

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Часть 1

Канд. техн. наук ЧЕРНЕЦКИЙ А. М.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: elsyst@tut.by

ANALYSIS OF STORAGE SYSTEM INFLUENCE ON ENERGY LOSSES IN POWER SYSTEM

Part 1

CHERNETSKY A. M.

Belarusian National Technical University

Предложена методика оценки влияния накопителей на потери электроэнергии. С ее помощью исследовано воздействие некоторых режимов работы устройств на потери электроэнергии для широкого диапазона вариантов задания исходных режимов. Приведены математические зависимости, определяющие критерии для максимизации снижения потерь электроэнергии.

Ключевые слова: накопители электроэнергии, снижение потерь электроэнергии, различные режимы работы.

Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

The paper proposes methodology for evaluation of storage system influence on energy losses. The methodology makes it possible to investigate influence of some operational modes of devices on energy losses for a wide range of variants pertaining to reset conditions. The paper provides mathematical dependences that determine criteria for maximization of energy loss reduction.

Keywords: energy storage system, energy loss reduction, various operational modes.

Tab. 2. Ref.: 2 titles.

Введение. Одним из показателей экономической эффективности применения устройства для накопления электроэнергии (УНЭ) в энергосистеме является анализ его влияния на потери электроэнергии. Общий подход к данной проблеме изложен в [1]. Структурный алгоритм оптимальной расстановки УНЭ, исходя из минимума потерь электроэнергии, приведен в [2].

Предлагаемая статья является первой частью исследования, направленного на изучение влияния различных режимов работы накопителей на величину потерь электроэнергии, в том числе исходя из возможных соотношений мощностей и периодов заряда/разряда накопителя, а также вариаций задания параметров режима. Интерес представляют, в частности, ответы на вопросы: всегда ли при работе УНЭ происходит снижение потерь электроэнергии, при каких условиях оно имеет место, в каких случаях снижение потерь электроэнергии будет максимальным?

Методика оценки. В расчетах примем следующие допущения. Влияние накопителя на потери электроэнергии будем оценивать, рассматривая узел нагрузки, соединенный с системой линией активным сопротивлением r и номинальным напряжением $U_{ном}$, характеризующийся в течение

суток наибольшим $P_{\text{нб}}$ и наименьшим $P_{\text{нм}}$ значениями мощности нагрузки. К узлу подключено УНЭ с коэффициентом полезного действия η , которое в режиме наименьших нагрузок потребляет активную мощность $P_{\text{зар}}$ в течение времени $t_{\text{зар}}$ (заряд устройства), а в режиме наибольших нагрузок генерирует мощность $P_{\text{разр}}$ в период $t_{\text{разр}}$ (разряд устройства), при этом

$$P_{\text{разр}} t_{\text{разр}} = \eta P_{\text{зар}} t_{\text{зар}}. \quad (1)$$

Поскольку целью исследования является получение зависимостей влияния режимов работы накопителя на потери электроэнергии, значения $P_{\text{нб}}$ и $P_{\text{нм}}$ на интервалах времени $t_{\text{зар}}$ и $t_{\text{разр}}$ примем неизменными. Условно выделим генерационную составляющую $P_{\text{Г}}$ такую, что $P_{\text{нб}} < P_{\text{Г}} < P_{\text{нм}}$. Мощность $P_{\text{Г}}$ представляет собой приемлемый для системы по экономическим или техническим соображениям уровень генерации и имеет значение при определении максимально возможных значений мощностей заряда и разряда УНЭ:

$$\begin{aligned} P_{\text{зар}}^{\text{макс}} &= P_{\text{Г}} - P_{\text{нм}}; \\ P_{\text{разр}}^{\text{макс}} &= P_{\text{нб}} - P_{\text{Г}}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом $P_{\text{зар}}$ может быть не равно $P_{\text{разр}}$. Варьируя значения генерационной составляющей $P_{\text{Г}}$, далее именуемой как базовая генерация, можно оценить влияние УНЭ на потери электроэнергии при достаточно широком диапазоне различных режимов работы накопителя, характеризующихся разными соотношениями мощностей заряда и разряда устройства.

Для дальнейшего анализа введем обозначения:

$$k = \frac{P_{\text{нб}}}{P_{\text{нм}}}; \quad \alpha = \frac{P_{\text{Г}}}{P_{\text{нб}}}; \quad \frac{1}{k} < \alpha < 1. \quad (3)$$

Потери электроэнергии на участке с сопротивлением r и номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ за время работы УНЭ, равное длительности процесса заряда и разряда устройства $t_{\text{зар}}$ и $t_{\text{разр}}$, определяются следующим образом (из соображений наглядности реактивной составляющей потерь пренебрегаем):

$$\Delta W_{\text{нак}} = \frac{(P_{\text{нб}} - P_{\text{разр}})^2}{U_{\text{ном}}^2} r t_{\text{разр}} + \frac{(P_{\text{нм}} + P_{\text{зар}})^2}{U_{\text{ном}}^2} r t_{\text{зар}}. \quad (4)$$

Необходимым и достаточным условием снижения потерь будет $\Delta W_{\text{нак}}/\Delta W < 1$, где ΔW – потери электроэнергии на участке при отсутствии УНЭ в течение сопоставимого временного интервала.

Целевая функция снижения потерь энергии в случае установки накопителя после преобразований примет вид

$$f\left(\frac{\Delta W_{\text{нак}}}{\Delta W}\right) = \frac{2 \frac{P_{\text{зар}}}{P_{\text{нм}}} (\eta k - 1) - \frac{P_{\text{зар}}}{P_{\text{нм}}} \left(\eta \frac{P_{\text{разр}}}{P_{\text{нм}}} + \frac{P_{\text{зар}}}{P_{\text{нм}}} \right)}{k^2 \eta \frac{P_{\text{зар}}}{P_{\text{разр}}} + 1} > 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой относительное изменение потерь электроэнергии при наличии/отсутствии УНЭ. Условие его положительности означает снижение потерь, связанное с работой УНЭ. Отрицательность (5) показывает, что при установке УНЭ происходит увеличение потерь электроэнергии. Универсальность выражения (5) для анализа влияния УНЭ на величину потерь электроэнергии с учетом различных вариантов режимов работы устройства заключается в том числе и в возможности ведения оценочных расчетов в относительных единицах, полагая $P_{\text{нм}}^* = 1$. В этом случае с учетом (3):

$$\begin{aligned} P_{\text{зар}}^{*\text{макс}} &= \frac{P_{\text{зар}}^{\text{макс}}}{P_{\text{нм}}} = \alpha k - 1; \\ P_{\text{разр}}^{*\text{макс}} &= \frac{P_{\text{разр}}^{\text{макс}}}{P_{\text{нм}}} = k(1 - \alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

На первом этапе исследуем влияние на потери электроэнергии режимов работы УНЭ при $P_{\text{зар}}^* = P_{\text{разр}}^*$. Подобная ситуация является достаточно типичной при выборе номинальной мощности накопителя исходя из разницы между наименьшей мощностью нагрузки и величиной базовой генерации в конкретном нагрузочном узле. При этом в режиме разряда накопитель может работать на полную мощность, т. е. номинальная мощность накопителя не превышает разности между пиковой нагрузочной мощностью и величиной базовой генерации.

При заданных условиях выражение (5) для относительного изменения потерь электроэнергии запишется следующим образом:

$$\delta\Delta W^* = f\left(\frac{\Delta W_{\text{нак}}}{\Delta W}\right) = \frac{2P_{\text{зар}}^*(\eta k - 1) - P_{\text{зар}}^{*2}(\eta + 1)}{k^2\eta + 1} > 0. \quad (7)$$

Снижение потерь электроэнергии будет иметь место при выполнении условия

$$P_{\text{зар}}^* < \frac{2(\eta k - 1)}{\eta + 1}. \quad (8)$$

Для обеспечения максимального снижения потерь электроэнергии необходимо, чтобы обеспечивалось равенство

$$\frac{\partial(\delta\Delta W^*)}{\partial P_{\text{зар}}^*} = 0, \text{ откуда } P_{\text{зар}}^* = \frac{\eta k - 1}{\eta + 1}. \quad (9)$$

Здесь необходимо обратить внимание на следующий существенный момент. Для режимов с $P_{\text{зар}} = P_{\text{разр}}$ характерны два основных варианта определения номинальной мощности накопителя. В первом из них в качестве базовой величины принимается возможная мощность заряда УНЭ $P_{\text{ном}} = P_{\text{зар}} = P_{\text{г}} - P_{\text{нм}}$. При этом должно соблюдаться соотношение $P_{\text{разр}} < (P_{\text{нб}} - P_{\text{г}})$. Иными словами, номинальная мощность накопителя позволяет использовать для заряда устройства всю избыточную мощность в системе в период

наименьших нагрузок, за счет чего частично покрывается дефицит мощности в пиковый период. Поскольку мощность заряда/разряда накопителя для заданных параметров режима определяется согласно (6), причем варьируемой величиной является параметр α , определяемый по (3), то должно соблюдаться условие

$$\alpha_{\text{гр}} < \frac{k+1}{2k}, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{гр}}$ – соотношение между уровнем базовой генерации и наибольшей мощностью нагрузки, при котором возможная мощность заряда УНЭ и необходимая мощность разряда равны между собой.

При втором варианте определения номинальной мощности накопителя за ориентир принимается необходимость полного покрытия дефицита мощности в пиковый период. Избыток мощности в период наименьших нагрузок превышает номинальную мощность накопителя, при этом часть избытка должна быть компенсирована системой. Номинальная мощность УНЭ выбирается исходя из допустимой мощности разряда $P_{\text{ном}} = P_{\text{разр}} = P_{\text{нб}} - P_{\text{г}}$, а $P_{\text{зар}} < (P_{\text{г}} - P_{\text{нм}})$.

Тогда необходимым является выполнение условия

$$\alpha_{\text{гр}} > \frac{k+1}{2k}. \quad (10^*)$$

Исходя из формул для определения $P_{\text{зар}}^*$ в зависимости от выполнения (10) либо (10*) с учетом (6), условие снижения потерь электроэнергии (8) и условие максимизации этого снижения (9) могут быть записаны следующим образом:

- при соблюдении ограничения (10) и $P_{\text{зар}} = P_{\text{г}} - P_{\text{нм}}$:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{сниж}} &< \frac{2\eta k - 1 + \eta}{k(\eta + 1)}; \\ \alpha_{\text{опт}} &= \frac{\eta(k+1)}{k(\eta+1)}; \end{aligned} \quad (11)$$

- при соблюдении ограничения (10*) и $P_{\text{разр}} = P_{\text{нм}} - P_{\text{г}}$:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{сниж}} &> \frac{k(1-\eta) + 2}{k(\eta+1)}; \\ \alpha_{\text{опт}} &= \frac{k+1}{k(\eta+1)}; \end{aligned} \quad (11^*)$$

где $\alpha_{\text{сниж}}$ – соотношение между уровнем базовой генерации и наибольшей мощностью нагрузки, определяющее, согласно (6), такую мощность заряда/разряда УНЭ, для которой снижение потерь электроэнергии при использовании УНЭ равно нулю; $\alpha_{\text{опт}}$ – аналогичный параметр для определения мощности заряда/разряда УНЭ, при которой снижение потерь электроэнергии максимально.

Выражения (11), (11*) полезны для анализа влияния УНЭ на изменение потерь электроэнергии в системе при различных вариантах соотноше-

ний (3), характеризующих параметры режима, и значений КПД накопителя η . Используя уравнения (11), (11^{*}) для вычисления согласно (6) мощности УНЭ, соответствующей максимуму снижения потерь энергии, можно видеть, что для обоих рассмотренных выше случаев она будет одинакова и равна

$$P_{\text{опт}}^{*\text{УНЭ}} = \frac{\eta k - 1}{\eta + 1}. \quad (12)$$

При этом оптимальные по условию снижения потерь режимы всегда существуют, поскольку вычисленные по (11), (11^{*}) значения $\alpha_{\text{опт}}$ удовлетворяют (10), (10^{*}) – в первом случае $\alpha_{\text{опт}}$ всегда меньше $\alpha_{\text{гр}}$, а во втором – всегда больше для любых значений k и η , как того и требуют ограничения (10), (10^{*}). Значения $\alpha_{\text{сниж}}$ в большинстве случаев также удовлетворяют условиям (11), (11^{*}). Следовательно, использование УНЭ для заданного варианта практически всегда приводит к снижению потерь электроэнергии.

Проведенные по формулам (6)–(11) расчеты, с учетом ограничений (10), (10^{*}), представлены в табл. 1. Для получения по возможности полной картины влияния УНЭ на потери электроэнергии рассмотрен достаточно широкий диапазон соотношений наибольшей и наименьшей нагрузок в течение суток. Значения потерь электроэнергии вычисляли как на самом диапазоне предварительно рассчитанных по уравнениям (11), (11^{*}) значений $\alpha_{\text{сниж}}$ и $\alpha_{\text{опт}}$, так и в его окрестностях. Ячейки, соответствующие соотношениям $\alpha_{\text{опт}}$ по условию максимизации снижения потерь электроэнергии в сети, а также значениям $\alpha_{\text{сниж}}$, после прохождения которых имеет место увеличение потерь электроэнергии, в табл. 1 выделены.

Анализ данных табл. 1 показывает, что увеличение потерь электроэнергии в результате работы УНЭ происходит только в варианте задания исходных данных $k = 2$; $\eta = 0,7$ и при соотношении $P_{\text{г}}/P_{\text{нб}}$, изменяющемся в диапазоне от 0,74 до 0,76. Во всех остальных случаях имеет место снижение потерь электроэнергии. Для каждого из соотношений наибольшей и наименьшей нагрузок отмечается симметричность режимов, рассчитанных для первого и второго случаев (различаются условием определения мощности заряда УНЭ) относительно вычисленного согласно (10) значения $\alpha_{\text{гр}}$.

Данные табл. 1 могут быть полезны при выборе параметров работы УНЭ. Наряду с жестко зафиксированными параметрами режима (наибольшая и наименьшая нагрузки) для определения мощностей заряда/разряда УНЭ имеет значение величина приемлемой для системы по экономическим соображениям базовой генерации. Критерием этой приемлемости, в том числе, является и влияние УНЭ на параметры работы системы. В этой связи фактор изменения потерь электроэнергии в зависимости от различных мощностей заряда/разряда УНЭ, определяемых исходя из приведенных в табл. 1 вариаций соотношения $P_{\text{г}}/P_{\text{нб}}$ для заданного коэффициента $k = P_{\text{нб}}/P_{\text{нм}}$ согласно (6), должен быть учтен в общем технико-экономическом анализе эффективности работы УНЭ.

Далее рассмотрим вариант работы УНЭ, при котором $P_{\text{зар}} = P_{\text{разр}}$ и соблюдается условие $P_{\text{г}} - P_{\text{нм}} = P_{\text{нб}} - P_{\text{г}}$. Частным случаем его являются пол-

ное поглощение накопителем избыточной мощности в период заряда (минимальных нагрузок) и полное покрытие дефицита мощности в течение времени разряда. Тогда:

$$P_{зар}^* = \gamma P_{зар}^{*макс} = \gamma(\alpha k - 1); \quad (13)$$

$$P_{разр}^* = \gamma P_{разр}^{*макс} = \gamma k(1 - \alpha),$$

где

$$\gamma = \frac{P_{зар}^*}{P_{зар}^{*макс}} = \frac{P_{разр}^*}{P_{разр}^{*макс}}.$$

Таблица 1

Оценка влияния УНЭ на потери электроэнергии в сети при $P_{зар} = P_{разр}$

$P_{нб}/P_{нм} = 2$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,60	0,62	0,67	0,71	0,74	0,76	0,79	0,83	0,88	0,90	
$\alpha_{гп} = 0,75$	$P_{зар} = P_{г} - P_{нм}$					$P_{разр} = P_{нб} - P_{г}$					
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,024	0,025	0,019	0,01	0	0	0,01	0,02	0,025	0,024
	0,8	0,04	0,044	0,048	0,04	0,038	0,038	0,04	0,048	0,044	0,04
	0,9	0,05	0,06	0,07	0,073	0,072	0,072	0,073	0,071	0,06	0,05
$P_{нб}/P_{нм} = 2,5$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,50	0,58	0,60	0,62	0,66	0,74	0,78	0,80	0,82	0,90	
$\alpha_{гп} = 0,70$	$P_{зар} = P_{г} - P_{нм}$					$P_{разр} = P_{нб} - P_{г}$					
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,05	0,062	0,06	0,058	0,048	0,048	0,058	0,06	0,062	0,05
	0,8	0,06	0,09	0,092	0,093	0,09	0,09	0,093	0,092	0,09	0,06
	0,9	0,076	0,11	0,117	0,12	0,124	0,124	0,12	0,117	0,11	0,076
$P_{нб}/P_{нм} = 3$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,50	0,55	0,59	0,60	0,63	0,70	0,74	0,78	0,80	0,90	
$\alpha_{гп} = 0,67$	$P_{зар} = P_{г} - P_{нм}$					$P_{разр} = P_{нб} - P_{г}$					
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,09	0,098	0,094	0,092	0,08	0,08	0,093	0,098	0,097	0,07
	0,8	0,116	0,129	0,133	0,132	0,13	0,129	0,133	0,13	0,126	0,08
	0,9	0,135	0,15	0,16	0,165	0,167	0,167	0,16	0,156	0,149	0,09
$P_{нб}/P_{нм} = 3,5$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,50	0,53	0,55	0,57	0,61	0,68	0,71	0,76	0,80	0,90	
$\alpha_{гп} = 0,64$	$P_{зар} = P_{г} - P_{нм}$					$P_{разр} = P_{нб} - P_{г}$					
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,127	0,129	0,128	0,126	0,118	0,117	0,125	0,129	0,125	0,08
	0,8	0,156	0,163	0,166	0,167	0,165	0,164	0,167	0,162	0,152	0,096
	0,9	0,18	0,19	0,196	0,199	0,202	0,202	0,2	0,189	0,173	0,11
$P_{нб}/P_{нм} = 4$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,50	0,51	0,55	0,59	0,60	0,66	0,69	0,73	0,80	0,90	
$\alpha_{гп} = 0,625$	$P_{зар} = P_{г} - P_{нм}$					$P_{разр} = P_{нб} - P_{г}$					
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,155	0,156	0,153	0,144	0,14	0,144	0,152	0,156	0,147	0,096
	0,8	0,188	0,19	0,195	0,192	0,19	0,172	0,194	0,192	0,172	0,11
	0,9	0,214	0,218	0,227	0,231	0,23	0,231	0,229	0,22	0,19	0,12

Необходимо отметить, что исходя из заданных условий, соотношение $\alpha = P_{\text{г}}/P_{\text{ноб}}$ однозначно определяется через коэффициент неравномерности нагрузки k

$$\alpha = \frac{k+1}{2k}. \quad (14)$$

Тогда в качестве оптимизируемой переменной рассматривается γ , определяемая согласно третьему выражению из (13) и представляющая собой часть от максимально возможной мощности заряда/разряда.

Подставляя (13) в целевую функцию для снижения потерь электроэнергии (7), получим следующее уравнение:

$$\delta\Delta W^* = \frac{\gamma(k-1)(\eta k-1) - \gamma^2 \frac{(k-1)^2}{4}(\eta+1)}{k^2\eta+1} > 0. \quad (15)$$

Из (15) найдем значения $\gamma_{\text{гран}}$, $\gamma_{\text{опт}}$, определяющие условие снижения потерь электроэнергии при использовании УНЭ и условие максимизации этого снижения:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{гран}} &< \frac{4(\eta k-1)}{(\eta+1)(k-1)}; \\ \gamma_{\text{опт}} &= \frac{2(\eta k-1)}{(\eta+1)(k-1)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Поскольку изначально γ не может быть больше 1, первое ограничение из (16), определяющее требование к снижению потерь электроэнергии, целесообразно учитывать только для варианта задания исходных данных $k=2$; $\eta=0,7$, для которого, как следует из (16), $\gamma_{\text{гран}}$ должно быть меньше 0,94. Для всех остальных вариантов ограничение (16) справедливо при любых возможных γ , т. е. для них всегда имеет место снижение потерь электроэнергии при работе накопителя с $P_{\text{зар}} = P_{\text{разр}}$.

Проведенные по формулам (15), (16) расчеты для различных вариантов КПД УНЭ и коэффициента неравномерности нагрузки сведены в табл. 2. Так же как и для табл. 1, в исследовательских целях расчет производили для различных соотношений наибольшей и наименьшей нагрузок в течение суток. Данные табл. 2 дополняют результаты, сведенные в табл. 1, и подтверждают тезис о снижении в большинстве случаев потерь электроэнергии при использовании УНЭ на участке сети, питающем нагрузочный узел. Максимизация снижения потерь электроэнергии от использования УНЭ не всегда имеет место при полном использовании доступной мощности заряда устройства. С увеличением КПД УНЭ точка экстремума по условию максимизации снижения потерь электроэнергии смещается в направлении увеличения соотношения $P_{\text{зар}}^* = P_{\text{зар}}^{\text{макс}}$, что означает повышение выгодности использования накопителей, номинальная мощность которых рассчитана исходя из полного поглощения избытка/покрытия недостатка электроэнергии в системе.

Таблица 2

Оценка влияния УНЭ на потери электроэнергии в сети при $P_{\text{зар}} = P_{\text{разр}}$

$\eta = 0,7$					
$P_{\text{нг}}/P_{\text{нм}}$	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000
$\gamma_{\text{опт}}$	0,470	0,590	0,650	0,680	0,710
$\delta\Delta W^{*\text{макс}}$	0,025	0,062	0,098	0,129	0,156
$\delta\Delta W^*$ при $\gamma = 1$	-0,007	0,030	0,068	0,10	0,130
$\eta = 0,8$					
$P_{\text{нг}}/P_{\text{нм}}$	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000
$\gamma_{\text{опт}}$	0,670	0,740	0,780	0,80	0,810
$\delta\Delta W^{*\text{макс}}$	0,048	0,093	0,133	0,167	0,195
$\delta\Delta W^*$ при $\gamma = 1$	0,036	0,081	0,121	0,156	0,185
$\eta = 0,9$					
$P_{\text{нг}}/P_{\text{нм}}$	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000
$\gamma_{\text{опт}}$	0,840	0,880	0,890	0,905	0,910
$\delta\Delta W^{*\text{макс}}$	0,070	0,124	0,167	0,200	0,230
$\delta\Delta W^*$ при $\gamma = 1$	0,070	0,122	0,164	0,200	0,230

ВЫВОД

Работа накопителя электроэнергии в режиме равенства мощностей заряда/разряда в абсолютном большинстве случаев приводит к снижению потерь электроэнергии в сети. Наибольшее относительное снижение потерь электроэнергии имеет место при частичном использовании доступной мощности заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. N o u r a i, A. Schafer. Load Leveling Reduces T&D Line Losses / A. Nourai, V. I. Kogan, C. M. Schafer // IEEE Transactions on Power Delivery – IEEE Trans Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, No 4. – P. 2168–2173.
2. O p t i m a l Allocation of Energy Storage Devices in Electrical Power Systems / V. A. Stroeve [et. al.] // 13th PSCC in Trondheim, June 28–July 2, 1999. – P. 510–515. http://pscce.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/psc1999_63.pdf.

REFERENCES

1. N o u r a i, A., Kogan, V. I., & Schafer, C. M. (2008) Load Leveling Reduces T&D Line Losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (4), 2168–2173.
2. S t r o e v, V. A., Styczynski, Z. A., Gremiakov, A. A., & Arachchige, C. U. (1999) Optimal Allocation of Energy Storage Devices in Electrical Power Systems. *13th Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Trondheim, Norway. Available at: <http://www.pscce-central.org/en/background/papers-from-previous-psccs/psc-1999-trondheim.html>

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 19.12.2013