

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Часть 2

Канд. техн. наук ЧЕРНЕЦКИЙ А. М.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: elsyst@tut.by

ANALYSIS OF STORAGE INFLUENCE ON ENERGY LOSSES IN POWER SYSTEM

Part 2

CHERNETSKY A. M.

Belarusian National Technical University

Получены математические зависимости, характеризующие влияние накопителей на потери электроэнергии при неравенстве мощностей заряда/разряда устройства. На их основе проведен ряд расчетов, оценивающих изменение потерь электроэнергии для широкого диапазона вариантов задания исходных режимов и мощностей заряда/разряда накопителя. С использованием полученных результатов осуществлено сопоставление различных вариантов работы накопителей исходя из критерия снижения потерь электроэнергии.

Ключевые слова: накопители электроэнергии, мощности заряда/разряда, снижение потерь электроэнергии.

Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 4 назв.

Mathematical relationships characterizing a storage impact on energy losses in case of different charge/discharge power ratio in the device have been obtained in the paper. The relationships have used as a basis for calculations that have estimated changes in energy losses for a wide scope of variants pertaining to setting up reference conditions and charge/discharge power ratio of the storage. The obtained results have made it possible to compare various storage operational modes on the assumption of an energy losses reduction criterion.

Keywords: energy storage devices, charge/discharge power ratio, energy losses reduction.

Fig. 1. Tab. 2. Ref.: 4 titles.

В первой части исследования [1] изложен общий подход к анализу влияния накопителей на изменение потерь электроэнергии. Предложена методика, реализующая его, применительно к простейшему участку сети проведены оценочные расчеты для режимов работы накопителя, характеризующегося равными значениями мощностей заряда и разряда, а также разных вариаций задания параметров режима.

Здесь рассмотрим случай, при котором $W_{\text{разр}} = \eta W_{\text{зар}}$, но $P_{\text{зар}}^* \neq P_{\text{разр}}^*$.

Он характеризует наиболее типичные условия использования устройств для накопления электроэнергии (УНЭ). Подставив в выражение (5) [1] формулы (6) для $P_{\text{зар}}^*$ и $P_{\text{разр}}^*$, после преобразований получим зависимость, определяющую условие для снижения потерь электроэнергии в результате работы УНЭ:

$$\delta\Delta W^* = f(\alpha) = 1 - \frac{\alpha^3 k^2 (\eta - 1) - \alpha^2 k (\eta - k)}{\alpha(k^2 \eta - 1) + 1 - \eta k} > 0, \quad (1)$$

где α – принятый в [1] условный коэффициент, характеризующий отношение «базовой генерации» P_r к максимально необходимой в пиковом режиме. Он имеет значение при определении максимально возможных величин мощностей заряда и разряда; $k = P_{нб}/P_{нм}$ – коэффициент, характеризующий неравномерность графика нагрузки; η – КПД накопителя.

Условию неотрицательности относительного снижения потерь энергии удовлетворяет следующее уравнение:

$$\alpha < \frac{\eta k - 1}{k(1 - \eta)}. \quad (2)$$

Дифференцируя (1) по α , можно получить уравнение для определения значений α , соответствующих экстремумам функции (1):

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}(\delta\Delta W^*) = \alpha^2 A + \alpha B + C = 0, \quad (3)$$

где

$$A = -2k(\eta - 1)(k^2 \eta - 1);$$

$$B = (k^2 \eta - 1)(\eta - k) - 3k(\eta - 1)(1 - k\eta);$$

$$C = 2(\eta - k)(1 - k\eta).$$

С учетом уравнений (2), (3) исследовали зависимости снижения потерь электроэнергии в случае использования УНЭ при различных вариантах задания исходных данных и КПД устройства. Полученные расчетные величины изменения потерь электроэнергии, а также значения коэффициента α , удовлетворяющие (3), сведены в табл. 1. В ней, как и в рассмотренных в [1] случаях, изучен широкий диапазон изменения соотношения $P_r/P_{нб}$. Особое внимание уделено поведению функции (1) в точках экстремума и их окрестностях, а также выполнению условия (2).

Для анализа большей наглядностью обладает вариант с $P_{нб}/P_{нм} = 2$ и КПД, равным 0,7, поскольку для него все критичные значения коэффициента α попадают в возможный диапазон изменения $P_r/P_{нб}$. В частности, максимальное значение уменьшения потерь электроэнергии наблюдается при $\alpha_1 = 0,56$, максимальное значение увеличения потерь электроэнергии происходит при $\alpha_2 = 0,85$. Величины α_1 , α_2 , соответствующие экстремумам (1), получены в результате решения уравнения (3). При $\alpha_0 = 0,66$, вычисленном согласно (2), изменения потерь энергии не происходит.

Для всех остальных вариантов задания исходных данных в возможный диапазон изменения α , определяемый согласно второй из формул (3) [1], попадают только значения α_1 , соответствующие максимуму снижения потерь энергии (выделены затемнением). Данные табл. 1 наглядно отражают влияние КПД накопителя и коэффициента неравномерности нагрузки на изменение потерь электроэнергии в системе.

Таблица 1

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

$P_{нб}/P_{нм} = 2,0$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,55	0,56	0,60	0,65	0,66	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,0053	0,0056	0,0047	0,001	0	-0,003	-0,007	-0,009	-0,01	-0,009
	0,8	0,0280	0,0310	0,0400	0,043	0,042	0,040	0,036	0,029	0,021	0,014
	0,9	0,0490	0,0550	0,0720	0,079	0,080	0,078	0,071	0,060	0,047	0,032
$P_{нб}/P_{нм} = 2,5$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,50	0,53	0,56	0,57	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,050	0,052	0,0510	0,050	0,047	0,040	0,030	0,020	0,015	0,004
	0,8	0,090	0,100	0,1021	0,102	0,100	0,092	0,081	0,068	0,055	0,026
	0,9	0,132	0,142	0,1450	0,146	0,144	0,135	0,122	0,105	0,086	0,044
$P_{нб}/P_{нм} = 3,0$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,35	0,40	0,48	0,49	0,50	0,60	0,65	0,70	0,80	0,90	
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,034	0,087	0,106	0,1055	0,1050	0,086	0,073	0,059	0,034	0,0134
	0,8	0,050	0,129	0,161	0,1618	0,1617	0,143	0,128	0,110	0,070	0,0350
	0,9	0,066	0,166	0,208	0,2090	0,2094	0,190	0,172	0,150	0,100	0,0510
$P_{нб}/P_{нм} = 3,5$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,35	0,40	0,43	0,44	0,443	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,132	0,156	0,159	0,1587	0,1585	0,148	0,120	0,08	0,048	0,020
	0,8	0,178	0,212	0,217	0,2180	0,2177	0,209	0,174	0,13	0,085	0,041
	0,9	0,218	0,259	0,266	0,2670	0,2700	0,259	0,220	0,17	0,115	0,057
$P_{нб}/P_{нм} = 4,0$											
$P_{г}/P_{нб}$	0,35	0,388	0,396	0,399	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	0,203	0,2100	0,2087	0,2085	0,2084	0,182	0,140	0,097	0,058	0,025
	0,8	0,260	0,2684	0,2686	0,2685	0,2685	0,243	0,197	0,146	0,095	0,046
	0,9	0,306	0,3178	0,3182	0,3183	0,3183	0,293	0,243	0,185	0,124	0,061

Таким образом, в табл. 1, 2 [1], а также табл. 1 отражено влияние на потери электроэнергии УНЭ исходя из основных вариантов их использования для выравнивания пиковых нагрузок. При этом рассмотренный спектр возможных режимов работы сети предусматривает как варианты, при которых доступная мощность заряда сравнительно невелика (нижний диапазон значений $P_{г}/P_{нб}$), так и те, при которых существует значительный резерв заряда накопителя (верхний диапазон значений $P_{г}/P_{нб}$). Очевидно (формула (4) [1], а также [2–4]), что увеличение значения мощности заряда приводит к росту ее потерь, а следовательно, и электроэнергии в сети. Снижение потерь электроэнергии происходит в режиме разряда накопителя. Кроме этого, имеет значение длительность процессов заряда/разряда.

При работе накопителя с $P_{зар} = P_{разр}$ (данные табл. 1, 2 [1]) различие между временем разряда и заряда устройства зависит от КПД УНЭ ($t_{разр} = \eta t_{зар}$). Этот вариант его использования, который может быть обусловлен в том числе и параметрами самого накопителя, исключает возможность варьирования длительности заряда/разряда устройства. С другой стороны, в ряде случаев именно он обеспечивает максимальное снижение потерь электроэнергии за счет ограничения на рост мощности заряда и стабильного показателя мощности разряда.

Работа накопителя с неодинаковыми мощностями разряда/заряда позволяет более гибко подходить к использованию устройства. Так, пусть график нагрузки характеризуется относительно кратковременным, но значительным увеличением мощности в режиме наибольших нагрузок. В режиме наименьших нагрузок существует небольшой резерв мощности заряда накопителя (определяется разницей между так называемой мощностью «базовой генерации» и наименьшей мощностью нагрузки). Тогда появляется возможность за счет более длительного использования накопителя в режиме заряда и сокращения времени разряда обеспечить относительно кратковременное покрытие накопителем значительного дисбаланса мощности в режиме наибольших нагрузок. Также в случае значительного провала спроса в часы наименьших нагрузок возможно за счет кратковременного заряда накопителя обеспечить полную компенсацию дефицита мощности в пиковом режиме. Графическая интерпретация подобных режимов для двухступенчатого графика нагрузки приведена на рис. 1а, б. Следует отметить, однако, что при использовании подобного принципа работы накопителей для одних и тех же вариантов задания исходных данных снижение потерь электроэнергии в сети может быть меньше, чем для случая с $P_{зар} = P_{разр}$.

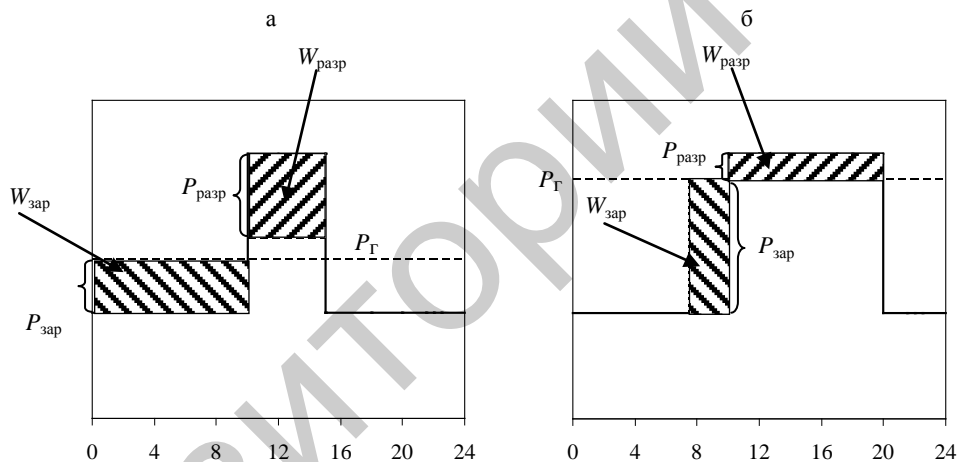


Рис. 1. Варианты использования УНЭ при $P_{зар} \neq P_{разр}$

В табл. 2 сведены взятые из табл. 1, 2 [1] и табл. 1 данные, характеризующие сравнение различных режимов работы УНЭ в сопоставимых условиях задания исходных данных исходя из мощности и времени разряда/заряда устройства, а также изменения потерь электроэнергии в сети. Затемнены ячейки с большим значением снижения потерь энергии. Обведены равнозначные варианты.

Анализ полученных численных значений позволяет выделить следующие закономерности. С увеличением соотношения $P_Г/P_{нб}$ работа накопителя при соблюдении условия $P_{зар}=P_{разр}$ приводит к большему эффекту снижения потерь электроэнергии в сети, чем при работе накопителя с $P_{зар} \neq P_{разр}$. Более того, для варианта с $P_Г/P_{нб} = 2$ и КПД УНЭ, равным 0,7, работа накопителя с $P_{зар} \neq P_{разр}$ приводит к увеличению потерь электроэнергии в системе.

Таблица 2

Влияние различных режимов работы УНЭ на потери электроэнергии

Исследуемый параметр		Режим работы УНЭ	$P_{г}/P_{нб}$			
			0,6	0,7	0,8	0,9
$P_{нб}/P_{нм} = 2,0$						
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	$P_{зар} = P_{разр}$	0,0240	0,013	0,013	0,024
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,0047	-0,003	-0,009	-0,009
	0,8	$P_{зар} = P_{разр}$	0,0400	0,046	0,046	0,040
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,0400	0,040	0,029	0,014
	0,9	$P_{зар} = P_{разр}$	0,0530	0,073	0,073	0,053
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,0720	0,078	0,060	0,032
$P_{разр}^*$		$P_{зар} = P_{разр}$	0,200	0,400	0,400	0,200
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,800	0,600	0,400	0,200
$t_{разр}$		$P_{зар} = P_{разр}$	$\eta t_{зар}$			
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	$0,25\eta t_{зар}$	$0,67\eta t_{зар}$	$1,5\eta t_{зар}$	$4\eta t_{зар}$
$P_{нб}/P_{нм} = 2,5$						
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	$P_{зар} = P_{разр}$	0,060	0,031	0,060	0,050
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,047	0,030	0,015	0,004
	0,8	$P_{зар} = P_{разр}$	0,092	0,081	0,092	0,065
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,100	0,081	0,055	0,026
	0,9	$P_{зар} = P_{разр}$	0,117	0,122	0,117	0,076
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,144	0,122	0,086	0,044
$P_{разр}^*$		$P_{зар} = P_{разр}$	0,500	0,750	0,500	0,250
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	1,000	0,750	0,500	0,250
$t_{разр}$		$P_{зар} = P_{разр}$	$\eta t_{зар}$			
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	$0,5\eta t_{зар}$	$\eta t_{зар}$	$2\eta t_{зар}$	$5\eta t_{зар}$
$P_{нб}/P_{нм} = 3,0$						
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	$P_{зар} = P_{разр}$	0,092	0,083	0,097	0,069
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,086	0,059	0,034	0,013
	0,8	$P_{зар} = P_{разр}$	0,133	0,130	0,126	0,083
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,143	0,110	0,070	0,035
	0,9	$P_{зар} = P_{разр}$	0,165	0,167	0,149	0,093
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,190	0,150	0,100	0,051
$P_{разр}^*$		$P_{зар} = P_{разр}$	0,800	0,900	0,600	0,300
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	1,200	0,900	0,600	0,300
$t_{разр}$		$P_{зар} = P_{разр}$	$\eta t_{зар}$			
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	$0,67\eta t_{зар}$	$1,22\eta t_{зар}$	$2,33\eta t_{зар}$	$5,67\eta t_{зар}$
$P_{нб}/P_{нм} = 3,5$						
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	$P_{зар} = P_{разр}$	0,118	0,122	0,125	0,084
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,120	0,080	0,048	0,020
	0,8	$P_{зар} = P_{разр}$	0,165	0,166	0,152	0,096
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,174	0,130	0,085	0,041
	0,9	$P_{зар} = P_{разр}$	0,202	0,201	0,173	0,106
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,220	0,170	0,115	0,057
$P_{разр}^*$		$P_{зар} = P_{разр}$	1,100	1,050	0,700	0,350
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	1,400	1,050	0,700	0,350
$t_{разр}$		$P_{зар} = P_{разр}$	$\eta t_{зар}$			
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	$0,79\eta t_{зар}$	$1,38\eta t_{зар}$	$2,57\eta t_{зар}$	$6,14\eta t_{зар}$

Исследуемый параметр	Режим работы УНЭ	$P_r/P_{нб}$				
		0,6	0,7	0,8	0,9	
$P_{нб}/P_{им} = 4,0$						
$\delta\Delta W^*$ при $\eta =$	0,7	$P_{зар} = P_{разр}$	0,140	0,153	0,147	0,096
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,140	0,097	0,058	0,025
	0,8	$P_{зар} = P_{разр}$	0,191	0,195	0,172	0,107
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,197	0,146	0,095	0,046
	0,9	$P_{зар} = P_{разр}$	0,231	0,230	0,191	0,115
		$P_{зар} \neq P_{разр}$	0,243	0,185	0,124	0,061
$P_{разр}^*$	$P_{зар} = P_{разр}$	1,400	1,200	0,800	0,400	
	$P_{зар} \neq P_{разр}$	1,600	1,200	0,800	0,400	
$t_{разр}$	$P_{зар} = P_{разр}$	$\eta t_{зар}$				
	$P_{зар} \neq P_{разр}$	$0,88\eta t_{зар}$	$1,5\eta t_{зар}$	$2,75\eta t_{зар}$	$6,5\eta t_{зар}$	

При полном использовании/компенсации за счет накопителей появляющегося в результате неравномерности нагрузки резерва/дефицита мощности снижение потерь электроэнергии меньше, чем при частичной компенсации флуктуаций нагрузки. Это следует из данных табл. 2 первой части, согласно которой для вариантов с $P_{зар} = P_{разр}$ при наличии возможности полного поглощения избыточной мощности/полной компенсации дефицита мощности оптимальный режим по условию минимизации потерь электроэнергии наступает при частичном использовании имеющегося резерва заряда/разряда.

Подобная закономерность объясняется тем, что рост потерь электроэнергии, имеющий место при увеличении мощности заряда до допустимых пределов, не компенсируется снижением потерь электроэнергии в период разряда. Этот эффект особо проявляется при $P_{зар} \neq P_{разр}$ и увеличении $P_r/P_{нб}$, означающем рост возможной мощности заряда устройства с одновременным снижением требуемой мощности разряда. Следует отметить, однако, что с ростом КПД накопителя разница в снижении потерь электроэнергии между вариантами с $P_{зар} = P_{разр}$ и $P_{зар} \neq P_{разр}$ уменьшается.

Возможности варьирования времени и мощности разряда являются сильными сторонами вариантов с $P_{зар} \neq P_{разр}$, имеющими преимущество исходя из критерия снижения потерь электроэнергии при небольших значениях $P_r/P_{нб}$. Как следует из данных табл. 2, с увеличением $P_r/P_{нб}$ для режимов работы с $P_{зар} \neq P_{разр}$, при наличии технической возможности, возрастают доступные величины энергий заряда/разряда накопителя. Это обстоятельство в большинстве случаев может являться решающим для определения целесообразного режима работы накопителя, при проведении более детальных технико-экономических расчетов.

ВЫВОДЫ

1. Использование накопителей электроэнергии, работающих в режиме равенства мощностей заряда/разряда, как правило, приводит к большему относительному снижению потерь электроэнергии в сети по сравнению с режимами работы накопителей с различающимися мощностями заряда/разряда устройства.

2. Работа накопителя с различающимися значениями мощностей заряда/разряда обеспечивает возможность варьирования времени и мощности

заряда/разряда устройства. Этот фактор может иметь существенное значение при комплексном технико-экономическом анализе эффективности применения накопителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернецкий, А. М. Анализ влияния накопителей на потери электроэнергии в энергосистеме. Ч. 1 / А. М. Чернецкий // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 2. – С. 21–28.
2. Nourai, A. Load Leveling Reduces T&D Line Losses / A. Nourai, V. I. Kogan, C. M. Schafer // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, No 4. – P. 2168–2173.
3. Oprima I Allocation of Energy Storage Devices in Electrical Power Systems / V. A. Stroeve [et al.] // Proceedings of the XIII International Conference on Computational Methods for Electric Power Systems Research (PSCC) in Trondheim, June 28 – July 2, 1999. – Norway, Trondheim, 1999. – P. 510–515.
4. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут [и др.]; под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

REFERENCES

1. Chernetsky, A. M. (2014) Analysis of Storage System Influence on Energy Losses in Power System. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering]*, 2, 21–28.
2. Nourai, A., Kogan, V. I., & Schafer, C. M. (2008) Load Leveling Reduces T&D Line Losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 23 (4), 2168–2173. doi: 10.1109/TPWRD.2008.921128.
3. Stroeve, V. A., Gremiakov, A. A., Arachchige, K. U., & Stychinskii, Z. A (1999) Optimal Allocation of Energy Storage Devices in Electrical Power Systems. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi Konferentsii po Vychislitel'nyim Metodam Dlia Issledovaniia Elektroenergeticheskikh Sistem (PSCC)* [Proceedings of the XIII International Conference on Computational Methods for Electric Power Systems Research (PSCC)]. Norway, Trondheim, 510–515.
4. But, D. A., Alievskii, B. L., Miziurin, S. R., & Vasukevich, P. V. (1991) *Energy Storages*. Moscow, Energoatomizdat.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 19.12.2013

УДК 621.311

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОЙ ДВУХМАШИННОЙ СИСТЕМЫ

Докт. техн. наук САФАРЯН В. С.

ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики», Республика Армения

E-mail: liliasafar@rambler.ru

MODELING AND INVESTIGATION OF ASYNCHRONOUS TWO-MACHINE SYSTEM MODES

SAFARYAN V. S.

CJSC “Scientific Research Institute of Energy”, Republic of Armenia

Рассматриваются стационарный и переходный процессы асинхронной двухмашинной системы. Приведены математическая модель стационарных и переходных режимов, статические характеристики и результаты исследования динамического процесса пуска асинхронной двухмашинной системы.

Ключевые слова: асинхронный генератор, переходный процесс, математическая модель, электромагнитный момент.

Ил. 5. Библиогр.: 4 назв.