improving the energy efficiency of the traction systems of the subway through the use of electricity got from the rolling stock braking.

Three types of use of braking energy of trains are analyzed: dissipation by the resistors, the inverting network and accumulation. As a result, the choice of a particular method of using the braking energy is to be determined by the technical aspects, electromagnetic compatibility requirements and aggregate material costs on the equipment of the whole substation.

поездов метро путём дополнительной установки на тяговых подстанциях инверторов-рекуператоров или накопителей электрической энергии.

В большинстве случаев основная часть кинетической энергии, запасённой в движущихся массах поезда, при торможении поезда превращается в электрическую энергию, часть которой используется бортовыми потребителями самого поезда. Избыток энергии торможения, как правило, рассеивается на балластных сопротивлениях, но может возвращаться в сеть среднего напряжения, либо запасаться в специальных накопителях (суперконденсаторах или литий-полимерных аккумуляторах), если на подстанции установить соответствующее оборудование. В этом случае только в нештатных режимах часть энергии торможения будет рассеиваться на тормозных резисторах в виде тепла.

Рассмотрим последовательно особенности всех трёх видов использования тормозной энергии поезда: рассеивание на резисторах, инвертирование в сеть и накопление.

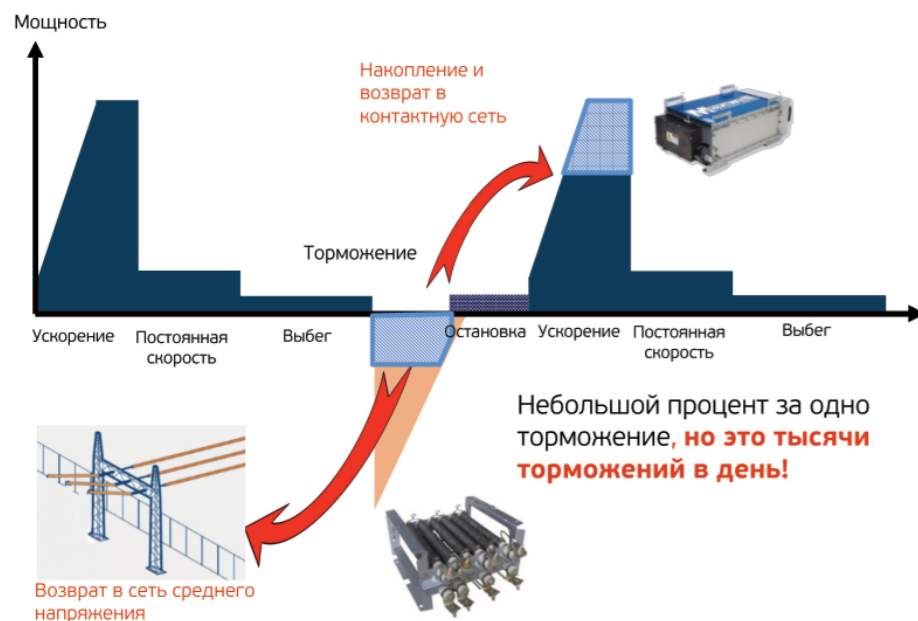
1. Тормозные резисторы, установленные на подвижном составе;
2. Инверторы, которые бывают тиристорные и транзисторные;
3. Накопители, выполненные на суперконденсаторах и аккумуляторах.

1. Рассеивание энергии торможения на резисторах не является способом вторичного использования энергии. Данный способ повсеместно используется в большинстве метрополитенов из-за отсутствия устройств, позволяющих вторично использовать избыточную энергию торможения поездов. Этот способ крайне неэкономичный, связанный с подключением к контактной сети дополнительных резисторов. При внедрении инверторов-рекуператоров или иных систем вторичного использования избыточной энергии торможения поездов, он должен остаться как аварийный для защиты от перенапряжений в контактной сети и при отказе систем рационального использования избыточной энергии торможения.

2. Передача энергии торможения из контактной сети постоянного тока в сеть переменного тока, как правило, сеть среднего напряжения.

Использование инвертируемой энергии торможения через сеть среднего напряжения либо собственными потребителями метрополитена, либо иными потребителями, подключёнными к этой сети.

Рисунок 1. Принципы рекуперации энергии торможения



3. В случае если возврат энергии в сеть среднего напряжения по каким-либо причинам невозможен (запрет на отдачу электроэнергии в сеть, жёсткие рамки по качеству электроэнергии) или недостаточна пиковая мощность подстанции, существует иной способ использования энергии торможения поезда.

Инверторные агрегаты или рекуператоры – далее «Инверторы»

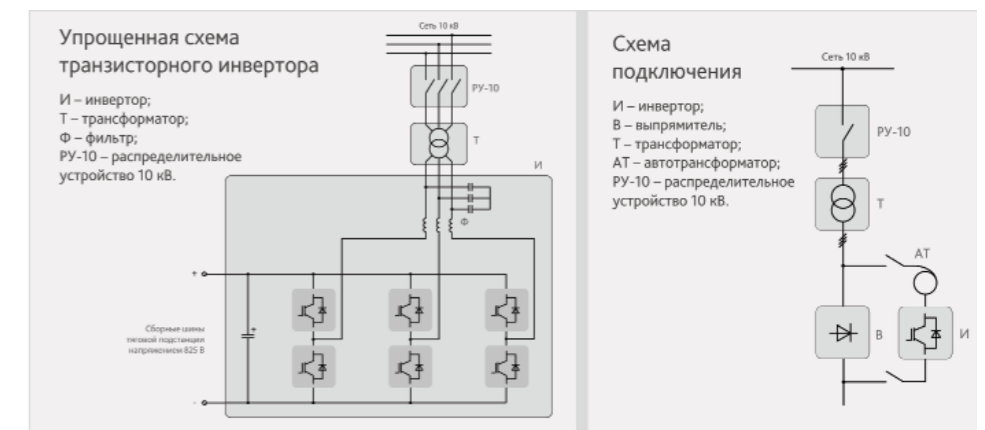
В большинстве случаев существующие подстанции не могут обеспечить возврат энергии торможения в сеть ввиду односторонней направленности их выпрямительных агрегатов. С установкой инверторов при возникновении излишка энергии при торможении поезда осуществляется автоматический её возврат в сеть среднего напряжения, где она используется другим потребителям.

Известны тиристорные варианты инверторов, выпускаемые ESTEL, Siemens, ABB, ЧАО «Плутон» и другими фирмами. Такие инверторы представляют собой инверторы, ведомые сетью (с естественной коммутацией или зависимые).

Такой инвертор, а также способы его включения, упрощённо показаны на рисунке 2.

Инвертор И подключается к существующим выпрямительным агрегатам через реактор в звене пос-

Рисунок 3. Упрощённая схема транзисторного инвертора и схема подключения



тоянного тока. Для подключения к сети должен использоваться либо отдельный трансформатор Т2, напряжение на вентильной обмотке которого выше, чем у трансформатора выпрямителя Т1, либо через автотрансформатор АТ (этот вариант показан пунктиром, так как менее предпочтителен из-за дополнительной токовой загрузки трансформатора выпрямителя, но менее затратный в реализации). Такой вариант значительно выгоднее там, где тяговый трансформатор работает с некоторым запасом по длительной нагрузке.

Тиристорные инверторы зарекомендовали себя с хорошей стороны. Их достоинства [2]: относительная простота схемы, хорошая устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям, хороший КПД и доступность элементной базы, что благоприятно сказывается на их цене и сроках окупаемости.

Однако им присущи некоторые недостатки [2]: пониженный коэффициент мощности, возможность «опрокидывания» инвертора, вследствие чего возникает необходимость установки реакторов и быстродействующих автоматических выключателей на стороне постоянного напряжения, а в отдельных случаях при наличии высоких требований по электромагнитной совместимости с питающей сетью – необходимость применения сетевых фильтров.

Второй вариант инверторов – это транзисторные инверторы на базе IGBT-модулей. На рисунке 3 показана упрощённая схема транзисторного инвертора и схема подключения. Инвертор включается между контактной сетью и вторичной обмоткой транс-

форматора, через корректирующий автотрансформатор, параллельно с выпрямителем или через отдельный трансформатор на сеть 10 кВ.

Транзисторные инверторы имеют свои преимущества и недостатки.

Инвертор на IGBT-модулях обладает хорошей электромагнитной совместимостью с сетью среднего напряжения и исключает сквозные прорывы инвертора, что в свою очередь не требует установки быстродействующего автоматического выключателя со стороны постоянного напряжения. Кроме этого, он позволяет не устанавливать дополнительные сетевые фильтры при самых высоких требованиях к электромагнитной совместимости.

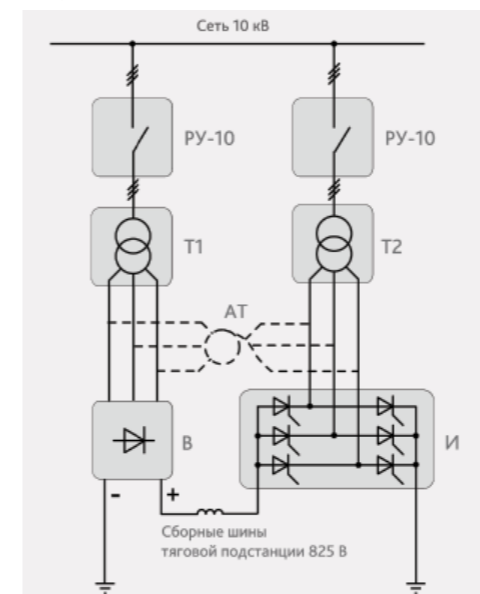
Недостатками инверторов на IGBT – модулях является: низкий по сравнению с тиристорными инверторами КПД, они более сложные в изготовлении и эксплуатации и, что самое главное, они значительно дороже, соответственно, у них больший, чем у тиристорных инверторов, срок окупаемости.

На рисунках 4 и 5 показаны осциллограммы выходного тока диодного 6-пульсного выпрямителя и транзисторного (на IGBT – модулях) инверторов, а также разложение этих токов в ряд Фурье.

На рис. 5, по сравнению с рис. 4, хорошо заметно общее снижение гармонических составляющих тока, их амплитуды, а также перенос их в высокочастотную область, что позволяет легко их отфильтровать (при необходимости) фильтром с небольшим габаритом.

Даже без установки фильтра, коэффициент гармоник для транзисторных инверторов не превышает 3.6%,

Рисунок 2. Тиристорный инвертор



И – инвертор; В – выпрямитель; Т1, Т2 – трансформаторы; АТ – автотрансформатор; РУ-10 – распределительное устройство 10 кВ.

Осциллограммы выходного тока и разложение в ряд Фурье

Рисунок 4

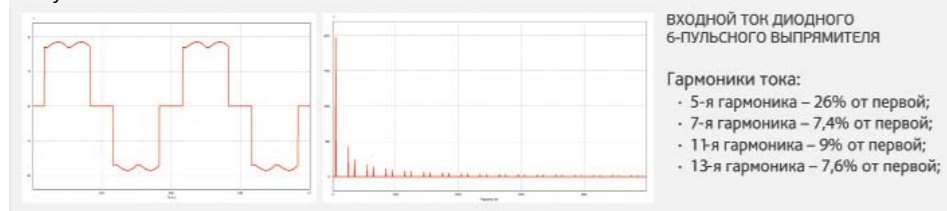
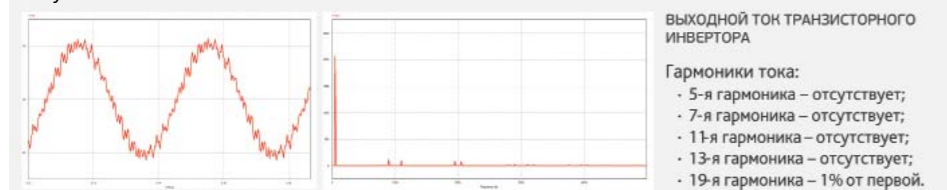


Рисунок 5



что находится в пределах требований любого международного стандарта. При этом при частоте коммутации 1000 Гц, первая высшая гармоника тока оказывается 19-я с долей порядка 1%, что также удовлетворяет требованиям любого стандарта.

Наиболее простой 6-пульсный тиристорный ведомый сетью инвертор имеет гармонический состав сетевого тока несколько хуже, чем 6-пульсный диодный выпрямитель. Следовательно, нет гарантии, что для его использования в качестве рекуператора будет обеспечено нормальное функционирование всех потребителей сети среднего напряжения и не потребуются установка дополнительных сетевых фильтров.

На рис. 5 видно, что основными составляющими высших гармоник тока 6-пульсного тиристорного инвертора являются 5-я и 7-я гармоники. 11-я и 13-я гармоники так же достаточно велики. Устранить или значительно уменьшить долю этих гармоник позволяет 12-пульсная схема рекуперации.

Такая схема включения имеет неоспоримое преимущество перед традиционной 6-пульсной схемой инвертирования в части гармонического состава инвертируемого тока и напряжения. По сравнению с 6-типульсной схемой отсутствуют 5 и 7 гармоники. Известно, что наличие сетевого трансформатора дополнительно улучшает (за счёт процессов коммутации) спектр тока, потребляемого из сети. Содержание 11-й и 13-й гармоник уменьшается не менее чем на 2%.

Коэффициент гармоник при этом не превышает 4%, а усреднённый составляет 3.6%. Следовательно, нелинейные искажения инвертируемого тока не превышают допустимых значений для сетей среднего напряжения согласно международному стандарту IEEE STD 519-1992 HARMONIC LIMITS. Они также не превышают искажений, с которыми работают 6-пульсные диодные выпрямители, а значит, нет необходимости применять дополнительные сетевые фильтры – вполне достаточно существующих для 6-типульсных выпрямителей, если они установлены.

Именно такие тиристорные инверторы-рекуператоры по 12-пульсной схеме рекуперации (в дальнейшем «И-ПТЕ-12») изготавливает и поставляет метрополитенам ЧАО «Плутон».

При разработке и изготовлении рекуператоров серии И-ПТЕ-12 были применены самые современные технологии, материалы и комплектующие ведущих мировых производителей. Они построены на силовых таблеточных тиристорах с током 2760 А, 28-го класса, производства компаний Dupex. Охлаждение И-ПТЕ-12 как правило, естественное, но при необходимости минимизировать габариты может применяться и воздушное принудительное. В И-ПТЕ-12 реализована защита силовых полупроводниковых приборов от внутренних и внешних коммутационных перенапряжений. RC-цепи обеспечивают защиту от внутренних коммутационных перенапряжений, от внешних перенапряжений защита организована комбинированно: RC-

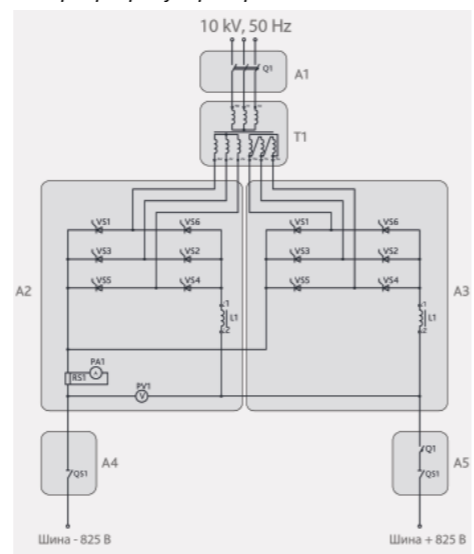
цепями и варисторами (панель защиты от перенапряжений).

Упрощённая схема силовой части инвертора-рекуператора И-ПТЕ-12 приведена на рисунке 6.

В настоящее время между фирмами ЧАО «Плутон» и АBB осуществляется сотрудничество, связанное с предложением транзисторных инверторов серии ENVELINE® мощностью 500 кВт для рекуперации энергии торможения поездов метрополитена. Такой инвертор представлен на рисунке 7.

Базовая система легко может быть выполнена на мощность 1 МВт путём установки двух секций. Инвертор, установленный на тяговой подстанции, способен вернуть в питающую сеть до 85% энергии, отдаваемой при торможении. При этом общая экономия энергии, потребляемой тяговым оборудованием, в зависимости от рельефа местности, составляет до 30%.

Рисунок 6. Упрощённая схема силовой части инвертора-рекуператора И-ПТЕ-12



A1 – распределительное устройство 10 кВ;
T1 – трансформатор преобразовательный;
A2 – секция 1 инвертора;
A3 – секция 2 инвертора;
A4 – разъединитель ОШ;
A5 – Шкаф БВ.

При увеличении расстояния до рекуператора, эффективность снижается. Очевидно, что первая установка рекуператоров должна производиться не на конечных станциях, чтобы обеспечить наполняемость поезда пассажирами (масса поезда) и охватывать оба направления движения.

Рисунок 7. Инвертор ENVELINE® производства АBB



Характеристики:

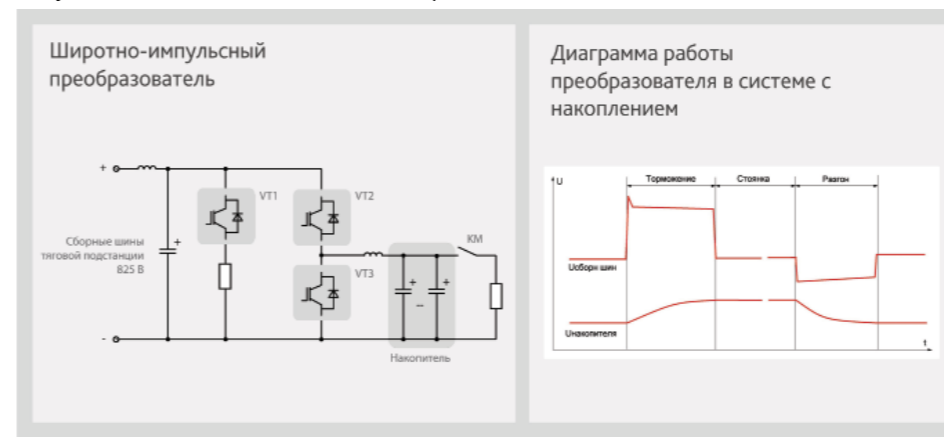
- базовая система 500 кВт;
- Инвертор И + Шкаф управления ШУ;
- степень защиты: IP21;
- габариты: 2.0 x 2.2 x 1.0 [м] (WxHxD);
- масса: 2100 кг;
- охлаждение: принудительное воздушное.

Кроме этого, инвертор обеспечивает уменьшение перенапряжений, возникающих в контактной сети при торможении тяговым двигателем, и затраты на вентиляцию, так как значительно меньше энергии рассеивается на тормозных резисторах.

Сам инвертор является статическим преобразовательным устройством, которое не имеет быстроизнашивающихся элементов, почти не требует обслуживания. Затраты на его содержание практически нулевые, а срок службы не менее 25 лет. Как правило, такие устройства заменяют не по причине технического износа, а по причине устаревших технических решений, на которых они созданы.

Принцип действия инвертора. При торможении избыточная энергия запасается в специальных накопи-

Рисунок 8. Системы с накопителями энергии



телях. Это могут быть ионисторы (суперконденсаторы, обладающие большой удельной ёмкостью) или батареи литий-полимерных аккумуляторов. При последующем разгоне энергия потребляется как от выпрямителя, так и от накопителя

Заряд и разряд накопителей осуществляется с помощью специального широтно-импульсного преобразователя. Работу этого преобразователя удобно рассмотреть с помощью диаграммы (рисунок 8).

Допустим, что в исходном состоянии на накопителе остаточное напряжение, а поезд движется с постоянной скоростью. После начала торможения напряжение в контактной сети и на сборных шинах подстанции повышается. В преобразователе включается транзистор VT2. С помощью ШИМ устанавливается необходимый ток заряда накопителя, при этом напряжение на нём начинает увеличиваться. Преобразователь работает в режиме понижения напряжения (чоппер).

После стоянки поезд разгоняется. При этом напряжение в контактной сети и на сборных шинах подстанции просаживается. Преобразователь переводится в режим повышения (бустер). При этом работает транзистор VT3. Энергия, запасённая в накопителе, возвращается в контактную сеть, а напряжение на нём уменьшается, при этом осуществляется стабилизация напряжения в контактной сети и на сборных шинах подстанции.

Может сложиться неблагоприятная ситуация, когда одновременно начинают торможение два поезда с не полностью разряженным накопителем. На этот случай установлен

дополнительный транзистор VT1, который позволяет после полной зарядки накопителя сбросить излишки энергии на резистор.

Для контрольной разрядки накопителя (например, с целью проверки его ёмкости или при выводе из работы) есть разрядное сопротивление, подключаемое через контактор КМ.

Суперконденсаторы имеют следующие преимущества [7]: обладают большой ёмкостью (десятки фарад), имеют малые времена заряда-разряда, заряд легко контролируется по напряжению суперконденсатора, у них наибольший срок службы среди накопителей.

Рисунок 9. Суперконденсаторы Maxwell



Недостатком суперконденсаторов являются низкие рабочие напряжения (в результате их требуется соединять последовательно и применять схемы выравнивания заряда).

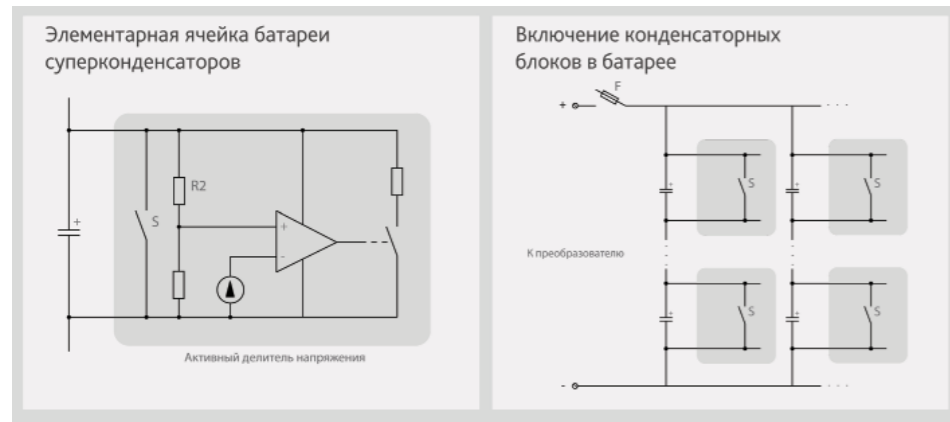
Существуют специальные типы суперконденсаторов фирмы Maxwell для применения в тяговых сетях (Рис. 9).

Их особенности:

- 1) Достаточно высокое по сравнению с другими типами суперконденсаторов значение рабочего напряжения (125В);
- 2) Большие рабочие токи (240 А) и токи короткого замыкания (6900 А);
- 3) Большое количество циклов заряд-разряд (больше 1 000 000);
- 4) Встроенные системы выравнивания напряжения, диагностики и мониторинга;
- 5) Простое включение блоков параллельно и последовательно.
- 6) Высокая циклоустойкость: длительность полного цикла (заряд от 0,1 до 1,0 Ун и разряд от 1,0 до 0,1 Ун) допускается производить один раз в 15 секунд.

Блок на 125 В состоит из 50 элементарных ячеек на 2,5 В с индиви-

Рисунок 10. Суперконденсаторы Maxwell



дуальными выравнивающими цепочками. Это позволяет активно делить напряжение на конденсаторах, не смотря на разброс их ёмкостей.

Схематически выравнивающая цепочка изображена на рисунке 10.

Ядром такого устройства является компаратор с низким потреблением. Напряжение опорного источника сравнивается с напряжением высокоомного делителя. Если напряжение больше установленного уровня, то компаратор включает ключ, который зашунтирует конденсатор, выравнивая тем самым напряжение на нём.

Рисунок 11. Пример накопителя



В случае внутреннего короткого замыкания в конденсаторе, он выводится из работы замыканием ключа S. При этом заряд перераспределяется на последовательно соединённые с ним конденсаторы. Количество последовательно включённых конденсаторов должно выбираться из условия 10-процентного резерва. Для того, чтобы получить требуемую ёмкость, последовательно соединённые блоки включают и параллельно.

Примерное включение конденсаторных блоков в батарею накопителя показано на рисунке 11.

Расчёты показывают, что для создания накопителя с пиковой мощностью 1 МВт при времени разгона-торможения 10 секунд, требуется ёмкость не меньше 28 Ф. При использовании блоков по 63Ф x 125В, потребуется 4 батареи по 8 последовательно соединённых блоков, то есть 32 блока. Для их размещения необходимо 4 шкафа с габаритами 600x1000x2500, при этом общий габарит только накопительных ёмкостей составит 600x4000x2500 мм. К ним ещё необходимы преобразователи и коммутационная аппаратура на уровне инвертора.

Литий-полимерные аккумуляторы являются наиболее пригодными из всех типов аккумуляторов для данного применения [8]. Это обусловлено их высокой плотностью заряда, быстротой перезарядки, отсутствием необходимости обслуживания, эффекта «памяти» и выделения вредных веществ во время эксплуатации. По сравнению с ионисторами они не требуют схем выравнивания заряда при последовательном соединении, однако медленнее перезаряжаются. Недостаток: отсутствует выраженная зависимость их напряжения от степени заряда, меньший срок службы.

Рисунок 12. Расчёт окупаемости систем вторичного использования энергии торможения



В г. Осака (Япония) в тестовую эксплуатацию введена система накопителей на базе никель-гидридных аккумуляторов БЕЗ преобразователя заряда. Информации по данным устройствам мало. Приведём информацию рекламного характера с сайта производителя – компании «Кавасаки».

Достоинства:

- высокая мощность,
- экологическая безопасность,
- отсутствие необходимости обслуживания,
- быстрый цикл заряда/разряда,
- возможность снижения уровня пиковой нагрузки в часы пик,
- возможность предотвращения падения напряжения в сети.

Недостатки:

- большая масса (масса батареи на 36 В – 248 кг. Для создания напряжения в 900 В потребуется 25 батарей общей массой 6200 кг, соединённых последовательно),
- наличие «эффекта памяти», то есть существенное снижение ёмкости батареи при неполном цикле заряд/разряд,
- при отсутствии преобразователя – невозможность контроля тока заряда батареи. Таким образом, есть вероятность, что скачок напряжения в контактной сети может вызвать повреждение батареи.

Выбор между способом накопления энергии должен осуществляться исходя из конкретных условий применения.

Мы видим, что система с накоплением является полностью отделённой от питающей сети и позволяет при этом сохранить до 75% энергии торможения. Ещё одним достоинством является возможность уменьшения пиковых нагрузок. Однако, в

виду того, что оборудование существующих подстанций уже рассчитано на эти пики, экономический эффект от системы с накоплением будет лишь в экономии электроэнергии.

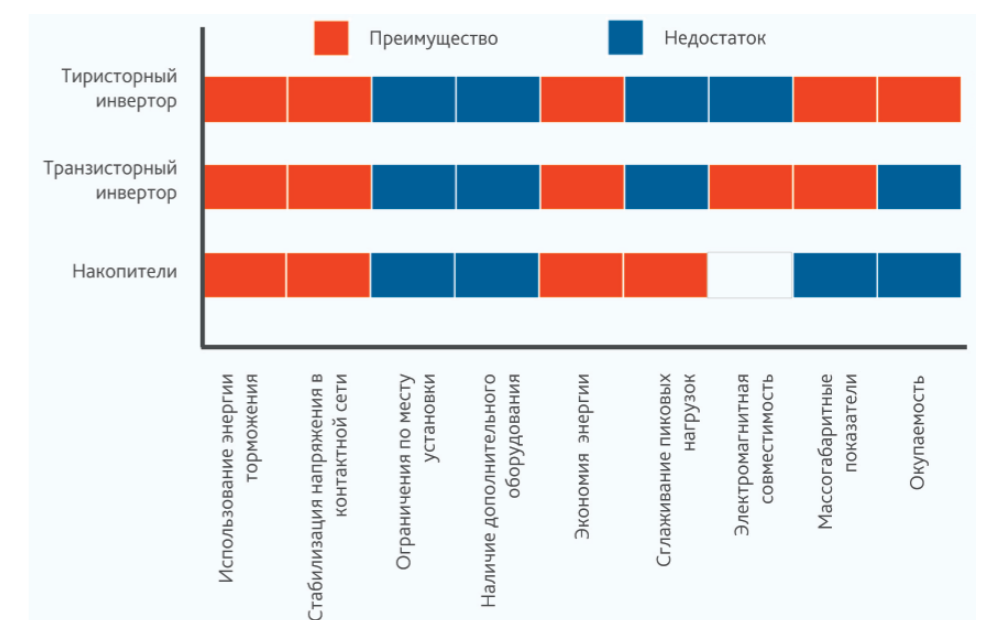
Общий недостаток накопительных систем: значительно большие, чем у инверторов, габариты, масса, стоимость и значительно меньший срок службы самих накопителей. На современном этапе затраты на их установку не окупаются.

На рисунке 12 представлен примерный расчёт срока окупаемости различных систем использования тормозной энергии для Киевского метрополитена по станции «Берестейская».

Как можно заметить из диаграммы, наилучшие показатели у тиристорного 12-пульсного рекуператора. Транзисторный инвертор со сроком окупаемости 5.7 лет также является экономически оправданным, а, учитывая его потенциал, предпочтительным для опытной эксплуатации. Срок 11.4 года для систем с накоплением является условным, т.к. срок службы суперконденсаторов заявлен производителем на уровне 1.5 миллиона циклов заряд-разряд. Согласно статистике на станции «Берестейская» и соседних с ней станциях за год происходит до 750 тысяч торможений поездов, то есть через 2 года отдельные конденсаторы могут выйти из строя. И, хотя конденсаторы работают в режиме частичного цикла и срок их жизни трудно спрогнозировать, представляется очевидным, что при нынешнем уровне прогресса технически невозможно обеспечить работу конденсаторов все 11 лет.

По метрополитенам Киева и Москвы расчёты срока окупаемости инвертора проводила компания АВВ. Для Алматинского метрополитена такие расчёты были выполнены в экспериментальном ПО ЧАО «Плутон». Опытная эксплуатация инвертора в метрополитене города Алматы призвана, помимо всего прочего, подтвердить и уточнить расчётные соотношения, заложенные в разработанный программный комплекс, и внести необходимые корректировки. После этого данное ПО позволит достаточно точно прогнозировать эффективность установки инвертора на той или иной станции.

Рисунок 13. Сравнение систем вторичного использования энергии торможения



На рис. 13 представлена диаграмма сравнения систем вторичного использования энергии торможения поездов.

Обобщая результаты, можно отметить:

На существующих подстанциях, уже рассчитанных на работу с пиковыми токами, применение систем с накоплением будет неоправданным ввиду высокой стоимости дополнительного оборудования. В этом случае наиболее целесообразным является установка рекуператоров на базе транзисторных или 12-пульсных тиристорных инверторов.

Наиболее перспективными и функциональными являются транзисторные инверторы, но и стоимость у них выше, чем у тиристорных. Тем не менее, при правильном использовании, они окупаются в течение 8–10 лет. При этом тиристорные 12-пульсные инверторы, почти не уступающие по качеству сети транзисторным инверторам, имеют срок окупаемости в 2–3 раза меньше. Заказчик в каждом конкретном случае вправе сам решать, на каком варианте рекуператора ему остановиться.

От редакции:

Тема, поднятая в данной статье, является весьма актуальной в свете дальнейшего развития прогрессивных технологий в метрополитенах. Предлагаем продолжить дискуссию по данной теме с привлечением компаний-изготовителей и разработчиков аналогичного оборудования и приглашаем направлять в редакцию соответствующие материалы для публикации.

На вновь строящихся подстанциях возможно снизить капитальные затраты на выпрямительные агрегаты, так как при возникновении пиковых нагрузок примерно половина мощности может быть отобрана от накопителя. Также установка систем с накоплением оправдана в тех случаях, когда запрещена отдача энергии в сеть среднего напряжения.

Следует отметить, что система с накоплением энергии является наиболее затратной.

Выбор конкретного способа использования энергии торможения должен определяться по техническим аспектам, требованиям электромагнитной совместимости и совокупности материальных затрат на оборудование всей подстанции (строящейся или модернизируемой).

Генеральный директор ЧАО «Плутон»

Д.Е. Овсяникер

Главный инженер ЧАО «Плутон»

А.В. Мищенко

Генеральный директор АО «Электротехническая компания «Плутон»

А.С. Савостьянов

E-mail: sas@etc-pluton.ru