

配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型

颜志敏¹,王承民¹,郑 健²,张 宇²,时志雄²,张 征²

(1. 上海交通大学 电气工程系,上海 200240;2. 上海市电力公司,上海 200122)

摘要: 根据典型日负荷曲线综合分析了配电网中蓄电池储能系统(BESS)在减少电网的扩建容量、削峰填谷节省总网损成本、低储高发套利、提高电网可靠性效益和减少新能源并网所需备用容量 5 个方面的经济价值。考虑了蓄电池储能系统的投资成本和运行维护成本,建立以年净收益为目标函数的蓄电池储能系统的最优价值评估模型,并采用结合混合罚函数的粒子群优化算法进行求解,对蓄电池储能系统的价值进行评估。算例分析表明,目前蓄电池单位造价偏高,其经济性尚欠佳。

关键词: 配电; 峰谷电价; 蓄电池; 储能; 价值评估; 成本; 可再生能源

中图分类号: TM 912

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.010

0 引言

随着大容量蓄电池储能系统(BESS)技术的发展,该技术逐渐被应用于削峰填谷、备用、改善电能质量和提高新能源供电稳定性等方面。其中最具代表性的钠硫电池和钒电池储能技术在日本、欧洲和北美等发达国家和地区得到了广泛的应用,获得了良好的效果^[1]。目前我国电力需求快速增长,电网供电压力大,在季节性用电高峰时尤其明显,调峰成为了城市配电网的一大难题。储能技术应用于电网中可以很好地削峰填谷,所以储能成为我国智能电网战略的一个重要部分,其中蓄电池储能因为具有技术成熟、可就地调节负荷和调节快速等特点,成为城市配电网中储能应用的热点。

文献[2]对蓄电池储能装置在调节负荷、功率平衡、削峰三方面的价值及投资成本进行了建模分析。文献[3-4]则考虑了蓄电池储能装置在低蓄高发套利、降低输电阻塞和延缓电网扩建三方面的价值。文献[5]建模分析了蓄电池储能装置在延缓电网扩建、提供辅助服务和提高设备利用率等方面的效益。文献[6]通过分析 PJM 电网中 BESS 在 2002 年至 2007 年这 6 年间的低蓄高发的套利价值来研究燃料价格、输电阻塞、效率、储能容量和混合燃料的影响。文献[7]比较全面地考虑了钠硫电池储能装置低蓄高发套利、延缓电网扩建、提供备用等方面效益的条件下,建立其成本-效益模型。文献[8]建立了蓄电池储能装置调节负荷的经济调度模型。文献[9]在考虑购电成本节省下建立了大用户的储能规划模型。文献[10]分析了用于负荷调节的储能装置的站址和容量的优化规划。文献[11]分析了用于调频和备用的储能装置的容量规划模型。文献[12]主要对储能装置提供的辅助服务的价值进行评估。文献

[13-15]分别对风-光-储能模式的规划进行了建模分析和评估。

以上对蓄电池储能装置进行价值评估的文献中,没有综合考虑其节省网损成本、降低可靠性成本和作为新能源发电备用容量的价值。本文以典型日负荷曲线为基础,将一日划分为 24 个小时段,综合考虑了 BESS 在减少电网扩建容量、削峰填谷降低总网损成本、低储高发套利、作为新能源发电备用容量和提高可靠性效益 5 个主要方面的经济价值以及其投资和运行维护成本,建立其价值评估模型,对电网公司建设 BESS 的经济性进行了分析。

1 BESS 的经济价值分析

BESS 的 5 个主要经济价值为通过削峰填谷减少电网扩建容量、减少电网网损成本、低储高发套利、减少新能源发电所需备用容量和提高可靠性效益。

a. 价值 1:减少电网扩建容量。

配电网容量一般需根据地区年最大负荷需求进行规划。在用电低谷时,电网的负载率低;而在用电高峰时,负载容量大幅增加,部分变电站和线路甚至会出现过载,此时电网则需要进行相应的升级扩建。而通过在过负荷点安装 BESS,利用储能站在用电低谷时对蓄电池进行充电,提高电网的负载率,而在用电高峰时,将储存的电能释放供电,实现部分负荷就地供电,减少高峰时配电网需传输的功率,从而使配电网需扩建的容量减少。所以 BESS 在减少电网扩建容量方面的收益等值到每年的现值 E_1 可表示为:

$$E_1 = \lambda_d C_d \eta P_N \quad (1)$$

其中, C_d 为配电设备的单位容量造价(万元/MW); λ_d 为配电设备的固定资产折旧率; η 为储能装置的储能效率,计及了并网设备的损耗和蓄电池的充放电损耗; P_N 为 BESS 的额定功率(MW)。

b. 价值 2:节省网损成本。

储能装置在负荷低谷充电、负荷高峰放电,从而实现削峰填谷,拉平负荷曲线,提高负荷率。研究表明:储能系统在拉平负荷曲线的过程中,能有效地减少系统的总网损^[16]。根据公式 $\Delta P = (P^2 + Q^2)R/U^2$, 可以得出蓄电池储能装置在节省网损费用方面的年收益 E_2 为:

$$E_2 = n \sum_{i=1}^{24} \frac{Re_i}{U^2} [P_i^2 + Q_i^2 - (P_i - \Delta P_i)^2 - (Q_i - \Delta Q_i)^2] \quad (2)$$

其中, $\Delta P_i = P_i^+ - P_i^-$, $\Delta Q_i = Q_i^+ - Q_i^-$, P_i^+ 和 P_i^- 分别为第 i 小时段储能装置的放电功率和充电功率(负荷低谷时净充电,负荷高峰时净放电), Q_i^+ 和 Q_i^- 分别为第 i 小时段储能装置发出的无功功率和吸收的无功功率; P_i 和 Q_i 分别为第 i 小时段负荷的有功和无功功率; e_i 为第 i 小时段的电价; n 为储能装置年投运次数; R 为上一级变电站至储能装置安装点的等效电阻; U 为储能装置接入点的电压(由于配电网的大部分损耗集中在中压配电网,而配电网中的蓄电池储能装置多接入中压配电站中靠负荷的一侧,所以本文只计及接入点所在电压等级的电网损耗)。

c. 价值 3: 低储高发套利。

在峰谷电价下,储能装置在负荷低谷、电价较低时充电,而在负荷高峰、电价较高时放电,在这个低价储电、高价卖出的过程中,实现其显性经济收益的年度值 E_3 可表示为:

$$E_3 = n \sum_{i=1}^{24} (P_i^+ - P_i^-) e_i \quad (3)$$

d. 价值 4: 新能源并网备用容量。

分布式新能源发电(主要是风电和太阳能发电)主要接入配电网,这在发达国家得到了很好的发展,我国也在积极开发利用。由于新能源发电的随机性和波动性,需要电网中配备更多的备用容量实现功率调节,蓄电池储能装置可以快速调节其消耗/发出的功率,可以代替常规电源作为新能源发电的备用容量。

大量的研究表明:风电和太阳能等新能源的有功出力分布呈现出近似的正态分布特性^[17-18]。所以采用正态分布来拟合新能源发电,则储能装置代替的备用容量的期望值可以表示为:

$$P_s = \int_{P_s}^{P_s + P_{\mu}} \frac{P}{\sqrt{2\pi} P_{\sigma}} \exp\left[-\frac{(P - P_{\mu})^2}{2P_{\sigma}^2}\right] dP \quad (4)$$

储能装置代替备用容量支出的年收益 E_4 可表示为:

$$E_4 = e_s P_s \quad (5)$$

其中, P_s 为电网消纳新能源发电而不需要配备相应的备用容量的限值; P_{μ} 为新能源发电功率的均值; P_{σ} 为新能源发电功率的波动偏差; e_s 为备用容量的价格(万元/(MW·a))。

e. 价值 5: 提高可靠性效益。

电网可靠性成本可定义为供电部门为使电网达到一定供电可靠性水平而需增加的投资成本,可靠性效益为电网达到一定供电可靠性水平而使用户获得的效益,两者均难以直接定量评估,而多采用缺电损失评价率方法进行间接估算^[19]。储能装置安装于配电站中,可以在停电时作为应急电源为部分重要用户继续供电,减少该配电站的用户停电损失。所以用缺电成本来对可靠性效益 E_5 进行衡量。

$$E_5 = R_{IEA} \lambda_s E_{ENS} [1 - p\{W_i < E_{ENS}\}] \quad (6)$$

$$E_{ENS} = T_s (1 - A_s) P_0 \quad (7)$$

$$p\{W_i < E_{ENS}\} = \frac{W_i \text{ 小于 } E_{ENS} \text{ 的小时数}}{24} \quad (8)$$

其中, R_{IEA} 为配电站所供重要用户的缺电损失评价率; λ_s 为配电站的停电率(次/a); E_{ENS} 为电网每次停电造成的重要用户电量不足期望值; T_s 为重要用户每年的用电小时数; A_s 为配电站的供电可靠度; P_0 为保障重要用户电力供应所需的功率; W_i 为第 i 小时储能装置中剩余的电量。

$p\{W_i < E_{ENS}\}$ 为储能装置投入后,停电事故发生装置剩余电量小于 E_{ENS} 的时刻的概率(即认为此时储能装置无法提供足够的电量继续供电)。 W_i 与储能装置的运行策略有关,而其运行策略是根据峰/谷/平时段而定,所以 $p\{W_i < E_{ENS}\}$ 的计算与峰/谷/平时段的划分有关。图 1 为上海地区某配电站供电用户各时段的分时电价,以谷时段的 22:00(此时所储存的电能完全释放,开始新一轮充放电)起至次日 21:00, i 分别取 1、2、3、...、24, 则 $W_i = \sum_{j=1}^i (P_j^- - P_j^+)$ 。

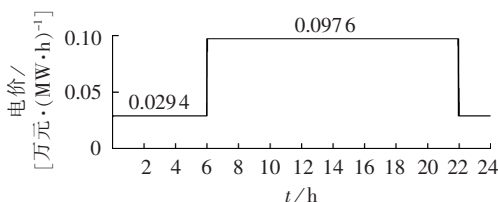


图 1 某配电站的分时电价

Fig.1 Hourly electricity price of a substation

2 投资成本分析^[5]

储能装置的投资成本主要包括储能装置的投资成本和运行维护成本(各类蓄电池储能技术的投资成本结构基本相同,主要的差别在于各种蓄电池的单位造价不同)。

a. 成本 1: 投资成本。

储能装置的投资成本主要包括电能转换设备成本(包括交流侧变压器和断路器、整流/逆变系统)和储能系统成本(主要为蓄电池组和电池组管理系统)。其年成本可表示为^[5]:

$$C_1 = 2\lambda_p k_p P_N + \lambda_w k_w W_N \quad (9)$$

其中, W_N 为蓄电池的额定蓄电量; k_p 为电能转换设备的单位造价 (万元/MW); k_w 为蓄电池系统的单位造价 (万元/(MW·h)), 钠硫电池寿命一般为电网设备的一半, 为 15 a^[7]; λ_p 和 λ_w 分别为并网设备和蓄电池组的固定资产折旧率。一般情况下, 蓄电池都能够以 $1.5P_N \sim 2.5P_N$ 的功率充放电 1~3 h, 储能装置在发生停电事故时需要为部分重要用户提供应急电力, 为了尽量增加其应急输出功率, 电能转换设备需留有足够的裕量来匹配, 所以本文按容量为 $2P_N$ 规划, 加上整流/逆变设备本身设计留有的至少 1.5 倍的裕量, 可以充分利用蓄电池组的充放电特性。

b. 成本 2: 年运行维护费用^[5]。

储能装置的年运行维护费用主要由其规模确定, 可以表示为:

$$C_2 = C_m P_N \quad (10)$$

其中, C_m 为单位容量的年运行维护成本。

3 价值评估总模型及求解方法

3.1 价值评估总模型

综合以上分析, 蓄电池储能装置的价值评估模型如式(11)所示, 约束条件如式(12)~(19)所示。

$$\max E_{\text{year}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 - C_1 - C_2 \quad (11)$$

$$\text{s.t. } P_0 \leq N(t_0) P_N \quad (12)$$

$$P_0 t_0 \leq W_N \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{24} P_i^- \leq W_N \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{24} (P_i^+ - \eta P_i^-) = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{j=i}^{i-1+t} P_j^+ \leq N(t) P_N t \quad t=1, \dots, 8 \quad (16)$$

$$\sum_{j=i}^{i-1+t} P_j^- \leq N(t) P_N t \quad t=1, \dots, 8 \quad (17)$$

$$-P_i^+ \leq Q_i^+ \leq P_i^+ \quad (18)$$

$$-P_i^- \leq Q_i^- \leq P_i^- \quad (19)$$

式(12)、(13)为储能装置作为应急电源的功率和蓄电量约束, 即储能装置应满足为重要用户提供持续时间为 t_0 、功率大于 P_0 、电量大于 $P_0 t_0$ 的功率和蓄电量要求; 式(14)和(15)为充放电电量约束; 式(16)和(17)为正常充放电应满足储能装置充放电脉冲系数约束; 式(18)和(19)为储能装置的无功功率约束。约束条件中各式为数值上的比较。

在配电站发生停电事故时, 储能装置作为应急电源为部分重要用户继续供电, 需要实现大功率放电, 这时它的放电功率受蓄电池充放电脉冲系数 $N(t)$ (即蓄电池以 $N(t)$ 倍的额定功率充放电, 其允许持续的时间为 t) 的限制^[20]。而在正常的充放电过程中, 也可以允许蓄电池超过额定功率运行一定的时间以进行调峰。本文以钠硫电池为例进行分析, 钠硫电

池的充放电脉冲系数见文献[7]。

3.2 求解方法及流程

本文中模型采用文献[21]中的粒子群优化算法结合混合罚函数法进行求解。设计算法时所需注意的其他问题见文献[21], 在此不再赘述。

由于本文的模型中 $p\{W_i < E_{\text{ENS}}\}$ 是根据 P_i^- 和 P_i^+ 计算得到的一系列离散值, 计算每个粒子的适应值之前需先计算 $p\{W_i < E_{\text{ENS}}\}$ 。同时模型中 E_4 所含的积分表达式难以求得代数表达式, 利用辛普生公式进行计算。

本文的粒子群优化算法结合混合罚函数法的算法流程如图 2 所示。

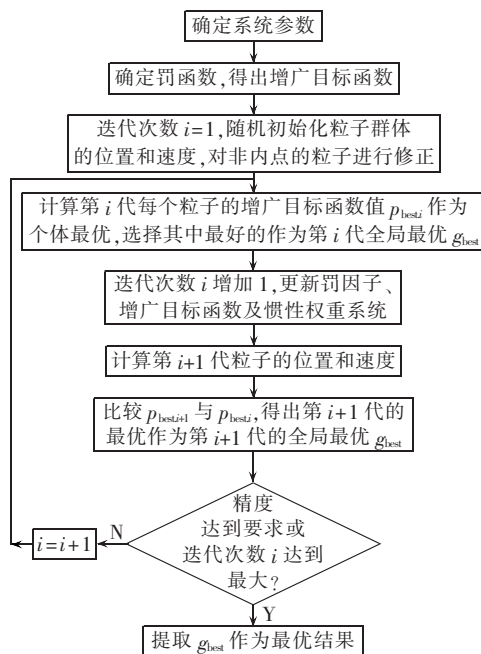


图 2 模型求解流程图

Fig.2 Flowchart of model solving

4 算例分析

取上海地区某 10 kV 配电站的典型日负荷数据为例进行分析, 图 3 为其典型日负荷的有功和无功曲线。假设钠硫电池储能装置安装于其 10 kV 母线上, 该配电站的上一级高压配电站接入 15 MW 的风电机组, 2 级配电站距离 1.6 km, 采用 YJV22-400 mm²、电阻为 0.0778 Ω/km 的电缆相连。电价曲线见图 1, 其他相关数据为: $P_\mu=7.5$ MW, $P_o=7.5$ MW, $P_a=3$ MW,

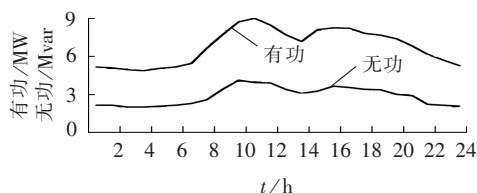


图 3 配电站的典型日负荷曲线

Fig.3 Typical daily load curve of a substation

$R_{IEA}=6$ 万元/(MW·h), $T_s=8760$ h, $A_s=99.973\%$, $P_0=3.5$ MW, $\lambda_s=0.34$ 次/a, $\eta=80\%$, $e_s=40$ 万元/(MW·a), $n=360$, $C_d=100$ 万元/MW, $C_m=2$ 万元/MW, $k_p=100$ 万元/MW, $k_w=192$ 万元/(MW·h)^[7], $\lambda_d=3\%$, $\lambda_p=3\%$, $\lambda_w=6\%$, $t_0=1$ h。本文采用 MATLAB 语言编程进行求解。

求解得到储能装置的充放电功率如图 4 所示,图中有功大于 0 的部分为 BESS 放电,小于 0 的部分为 BESS 充电。由于配电站无功不足,所以储能系统始终为系统提供无功补偿,其无功功率输出如图 5 所示。BESS 的最佳额定功率和额定蓄电量分别为 $P_N=1.52$ MW 和 $W_N=12.68$ MW·h。储能装置各部分收益和成本如下: $E_1=3.648$ 万元, $E_2=8.01$ 万元, $E_3=222.2$ 万元, $E_4=21.74$ 万元, $E_5=4.93$ 万元, $C_1=155.2$ 万元, $C_2=3.04$ 万元, $E_{\text{year}}=102.288$ 万元。其年净收益为 102.288 万元,相对于 2738.56 万元的一次性固定投资,其平均年投资回报率只能达到 3.7%。

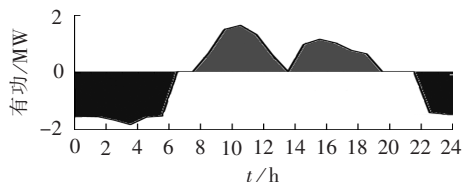


图 4 BESS 的充/放电功率

Fig.4 Charge/discharge power curve of BESS

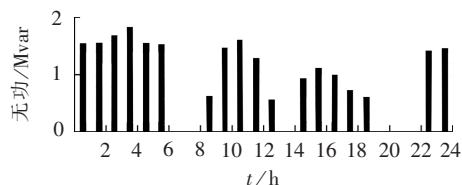


图 5 BESS 提供的无功功率

Fig.5 Reactive power provided by BESS

BESS 的投资回报率偏低的原因主要为:在目前的应用规模和制造条件下,蓄电池造价偏高;在目前的技术条件下,BESS 的能量转换效率还不够高,仅能达到 80% 左右;峰谷电价差不够大,极大影响了 BESS 的经济性,在发达国家的电力市场中,峰荷电价能达到谷荷电价的 4~5 倍;算例中在计算 BESS 提高可靠性效益时,只计及了电网故障导致的年停电次数,使得该部分收益相比实际偏低,因为错峰用电每增加一次,则可靠性收益相应增加 14.5 万元,极大提高了装置的经济性。

5 结论

本文比较全面地考虑了 BESS 多方面的价值,建立了电网中 BESS 的经济价值评估模型,同时分析确定了其最佳额定功率、额定蓄电量 and 对应规模下的投资经济性。最后利用上海某配电站的数据为例进

行评估分析,通过分析可以看出:目前 BESS 的单位造价偏高,其经济性不够好,难以实现商业化推广应用,需要进一步提高技术性能和降低造价,在试验示范阶段,宜建于电网供电紧张的重要负荷点。

参考文献:

- [1] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7):1-9.
- [2] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C, et al. Value analysis of battery energy storage applications in power systems[C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. Atlanta, GA, USA: [s.n.], 2006:2206-2211.
- [3] LEOU Rongceng. An economic analysis model for the energy storage systems in a deregulated market[C]//IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. Singapore: [s.n.], 2008:744-749.
- [4] REDRODT R C, ANDERSON M D, KLUCZNY R M. Economic models for battery energy storage: improvements for existing methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 659-665.
- [5] CHACRA F A, BASTARD P, FLEURY G, et al. Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 684-691.
- [6] SILSHANSI R, DENHOLM P, JENKIN T, et al. Estimating the value of electricity storage in PJM: arbitrage and some welfare effects[J]. Energy Economics, 2009, 31(2): 269-277.
- [7] KAZEMPOUR S J, MOGHADDAM M P. Economic viability of NaS battery plant in a competitive electricity market[C]//2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy: [s.n.], 2009:453-459.
- [8] LO C H L, ANDERSON M D. Economic dispatch and optimal sizing of battery energy storage systems in utility load-leveling operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 824-829.
- [9] LEE Tsungying, CHEN Nanming. Determination of optimal contract capacities and optimal sizes of battery energy storage systems for time-of-use rates industrial customers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(3): 562-568.
- [10] JUNG Kyunghee, KIM Hoyong, RHO Daeseok. Determination of the installation site and optimal capacity of the battery energy storage system for load leveling[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(1): 162-167.
- [11] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1259-1266.
- [12] MIYAUCHI H, TASHIRO D. Value evaluation of ancillary service offered by energy storage systems[C]//Transmission & Distribution Conference and Exposition: Asia and Pacific, 2009. Seoul, Korea: [s.n.], 2009:1-4.
- [13] HIDA Y, ITO Y, YOKOYAMA R, et al. A study of optimal capacity of PV and battery energy storage system distributed in demand side[C]//2010 45th International Universities Power

- Engineering Conference(UPEC). Cardiff,Wales,UK:[s.n.],2010:1-5.
- [14] EKREN O,EKREN B Y,OZERDEM B. Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage—a case study[J]. Applied Energy, 2009,86(7-8):1043-1054.
- [15] DIAF S,BELHAMEL M,HADDADI M,et al. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island[J]. Energy Policy,2008,36(2):743-754.
- [16] 姚遥,刘东,廖怀庆,等. 含储能电池的配电网降损分析[J]. 华东电力,2010,38(5):677-680.
- YAO Yao,LIU Dong,LIAO Huaiqing,et al. Analysis on loss reduction of distribution network with energy storage battery[J]. East China Electric Power,2010,38(5):677-680.
- [17] 于晗,钟志勇,黄杰波,等. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):20-24.
- YU Han,CHUNG C Y,WONG K P,et al. A chance constrained transmission network expansion planning method associated with load and wind farm variations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(2):20-24.
- [18] 姚国平,余岳峰,王志征. 如东沿海地区风速数据分析及风力发电量计算[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):11-14.
- YAO Guoping,YU Yuefeng,WANG Zhizheng. Wind data analysis and wind power generation calculation[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):11-14.
- [19] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(15):33-35.
- ZHANG Yan. Research on cost-benefit analysis of electric power network reliability planning[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(15):33-35.
- [20] 丁明,徐宁舟,毕锐. 负荷侧新型电池储能电站动态功能的研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):1-7.
- DING Ming,XU Ningzhou,BI Rui. Dynamic model of new-type battery energy storage system at demand side[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):1-7.
- [21] 崔鹏程,陈明榜,向铁元. 基于粒子群优化算法与混合罚函数法的最优潮流计算[J]. 电网技术,2006,30(增刊):191-194.
- CUI Pengcheng,CHEN Mingbang,XIANG Tiejuan. Optimal power flow by particle swarm optimization and multi-SUMT method[J]. Power System Technology,2006,30(Supplement):191-194.

作者简介:

颜志敏(1983-),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事电力系统规划方面的研究(E-mail:scut_ym@126.com);

王承民(1970-),男,辽宁大连人,副教授,博士,主要从事电力系统规划和电力系统经济运行方面的研究(E-mail:wangchengmin@sjtu.edu.cn)。

Value assessment model of battery energy storage system in distribution network

YAN Zhimin¹,WANG Chengmin¹,ZHENG Jian²,ZHANG Yu²,SHI Zhixiong²,ZHANG Zheng²

(1. Electric Engineering Department,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;

2. Shanghai Electric Power Company,Shanghai 200122,China)

Abstract: The economic value of BESS(Battery Energy Storage System) in distribution network are comprehensively analyzed based on the typical daily load curve in five aspects:decrease of grid expansion capacity, reduction of total net loss cost by peak load shifting,arbitrage of energy storage,increase of grid reliability benefit,and reduction of capacity reserve for grid-connection of renewable energy resource. The optimal value assessment model of BESS,which considers the investment and maintenance costs and takes the annual net income as its objective,is established and solved by the particle swarm optimization algorithm combined with the multi-SUMT function. Case analysis shows that,due to the unit cost of battery is high at present,the economy of BESS is poor.

Key words: electric power distribution; peak / valley electricity price; electric batteries; energy storage; value assessment; costs; renewable energy resources