

**СОЗДАНИЕ ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ
НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

К.Р. Бахтеев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: orcid.org/0000-0002-4478-4121, kam1609@mail.ru

Резюме: В статье проведен сравнительный анализ различных типов накопителей электроэнергии. Обосновывается возможность применения гибридного накопителя электроэнергии на базе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения, вызываемых замыканиями в сетях внешнего электроснабжения. Построена имитационная модель аккумуляторной батареи большой мощности, батареи суперконденсаторов и гибридного накопителя электроэнергии для выбора оптимального решения данной проблемы и оценки эффективности данного метода.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрические сети, суперконденсаторы, аккумуляторные батареи, остаточное напряжение, качество электроэнергии, провал напряжения.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-36-44

**CREATION OF A BIG POWER HYBRID ELECTRIC ENERGY STORAGE FOR
PREVENTION SHORT-TERM INTERRUPTION OF POWER SUPPLY TO
INDUSTRIAL CONSUMERS**

K.R. Bakhteev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: orcid.org/0000-0002-4478-4121, kam1609@mail.ru

Abstract: The article gives a comparative analysis of different types of electricity accumulators. A possibility of using a hybrid electrical energy storage based on accumulator batteries and supercapacitors of high power is substantiated as one of the ways to prevent short-term power failures caused by short circuits in external power supply networks. Simulation models of the high power battery, supercapacitor battery and hybrid storage was constructed to evaluate the efficiency of this method.

Keywords: mathematical modeling, electrical networks, supercapacitors, batteries, residual voltage, power quality, voltage sag.

Высокая степень автоматизации и электрификации многих технологических процессов, появление многочисленных технологических циклов с тонкой настройкой сделали производственный процесс промышленных потребителей очень чувствительным к надежности системы электроснабжения и качеству электроэнергии [1]. Нарушение

технологического процесса, особенно в условиях непрерывного характера производства, может приводить к остановке производства, к браку и недоотпуску продукции, а также сопровождаться существенными экономическими потерями. Для ряда производств ущерб от кратковременных провалов напряжения (ПН) длительностью от 20 мс с учетом перезапуска технологических процессов сопоставим с ущербом от длительных перерывов питания, в то время как частота возникновения провалов напряжения выше на несколько порядков [2]. Как правило, ПН в системах внутреннего электроснабжения промышленных потребителей возникают из-за коротких замыканий (КЗ) на воздушных линиях в питающих сетях напряжением 110 кВ и выше. Из-за электрических связей между шинами распределительных устройств системообразующих подстанций снижение напряжения при КЗ распространяется на каждую секцию соответствующей главной понизительной подстанции, питающей промышленные предприятия, что делает неэффективной работу классического автоматического ввода резерва (АВР) 6 – 10 кВ [3]. В связи с этим возрастает интерес к применению накопителей электроэнергии для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) [2]. Наличие энергоемких и мощных накопителей в качестве промежуточных устройств между источниками генерации энергии и потребителем позволяет освободиться от жесткого требования ежечасного соответствия генерации энергии ее потреблению [4].

Целью исследования является выбор типа и емкости накопителей энергии, способных выдать суммарную мощность свыше 1 МВт, и обоснование экономической эффективности их применения для обеспечения бесперебойного питания как собственных подстанций, так и особо ответственных потребителей.

В качестве накопителей энергии в энергосистемах наиболее широко используются аккумуляторные батареи (АКБ) с различными типами электролитов, на основе которых формируют мощные системы накопления – аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ). Иными словами, АББМ представляет собой накопитель, который состоит из мощных АКБ различного типа, объединенных в пакеты [5, 6].

Проведенный анализ накопителей (а среди них были рассмотрены различные типы АКБ, характеризующиеся определенным составом и техническими характеристиками), позволил выделить те из них, которые в наибольшей степени пригодны для предотвращения ПН. Их характеристики представлены в таблице.

Таблица

Характеристики различных видов накопителей энергии

	Lead Acid	Li-ion	NiCd	NiMH	Ni-NaCl	СК
Емкость одного элемента	26–3000 А*ч	40–800 А*ч	10–1100 А*ч	0,3–7 А*ч	40–200 А*ч	500–12 000 Ф
Энергетическая плотность, Вт*ч/кг	30–60	80–160	45–80	60–120	140–190	1–10
Число циклов заряда/разряда	200–1200	700–3000	1500	300–500	3000–7000	>500 000
Устойчивость к перезаряду	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая	Высокая	Очень высокая

Как видно из таблицы, наиболее пригодными для предотвращения ПН являются литий-ионные (Li-ion) и никель-солевые (Ni-NaCl) батареи, а также суперконденсатор (СК). Так, литий-ионная (Li-ion) и никель-солевая (Ni-NaCl) батареи имеют очень небольшой саморазряд, что очень выгодно отличает их от свинцово-кислотных или никель-кадмиевых / никель-металл – гибридных батарей, которым необходима периодическая подзарядка.

Проведенный анализ накопителей показал, что наиболее перспективными для применения в данной области являются литий-ионные батареи. Основным недостатком таких АКБ является ограничение по току разряда, поскольку непосредственно клеммы не могут передавать такой ток (хотя теоретически самому аккумулятору это под силу). На сегодняшний день максимальная единичная емкость АКБ данного типа составляет 1200 А*ч, а напряжение – 2 В [7]. С учетом этого была разработана имитационная модель АББМ (рис. 1.), состоящая из 420 АКБ емкостью 1200 А*ч и суммарным напряжением 840 В и стабилизатора, предназначенного для поддержания постоянного значения напряжения на выходе, которые работают на нагрузку от 250 кВт до 2 МВт. Основными задачами данной имитационной модели является определение времени отклика и разрядных характеристик АББМ [8, 9], поэтому нагрузка здесь имитируется упрощенно в качестве постоянного сопротивления. Что касается согласования параметров устройств и источника с сетью, то, исходя из проведенного технико-экономического расчета [7], было выбрано напряжение 840 В как наиболее оптимальное.

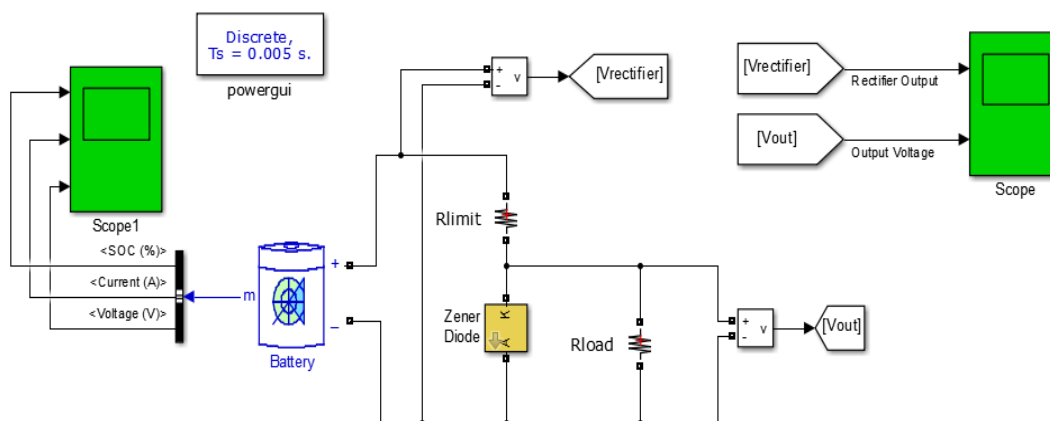


Рис. 1. Имитационная модель АББМ и стабилизатора напряжения

Допущения, принятые в модели АББМ (рис. 1.):

- Внутреннее сопротивление считается постоянным во время циклов заряда и разряда и не изменяется с амплитудой тока.
- Параметры модели получены из характеристик разряда, считаются одинаковыми и для зарядки.
- Саморазряд батареи не представлен. Его можно представить, добавив большое сопротивление параллельно клеммам аккумулятора.
- Аккумулятор не имеет эффекта памяти.
- Емкость аккумулятора не изменяется с амплитудой тока (эффект Пекерта).

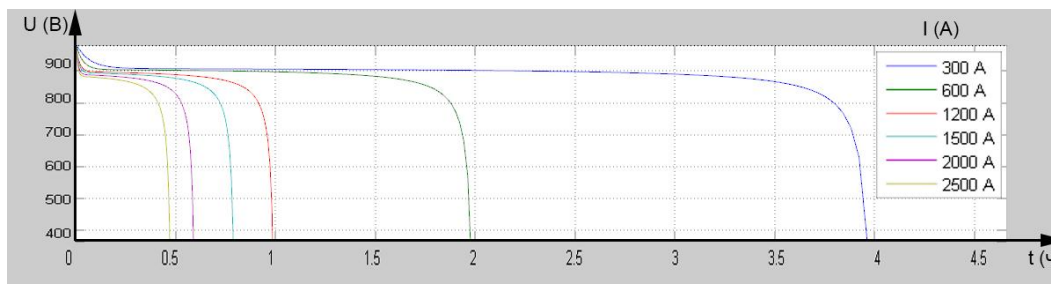


Рис. 2. Токоразрядные характеристики АББМ

Результаты эксперимента, приведенные на рис. 2, показывают, что ток разряда изменяется пропорционально мощности нагрузки от 300 до 1200 А, а время разряда АББМ обратно пропорционально увеличению нагрузки. Одной из особенностей АКБ, не отображенных на рис. 2, является то, что чем больше сила разрядного тока, тем ниже напряжение, до которого может разряжаться аккумулятор. Это связано с тем, что при быстром разряде большими токами (от 1500 А и выше) емкость аккумулятора обычно составляет чуть более половины от номинальной емкости, так как электролит не успевает перемешиваться, и разряженный слой скапливается вокруг пластин, в результате чего падает напряжение на АКБ, а ток разряда и время разряда аккумулятора становятся не пропорциональными друг другу. Однако, спустя несколько десятков минут электролит перемешивается, а емкость и, соответственно, напряжение аккумулятора повышаются.

На рис. 3 представлена имитационная модель АББМ, которая работает через стабилизатор напряжения, инвертор и трансформатор, выдавая запасенную энергию на шины промышленного потребителя 6(10) кВ. Такая модель позволяет показать работу системы в целом.

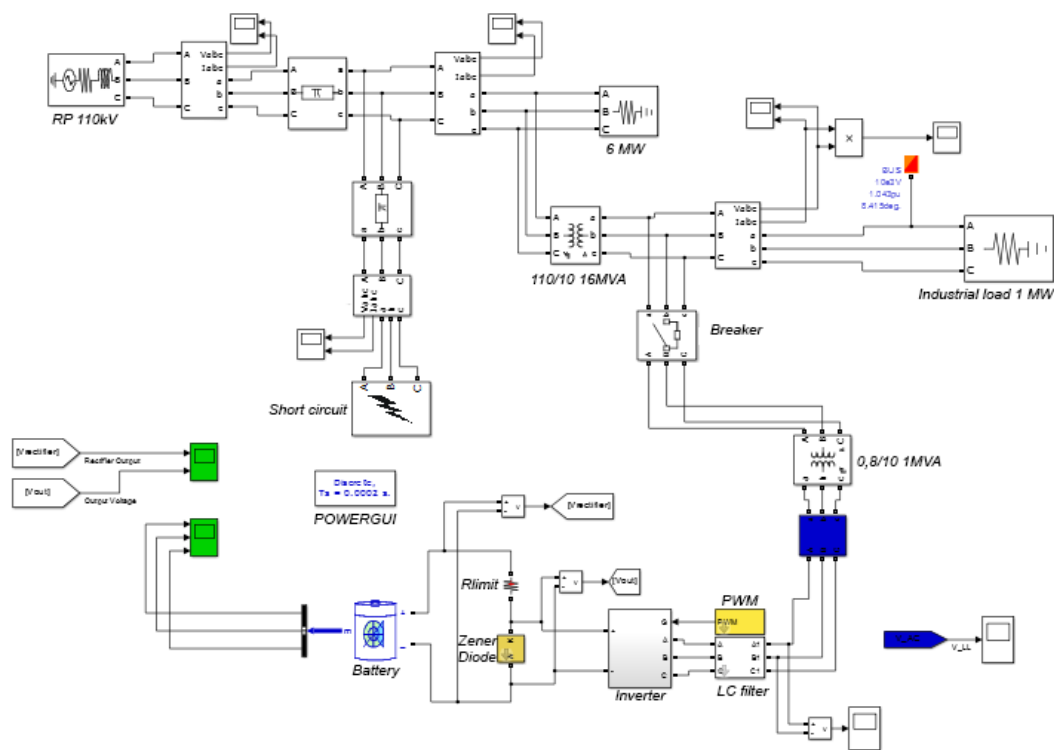


Рис. 3. Имитационная модель подключения АББМ к шинам промышленного потребителя 6(10) кВ

На рис. 4 представлены результаты эксперимента, которые иллюстрируют время срабатывания резервной защиты, основанной на АББМ. В случае возникновения ПН происходит переключение нагрузки при помощи быстродействующего АВР (БАВР), время полного цикла срабатывания составляет 50-60 мс. Время отклика батареи задается в имитационной модели, показанной на рис. 3, и по данным *Electric Power Research Institute* (Научно-исследовательский институт электроэнергетики, США) оно составляет 40-60 мс [10].

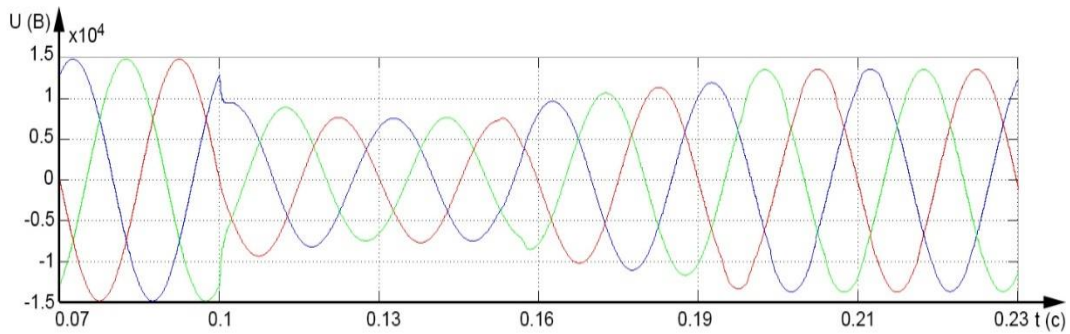


Рис. 4. Время срабатывания резервной защиты, основанной на АББМ

Как видно из осциллограммы (рис. 4), в момент времени 0,1 с происходит ПН, в течение 50 мс срабатывает БАВР, подключается резервная защита, но из-за длительного времени отклика АКБ, который составляет 50 мс, КНЭ с меньшей продолжительностью времени успевают оказать негативное влияние на энергосистему предприятия. Однако это не единственный недостаток АКБ. В частности, к ним можно отнести: недостаточный ресурс работы (небольшое количество циклов заряд-разряд); существенное уменьшение ресурса при работе в пиковых режимах при разряде и заряде; наличие специальных требований к глубине разряда.

Этих недостатков лишены СК – конденсаторные батареи, выполненные на базе ячеек с двойным электрическим слоем, которые все чаще находят применение в качестве накопителей энергии в энергосистеме [11, 12].

Время отклика СК, в отличие от АКБ, значительно меньше и составляет около 1 мкс. Существенными преимуществами емкостных накопителей энергии, расширяющими их применение в импульсных технологиях, являются: простота коммутации при заряде и разряде батареи конденсаторов; возможность строгого дозирования накопленной энергии за счет регулирования уровня напряжения заряда или длительности импульса воздействия, а также способность выдерживать более 500 тыс. циклов заряда/разряда при 100%-ой глубине разряда [13].

Разработана имитационная модель батареи СК (БСК), которая работает через стабилизатор напряжения на нагрузку 1 МВт (рис. 5).

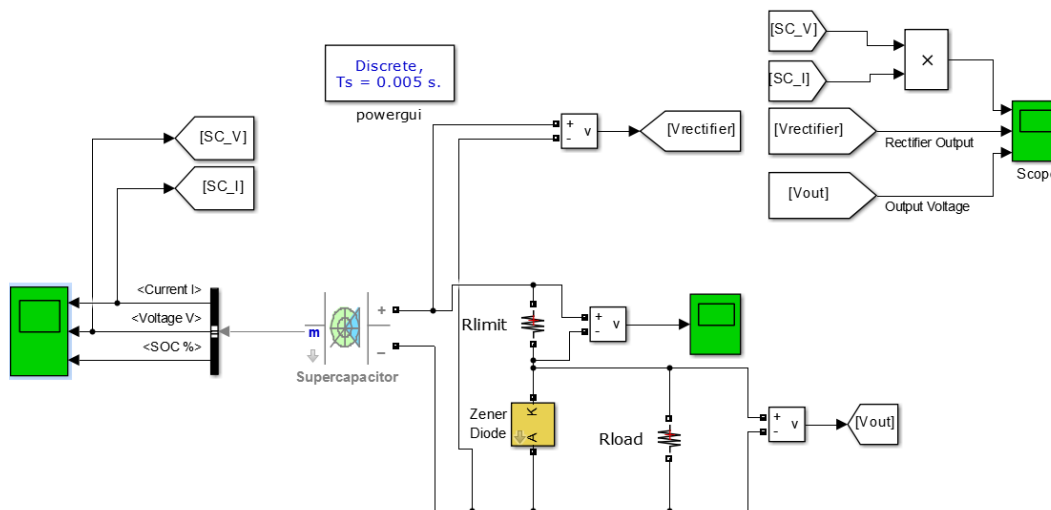


Рис. 5. Имитационная модель БСК и стабилизатора напряжения

Данная модель описывает работу БСК, емкостью 60 Ф и суммарным напряжением 900 В, работающего через стабилизатор, который ограничивает напряжение до 800 В и работает на нагрузку 1 МВт.

На рис. 6 показано время разряда БСК.

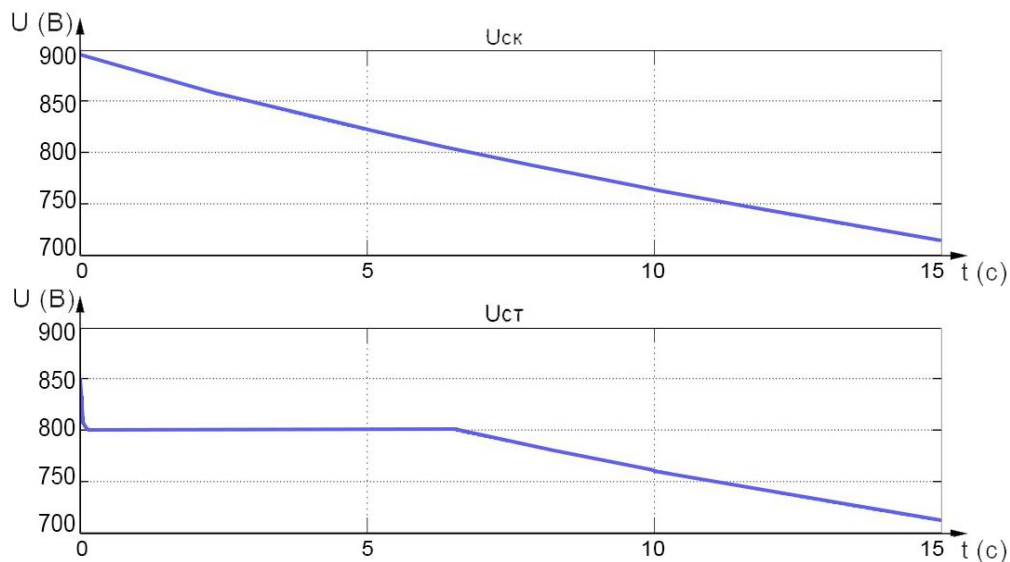


Рис. 6: а – Падение напряжения на БСК
б – Напряжение на выходе после стабилизатора

Как видно из рис. 6, в случае пропадания электрического тока или при выходе его параметров за допустимые нормы БСК позволяет подключенному к ней промышленному потребителю еще в течение непродолжительного времени продолжить работу. БСК стремительно разряжается (рис. 6, а), в то время как напряжение на выходе после стабилизатора остается постоянным (рис. 6, б) и, как следствие, напряжение на шинах промышленного потребителя также остается стабильным. Необходимо учитывать, что отдача электроэнергии нагрузке от накопителя производится при условии соблюдения параметров качества электроэнергии, а это требует решения вопроса электромагнитной совместимости объектов с учетом их экономической эффективности. Кроме того, необходимо решить вопрос минимизации остаточной неиспользованной энергии накопителя.

До определённого уровня напряжение на выходе после стабилизатора может поддерживаться постоянным. Этого времени хватит для ограничения ПН длительностью от 0,02–10 сек. У СК, в отличие от АКБ, есть свой недостаток: низкая энергетическая плотность. Для того, чтобы ограничить КНЭ различной длительности и избежать вышеперечисленных недостатков АББМ и СК, предложен подход, основанный на использовании гибридного накопителя электроэнергии (ГНЭ). ГНЭ представляет собой сложную электротехническую систему, показанную на рис. 7.

Основными элементами имитационной модели ГНЭ являются:

- накопители электроэнергии в виде АББМ и БСК;
- система преобразования тока из одного рода в другой, состоящая из инвертора, стабилизатора напряжения и фильтров;
- система управления данным преобразователем;
- система управления электротехнической системой в целом.

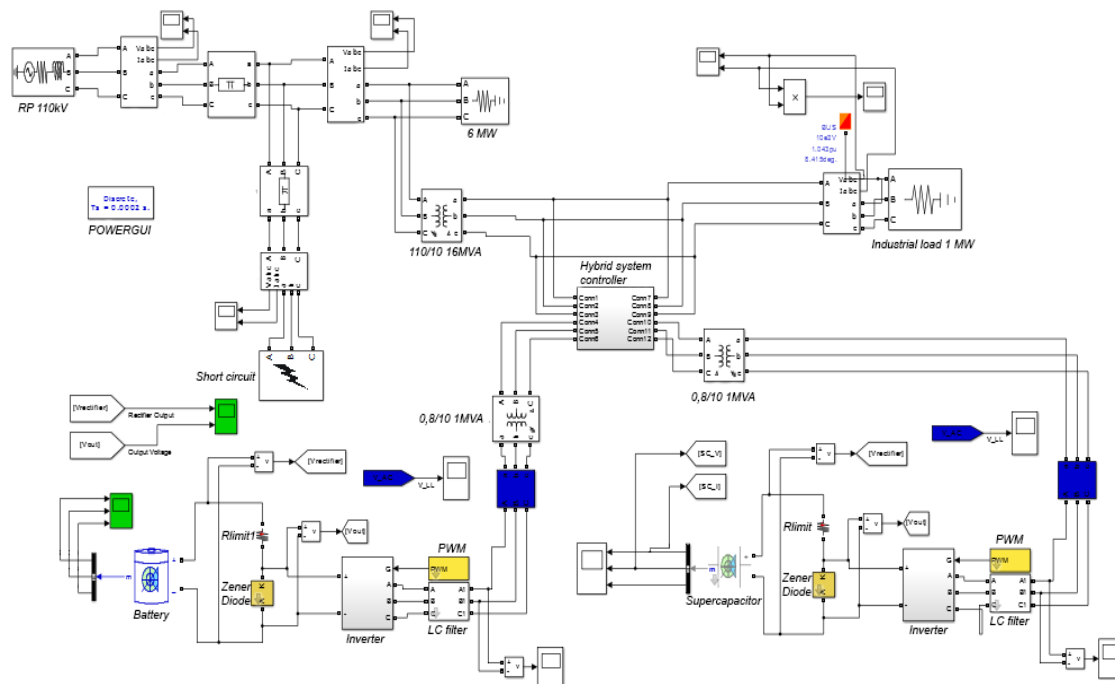


Рис. 7. Имитационная модель ГНЭ

Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 8.

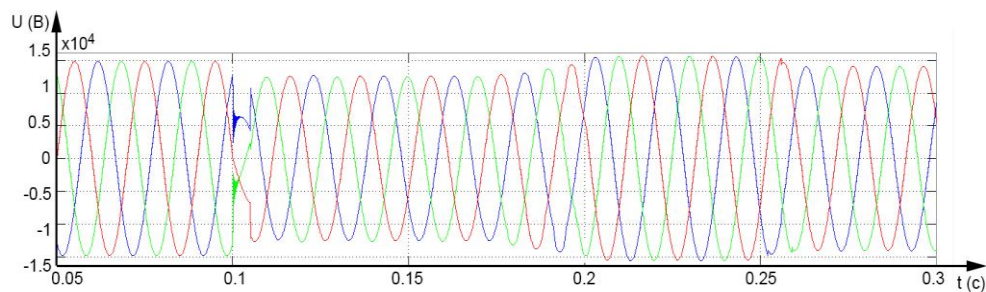


Рис. 8. Результаты имитационного моделирования

Результаты моделирования, представленные на рис. 8, показали, что уровень остаточного напряжения при КНЭ составил 40%. Через 10 мс была включена БСК, что обеспечило практически мгновенное восстановление напряжения до уровня остаточного напряжения 93%. Через 100 мс после ПН подключается АББМ. Непродолжительное время они работают параллельно, затем БСК отключается, и работа продолжается на АББМ.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Рациональный выбор накопителей энергии для ограничения КНЭ позволяет оптимизировать их технические, массогабаритные и стоимостные характеристики.
2. АББМ и БСК можно использовать для ограничения глубины ПН, оказывающего влияние на промышленные предприятия с суммарной потребляемой мощностью 1 МВт и более.
3. БСК целесообразно использовать для ограничения кратковременных ПН, когда чувствительность технологии находится в пределах 1 мс. Для более длительного ПН (от 60 мс и больше) потребуются довольно громоздкие и дорогие установки, состоящие из БСК,

поэтому для ограничения ПН длительностью свыше 60 мс целесообразно применение АББМ.

4. Совместное использование АББМ и БСК в качестве ГНЭ может нивелировать недостатки обоих элементов. Кроме того, появляется возможность в несколько раз увеличить кратковременную мощность накопителя в аварийных режимах работы сети, а также покрывать кратковременные пиковые нагрузки без уменьшения общего ресурса работы накопителя.

Литература

1. Бердников Р.Н., Фортон В.Е., СОН Э.Е., Дельщиков К.К., Жук А.З., Новиков Н.Л., Шакарян Ю.Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. №2(7). С. 41–51.
2. Бахтеев К.Р. Использование накопителей электроэнергии для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения // «Молодежь и XXI век 2017: Мат. VII Международной молодежной научной конференции, г. Курск. 2017. - в 4-х томах № 4. С. 216–219.
3. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Влияние форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения // Известия Вузов. «Проблемы энергетики». 2016 № 7-8. – С. 64–71.
4. Ch. Ambedker, G. Sathish Goud, S. Rajesh An Integrated Dynamic Voltage Restorer-Ultra Capacitor Design for Improving Power Quality of the Distribution Grid // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2402221. Pages. 616–624.
5. Глускин И.З., Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю. Применение накопителей в энергосистеме для целей противоаварийной автоматики // Евразийский Научный Журнал. 2015. № 11. С. 1–7.
6. A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, T. Schmidt Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. №56 DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.085. Pages. 705–721.
7. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Повышение качества электроснабжения промышленных потребителей путем использования накопителей электроэнергии при провалах напряжения // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. г. Чебоксары. 2017. С. 308–311.
8. Дьяконов В.П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2010.
9. Fedotov A., Fedotov E., Bahteev K. Application of local Fourier transform to mathematical simulation of synchronous machines with valve excitation systems // Latvian journal of physics and technical sciences. 2017. DOI: 10.1515/lpts-2017-0004. -№ 1. Pages. 31–40.
10. D. Rastler, Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676.
11. Kenan M., Ayşen D., Arsoyb B., Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage // International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 78, June 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.020>, Pages 414–421.
12. Коротынский А.Е., Драченко Н.П., Шапка В.А. Особенности применения суперконденсаторов в устройствах для импульсных технологий сварки // Автоматическая сварка. – 2014. №9. С. 36–40.
13. Y. Yoo, M.-S. Kim, J.-K. Kim, Y. Kimb, W. Kim Fast-response supercapacitors with graphitic ordered mesoporous carbons and carbon nanotubes for AC line filtering // Journal of Materials Chemistry A. - 2016. – Issue 14, DOI:10.1039/C6TA00921B.

Автор публикации

Бахтеев Камил Равилевич – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: kam1609@mail.ru

References

1. Berdnikov R, Fortov V, SON E, Delshchikov K, Zhuk A, Novikov N, Shakaryan Yu.. Hybrid power storage for UNEG based on accumulators and supercapacitors // *Energy of a unified network*. 2013. № 2 (7). P. 41–51.
2. Bakhteeв K. The use of power storage to prevent short-term power interruption // "Youth and the XXI century - 2017: Mat. VII International Youth Scientific Conference, Kursk. 2017. № 4, in 4 volumes. P. 216–219.
3. Fedotov A, Bakhteeв K. Influence of forced excitation of synchronous machines on the level of residual voltage for short-term power failures // *News of universities. "Energy Problems" in the publishing of Kazan State Power Engineering University*, 2016, № 7-8. P. 64–71.
4. Ch. Ambedker, G. Sathish Goud, S. Rajesh An Integrated Dynamic Voltage Restorer-Ultra Capacitor Design for Improving Power Quality of the Distribution Grid // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2015. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2402221. C. 616–624.
5. Gluskin I, Efremov D, Efremova I. Application of storage devices in the power system for the purpose of emergency control automation // *The Eurasian Scientific Journal*. 2015. № 11. P. 1–7.
6. A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, T. Schmidt Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. №56, DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.085. Pages. 705–721.
7. Fedotov A, Bakhteeв K. Improving the quality of power supply to industrial consumers by using power storage devices in case of voltage failures // In the collection: *Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems. Materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2017. P. 308–311.
8. Dyakonov V. MATLAB R2007 / 2008/2009 for radio engineers. Moscow: DMK Press, 2010.
9. Fedotov A., Fedotov E., Bahteeв K. Application of local Fourier transform to mathematical simulation of synchronous machines with valve excitation systems // *Latvian journal of physics and technical sciences* 2017. DOI: 10.1515/lpts-2017-0004. -№ 1. – P. 31–40.
10. D. Rastler, *Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits*. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676.
11. Kenan M., Ayşen D., Arsoyb B., Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* Volume 78, June 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.020>, Pages 414–421.
12. Korotynsky A, Drachenko N, Shapka V Features of the application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies. // *Automatic welding*. 2014. №9. P. 36–40.
13. Y. Yoo, M.-S. Kim, J.-K. Kim, Y. Kimb, W. Kim Fast-response supercapacitors with graphitic ordered mesoporous carbons and carbon nanotubes for AC line filtering // *Journal of Materials Chemistry A*. 2016. Issue 14, DOI:10.1039/C6TA00921B.

Authors of the publication

Kamil Bakhteeв - graduate student of the department "Electric power systems and networks", Kazan State Power Engineering University. E-mail: kam1609@mail.ru

Поступила в редакцию

21 декабря 2017 г.