

6. Аржанников, Е. А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю / Е. А. Аржанников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.
7. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
8. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, О. А. Гурьянчик // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 6. – С. 5–13.
9. Айзенфельд, А. И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / А. И. Айзенфельд, Г. М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
10. Математическая статистика / В. М. Иванова [и др.]. – М.: Высш. шк., 1975. – 398 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 22.04.2013

*К 50-летию кафедры
«Электрические системы»*

УДК 621.311

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Канд. техн. наук ЧЕРНЕЦКИЙ А. М.

Белорусский национальный технический университет

В течение последнего десятилетия отмечается устойчивая тенденция расширения сферы практического применения накопителей электроэнергии [1]. Изначально используемые в основном в качестве аккумуляторных батарей и источников бесперебойного питания нагрузок небольшой мощности в настоящее время накопители рассматриваются в качестве одной из важнейших составляющих электроэнергетики будущего как неотъемлемый элемент «интеллектуальных электроэнергетических систем» [2, 3]. Основными движущими силами, способствующими более пристальному изучению аспектов применения технологий сохранения энергии в большой электроэнергетике, являются тенденции увеличения генерации на основе возобновляемых источников энергии (в первую очередь, энергии ветра), значительный рост в большинстве энергосистем стоимости электроэнергии в пиковые часы [4], возрастающие требования к надежности электроснабжения и вопросам экологии. Основное свойство накопителей – способность аккумулировать электроэнергию с ее последующей выдачей в нужное время – имеет особое значение для создания принципиально новых методик оптимального управления энергосистемами.

На современном этапе общая установленная мощность используемых в мире накопителей электроэнергии превышает 127 ГВт [1, 3]. Порядка

99 % из них составляют гидроаккумулирующие станции [3]. Далее в порядке убывания мощностей следуют накопители, в которых энергия сохраняется за счет нагнетания сжатого воздуха (подземного и наземного исполнения – 440 МВт установленной мощности), батареи различного типа исполнения (сернисто-натриевые – 316 МВт, свинцово-кислотные – 35 МВт, кадмиево-никельные – 27 МВт, ионно-литиевые – 20 МВт), а также маховики – 25 МВт.

К основным сферам применения накопителей относят покрытие пиковых нагрузок, регулирование частоты и напряжения, замещение вращающегося резерва, уменьшение загруженности линий электропередачи и перенос на более поздний срок необходимости их модернизации, повышение надежности и качественных показателей электроснабжения, обеспечение интеграции возобновляемых источников электроэнергии в систему [4–7]. Для каждого из указанных применений имеет значение энергоемкость накопителя (количество электроэнергии, которое устройство способно накапливать и сохранять на протяжении определенного периода), выдаваемая в единицу времени мощность на протяжении периода разряда, длительность разряда (способность выдавать требуемую мощность в течение конечного временного интервала) и КПД накопителя. В табл. 1 на основе полученных американским институтом исследований в сфере электроэнергетики EPRI (Electric Power Research Institute) данных [3] приведены основные характеристики существующих в настоящее время вариантов использования накопителей электроэнергии для решения конкретных задач энергосистемы с указанием технических и стоимостных параметров устройств (с учетом стоимости оборудования, необходимого для подключения накопителя к системе), степени проработки технологии для каждого из применений. Данные, приведенные в табл. 1, могут служить отправной точкой при проведении предварительных исследований, связанных с оценкой экономической целесообразности применения известных технологий накопления энергии для решения в энергосистемах конкретных задач.

Основной проблемой, препятствующей масштабному использованию накопителей электроэнергии, является их высокая стоимость. Однако уже сейчас в ряде стран (США, Япония, Индия, Бразилия, Российская Федерация) отмечается активизация исследований и практических разработок, направленных на создание накопителей новых типов (суперконденсаторы, различные типы электрохимических и асимметричных накопителей), наряду с поиском вариантов снижения стоимости и изучением аспектов их использования для решения прикладных задач оптимизации управления энергосистемой. Намеченной Министерством энергетики США концепцией разработки практических вариантов использования накопителей электроэнергии в сетях на период до 2020 г. предусматривается получение решений, готовых к внедрению, уже к 2015–2016 гг. [4, 8]. Особое внимание уделяется исследованиям, связанным с применением накопителей для обеспечения интегрирования в систему электростанций, работающих на ветряной либо солнечной энергии, использованием систем накопления электроэнергии как в интересах конечного потребителя (покрытие пиковых нагрузок), так и для решения системных вопросов, а также аспектам уменьшения стоимости накопителей. В результате уже к 2020 г. прогнозируется снижение затрат на создание накопителей в среднем на 70 %.

Таблица 1

Стоимостные и технические характеристики накопителей электроэнергии

Используемая технология	Уровень проработки	Энергоемкость, МВт·ч	Мощность, МВт	Время разряда, ч	КПД % (количество циклов)	Стоимость (дол./кВт)
Системные потребности (оптовая торговля электроэнергией, покрытие пиковых нагрузок), интеграция возобновляемых источников энергии						
ГАЭС	Практ. исп.	1680–5300	280–530	6–10	80–82	2500–4300
		5400–14000	900–1400	6–10	(>13000)	1500–2700
Сж. воздух (подз. исп.)	Коммерч.	1080	135	8	–	960
		2700		20	(>13000)	1150
Натрий/сера	Коммерч.	300	50	6	75 (4500)	3100–3300
Свинцово-кислотный	Коммерч.	200	50	4	85–90 (2200)	1700–1900
	Коммерч.	250	20–50	5	85–90 (4500)	4600–4900
	Демонстр.	400	100	4	85–90 (4500)	2700
Ванадий, окисл.-восст.	Демонстр.	250	50	5	65–75 (>10000)	3100–3700
Цинк/бром, окисл.-восст.	Демонстр.	250	50	5	60 (>10000)	1450–1750
Железо/хром, окисл.-восст.	Ведутся разработки	250	50	5	75 (>10000)	1800–1900
Регулирование частоты, интеграция возобновляемых источников энергии						
Маховик	Демонстр.	5	20	0,25	85–87 (>100000)	1950–2200
Ионно-литиевый	Демонстр.	0,25–25	1–100	0,25–1	87–92 (>100000)	1085–1550
Свинцово-кислотный	Демонстр.	0,25–50	1–100	0,25–1	75–90 (>100000)	950–1590
Сетевые потребности (разгрузка линий электропередачи, перенос сроков модернизации линий и подстанций)						
Сж. воздух (надз. исп.)	Демонстр.	250	50	5	– (>10000)	1950–2150
Свинцово-кислотный	Демонстр.	3,2–48	1–12	3,2–4,0	75–90 (4500)	2000–4600
Натрий/сера	Коммерч.	7,2	1	7,2	75 (4500)	3200–4000
Цинк/бром	Демонстр.	5–50	1–10	5	60–65 (>10000)	1670–2015
Ванадий, окисл.-восст.	Демонстр.	4–40	1–10	4	65–70 (>10000)	3000–3130
Железо/хром	Ведутся разработки	4	1	4	75 (>10000)	1200–1600
Ионно-литиевый	Демонстр.	4–24	1–10	2–4	90–94 (4500)	1800–4100
Использование в интересах потребителей (выравнивание графика потребления, улучшение качества электроэнергии, повышение надежности энергоснабжения)						
Свинцово-кислотный	Демонстр.-коммерч.	10	5	2	85–90 (1500–5000)	4520–5600
		20		4		
Цинк/бром	Демонстр.	9–30	3–15	2–4	60–64 (>5000)	2000–6300
Ионно-литиевый	Демонстр.	7–40	1–10	1–7	75–92 (5000)	1250–11000

Анализ материалов, относящихся к оценке экономической эффективности применения накопителей электроэнергии, свидетельствует о том, что, несмотря на многочисленность задач, которые устройства для накопления электроэнергии способны решать в энергосистеме, на данном этапе наиболее действенным стимулом активизации их практического использования является возможность накапливать электроэнергию в период снижения спроса на нее с последующей выдачей во время максимального потребления.

Простейшая методика предварительной оценки эффективности использования накопителя приведена в [4, 7, 8]. Для ее иллюстрации рассмотрим пример, основанный на суточных изменениях стоимости электроэнергии для потребителей штата Калифорния, США (данные соответствуют периоду с 1 мая по 31 октября 2010 г., <http://www.pge.com/tariffs>):

- с 00.00 до 8.30 – 0,13840 дол. США/(кВт·ч);
- с 8.30 до 12.00 – 0,22498 дол. США/(кВт·ч);
- с 12.00 до 18.00 – 0,43995 дол. США/(кВт·ч);
- с 18.00 до 21.30 – 0,22498 дол. США/(кВт·ч);
- с 21.30 до 24.00 – 0,13840 дол. США/(кВт·ч).

В случае аккумуляции электроэнергии в часы ее минимальной стоимости (как правило, это время наименьших нагрузок) в накопителе, имеющем КПД 80 % и удельные отчисления на амортизацию и обслуживание 0,02 дол./кВт·ч [4, 8], стоимость 1 кВт·ч $C_{\text{сохр}}$ может быть определена по упрощенной формуле

$$C_{\text{сохр}} = \frac{C_{\text{мин}}}{\eta} + C_{\text{а.о}} = \frac{0,13840}{0,8} + 0,02 = 0,193 \text{ дол./кВт·ч}, \quad (1)$$

где $C_{\text{мин}}$ – стоимость электроэнергии в часы ночного минимума (21.30–8.30); $C_{\text{а.о}}$ – удельные отчисления на амортизацию и обслуживание устройства для накопления энергии; η – КПД устройства для накопления энергии.

При выдаче накопителем сохраненной электроэнергии в часы пиковых нагрузок выгода может быть оценена как разность между стоимостью электроэнергии в пиковые часы $C_{\text{макс}}$ и величиной $C_{\text{сохр}}$

$$C_{\text{макс}} - C_{\text{сохр}} = 0,43995 - 0,193 = 0,24695 \text{ дол./кВт·ч}.$$

В общем случае анализ эффективности применения накопителей является сложной многокритериальной задачей, основные принципы решения которой содержатся в [9]. Приведенный выше подход носит исключительно оценочный характер, поскольку, во-первых, не учитывает ряд факторов (затраты на создание, установку и обслуживание накопителя, влияние устройства на параметры энергосистемы, состав генерирующих мощностей энергосистемы и пр.). Во-вторых, приведенные выше соображения в основном относятся к точке зрения потребителей. Тем не менее подобный подход наглядно демонстрирует одно из основных условий целесообразности использования накопителей – наличие как минимум двух суточных тарифов на электроэнергию.

Для выработки подхода к анализу эффективности применения устройства для накопления электроэнергии (УНЭ), с точки зрения генерирующей

компании, рассмотрим примерный суточный график нагрузки, приведенный на рис. 1. В течение суток выработка электроэнергии станциями, работающими в базовой, полупиковой и пиковой частях графика, равна $W_{\text{баз}}$, $W_{\text{п/пик}}$ и $W_{\text{пик}}$ соответственно. Стоимостные показатели выработки 1 кВт·ч равны $C_{\text{баз}}$, $C_{\text{п/пик}}$, $C_{\text{пик}}$. Устройство для накопления энергии работает в полупиковой зоне в режиме заряда, в пиковой – в режиме разряда, при этом $W_{\text{разр}} = \eta W_{\text{зар}}$, где η – КПД УНЭ; $W_{\text{зар}}$ – энергия заряда устройства; $W_{\text{разр}}$ – энергия разряда устройства.

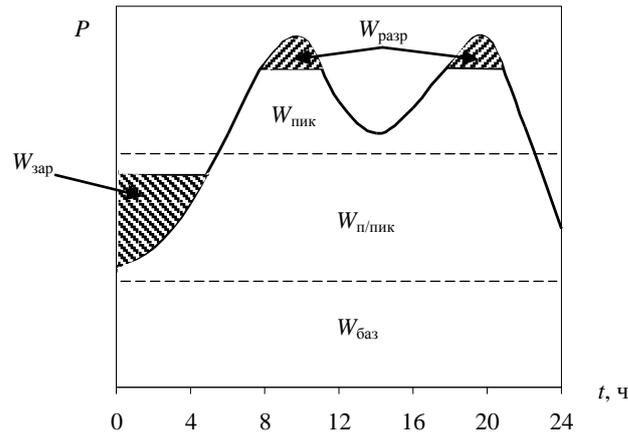


Рис. 1. Применение накопителей электроэнергии для выравнивания суточного графика работы энергосистемы

Усредненная стоимость генерации 1 кВт·ч в течение суток в энергосистеме, функционирующей без устройства для накопления электроэнергии, может быть определена следующим образом:

$$C_{\text{уср}} = \frac{W_{\text{баз}} C_{\text{баз}} + W_{\text{п/пик}} C_{\text{п/пик}} + W_{\text{пик}} C_{\text{пик}}}{W_{\text{баз}} + W_{\text{п/пик}} + W_{\text{пик}}} = \frac{C_{\Sigma}}{W_{\Sigma}}. \quad (2)$$

В случае подключения УНЭ, заряд которого происходит в полупиковой, а разряд – в пиковой зонах суточного графика, формула (2) после преобразований примет вид

$$C_{\text{уср}}^{\text{УНЭ}} = \frac{C_{\Sigma} + W_{\text{зар}} (C_{\text{п/пик}} - \eta C_{\text{пик}})}{W_{\Sigma} + W_{\text{зар}} (1 - \eta)}. \quad (3)$$

Из формул (2), (3) можно определить условие снижения усредненной стоимости генерации 1 кВт·ч в энергосистеме в случае использования УНЭ

$$C_{\text{уср}} - C_{\text{уср}}^{\text{УНЭ}} = \frac{C_{\Sigma} W_{\text{зар}} (1 - \eta) - W_{\Sigma} W_{\text{зар}} (C_{\text{п/пик}} - \eta C_{\text{пик}})}{W_{\Sigma} (W_{\Sigma} + W_{\text{зар}} (1 - \eta))} > 0. \quad (4)$$

Условие (4) выполняется всегда, если $C_{\text{пик}} > (C_{\text{п/пик}}/\eta)$. В ином случае ($C_{\text{пик}} < (C_{\text{п/пик}}/\eta)$) необходимо соблюдение между $C_{\text{уср}}$, $C_{\text{п/пик}}$ и $C_{\text{пик}}$ следующего соотношения:

$$C_{\text{пик}} < \frac{C_{\text{уср}}(1-\eta)}{\frac{C_{\text{п/пик}}}{C_{\text{пик}}} - \eta}. \quad (5)$$

Соотношение между стоимостью генерации пиковой и полупиковой электроэнергии зависит в первую очередь от вида задействованных электростанций энергосистемы. Если генерирующие мощности энергосистемы представлены различными видами станций, то $C_{\text{пик}}$ и $C_{\text{п/пик}}$, могут различаться в 1,5–2 раза или более [10]. В этом случае использование УНЭ, работающего в полупиковой (режим заряда) и пиковой (режим разряда) зонах всегда обеспечит выполнение (4). Необходимость принятия во внимание зависимости (5) может возникать только при анализе эффективности применения УНЭ в энергосистеме, состоящей из станций одного типа, удельные стоимости генерации киловатт-часа в которых различаются незначительно.

Окончательное суждение о заинтересованности генерирующей части (генерирующей компании) энергосистемы в использовании УНЭ может быть сделано только на основе сопоставления эффекта от использования устройства, заключающегося в снижении стоимости генерации 1 кВт·ч согласно (4), с удельными затратами, связанными с использованием УНЭ. Оценивая их по методикам, приведенным в [3, 10] с учетом стоимости потерь в УНЭ, получим условие, характеризующее соотношение между параметрами суточного графика работы энергосистемы, стоимостью электроэнергии в пиковой, полупиковой и базовой зонах с диапазоном целесообразных удельных капиталовложений в создание УНЭ $k_{\text{уд}}$, при которых использование УНЭ для выравнивания суточного графика нагрузки энергосистемы будет экономически оправдано

$$k_{\text{уд}} < 2 \frac{N t_{\text{зар}} \eta^2 C_{\text{пик}} - C_{\text{п/пик}}}{E + a} \frac{1}{1 + \eta}, \quad (6)$$

где N – количество суток работы УНЭ в году, согласно [10] принято равным 300; $t_{\text{зар}}$ – время заряда УНЭ в течение суток, согласно данным табл. 1 может быть принято в пределах 6–8 ч; E – коэффициент дисконтирования, принят 0,1 [3]; a – норма амортизации УНЭ, принята 0,033 [3, 4, 10].

Выражение (6) носит оценочный характер. Для более точных расчетов необходимо учитывать изменение потерь мощности в системе, вызванное работой УНЭ, точное соотношение различных типов электростанций, задействованных в покрытии суточного графика нагрузки, их доли в этом графике и другую информацию. Тем не менее по (6) возможно предварительно оценить величину удельных капитальных вложений в УНЭ, при которых применение устройств для накопления электроэнергии приводит к снижению стоимости генерации 1 кВт·ч. Так, для примера, приведенного в настоящей статье, подставляя значения $C_{\text{пик}} = 0,43995$ дол./(кВт·ч) и $C_{\text{п/пик}} = 0,22498$ дол./(кВт·ч) в формулу (6), получим, что удельная стоимость УНЭ $k_{\text{уд}}$, при которой в случае использования накопителя происходит снижение удельной стоимости генерации 1 кВт·ч, должна быть менее 2129 дол./(кВт·ч). Сопоставляя эту величину с данными табл. 1, соответст-

вующими рассматриваемому предназначению накопителя (выравнивание графика потребления – см. последние три строки табл. 1), можно предварительно оценить целесообразность применения технологий накопления электроэнергии для данного конкретного случая.

Следует отметить, что для данных, принятых в настоящей статье в качестве примера, порядок экономически целесообразных капиталовложений в УНЭ оказался сопоставим практически со всеми известными и разрабатываемыми технологиями. Этот факт еще раз подтверждает перспективность работ по созданию, совершенствованию и внедрению технологий накопления электроэнергии в большой энергетике.

Приведенные соображения полезны при проведении углубленного анализа перспектив дальнейшего внедрения накопителей электроэнергии с учетом прогнозных оценок в отношении состава генерирующих мощностей конкретных энергосистем, динамики стоимостных показателей генерации электроэнергии с использованием различных видов топлива, особенностей работы накопителей электроэнергии.

ВЫВОДЫ

1. Применение накопителей электроэнергии для решения прикладной задачи энергосистемы по выравниванию графиков нагрузки может быть одним из наиболее действенных стимулов для дальнейшего развития технологий накопления электроэнергии.

2. В статье выполнена оценка границы экономически целесообразных значений удельных капиталовложений в техническую систему накопления энергии, предназначенную решать задачу выравнивания суточного графика нагрузки, для заданных стоимостных показателей генерации. Сопоставление полученного значения с удельной стоимостью изготовления накопителей на основе известных технологий подтверждает перспективность данного направления научно-прикладных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. А б л я з о в, П. Н. Энергия впрок / П. Н. Абязов // Энергоэксперт. – 2011. – № 1. – С. 31–32.
2. В о р о п а й, Н. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы / Н. И. Воропай // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3. – С. 11–16.
3. E l e c t r i c i t y Energy Storage Technology Options. A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits // EPRI, Palo Alto, CA: December 2010. 1020676. – P. 170.
4. E y e r, J. Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide. Study for the DOE Energy Storage Systems Program / J. Eyer, G. Corey // SAND2010-0815. – 2010. – P. 232.
5. B u t l e r, P. C. Innovative Business Cases For Energy Storage In a Restructured Electricity Marketplace. Study for the DOE Energy Storage Systems Program / P. C. Butler, J. Iannucci, J. Eyer // SAND REPORT SAND2003-0362. – 2003. – P. 84.
6. E n e r g y Storage Systems Projects. Sandia National Laboratories. March 16, 2010. – <http://www.sandia.gov/ess/About/projects.html>.
7. E n e r g y Storage in the New York. A New York Independent System Operator White Paper March 2010 / D. Allen [et. al.].
8. S c h o e n u n g, S.M. Energy Storage Systems Cost Update. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program / S. M. Schoenung // SAND2011-2730. – 2011. – P. 30.

9. Накопители энергии в электрических системах: учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. Г. Тер-Газарян. – М.: Высш. шк., 1989.

10. Оценка экономической эффективности использования аккумулирующих систем в электроэнергетике / В. А. Волконский [и др.] // Проблемы прогнозирования. Отрасли и межотраслевые комплексы. – Изд-во Института народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2010. – № 26.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 22.04.2013

*К 50-летию кафедры
«Электрические системы»*

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕНЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Асп. ПЕТРАШЕВИЧ Н. С.

Белорусский национальный технический университет

Оптимальная или близкая к ней загрузка трансформаторов распределительных электрических сетей 6–10 кВ может быть обеспечена двумя основными путями [1]. Первый состоит в расчете и подключении к эксплуатируемым трансформаторам оптимальной нагрузки [1], второй – в замене установленных в сети трансформаторов на оптимальные номинальные мощности [2]. В ходе исследований, проведенных автором на примере схемы распределительной линии 10 кВ [1, 2], были определены условия глобального оптимума эффективности эксплуатации трансформаторов. Эти условия характеризуют случай идеальной оптимизации. На практике случаи идеальной оптимизации встречаются редко, так как в процессе эксплуатации реальных электрических сетей приходится учитывать различные ограничения – как технические, так и экономические. Например, для изменения загрузки установленных трансформаторов необходимо изменять состав и величину нагрузки, а это не всегда возможно и более эффективно при планировании развития сети. Поэтому наиболее практичным в эксплуатации будет замена трансформаторов. Однако одновременная оперативная замена большого числа трансформаторов в разветвленных распределительных сетях (рис. 1) представляет собой трудную, а порой и невыполнимую задачу. В таком случае оптимизацию электрической сети целесообразно проводить последовательно, трансформатор за трансформатором. На каждом таком шаге состояние сети можно определять как некий локальный оптимум.