

DOI: 10.7667/PSPC152082

提高光伏并网渗透能力的电价激励负荷转移策略研究

石磊磊^{1,2}, 胡建昭¹, 韩胜峰¹, 杨健¹, 白莉研¹, 宫龙威², 刘延华³

(1. 国网河北省电力公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001; 2. 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学电气工程学院), 河北 秦皇岛 066004; 3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: 提出一种计及光伏出力的实时电价激励机制以实现负荷转移、提高光伏并网渗透率。根据光伏发电曲线和需求响应特性建立了反映光伏出力的实时电价模型和用户的电价响应模型。结合实时电价和用户响应模型构建了负荷转移的实现方法和流程, 从而鼓励用户主动将可转移负荷向光伏出力大的时段转移, 提高光伏出力时段的净负荷值。算例表明所提方法能够有效削弱光伏出力波动性对电网的不利影响, 提高电网接纳光伏发电的能力。

关键词: 光伏发电; 光伏渗透率; 光伏消纳能力; 负荷转移机制; 实时电价

An electricity price excited load transfer strategy for improving PV penetration ability to power systems

SHI Leilei^{1,2}, HU Jianzhao¹, HAN Shengfeng¹, YANG Jian¹, BAI Liyan¹, GONG Longwei², LIU Yanhua³

(1. Xingtai Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Company, Xingtai 054001, China; 2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: A PV output related real-time electricity price exciting strategy is proposed to achieve load transfer and PV penetration improvement. The PV output based electricity price model and the price response model are established according to PV generating curves and the demand response characteristics. Combined with real time price and demand response model, the implementation as well as the flowchart of load transfer strategy is constructed. Example shows that the proposed method can reduce the adverse impact caused by the PV output fluctuation, and improve PV penetration rate to power systems.

Key words: PV generation; PV penetration rate; PV accommodation capacity; load transfer mechanism; real-time electricity price

0 引言

光伏发电出力具有周期性和波动性特点, 大规模电站式和分布式光伏并网后, 如果负荷不能有效消纳其出力, 将会对电网的安全运行带来挑战^[1]。探索有效措施提高电力系统对光伏电源的接纳能力是目前亟待研究的热点问题^[2-3]。

文献[4]从光伏容量渗透率角度分析了光伏电源并网对电网产生的影响, 提出通过合理降低电网最小允许负荷水平来提高电网的光伏接纳能力。文献[5]将太阳辐射随机序列模型引入到光伏接纳能力模型中, 运用机会约束规划理论建立多目标约束的非线性数学模型, 以遗传算法和蒙特卡罗法为基础进行求解和验证。文献[6]提出负荷聚集商(Load aggregator)概念, 通过第三方机构将具有可利用价

值的需求响应资源进行整合并参与市场调节, 利用需求响应技术挖掘和利用负荷资源。

本文从负荷转移角度出发, 建立利用实时电价和用户响应来转移负荷的光伏消纳策略。通过反映光伏发电系统出力特征的实时电价机制, 激励负荷对电价进行动态响应, 引导用户积极消纳本地光伏出力, 提高电网接纳光伏的能力。

1 电网接纳光伏发电能力分析

当大量光伏电源并网后, 通常将光伏发电系统出力总和当成一种负值的特殊负荷, 与传统负荷叠加得到电网实际供给的净负荷(Net Load)^[7]。光伏容量渗透率定义如式(1)。

$$P_c = \frac{C_{pv, sum}}{P_{max}} \quad (1)$$

式中： P_c 为光伏容量渗透率； $C_{pv, sum}$ 为光伏并网发电系统装机总量； P_{max} 为电网负荷峰值。

当光伏容量渗透率 P_c 升高到一定程度，电力系统净负荷会变为负值，导致潮流反向，出现功率倒送现象。这将给配电网电压调节和继电保护造成不利影响^[8]。因此，在对传统电网的电压调整和保护规则进行升级改造前，尽量避免发生大功率倒送现象。当电力系统各馈线的实际最小负荷值不小于其最小允许负荷值时，电力系统不会发生功率反送现象。

光伏能量渗透率定义如(2)式所示。

$$P_e = \frac{E_{pv, sum}}{W_{sum}} \quad (2)$$

式中，能量渗透率 P_e 表示光伏电源年发电量 $E_{pv, sum}$ 与电力系统年耗电量 W_{sum} 的比值，该值反映了光伏系统在能量方面对传统电力系统的渗透情况，是衡量不同地区电力系统利用光伏能源能力的指标。

图 1 所示为电力系统光伏容量渗透率与能量渗透率关系曲线。随着 P_c 的上升，光伏能量渗透率 P_e 在 P_c 较小阶段近似成正比关系；但随着 P_c 的进一步增大， P_e 增势趋于放缓。

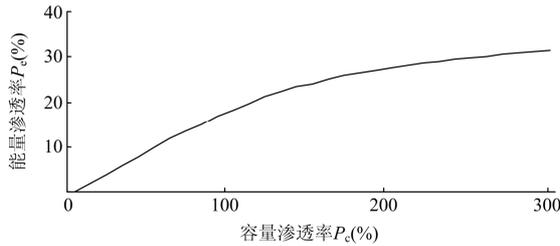


图 1 光伏容量渗透率与能量渗透率关系曲线

Fig. 1 Curve of the relationship between photovoltaic capacity permeability and energy permeability

光伏系统并网容量和光伏能源利用率之间并不完全成正比关系。在光伏并网容量较小阶段可近似认为光伏能源利用率为 100%。但随着 P_c 的升高，接入的光伏电源容量接近或达到光伏容量渗透率极限 $P_{c, max}$ ，此时光伏渗透率不再与其容量渗透率成正比升高，会有更多的光伏发电不能被有效利用。

以某地区 24 h 负荷数据为例进行分析。该区域电力系统的最小允许负荷为 0.1p.u.，当光伏容量渗透率 P_c 分别是 40% 和 80% 时的电力系统净负荷如图 2 所示。在负荷曲线以下，两条净负荷曲线围成的白色区域面积代表光伏发电有效利用量。系统最小负荷线与两条净负荷曲线围成的深色阴影区域面积代表最小负荷时无法利用的光伏发电量。两侧浅色阴影区域面积代表电力系统的实际供电量。从如图 2 可以看出，随着 P_c 的增加，不可用光伏发电量

迅速增加，但可用光伏发电量面积并没有显著增加。这表示光伏能源的弃用率随着光伏渗透率的升高而显著增加，光伏能源的利用率随之降低。

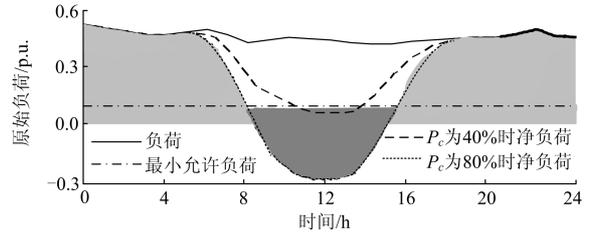


图 2 某地区晴天条件下光伏利用情况

Fig. 2 Photovoltaic utilization conditions in a sunny day in a given area

以上分析可见，电力系统负荷特性与净负荷特性在时间尺度上不匹配，是限制光伏渗透率的主要原因之一；采用表征光伏实时出力特征的负荷转移机制，增加电网在光伏出力高峰时段的净负荷量，可有效提高电网对光伏发电的接纳能力。

2 考虑光伏出力的实时电价和用户响应特性

负荷转移是一种需求响应方式，针对削峰填谷、环保或节能减排等目的，利用电力用户对价格或激励的响应引导用户的用电行为，调整用电设备的使用时间。改变原有的用电时间分布特征是负荷转移的基本任务^[9-12]。通过价格引导用户的需求响应行为能更好的完成负荷转移任务。

2.1 计及光伏系统出力的实时电价模型

光伏出力特征和用户的用电行为之间不存在必然联系，而用户用电行为为受电价的影响在根本上来源于电力用户本能的趋利响应。因此，通过建立反应光伏出力特征的电价机制能够在光伏发电与用户用电行为之间建立联系。该电价机制需要实时反应光伏发电的出力特征，并作为负荷转移的激励信号引导用户改变用电行为，实现负荷转移。有光伏出力时段，电价与光伏出力成比例降低，以引导用户在该时段用电；无光伏出力时段，电价相对升高，引导用户减少该时段的用电。

构建电价模型的输入变量为光伏出力曲线 Q 、负荷曲线 L 和原始电价 P_0 ，有光伏出力阶段第 i 时段期望电价如式(3)所示。

$$P_{e,i} = \frac{P_i \times (L_i - Q_i) + Q_i \times (1 - R) \times P_0}{L_i} \quad (3)$$

式中： P_i 为该时段初始电价； L_i 为该时段初始负荷； Q_i 为该时段光伏发电系统出力； R 定义为光伏补偿系数，等于单位光伏电能补贴金额 P^* 与固定电价 P_0 之比。

无光伏出力的第 i 时段期望电价如式(4)所示。

$$P_{e,i} = \frac{\frac{L_i}{L_{\text{sum(non-pv)}}} \times Q_{\text{sum}} \times R \times P_0 + L_i \times P_i}{L_i} \quad (4)$$

式中: $L_{\text{sum(non-pv)}}$ 为无光伏出力时段的负荷总量; Q_{sum} 为光伏发电系统出力总值; 其他参量与式(3)相同。

按此原理构造的期望电价曲线示意图如图3所示。在有光伏出力时段的电价与光伏出力成比例下降, 使用户进行合理的负荷转移, 从而在光伏出力与用户响应之间建立了联系。

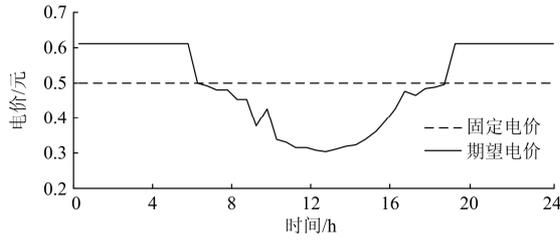


图3 随光伏变化的期望电价曲线

Fig. 3 Expected price variation curve with the PV output

2.2 负荷价格弹性

电价弹性指电价变化引起的电能需求量的相应变化。用户在某一时刻的用电意愿同时受本时段与其他时段电价的影响, 因此 i 时段的期望电价 $P_{e,i}$ 对所有时段负荷 L 都存在有电价弹性; i 时段负荷 L_i 也是全天所有时刻期望电价 P_e 的函数^[13]。 i 时段某类负荷 L_i 是所有时段实时电价的函数, 即 $L_i(P_1, P_2, \dots, P_t)$ 。则负荷电价弹性定义如式(5)所示。

$$e_{s,i,k} = \frac{\Delta L_i / L_i}{\Delta P_k / P_k} \quad (5)$$

式中: $e_{s,i,k}$ 表示 k 时刻电价的变化引起 s 类负荷在 i 时刻的变化量; ΔL_i 表示 s 类负荷在 i 时刻的期望负荷变化量; L_i 表示 s 类负荷在 i 时刻的实际负荷; ΔP_k 表示 k 时刻期望电价相对原始电价的变化量; P_k 表示 k 时刻的原始电价。当 $i=k$ 时, $e_{s,i,k}$ 为 s 类负荷本时段的负荷电价弹性, 即自弹性系数。当 $i \neq k$ 时, $e_{s,i,k}$ 为 s 类负荷跨时段负荷电价弹性, 即互弹性系数。若 $e_{s,i,k} < 0$, 表示 k 时刻价格上升引起 s 类负荷 i 时刻期望负荷的下降。

设期望电价的调整间隔为 T 小时, 则 s 类型负荷在 24 小时内的电价弹性矩阵 E_s 定义如式(6)所示。

$$E_s = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1t} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{t1} & e_{t2} & \cdots & e_{tt} \end{bmatrix}, \quad t = 24/T \quad (6)$$

不同类型负荷的电价弹性矩阵的具体数值需要通过对各类型用电设备的大量用电转移行为进行统计归纳得到^[14-15]。

2.3 用户响应模型

电价策略变化后, s 类负荷在 i 时刻用电变化量表述如式(7)所示。

$$L_{e,s,i} = \left[e_{s,i} \times \left(\frac{\Delta P}{P_e} \right)^T + 1 \right] \times L_{s,i} \quad (7)$$

式中: $L_{e,s,i}$ 表示 s 类负荷在 i 时刻的期望负荷变化量列向量; $e_{s,i}$ 为 s 类负荷的电价弹性矩阵 E_s 中第 i 行行向量, 即 i 时刻 s 类负荷对所有时刻的电价弹性; $L_{s,i}$ 表示 s 类负荷在 i 时刻的实际负荷列向量; ΔP 为期望电价与实际电价的电价差; P_e 为系统期望电价。

单独用户的用电选择行为具有随机性, 无法进行准确描述。但当用户的数量较大时, 全体用户的用电转移行为就具有一定的规律性。泊松分布适用于对单位时间内随机事件发生次数的描述, 单位时间内全体用户对某类负荷的用电选择行为属于随机过程。不同用户间用电行为互不影响, 该过程属于泊松分布的随机过程。因此可将全体用户针对某类用电设备期望负荷的用电选择行为转化为泊松分布的随机抽样过程。用户在 i 时刻使用 s 类负荷的期望次数描述如式(8)所示。

$$P_{s,i} = \frac{L_{e,s,i}}{n \cdot p_s} \quad (8)$$

式中: $L_{e,s,i}$ 为 s 类负荷在 i 时刻的期望负荷; n 为用户总数; p_s 为单独用户 s 类负荷的平均功率。通过对全体用户所有类型负荷在全时段范围内的随机抽样, 可以得到全体用户对实时电价产生的随机用电响应行为的总体结果, 将不同类型负荷的响应结果求和能得到全体用户在全时段的总负荷响应结果。

3 基于实时电价与用户响应的负荷转移方法

根据构建的实时电价模型, 期望电价为光伏出力与用户负荷两个参数的函数。当用户对实时电价做出用电响应后, 用户负荷的变化将对电价产生新的影响。本节通过建立负荷转移模型, 分析电价与用户之间的动态响应关系。实时电价与用户响应的负荷转移模型流程图如图4所示。

首先, 在光伏出力 P_{pv} 、原始电价 P_0 与 L_c 条件下, 通过式(3)、式(4)实时电价模型计算此时的期望电价 P_e , 则电价变化率为

$$\Delta P = \frac{P_e - P_0}{P_0} \quad (9)$$

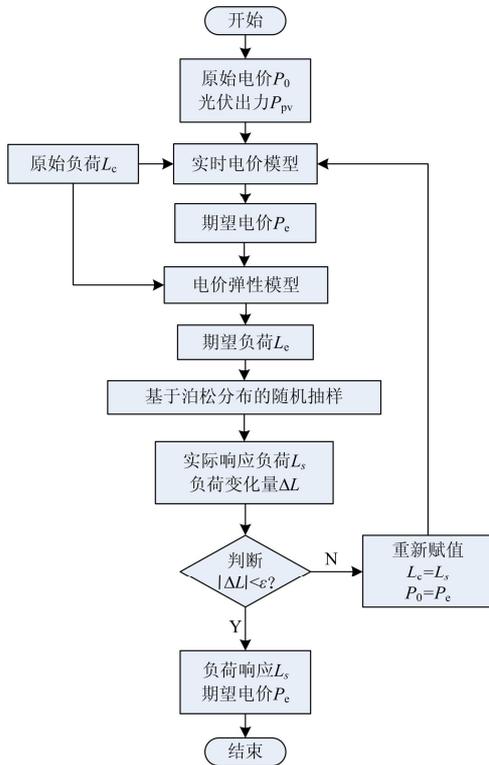


图 4 基于实时电价与用户响应的负荷转移策略流程图

Fig. 4 Flow chart of load transfer strategy based on the real-time price and the user response

设电价弹性矩阵为 E ，通过电价弹性模型得到新的分类期望负荷矩阵如式(10)所示。

$$L_c = (1 + E \cdot \Delta P) \cdot L_c \quad (10)$$

对 L_c 进行泊松分布随机抽样得到用户实际的负荷响应矩阵 L_s ，则负荷变化量如式(11)所示。

$$\Delta L = L_s - L_c \quad (11)$$

对负荷变化量大小进行判断，若 $|\Delta L| > \varepsilon$ ，则对原始电价 P_0 与原负荷矩阵 L_c 重新赋值，如式(12)所示。在原光伏出力与新分类负荷矩阵 L_c 的条件下生成新的分时电价 P'_e ，并带入新的循环再次进行计算。此情况表示期望电价变化引起了负荷较大的变化，并引起电价继续变化，电价与用户响应之间的相互影响过程并没有结束，需要再次进行循环，直到 $|\Delta L| < \varepsilon$ ，表示当前电价几乎不再引起负荷变化。

$$\begin{cases} P_0 = P_e \\ L_c = L_s \end{cases} \quad (12)$$

4 算例分析

考虑到用户对电价激励进行用电响应的速率较慢，设电价调整间隔为 0.5 h，全天共 48 个数据点。设光伏容量渗透率为 40% 的较高水平，原始电价为 0.5 元，光伏补偿系数为 0.5，电力用户总数为 2 800

户，各类用户负荷的电价弹性参数设置参见文献 [14-15]，可得到晴天情况下负荷转移情况如图 5 所示。可见，负荷响应结果在有光伏出力时段负荷量上升，在无光伏出力时段负荷量下降，宏观上达到了按光伏出力特征引导用户进行负荷转移的目标。

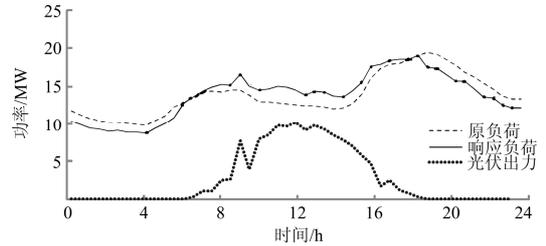


图 5 负荷转移响应曲线

Fig. 5 Response curves of load transfer

通过计算得到负荷响应后用户的用电开支相比响应前节省 9.98%，负荷总转移量为 15.12 MW/h。

光伏容量渗透率极限是衡量电力系统在装机容量方面接纳光伏发电能力的重要指标。进一步分析可以得出系统在负荷转移前后光伏渗透率极限随光伏渗透率变化的规律，如图 6 所示。

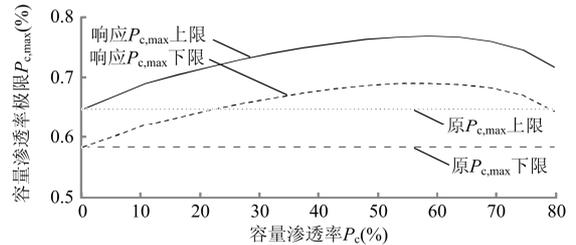


图 6 光伏容量渗透率极限

Fig. 6 Limit of PV capacity permeability

可见经过负荷响应后电网的光伏容量渗透率极限得到明显提升；在实际光伏容量渗透率超过电力系统原始容量渗透率极限值后，光伏容量渗透率极限随容量渗透率的上升而下降，说明光伏容量渗透率超过其极限后，负荷转移机制将不能继续提升系统的光伏容量渗透率极限。

5 结论

本文建立了反映光伏出力的实时电价机制，使用户能够通过价格感知光伏发电系统出力情况。以电价弹性与泊松分布随机抽样为基础模拟用户在感知到电价激励后改变实际用电行为的过程，并建立了用户响应模型。以实时电价与用户响应之间动态关系为基础，建立基于实时电价与用户响应的负荷转移模型。算例结果表明，负荷转移机制能够有效改善光伏发电出力波动性对电网的不利影响，提高电网对光伏发电的接纳能力。

参考文献

- [1] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [2] 黄炜, 刘健, 魏昊煜, 等. 光伏电源极端可接入容量极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 22-28.
HUANG Wei, LIU Jian, WEI Haokun, et al. Extreme capacity limitations of photovoltaic generators in distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 22-28.
- [3] 刘健, 同向前, 潘忠美, 等. 考虑过电压因素时光伏电源的准入容量[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 45-51.
LIU Jian, TONG Xiangqian, PAN Zhongmei, et al. The maximum power of distributed PV generation according to over-voltage in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 45-51.
- [4] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 95-100.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic integrated into smart distribution network sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 95-100.
- [5] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 22-28.
WANG Yibo, XU Honghua. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 22-28.
- [6] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [7] 郭旭阳, 谢开贵, 胡博, 等. 计入光伏发电的电力系统分段随机生产模拟[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1499-1505.
GUO Xuyang, XIE Kaigui, HU Bo, et al. A time-interval based probabilistic production simulation of power system with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1499-1505.
- [8] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [9] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充放电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.
SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.
- [10] 董开松, 丁岩, 谢永涛, 等. 基于需求侧响应的微电网市场优化模型[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 122-126.
DONG Kaisong, DING Yan, XIE Yongtao, et al. Market optimization model for microgrid with demand response[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 122-126.
- [11] 朱国防, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网电源侧故障下大范围负荷转移优化策略及实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 73-77.
ZHU Guofang, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. Wide range of load transfer optimization strategy and its implementation method for the busbar voltage loss in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 73-77.
- [12] 白新雷, 郭力萍, 王凯. 基于多目标优化的配电网负荷转移路径研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 11-15.
BAI Xinlei, GUO Liping, WANG Kai. Research on distribution network load transferring path based on multi-objective optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(12): 11-15.
- [13] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫, 等. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 16-19, 24.
QIN Zhenfang, YUE Shunmin, YU Yixin, et al. Price elasticity matrix of demand in current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 16-19, 24.
- [14] CONEJO A J, MORALES J M, BARINGO L. Real-time demand response model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 236-242.
- [15] VENKATESAN N, SOLANKI J, SLOANKI S K. Demand response model and its effects on voltage profile of a distribution system[C] // Detroit, MI, USA: IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-7.

收稿日期: 2015-11-29

作者简介:

石磊磊(1985-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题; E-mail: ashileilei@126.com

胡建昭(1964-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网;

韩胜峰(1977-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题。E-mail: han.shengfeng@he.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)