

Распределенная система оценки остаточного заряда модульного многоуровневого накопителя энергии

В. С. Лавриновский

Санкт-Петербургский
государственный

электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Linwega.g@gmail.com

Н. А. Доброскок

Санкт-Петербургский
государственный

электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Nadobroskok@etu

Е. С. Трусова

Санкт-Петербургский
государственный

электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. С развитием концепций построения распределенных электроэнергетических систем и интернета энергии, сетевые накопители энергии стали неотъемлемой частью энергетической инфраструктуры. Модульные многоуровневые схемы построения таких накопителей являются технологией, позволяющей повысить безопасность построения накопителей, увеличить эффективность использования аккумуляторных батарей и упростить их разработку и изготовление. Однако, для функционирования модульного многоуровневого накопителя необходимы сложные системы управления и измерения, обрабатывающие сотни сигналов. Централизованные системы измерения физически не способны обеспечить оценку состояния модульного накопителя, и возникает необходимость создавать распределенную систему измерения.

Ключевые слова: *накопитель энергии, модульный многоуровневый накопитель, распределенная измерительная система*

I. ВВЕДЕНИЕ

В современных электроэнергетических сетях и при работе в концепции интернета энергий сетевой энергетический накопитель становится необходимым элементом сети. Однако, распространенные сейчас накопители с высоковольтным аккумулятором имеют ряд недостатков.

Во-первых, аккумуляторные батареи даже в разряженном виде имеют на обкладках напряжение, сопоставимое с номинальным, что делает работу с ними опасной, когда суммарное напряжение превышает 24 В. Использование низковольтной батареи и повышающего трансформатора делает работу с накопителем более безопасной, но снижает КПД и в разы повышает габариты.

Во-вторых, при последовательном соединении ячеек, емкость сборки будет ограничиваться минимальной емкостью ячейки в сборке [1]. При создании новой батареи из подобранных по своим параметрам новых ячеек это не является проблемой, но существенно ограничивает возможности повторного использования ячеек, бывших в употреблении, переработка которых в настоящее время еще недостаточно налажена.

В-третьих, при работе инвертора, входящего в состав накопителя, формируются напряжение, имеющее богатый спектр и требующее фильтрации [2]. Любой

фильтр создает задержку выходного сигнала и повышает порядок исследуемой системы. При этом фильтры имеют тем большие габариты, чем меньшая частота коммутации ключей в инверторе используется. Однако, высокая частота коммутации ключей увеличивает коммутационные потери [3], снижая КПД накопителя. Вынужденное применение фильтров высокого порядка вместо простого L-фильтра для снижения габаритов устройства также усложняет синхронизацию преобразователей, поскольку повышает порядок управляемых систем.

В-четвертых, сборки большого напряжения и большой емкости обладают большой массой и габаритами, что заставляет усложнять их конструкцию и монтаж для обеспечения возможности транспортировки, монтажа и обслуживания.

В-пятых, отказ любой ячейки в сборке делает применение всей сборки не безопасным [4]. Надежность современных аккумуляторных ячеек находится на очень высоком уровне, но с ростом количества ячеек в сборке надежность сборки неминуемо снижается. Для обеспечения требований по надежности, большие сборки необходимо разбивать на множество маленьких сборок, которые можно обслуживать и заменять независимо.

II. КАСКАДНОЕ ПОСТРОЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯ

Среди всех схем построения многоуровневых преобразователей следует выделить каскадную [5], изображенную на рис. 1, которая позволяет:

- разбить одно высоковольтное звено постоянного тока на множество низковольтных, на клеммы которых не подается питание без команды системы управления, что уменьшит опасность транспортировки, обслуживания и монтажа накопителя;
- произвольно распределять нагрузку на отдельные каскады [6], позволяя использовать накопители с существенно различающимися характеристиками, ограничиваясь лишь экономической оправданностью;
- увеличить количество уровней в кривой выходного напряжения до 15 и более, при котором требования к фильтрации выходного напряжения могут настолько существенно

снижаться, что в ряде случаев фильтры, как отдельные устройства, не потребуются.

- является модульной по своей структуре и не требует монолитного исполнения
- позволяет заменять только те каскады, накопители в которых существенно деградировали, причем, с точки зрения управления накопителем, горячая замена каскада возможна [7].

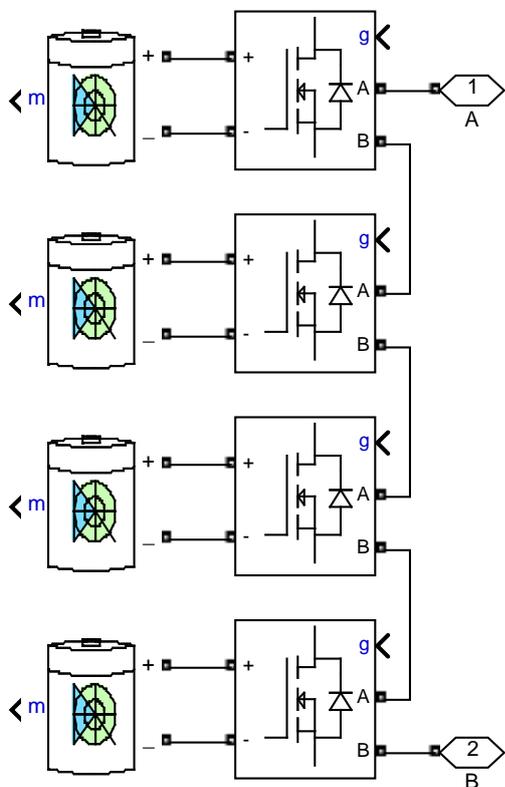


Рис. 1. Каскадная схема накопителя

Также следует отметить, что применение каскадной схемы позволит:

- произвольно изменять рабочее напряжение накопителя, увеличивая количество последовательно соединенных каскадов [6];
- повысить коэффициент использования звена постоянного тока, естественным образом увеличивающийся с ростом количества уровней [8].

III. ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ОБ ОСТАТОЧНОМ ЗАРЯДЕ НАКОПИТЕЛЯ

Для безопасной работы с накопителем необходимо отслеживать его температуру и напряжение [9]. Для монолитного высоковольтного накопителя не потребуется большого количества датчиков и измерений, но при использовании каскадной схемы количество датчиков значительно возрастет.

Для того, чтобы иметь возможность работать с каскадами, емкость накопителя в которых существенно различается, необходимо контролировать напряжение каждого каскада и температуру накопителя в нем. В накопителе с большим количеством каскадов, 16 и более,

реализация централизованной системы измерения параметров становится технически сложной задачей.

Поскольку необходимо обеспечить масштабирование по напряжению в каждой фазе, то предлагается следующая иерархическая структура измерительной сети, показанная на рис. 2.

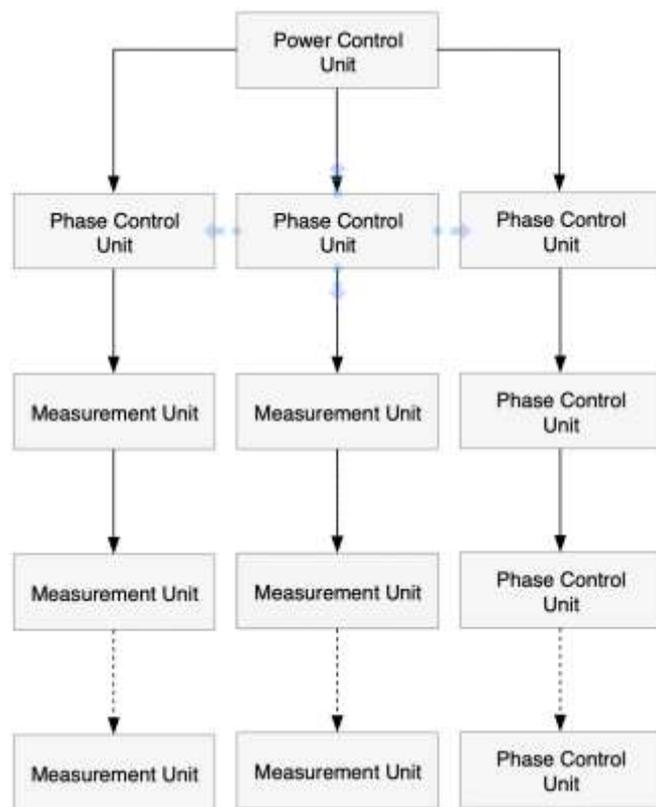


Рис. 2. Структура измерительной сети для модульного накопителя энергии с каскадной схемой

В предлагаемой сети имеются следующие элементы:

- узел измерения, осуществляющий непосредственное измерение напряжений и температур в группе каскадов;
- фазный узел, измеряющий рабочий ток и осуществляющий математическую обработку результатов для получения информации об израсходованном или полученном заряде.

Оценка состояния аккумулятора осуществляется в два этапа. Сначала подсчитывается полученный или отданный заряд в соответствии с

$$C_i = \int S_i(t) \cdot i(t) dt, \quad (1)$$

где C_i – отданный (полученный) заряд аккумулятора i -го каскада, $i(t)$ – ток фазы, $S(t)$ – состояние каскада в процессе работы, которое может принимать значение «0», если каскад зашунтирован, «1», если каскад включен в состояние принятое за положительное и «-1», если формируется инверсное напряжение.

Однако простой контроль остаточного заряда недостаточен, и вторым этапом необходимо контролировать напряжение аккумулятора, чтоб избежать его глубокого разряда или перезаряда, а также подсчитать емкость накопителя каждого каскада.

Каскадная схема инвертора предполагает необходимость гальванической развязки. Непосредственное измерение напряжения отдельных каскадов кажется тривиальной задачей, но не является таковой при большом количестве каскадов.

Для сокращения количества датчиков измерение осуществляется группами по четыре каскада, на стороне переменного тока, как показано на рис. 3. Выбор числа одновременно измеряемых каскадов вызван компромиссом между ошибкой измерения датчика напряжения, сложностью обработки и диапазоном изменения напряжения аккумулятора между максимальным и минимальным зарядом.

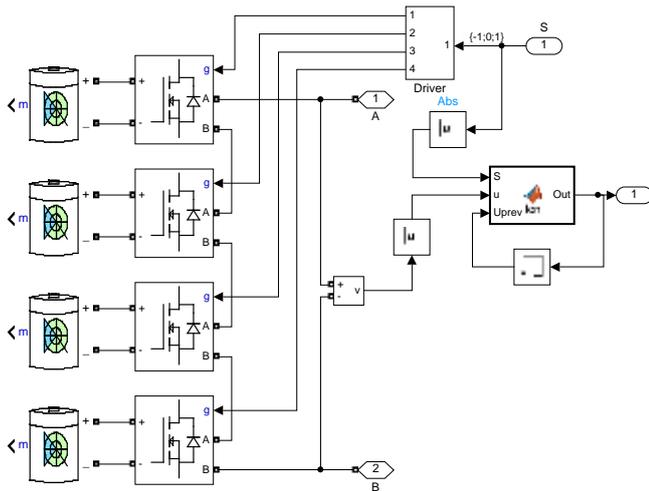


Рис. 3. Измерение напряжения каскадов

Алгоритм выполнения обработки представлен на рис. 4.

Для его работы необходимо значение модуля напряжения и состояния каскадов без учета направления включения. Дополнительным условием функционирования алгоритма является применение ступенчатой модуляции, позволяющей упростить полноценный алгоритм Гаусса для решения системы линейных уравнений до не итеративного алгоритма. Допущение о том, что знаки у состояний каскадов являются одинаковыми, также накладывает ограничение на работу накопителя, не позволяя перераспределять остаточную энергию между каскадами при существенном расхождении их емкости.

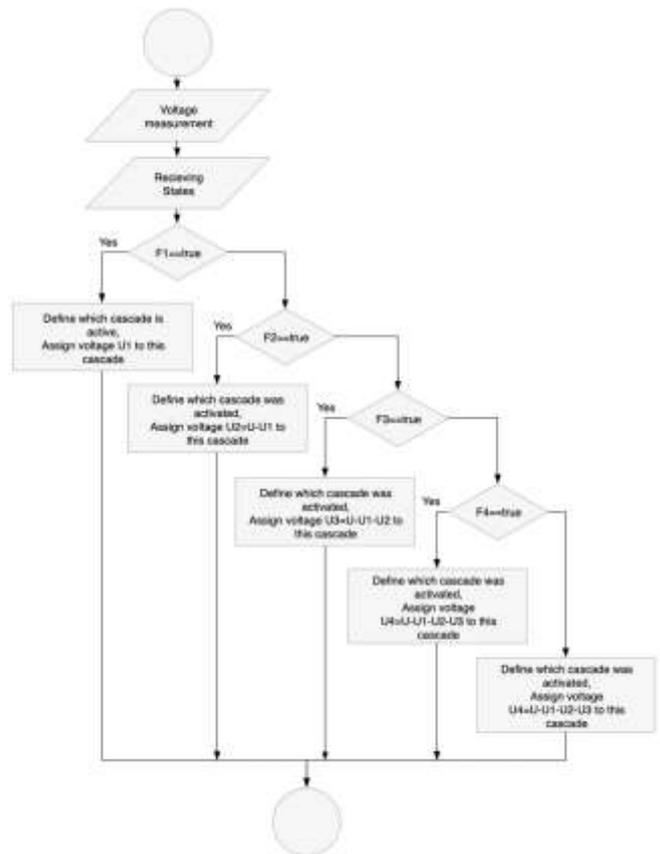


Рис. 4. Алгоритм косвенного определения напряжения каскадов

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный подход к организации измерения позволяет балансировать нагрузку между каскадами предлагаемого накопителя и следить за состоянием аккумуляторных батарей, не прерывая работу накопителя. Переход к распределенному измерению напряжения позволяет не только существенно уменьшить количество информационных связей, но и сделать предлагаемую схему построения накопителя модульной и расширяемой по напряжению не только с точки зрения построения силовой части, но и построения системы измерения и управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] E. Martinez-Laserna et al., "Evaluation of lithium-ion battery second life performance and degradation," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855090.
- [2] Grahame D., Thomas A. Lipo. Pulse width modulation for power converters. Principles and practice. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [3] Bai Baodong and Chen Dezhi, "Inverter IGBT loss analysis and calculation," 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2013, pp. 563-569, doi: 10.1109/ICIT.2013.6505733.
- [4] Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles ZACHARY BOSIRE OMARIBA, LIJUN ZHANG, DONGBAI SUN, Received August 1, 2019, accepted September 4, 2019, date of publication September 12, 2019, date of current version September 23, 2019. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2940090
- [5] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.

- [6] H. Hasabelrasul, X. Yan and A. S. Gadalla, "Cascaded H-bridge Multilevel Inverter Balancing for Energy-Power Based on VSG," 2019 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCEEE46830.2019.9071225.
- [7] Cascaded H-bridge Multilevel Inverter Drives Operating under Faulty Condition with AI-Based Fault Diagnosis and Reconfiguration Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, 2, and Burak Ozpineci2
- [8] Y.P. Siwakoti, A. Mahajan and S. Liese, "Active Utilization of a Full DC-Link Voltage in Multilevel Converter," 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/INTLEC.2018.8612348.
- [9] C.G. Moral, D. Fernandez, J.M. Guerrero, D. Reigosa, C.R. Pereda and F. Briz, "Thermal Monitoring of LiFePO4 Batteries Using Switching Harmonics," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 4, pp. 4134-4145, July-Aug. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2988425.