

智能电网环境下的储能装置经济评价模型研究

智能电网是当今电力系统发展变革的重要方向,各个国家正在积极推进。储能装置的发展可以提高能源利用率,使智能电网更加安全经济有效的运行。在概括介绍储能装置的效益评价方法和储能装置分类的基础上,重点以电化学储能电池为对象,建立了储能装置综合经济评价模型和优化模型,模型中考虑了造价、人工、建设和维修等成本,以及年运行收入、网损、排放、容量和电价等收益,优化模型以储能装置的最终收益最大化为目标,以网络损耗为约束。最后通过IEEE 5节点算例对储能装置进行经济效益求解,并给出储能装置接入系统后的优化结果。结果表明,所构建模型具有可行性和有效性。

杨海波 谢宁 白荣静/上海交通大学电子信息与电气工程学院

0 引言

自进入工业时代,全球发展对电力的依赖程度越来越高,尤其在进入信息时代之后,提出了智能电网的发展需求,不仅要满足日益增长的能源需求,还要提供经济可靠的绿色环保能源。智能电网环境下的储能装置重要作用之一,即是负荷低谷时的电能加以储存,转换为用电高峰时的电能,从而体现该储能方式的效益^[1]。各种储能方式的技术参数比较如表1所示^[2]。其中,电化学储能具有响应时间快、维护成本低、

能量密度高以及灵活方便等诸多优点,已经成为目前大规模储能技术的发展方向,所以本文中所有的讨论和分析将围绕电化学储能技术进行。

目前我国已经提出了包括智能电网规划、技术支撑和发展效果三个方面综合评估经济效益。该评价体系更侧重于构建坚强电网,对于微电网和用户侧的评价缺少针对性^[3]。国外也有成熟的指标体系,如IBM智能电网成熟度模型、欧盟智能电网收益评估体系等,该体系针对智能配电网进行效益评估^[4]。文献[5]以目前市场的低储高发套利最大为目标,对压缩空气储能系统的优化运行调度模型进行数值仿真,并对其在不同商业模式下的经济效益进行了比较。文献[6]分析了随着蓄电池储能规模的变化储能系统的效益。文献[7]建立了经济模型,重点介绍了减少规划电站和减少电费支出等方面带来的经济效益。

本文首先建立了储能装置的成本经济模型、收益经济模型和优化模型。通过算例分析求出储能装置的各种成本和收益,对经济模型进行验证,同时比较了各储能装置的最终收益,然后研究了



杨海波/硕士研究生

关键词/Keywords

智能电网·
储能装置·
经济效益评价·

表1 不同储能技术参数比较^[2]

储能技术	成熟程度	容量/MW·h	功率/MW	效率(%)	寿命/周期	功率成本/(美元/kW)	能量成本/[美元/(kW·h)]
压缩空气储能	示范	250	50	70~89	>10 000	1 950~2 150	390~430
改性铅酸电池	示范	3.2~48	1~12	75~90	4 500	2 000~4 600	625~1 150
钠硫电池	商业化	7.2	1	75	4 500	3 200~4 000	445~555
全钒液流电池	示范	4~40	1~10	65~70	>10 000	3 000~3 310	750~830
锌溴液流电池	示范	5~50	1~10	60~65	>10 000	1 670~2 015	340~1 350
铁镉液流电池	示范	4	1	75	>10 000	1 200~1 600	300~400
锂离子	示范	4~24	1~10	90~94	4 500	1 800~4 100	900~1 700

储能装置接入IEEE 5节点配电系统时的最优经济配置。

1 储能装置的经济成本模型

1.1 储能装置的设备费 C_{dev}

1) 储能系统的造价为

$$C_{\text{sys}} = r_w k_w W_{\text{max}} \quad (1)$$

式中, k_w 为储能系统的单位造价, 万元/MW·h; r_w 为储能装置的固定资产折旧率; W_{max} 为储能系统的最大储能容量, MW·h, 即额定容量。

2) 转化装置的造价为

$$C_{\text{cno}} = 2k_p r_p P_{\text{max}} \quad (2)$$

式中, k_p 为转换设备的单位造价, 万元/MW; r_p 为并网设备的固定资产折旧率; 一般情况下, 蓄电池都能够以功率为 $1.5 \sim 2.5 P_{\text{max}}$ 充放电 $1 \sim 3$ h, 同时储能装置在发生停电事故时需要为重要负荷提供应急电力, 为了尽量增加其应急输出功率, 考虑电能转换设备裕量需要, 按容量为 $2P_{\text{max}}$ 规划, 加上整流/逆变设备本身设计需留有至少1.5倍的安全裕量, 可以充分利用蓄电池组的充放电特性。

储能装置的设备费 C_{dev} 为储能系统造价和转化装置的总和。

1.2 储能装置的人工费 C_{lab}

C_{lab} 是指每年所需支付给员工的费用, 包括员工的管理费、工资性收入和福利性收入等。具体计算如下, 即

$$C_{\text{lab}} = N_{\text{employee}} v_{\text{salary}} \quad (3)$$

式中, N_{employee} 为员工人数; v_{salary} 为每个员工的人工成本, 万元/人。

1.3 储能装置的建设费 C_{con}

具体储能装置的建设费, 即站址建设成本可参见文献[7]。

1.4 储能装置的运行和维护费 C_{om}

储能装置的年运行维护费用主要由其规模确定, 所以按照储能装置的固定资产费用即设备费用和建设费的比例计算, 可以得到

$$C_{\text{om}} = R_{\text{om}} (C_{\text{dev}} + C_{\text{con}}) \quad (4)$$

式中, R_{om} 为年运行和维护费用占固定资产的比例。

2 储能装置的经济收益模型

2.1 储能装置的年运行收入 R_{opr}

储能装置由于能在电力系统的高负荷即电价较高时作为供能装置提供能量, 而在电力系统的低负荷即电价较低时将多余的电能以其他形式储存起来, 因此储能装置在这个低价储电、高价卖出的过程中能够实现低储高发, 从而带来运行收益。

$$R_{\text{opr}} = (P_i^+ t_H v_{\text{gridH}} - P_i^- t_L v_{\text{gridL}}) = DW(v_{\text{gridH}} - v_{\text{gridL}}) \quad (5)$$

式中, v_{grid} 为普通工业用电价格; P_i^+ 和 P_i^- 分别为储能装置的放电功率和充电功率, 假定负荷低谷时净充电, 负荷高峰时净放电; D 为运行天数; W 为储能装置的额定容量; t_L 、 t_H 分别为储能装置在一年中的用电低谷时段的充电时间和用电高峰时段的放电时间, 即

$$t_L = \frac{W}{P_i^-} D \quad (6)$$

$$t_H = \frac{W}{P_i^+} D \quad (7)$$

2.2 储能装置的网损收益 R_{loss}

储能系统在负荷低谷充电, 此时相当于负荷量增加, 系统损耗也随之增加, 而储能系统在负荷高峰放电, 此时相当于负荷量减少, 系统损耗也随之减少。而由于分时计费制, 在负荷低谷时的电费相对于峰值时低, 所以总体上储能装置的网损收益增加。由于储能装置在负荷低谷时和高峰时的表现特性不同, 所以在计算网损时需分别讨论这两种情况所带来的网损收益。假设集中电源和负荷之间的配电网为典型放射状链式电网, 配电系统中采用星形三相接线。负荷端相电压为 u_p , 且吸收的视在功率 $S_L = P_L + jQ_L$ 。

在没有储能装置接入时可得网络总损耗为

$$P_{\text{loss0}} = \frac{(P_L^2 + Q_L^2)}{3u_p^2} R_L + \frac{(P_H^2 + Q_H^2)}{3u_p^2} R_H \quad (8)$$

而接入储能装置时可得网络损耗为

$$P_{\text{lossD}_1} = \frac{[(P_L + P_i^-)^2 + Q_L^2]}{3u_p^2} R_L$$

$$P_{\text{lossD}_2} = \frac{[(P_H - P_i^+)^2 + Q_H^2]}{3u_p^2} R_H \quad (9)$$

式中, P_{lossD_1} 、 P_{lossD_2} 分别为储能装置充电时和放电时的网损; P_L 、 P_H 分别为用电低谷和高峰时的有功功率; Q_L 、 Q_H 分别为用电低谷和高峰时的无功功率; R_L 、 R_H 分别为用电低谷和高峰时电源与负荷之间输电线路的等效电阻, 这里均等于 $r_0 L$, 注意此处并不考虑储能装置提供的无功功率和吸收的无功功率。

按分时电价分别计算网损的电力价值, 即

$$R_{\text{loss0}} = \frac{(P_L^2 + Q_L^2)}{3u_p^2} R_L t_L v_{\text{gridL}} K_1 + \frac{(P_H^2 + Q_H^2)}{3u_p^2} R_H t_H v_{\text{gridH}} K_1 \quad (10)$$

$$R_{\text{lossD}} = \frac{[(P_L + P_i^-)^2 + Q_L^2]}{3u_p^2} R_L t_L v_{\text{gridL}} K_1 + \frac{[(P_H - P_i^+)^2 + Q_H^2]}{3u_p^2} R_H t_H v_{\text{gridH}} K_1 \quad (11)$$

因此可知, 接入储能装置而带来的网损收益为

$$R_{\text{loss}} = R_{\text{loss0}} - R_{\text{lossD}}$$

$$= \frac{(-2P_L P_i^- - P_L^2)}{3u_p^2} R_L t_L v_{\text{gridL}} K_1 + \frac{(2P_H P_i^+ - P_H^2)}{3u_p^2} R_H t_H v_{\text{gridH}} K_1 \quad (12)$$

2.3 储能装置的排放收益 R_{dis}

(1) 发电机组的碳排放量

由于接入储能装置后, 储能装置在负荷高峰和低谷时的工作状态分别为放电和充电, 并且由于储能装置放电功率一般大于充电功率(充电时间一般较放电时间长), 取放电功率为额定功率的90%, 充电功率为额定功率的50%, 这就相应地改变了发电机组所需承担的负荷情况, 从而经济机组调度发生改变会带来一定的碳排放量的改变。

设电力生产过程中可能产生 n 种排放物($n=1, 2, \dots, k$), 则第 k 种排放物的变化量为 Δe_i^k 。注意由于储能装置在用电低谷和高峰时向电网提供和

吸收的功率不同, 所以要分别算两种情况时的机组调度情况。

$$\Delta e_i^k = \sum_{j \in U_{\text{on}, t}} P_{j,t} e_i^k (t_L + t_H) - \sum_{j \in U_{\text{on}, t'}} P_{j,t} e_i^k t_L - \sum_{j \in U_{\text{on}, t''}} P_{j,t} e_i^k t_H \quad (13)$$

式中, Δe_i^k 为时段 t 内, 集中电源侧发电过程中第 k 种排放物减少量; e_j^k 、 e_i^k 为不同类型发电机组的排放指标, $\text{kg}/\text{MW} \cdot \text{h}$, 具体的取值如表2所示^[8]。

表2 发电机组气体排放强度表

污染物 $[\text{kg}/(\text{MW} \cdot \text{h})]$	NO_x	SO_2	CO_2
燃煤发电	1.643	4.445	1 008.78
天然气发电	1.199	0.005	563.41

在本文的探讨中均按照表2中燃煤发电机组计算 CO_2 排放量, 即 $e_i^k = 1\,008.78 \text{ kg}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 。

(2) 储能装置的碳排放量

由于储能装置也正向着低污染、高容量及高效率的方向发展, 所以这里忽略储能装置的碳排放量。即 $\Delta e_i^{k+} = 0$

$$R_{\text{dis}} = v_2 \Delta e_i^k = v_2 \Delta e_i^{k-} \quad (14)$$

式中, v_2 为碳减排的价格, 包括单位标准碳成本与单位碳排放治理成本, 元/kg。具体取值为 CO_2 排污费用0.765元/kg, 环境价值0.023^[9]元/kg。本文中的排放收益仅仅考虑碳排放污染物。

2.4 储能装置的容量收益 R_{cap}

电力系统一般按照最大负荷来设计和规划, 但是电力负荷存在明显的负荷峰谷差, 这必然会增加电网建设费用和运营成本; 如果将储能装置接入电网, 储能装置就能在用电低谷时储存相对便宜的电能, 减少负荷的峰谷差, 从而减少配电网容量配置的浪费率, 而在用电高峰时作为电源对负荷供电, 减少所需配电网的容量规模, 相应产生一定的容量收益。

储能系统可以提供的功率为

$$E_{\text{cap}} = \eta P_D \quad (15)$$

式中, η 为储能的效率; P_D 为储能系统最大充放电功率, 即额定功率; E_{cap} 为储能系统可以提供的功率。

储能系统的容量收益为

$$R_{\text{cap}} = v_3 E_{\text{cap}} \quad (16)$$

式中, v_3 为储能容量价格, 即造价, 万元/MW。

2.5 储能装置的电价收益 R_{pri}

(1) 电网的收益

$$R_{\text{gri}} = \alpha E_{\text{cap}} \quad (17)$$

式中, α 为减少电费价格, 万元/kW。

(2) 用户的收益

本文考虑从发电端进行经济评价, 此处可不分析用户收益情况。

3 储能装置经济优化模型

基于前两节所建立的储能装置的经济模型, 可以得出储能装置接入系统所产生的最终收益为

$$\begin{aligned} F_{\text{ESD}} &= (R_{\text{opr}} + R_{\text{loss}} + R_{\text{dis}} + R_{\text{cap}} + R_{\text{pri}}) - \\ &\quad (C_{\text{dev}} + C_{\text{lab}} + C_{\text{con}} + C_{\text{om}}) \\ &= 65.692 \Delta P_{\text{lossL}} \frac{W_{\text{ESD}}}{P_{\text{ESD}}} + 40.697 \Delta P_{\text{lossH}} \frac{W_{\text{ESD}}}{P_{\text{ESD}}} + \\ &\quad 19.624 P_{\text{ESD}} - 0.6656 W + 3078.31 \end{aligned} \quad (18)$$

对于储能装置, $W_{\text{ESD}} = 3P_{\text{ESD}}$, 将式(18)进行简化可得

$$\begin{aligned} F_{\text{ESD}} &= 197.076 \Delta P_{\text{lossL}} + 122.091 \Delta P_{\text{lossH}} + \\ &\quad 17.6272 P_{\text{ESD}} + 3078.31 \end{aligned} \quad (19)$$

约束条件为

$$\begin{cases} 0 < \Delta P_{\text{lossL}} \leq \Delta P_{\text{lossL}_{\text{max}}} \\ 0 < \Delta P_{\text{lossH}} \leq \Delta P_{\text{lossH}_{\text{max}}} \\ 0 < P_{\text{ESD}} \leq 100 \\ P = B; P_{\text{L}} = (i - j) / x_{ij} \end{cases} \quad (20)$$

目标函数为

$$\begin{aligned} \max F_{\text{ESD}} &= 197.076 \Delta P_{\text{lossL}} + 122.091 \Delta P_{\text{lossH}} + \\ &\quad 17.6272 P_{\text{ESD}} + 3078.31 \end{aligned} \quad (21)$$

4 算例分析

系统则以三台机组和储能装置为例, 对所提出的储能装置经济模型及算法进行计算分析, 同时比较表1中的七种主要储能装置的经济效益。系统模型的相关参数如表3所示。

假定系统所需接入的储能装置容量为250 MW·h, 并参照表1可知储能装置的种类有很多, 这里依次

表3 系统模型相关参数表

参数	符号	数值
负荷端功率/MW	P_{L}	600
无功功率/Mvar	Q_{L}	372
集中电源到负荷端距离/km	L	30
集中电源到DG距离/km	K	16
单位长度电阻/(Ω/km)	r_0	1.98

选择压缩空气储能等装置, 选定的储能装置如表4所示。

表4 算例中选定的储能装置基本参数

	功率 P /MW	容量 W /MW·h	效率 η	功率成本 /(万元/MW)	能量成本 /(万元/MW·h)
压缩空气储能A	50	250	0.8	1 300	273
锂离子电池B	5	15	0.92	1 950	845
改性铅酸电池C	7	25	0.83	2 145	576.86
钠硫电池D	1	7.2	0.75	2 340	326
全钒液流电池E	5	22	0.68	2 050.75	513.5
锌溴液流电池F	5	25	0.63	1 197.3	549.25
铁镉液流电池G	1	4	0.75	910	227.5

按照表4中各储能装置的规格, 并且取放电功率为额定功率的80%, 充电功率为额定功率的60%, 则可根据式(6)、式(7)计算得出储能装置充、放电时间, 并整理得到表5。

表5 算例中选定的储能装置的充放电参数

	放电功率 P_{t}^+/MW	充电功率 P_{t}^-/MW	放电时间 t_{d}/h	充电时间 t_{c}/h	系统所需 电池组数
压缩空气储能A	45	25	2 027.78	3 650	1
锂离子电池B	76.5	42.5	1 192.8	2 147	17
改性铅酸电池C	63	35	1 448.4	2 607.14	10
钠硫电池D	31.5	17.5	2 896.83	5 214.29	35
全钒液流电池E	54	30	1 689.81	3 041.67	12
锌溴液流电池F	45	25	2 027.78	3 650	10
铁镉液流电池G	56.7	31.5	1 609.35	2 896.83	63

最终根据式(1)~式(5)、式(12)、式(14)、式(16)、式(17)以及表3~表5等数据计算。人工费按52万元/年·人, 需要员工共10人。若按照表1中储能装置寿命参数假定装置A、E、F和G的寿命周期都为10 000, 而B、C和D的寿命周期都为4 500, 取A的寿命为40年^[11], 其他储能装置的寿命为10年, 则将设备成本和建设费折算到每年, 并最终得出储能装置的总收益, 具体

如表6所示。

由于在分析和比较各储能装置时，假定它们的容量是相同的，由式（5）可知，装置的运行收益是相同的，而人工费和建设费由于起初假定也是相同的，所以下面主要比较设备成本、容量收益、电价收益、网损收益以及排放收益等费用。

表6 算例中选定的储能装置的经济模型最终年比较收益

(单位：万元)

储能装置	A	B	C	D	E	F	G
设备成本 C_{dev}	129.375	1447.5	1 012.513	563.1	899.85	931.875	477.33
人工费 C_{lab}	520	520	520	520	520	520	520
建设费 C_{con}	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
维修费 C_{om}	73.15	203.35	143.012	79.534	126.679	131.162 5	67.526
运行收益 R_{opr}	3 650	3 650	3 650	3 650	3 650	3 650	3 650
网损收益 R_{loss}	205.483	173.797	187.374	219.012	196.429	199.447	156.855
排放收益 R_{dis}	-977.56	-690.62	-770	-1 320.59	-853.86	-980.45	-826.21
容量收益 R_{cap}	108	183.6	151.2	75.6	129.6	108	136
电价收益 R_{pri}	720	1224	1008	504	864	720	907.2
最终受益 F_{ESD}	4 429.70	6 716.13	5 911.10	4 312.94	5 567.25	5 309.66	5 124.81

将表6中各储能装置的设备年成本进行分析比较可知，储能装置B的设备成本相对于其余装置较高，这是由于其功率成本和能量成本都比较高且其寿命周期比较短。但由于设备寿命都有十多年，所以设备年成本都相对于其他成本较低，从而储能装置较高的设备年成本并不影响其成为经济收益上最好的储能装置。

将表6中各储能装置的容量收益和电价收益分析比较可知装置B的收益最大，这是由于容量收益和电价收益都和装置的功率线性相关，而在储能装置容量一定时，装置B的额定功率最大，所以可见储能装置的额定功率大小对于经济效益有着决定性的影响。

将表6中各储能装置的网损收益分析比较可知，其余装置的网损收益均在200万元左右，而装置D的网损收益却为负值，而且将近负200万元；这是由于该装置额定功率较小，所以充电时间相对于其放电时间较长，从而产生负的网损收益时间远长于产生正的网损收益时间。由此可见，储能装置若要有正的网损收益，其额定功率不能过小，这样其充放电时间才能不至于相差过大而相应产生负的网损收益。

将表6中各储能装置的排放收益分析比较可知，所有装置的排放收益均为负值，这是由于储

能装置充电时，系统不仅仅相当于所需承担的负荷量增加，而且该增加的负荷量会相应带来更大的网损，从而充电时的碳排放量必须增加，反之放电时系统碳排放量减少，而储能装置的充电时间一般较放电时间较长，所以总体上储能装置带来的排放效益必然为负。而装置D的排放收益较其他装置的收益更少，这是由于该装置额定功率较小，所以充电时间相对于其放电时间较长，从而产生相应增加的碳排放量也较其他装置更多。

通过表6中的储能装置最终收益可知，储能装置B（锂离子电池）的最终收益最可观。

对于锂离子电池的最终收益，按照第二节中的模型进行综合优化。将锂离子电池接入IEEE 5节点系统，进行综合优化，即求 F_{ESD_max} 。

IEEE 5节点系统结构如图1所示。

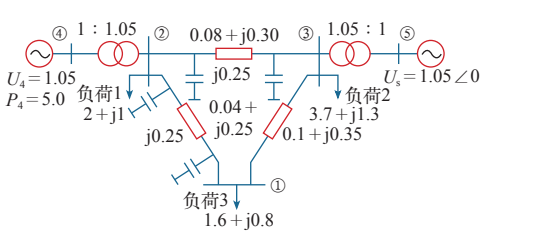


图1 IEEE 5节点系统结构图

4.1 IEEE 5节点系统

按照图1中的节点参数，发电机参数以及支路

参数分别写入Matpower中的mpc.bus、mpc.gen和mpc.branch 三个矩阵中,然后运行Matpower进行潮流计算可以得到最低电压节点1,其电压幅值为0.862(pu),因此可知 $P_{loss0}=27.943$ MW。

4.2 将储能装置接入系统

由于节点1的电压为全系统最低,所以考虑在节点1处接入储能装置,从而使得系统的经济最优化,即 F_{ESD_max} 。不断地从 $P_{ESD}=1$ MW增加到 $P_{ESD}=99$ MW,依次通过潮流计算得出接入分布式电源的网络损耗,再通过代入优化函数得到函数值。同时由于储能装置在充电和放电状态时所产生的网络损耗也不相同,所以分两种不同的工作状态来计算潮流和网络损耗。这样可以得到图2,即接入储能装置后的经济效益。

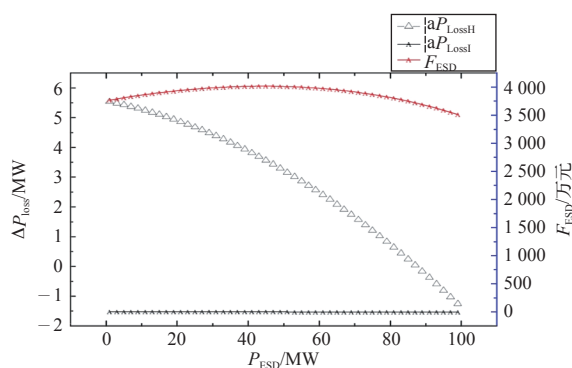


图2 ESD接入IEEE 5节点系统中的网络损耗和经济效益

由图2和计算所得数据可知,当 $P_{ESD}=44$ MW时,接入IEEE 5节点系统所带来的最优经济效益 $F_{ESD_max}=4\ 013.72$ 万元。由此可见,储能装置接入系统中会带来一定的经济收益,而且可以通过之前所建立的储能装置经济模型来得知最优化经济情况,从而为智能配电网的建设提供一定的参考价值。

5 结束语

首先介绍了当前国内外对于储能装置的经济评价情况和储能装置的分类,以电化学储能装置作为主要研究对象,对于储能装置接入电网时的两种工作状态推导建立了成本和收益模型,同时建立了综合优化模型。本文相对全面地建立了储

能装置的经济评价模型,通过具体算例分析以验证其有效性,同时研究储能装置接入智能配电网所带来的经济影响。建立经济评价模型,很容易通过比较得出何种储能方式更经济可行,对于此种储能装置可以进一步分析其各项成本所占的比例,可为储能装置的经济建设提供参考。

参考文献

- [1] 陈来军,梅生伟,等.面向智能电网的大规模压缩空气储能技术[J].电工电能新技术,2014,33(6):1-6.
- [2] 蒋凯,李浩秒,李威,等.几类面向电网的储能电池介绍[J].电力系统自动化,2013,37(1):47-53.
- [3] 王智冬,李辉,李隽,等.智能电网的评估指标体系[J].电网技术,2009,33(17):14-18.
- [4] 孙强,葛旭波,刘林,等.国内外智能电网评价体系对比分析[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(6):105-110.
- [5] He X, Lecomte R, Nekrassov A, et al. Compressed air energy storage multi-stream value assessment on the French energy market [C]. IEEE Trondheim PES Power Tech, 2011: 1-6.
- [6] Alt J T, Anderson M D, Jungst R G. Assessment of utility side cost savings from battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1112-1120.
- [7] 虞胜东,华寅飞,胡志勇.在智能电网体系下用户侧储能装置的经济性分析[J].电力系统及其自动化,2013,35(2):62-64.
- [8] 王敏,丁明.分布式发电及其效益[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(4):354-358.
- [9] 孙可.几种类型发电公司环境成本核算的分析研究[J].能源工程,2004(3):23-26.
- [10] 于尔铿,周京阳,张学松.电力市场竞价模型与原理[J].电力系统自动化,2001,25(1):24-27.
- [11] 卢强.浅谈压缩空气储能[EB].http://news.xinhuanet.com/energy/2012-06/20/c_123311268.htm.

(收稿日期:2016-05-24) EA