

含风力发电的配电网侧储能容量优化

储能设备适时地吸收和释放功率,缓解电网高峰时供电压力,因此在配电网中并入储能设备也成为热点。由于储能设备造价昂贵,在配电网中如何经济合理地选取储能设备容量已成重要问题。在含有新能源发电的配电网中并入储能设备后,分析电网企业、火电厂和风电企业受益的变化,以三方各自受益最优为目标,采用多目标算法优化储能容量,并通过实际算法验证该方法的有效性。

计仕清¹ 奚 迅¹ 李 扬² 邱泽峰¹ / 1.南京工业大学自动化与电气工程学院 2.东南大学电气工程学院



计仕清/硕士研究生

关键词/Keywords

储能设备 ·
容量配置 ·
配电网 ·
多目标算法 ·

随着储能技术的发展,该技术已逐渐应用于电力系统之中,在电网系统中可起到削峰填谷、改善电能质量及促进新能源并网等作用,储能设备已成为现阶段缓解供电压力的重要方式^[1-2]。

文献[3-4]中设计了储能设备并网的控制电路。文献[5]对蓄电池与超级电容的混合储能装置建模,采用滞环控制提高储能设备灵活性和实用性。文献[6]分析了储能系统在电网中抑制低频振荡的作用。文献[7]在暂态电网电压波动范围内,优化了储能设备容量。文献[8]中研究了储能在电网所产生的经济效益,考虑其建设成本,以储能经济最优,优化其容量配置。文献[9]中根据风电并网标准,设计了储能容量配置平抑风电波动。文献[10]建立了风储联合模型,在提高风速预测准确度的同时考虑模型的经济性,优化储能装置容量。

文献[5-7]中,储能设备并网的研究主要侧重于其实现方案:如电路设计和

波形控制。并未考虑其经济效益,不符合电力市场需求。文献[8-10]在考虑储能设备带来经济性时也只是集中于对单一的对象研究,并未考虑到储能设备对整个系统所产生的影响。

本文分析了储能设备并网后,对原电网系统中的电网企业、火电厂和风电企业带来的影响。建立了储能并网前后,三方变化收益模型,并以三方各自收益最大化的目标下,采用多目标所发,优化储能配置,并通过算例验证该方法的准确性。

模型建立

在风电场并入以火力发电为主的电网的情况下,加入储能设备。其示意图如图1所示。

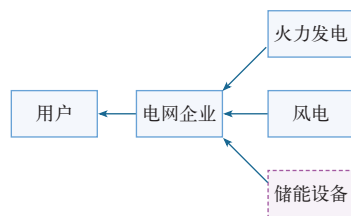


图1 储能并网示意图

1. 储能设备对电网影响

(1) 减少电网扩容

电网中某一线路负荷超过其容量时,需要对电网进行升级或增建。传统措施采用升级或者增加变电站变压器、输配电线路等方法。而储能设备则可等效为一个调峰电源,在用电低谷时进行充电,在负荷高峰时将所储能量释放到电网,减缓了电网所需规划容量^[11]。加入储能设备后电网因减少扩容所带来的

国家自然科学基金项目(51277028),江苏省高校自然科学基金面上项目(12KJB470007)。

年收益以近似的二次函数表示

$$I_{B1} = C_{y,B} \beta (2P_c P_m - P_m^2) \eta / P_c \quad (1)$$

式中, I_{B1} 为减少扩容带来的收益; $C_{y,B}$ 为配电系统年折旧费用; P_c 为储能设备拉平负荷曲线的临界充放功率; P_m 为储能设备最大充放功率; η 为储能装置充放电效率; β 为配电设备折旧率。

(2) 减少常规备用容量

由于风电输出的波动性和随机性, 电网中需配备更多的备用容量以调节功率。如表1所示, 可以看出风电并网所需容量随风电容量的增加呈线性增长趋势。

表1 不同风电容量并网所需备用容量

风电并入容量/MW	所需备用容量/MW
200	150.172
400	294.696
600	472.455
800	606.162
1 000	770.927
1 200	939.243
1 400	1 118.858

储能设备能快速调节输出/消耗功率, 可作为风力发电的备用容量。由于储能设备在某时刻用于备用的容量是变化的, 因此对储能剩余容量期望值评估其作为备用容量带来的效益。

为计算方便, 将储能设备假设能均匀充放电。则因储能设备代替备用容量, 电网所获得收益为

$$I_{B2} = 0.5e_c P_m T_1 \quad (2)$$

式中, e_c 为备用容量的单位价格, 万元/MW; T_1 为负荷低谷持续时间。

(3) 减少电网网损

储能设备在充电时可等效为一个负载, 在放电时可作为电源处理。将电网等效处理成电阻 R 和电抗 X 。负荷侧有功与无功功率 P 和 Q 、电压为 U 。则此时的电网有功网损为

$$\Delta P = \frac{(P^2 + Q^2)R}{U^2} \quad (3)$$

储能设备在负荷低谷时充电, 此时可等效为一个负载, 网损增加。在负荷高峰时放电, 此时储能设备可等效为一个电源, 网损减少。设负荷低谷时平均有功功率和无功功率为 P_l 、 Q_l 。负荷高

峰时平均有功功率和无功功率为 P_h 、 Q_h 。则在负荷低谷和负荷高峰时网损变化量为

$$\Delta P_{\text{loss}}^l = \frac{[2P_l P_{SB}^- + (P_{SB}^-)^2 + 2Q_l Q_{SB}^- + (Q_{SB}^-)^2]R}{U^2} \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{loss}}^h = \frac{[2P_h P_{SB}^+ - (P_{SB}^+)^2 + 2Q_h Q_{SB}^+ - (Q_{SB}^+)^2]R}{U^2} \quad (5)$$

式中, P_{SB}^- 、 P_{SB}^+ 为储能设备的充电和放电功率; Q_{SB}^- 、 Q_{SB}^+ 为储能设备吸收的无功功率和放出的无功功率。

因网损的变化而增加的收益为

$$I_{B3} = 365n(e_h \Delta P_{\text{loss}}^h - e_l \Delta P_{\text{loss}}^l) \quad (6)$$

式中, e_h 、 e_l 为电网的峰时电价和谷时电价; n 为典型日充放电循环次数。

2. 储能设备对火力发电厂影响

火电机组在负荷高峰时, 需启用成本较高的燃油和燃气机组。储能设备的低储高发对负荷实现空间转移, 降低了在高峰时段火电机组的发电成本, 提高了煤炭利用率。

火电厂因储能设备获得的年收益为

$$I_f = 365n P_m T_1 (\eta e_h - e_l) \quad (7)$$

3. 储能设备对风力发电影响

(1) 增加风电上网量

电网对风电上网限制导致风电场产生大量的“弃风”, 造成资源的浪费。由于我国风力发电对电网负荷的调峰效应以反调峰为主, 即风电出力曲线与负荷曲线反相关, 在负荷低谷时, 风电出力较大。因而电网接纳风电的能力主要取决于系统向下调峰的能力, 即常规机组的最小出力, 电网在低谷时接纳风电量为

$$P_w = P_{\min} - P_{\min,g} \quad (8)$$

式中, $P_{\min}$ 为负荷低谷时的功率; $P_{\min,g}$ 为发电机组的最小输出功率。

配置储能设备后能对原电网负荷起到削峰填谷的作用。在高峰时将负荷下拉, 在低谷时将负荷上移, 减小负荷的峰谷差, 提高系统向下调节空间, 增大电网接纳风电的能力。

文献[12]给出了储能装置容量与电网多接纳风电量的关系。假设储能装置日充放电一次, 则储能设备与改善负荷峰谷功率的关系为

$$W = \frac{1}{\eta_{SB}^+} \int_0^{t_0} [P_B(t) - P_{ref,max}] dt = \eta_{SB}^- \int_{t_1}^{24} [P_{ref,min} - P_B(t)] dt \quad (9)$$

式中, W 为储能容量; η_{SB}^- 、 η_{SB}^+ 为储能充放电效率; $P_{ref,max}$ 、 $P_{ref,min}$ 为经储能装置平抑后的峰谷功率; t_0 、 t_1 为风电超出机组向下调峰的时段; P_B 为日负荷曲线。

改善后, 电网提高风电的接纳量为

$$\Delta P_w = P_{ref,min} - P_{min} \quad (10)$$

则 t 时刻, 电网多接纳风电功率为

$$\Delta f_w(t) = \begin{cases} 0 & P_{wind}(t) < P_w \\ P_{wind}(t) - P_w & P_w \leq P_{wind}(t) \leq P_w + \Delta P_w \\ \Delta P_w & P_{wind}(t) > P_w + \Delta P_w \end{cases} \quad (11)$$

式中, $P_{wind}(t)$ 为风电输出曲线。

风电场增加的年收益为

$$I_{w1} = 365 C_w \int_{T_1}^{T_2} \Delta f_w(t) dt \quad (12)$$

式中, C_w 为风电上网电价; T_1 、 T_2 为负荷低谷的起始和终止时刻。

(2) 环境收益

储能设备提高了风电接入量, 减少了部分火电对外排放的污染物。所获得的年环境效益为

$$I_{w2} = 365 C_F \int_{T_1}^{T_2} \Delta f_w(t) dt \quad (13)$$

式中, C_F 为单位电量的环境收益。

4. 储能设备成本

储能设备运行成本主要包括: 站地址成本、电能转换装置成本、年维护费用和储能成本。储能系统的年运行成本为

$$C_y = \lambda_1 (C_f + k_p P_m) + \lambda_2 k_w W_m + C_m P_m \quad (14)$$

式中, W_m 为储能系统额定容量; C_m 为储能单位容量的年运行成本; λ_1 为并网设备装置的折旧率; λ_2 为储能设备的折旧率; C_f 为站地址建设成本, 万元; k_p 为转换装备成本, 万元/MW; k_w 为储能设备造价。

储能设备在电力系统中主要起辅助作用。从上述模型中可以看出, 在配电网中并入储能设备后, 原本电力系统中的参与者都可因此而获益。

假设在政府不参与储能设备情况下, 有三方参与者投资储能设备。每个参与者投资储能设备

的一部分。三方收益为

$$\max f_1 = I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} - \alpha_1 C_y \quad (15)$$

$$\max f_2 = I_f - \alpha_2 C_y \quad (16)$$

$$\max f_3 = I_{w1} + I_{w2} - \alpha_3 C_y \quad (17)$$

式中, α_1 、 α_2 和 α_3 为储能成本所占比例, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

5. 约束条件

在储能设备并网下应考虑储能设备的充放电功率

$$\begin{cases} 0 \leq P_{SB,t}^+ \leq P_m \\ 0 \leq P_{SB,t}^- \leq P_m \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} 0 < \sum_{i=1}^T P_{SB,i}^- - P_{SB,i}^+ < W_m \\ \sum_{i=1}^{24} P_{SB,i}^- - P_{SB,i}^+ = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中, W_m 为储能系统的额定容量; T 为充放电时间段中的任意时刻。

模型求解

虽然本次的优化皆是以经济收益为量纲, 但电网企业、火力发电厂和风电企业却是不同的投资者。单纯优化整个系统的综合收益会引起个别参与者收益的不均衡。因此对上述模型采用多目标优化, 折中考虑各优化对象收益。

1. 模型算法

多目标问题是指拥有两个或两个以上的目标需要同时优化, 且多个目标之间相互联系, 相互制约。区别于单目标优化, 多目标优化的解集不局限于单个全局最优解, 而是多个解的集合, 是某种程度上的折中与妥协。

一般对于多目标问题可如下描述^[13]

$$\begin{aligned} \min f(x) &= [f_1(x), \dots, f_p(x)]^T \\ \text{s.t. } g_i(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $f(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为约束条件。式(20)中有 p 个目标函数和 i 个约束条件。当多个目标都要达到最优时, 这个解集成为Pareto最优解集。

2. 基于Pareto解集多目标粒子群算法

本次结合Pareto支配排挤思想, 采用多目标粒子群算法进行优化。其算法步骤如下。

- 1) 初始种群 $P(t)$, 设置迭代次数 t 。
 - 2) 求解个体目标函数值, 根据Pareto支配关系进行排序, 并计算个体的拥挤度。采用锦标赛制选择粒子最佳位置, 从而得到种群的最佳位置。
 - 3) 更新粒子种群。
 - 4) 评价目标函数值, 进行非支配排序, 计算个体拥挤度。选择粒子最佳位置, 得到种群最佳位置。
 - 5) 满足迭代条件后, 输出最优一代粒子种群。否则返回步骤3), 继续操作。
- 本次算法的流程如图2所示。结合本次所需优化目标。将以蓄电池的额定功率以及储能容量作为目标函数变量, 通过上述算法折中优化风-储联合系统与火力发电系统收益。

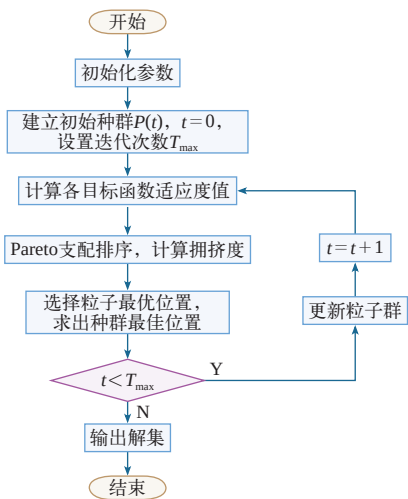


图2 算法流程

算例分析

以某地区大电网的1/10为例, 该配电网的典型日负荷曲线如图3所示。高峰时负荷为1 844.6 MW, 高峰时刻的平均负荷为1 770.7 MW、708.28 Mvar, 低谷时负荷为1 502.8 MW, 低谷时段的平均负荷为1 591.1 MW、636.12 Mvar。峰谷差为341.8 MW。火力发电机组最大出力为1 905 MW, 最小出力为1 466 MW。

该地区年风电装机容量为209.1 MW, 其典型日输出曲线如图4所示, 风电上网电价为0.06万元/MW·h。

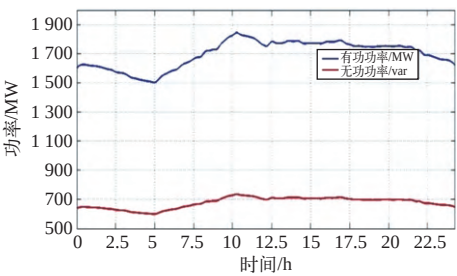


图3 典型日负荷曲线

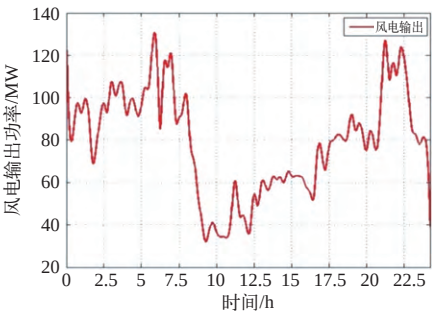


图4 风电典型日输出曲线

本次优化采用锂电池储能作为优化对象。假设储能设备日充放电一次, 在低谷时段2: 15~6: 15充电, 高峰时段在7: 00~11: 00时储能设备放电。储能设备的寿命期限为10年。

峰谷电价以及参数如表2所示。

表2 峰谷电价

	低谷	高峰
时间	[0,7] U [23,24]	[7,11] U [17,21]
电价/(万元/MW·h)	0.04	0.09

经过对三方收益进行估算, 电网企业出资储能设备成本的60%, 火力发电厂出资25%, 风力发电企业出资15%。即 $\alpha_1 = 0.6$, $\alpha_2 = 0.25$, $\alpha_3 = 0.15$, 其他的模型参数如表3所示。

表3 模型参数

参数	数值	参数	数值
$C_{y,B}/(\text{万元/MW})$	820	Q_i/Mvar	636.12
P_i/MW	105.7	P_h/MW	1 770.1
$\eta_{sb}(\%)$	90	Q_h/Mvar	708.28
$\eta_{sb}^+(\%)$	90	$k_p/(\text{万元/MW})$	200
$e_c/(\text{万元/MW}\cdot\text{年})$	40	$k_w/(\text{万元/MW}\cdot\text{h})$	400
T_f/h	4	$C_w/(\text{万元/MW}\cdot\text{h})$	0.023
P_f/MW	1 591.1	$C_m/(\text{万元/MW})$	2
$\lambda_1(\%)$	3%	$\lambda_2(\%)$	6
C_i	200万元	$C_r/(\text{万元/MW}\cdot\text{h})$	0.024
η	0.9	$\beta(\%)$	3

通过软件编程计算，可得到优化解集如图5所示。

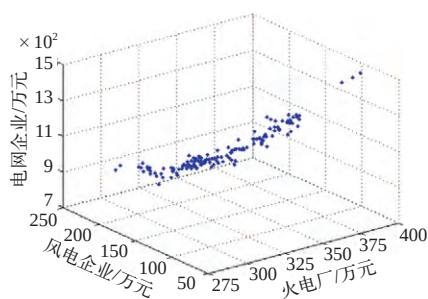


图5 优化结果

选取其中的两种方案，其方案结果如表4所示。

表4 储能容量配置

方案	P_m/MW	$W_m/\text{MW}\cdot\text{h}$
方案一	10.94	43.02
方案二	16.33	65.12

在上述配置下，各参与者所获收益如表5所示。

表5 参与者收益

(单位：万元)

方案	I_{B1}	I_{B2}	I_{B3}	I_f	I_{w1}	I_{w2}
方案一	459.4	860.4	258.3	643.8	294	112.7
方案二	629.6	1 224.4	366.5	816.2	328	125.6

现对方案一进行研究，在该方案下，储能设备一次性投资费用为28 348.7万元，年运行费用 $C_y=1\,126.12$ 万元。每年电网企业获利 $f_1=902.43$ 万元，火电企业获利 $f_2=362.27$ 万元，风电企业获利 $f_3=237.78$ 万元，年综合收益为1 502.48万元，年投资回报率为5.29%。

在并入储能设备后，低谷时段和高峰时段的负荷曲线如图6和图7所示。

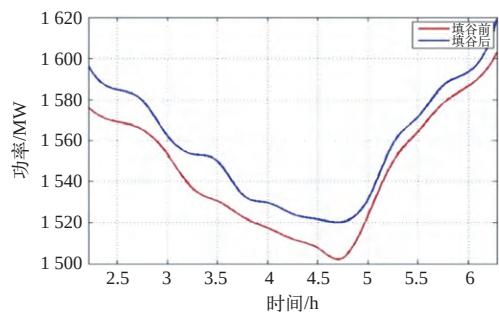


图6 填谷前后曲线对比

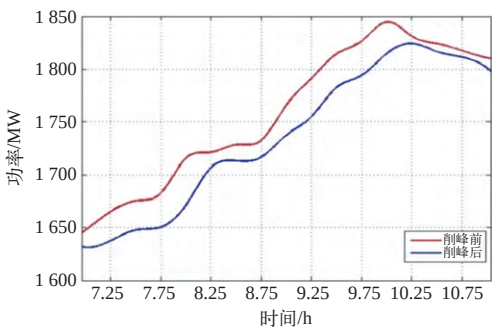


图7 削峰前后曲线对比

从上述分析结果可以看出，在电网中加入储能设备，能使电网企业、火力发电企业以及风电企业都能获得收益。电网企业的收益中，因备用容量减少而获得的收益占很大的比重。而对于风电企业而言，储能的削峰填谷使火力机组向下调峰能力加强，在加入该配置下的储能设备，低谷时风电上网限制容量从36.7 MW升至51.1 MW，全年上网量也增加了4 200 MW·h，减少了风电弃风量，提高风电的资源利用率。

以方案二作为储能的容量配置，储能设备一次性投资为35 811.6万元，年运行费用 $C_y=1\,699.52$ 万元。每年电网企业获利 $f_1=1\,200.79$ 万元，火电企业获利 $f_2=391.32$ 万元，风电企业获利 $f_3=198.47$ 万元，综合收益为1 790.58万元，年投资回报率为5.1%。

方案二中，储能设备的容量增大，除风电企业外，电网企业与火力发电厂的年收益都得到增加。各参与者的收益与储能容量的关系如图8所示。

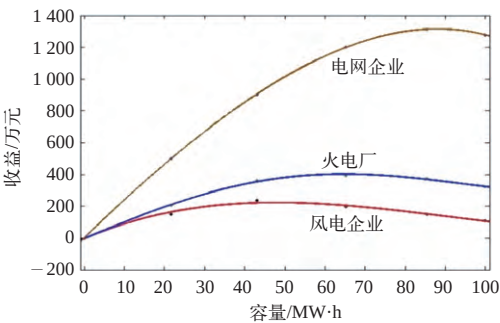


图8 各参与者收益与储能容量关系

从图8分析可知，对电网企业而言，并入的储能设备容量在85 MW·h以下时，电网企业的收益是呈现上升趋势，而火电厂则在68 MW·h后，收益就

开始呈现下降趋势,而对风电企业而言,在并入43 MW·h的收益达到顶峰,之后则开始减少。

风电场在低谷段多接入功率与储能容量关系如图9所示。

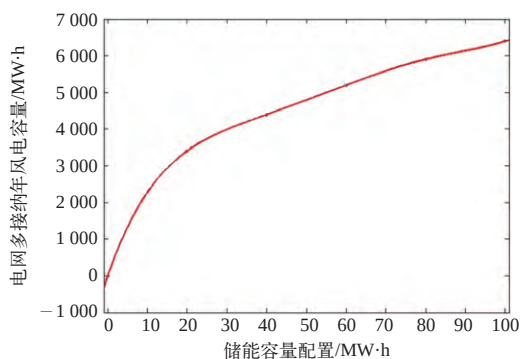


图9 储能容量与多接纳风电量关系

对比两方案,虽然方案二中储能容量增大,整个系统的综合收益也增加了,但年投资回报率却反而降低,其年投资回报率与储能容量配置关系如图10所示。

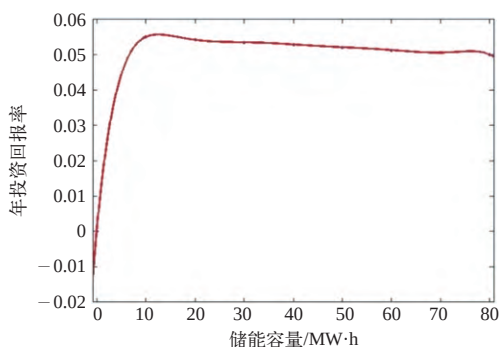


图10 年投资回报率与储能容量关系

储能设备成本的昂贵是导致年投资回报率低的主要因素。如图11所示,当储能设备的单位造

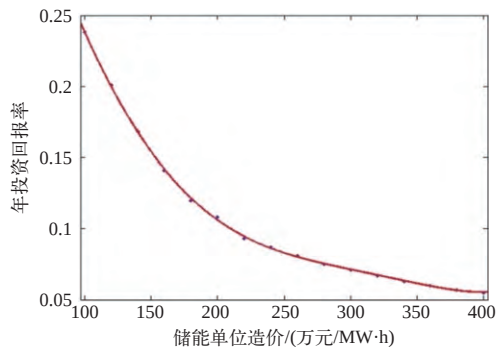


图11 储能造价与回报率关系

价降至200万元/MW·h时,储能设备的年投资回报率可达到10%,即在寿命期限内可回收储能的一次性成本,在单位造价达到180万元/MW·h时,年投资回报率可以达到12%,接近一个比较能接受的投资回报率。

结束语

本文分析了对含新能源发电的配电网中并入储能设备后对原电网系统产生的影响,在考虑各参与者的经济效益下,采用了多目标算法优化储能容量。通过分析可得到以下结论。

1) 配电网中加入储能设备能对原系统起到优化作用。对输电企业而言,可以改善电能质量,降低网损,增加电网企业受益;对火电发电厂而言,则起到了降低成本的作用;储能设备提高火电机组向下调峰能力,增加风电并网量,促进了新能源的应用。

2) 储能设备的容量配置关系到各投资者的收益。其中电网企业因并入储能设备所获收益最为明显。由于三方收益曲线与储能容量呈现不同的趋势,因此需根据实际条件选取容量配置。

3) 储能设备的年投资回报率较低的主要因素是其造价成本的昂贵。就现阶段而言,储能技术的利用还需政策的扶持,从长远角度而言,技术进步降低成本才是储能技术广泛利用的唯一手段。

本文对储能容量的优化只是对其静态的经济效益进行分析。储能装置在其他方面如抑制低频振荡、调节频率和提高暂态电压稳定这些方面难以用经济指标衡量,因此本文所得的收益相比实际情况较低。

参考文献

- [1] Jewell W T. Electric industry infrastructure for sustainability: climate change and energy storage [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [2] 严干贵, 谢国强, 李军徽, 等. 储能系统在电力系统中的应用综述 [J]. 东北电力大学学报, 2011, 31 (3): 7-12.

- [3] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄, 等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (1): 97-102.
- [4] 侯朝勇, 胡学浩, 惠东. 锂电池储能并网变换器的设计与控制 [J]. 电网技术, 2012, 36 (13): 247-251.
- [5] Haihua Z, Bhattacharya T, Duong Tran, et al. Composite energy storagesystem involving battery and ultracapacitor with dynamic energymangement in microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (3): 923-930.
- [6] 史林军, 陈中, 王海风, 等. 应用飞轮储能系统阻尼电力系统低频振荡 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (8): 29-33.
- [7] 周念成, 郭燕, 王强钢. 飞轮储能系统建模与及提高电网暂态稳定性研究 [J]. 华东电力, 2011, 39 (5): 724-728.
- [8] 颜志敏, 王承民, 郑健, 等. 配电网中蓄电池储能系统价值评估 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (2): 57-61.
- [9] Bludszuwei H, Domínguez-Navarro J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (3): 1651-1658.
- [10] 曾鸣, 李娜, 马明娟, 等. 电力市场环境下的风储联合运行系统的经济效益评估模型 [J]. 华东电力, 2012, 40 (9): 1439-1443.
- [11] Fouad Abou Chacra, Patrick Bastard, Gilles Fleury, et al. Impact of energystorage costs on economical performance in a distribution substation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (2): 684-691.
- [12] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (28): 27-35.
- [13] 肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标问题的研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 3 (5): 15-19.

(收稿日期: 2014-09-10) EA

(上接第61页)

- [5] 杨淑霞, 李翔, 黄陈锋. 区间数信息下的用电客户信用评价 [J]. 电气应用, 2005, 24 (11): 24-27.
- [6] 张铮, 闫红漫, 陆融. 电力监控系统跨平台集成方案的研究与实现 [J]. 电气应用, 2008, 27 (18): 65-68.
- [7] 靳方明. 基于客户价值分析的电力客户服务管理研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [8] 傅涛, 孙亚民. 基于PSO的k-means算法及其在网络入侵检测中的应用 [J]. 计算机科学, 2011, 38 (5): 54-55.
- [9] 魏新红, 张凯. 一种改进的PSO-Means聚类优化算法 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2011, 32 (2): 41-43.
- [10] Mukhopadhyay A, Maulik U, Bandyopadhyay S. Multiobjective genetic algorithm-based fuzzy clustering of categorical attributes [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13 (5): 991-1005.
- [11] 杨乐新, 吴宾宾, 万旭. 论历城电力的增供扩销策略与实践 [J]. 电气应用, 2013 (S1): 229-233.
- [12] 王纵虎, 刘志镜, 陈东辉. 一种改进的粒子群优化快速聚类算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2012 (5): 61-65.
- [13] Meng A, Chen Y, Yin H, et al. Crisscross optimization algorithm and its application [J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 67 (3): 218-229.
- [14] 王春叶. 基于数据挖掘的电力客户细分研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [15] 程志炯. 乐山电业局大客户细分及增值服务研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

(收稿日期: 2015-01-04) EA