

考虑蓄电池储能的配电网动态网络重构

谢 亮¹,李远卓¹,崔慧军¹,宋庆昌¹,罗 欣²,张志伟²

(1. 国网冀北电力有限公司,北京 100085;

2. 北京清软创新科技股份有限公司,北京 100085)

Dynamic network reconfiguration of distribution network considering battery energy storage

XIE Liang¹, LI Yuanzhuo¹, CUI Huijun¹, SONG Qingchang¹, LUO Xin², ZHANG Zhiwei²

(1. State Grid North Hebei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. Beijing Tsingsoft Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

摘要:随着分布式能源渗透率逐渐增高,用户侧负荷波动变大,电网很难一直保持其原有的较佳运行方式;而蓄电池储能技术的日渐成熟使其应用越来越广泛,削峰填谷的效益也被认可。考虑到蓄电池储能在配电网中的应用,会对未来配电网进行动态重构。具体以网络损耗最小为目标函数,考虑网络拓扑约束、节点电压约束、支路电流约束和潮流平衡约束等,建立上层优化模型进行网络重构;以收益最大为目标函数,考虑储能充放电功率约束等,建立下层优化模型制定充放电策略;通过嵌入fmincon函数的遗传算法对双层优化模型进行求解;最后以修改的IEEE33节点系统作为算例,验证了所提方法的有效性。

关键词:电网结构;分布式能源;蓄电池储能;网络重构

Abstract: As the penetration rate of distributed energy increases gradually and the load fluctuation on the user side becomes larger, it is difficult for the power grid to maintain its original better operation mode all the time. With the maturity of battery energy storage technology, the application is extensive, and the benefits of peak cutting and valley filling are also recognized. The application of battery energy storage in distribution network is considered, and the future distribution network is dynamically reconstructed. Taking the minimum network loss as the objective function and considering the network topology constraint, node voltage constraint, branch current constraint and power flow balance constraint, an upper optimization model is established for network reconfiguration. Taking the maximum profit as the objective function and considering the energy storage charge and discharge power constraints, the lower optimization model is established to formulate the charge and discharge strategy. The two-layer optimization model is solved by the genetic algorithm embedded with fmincon function. Then a mathematical model is established. Genetic algorithm is solved by embedding graphminspantree function. Finally, a modified IEEE-33 node system is used as an example to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: power grid structure; distributed energy; battery energy storage; network reconfiguration

0 引言

具有间歇性和波动性的分布式电源(distributed generation, DG)由用户侧大量接入电网,使得用户侧负荷波动变大。同时蓄电池储能(battery energy storage, BES)技术逐渐成熟,成本的下降使其削峰填谷效益越来越明显,在一定程度上改善了负荷波动情况^[1-2]。对于电力公司特别是调度部门来说,要根据历史负荷情况准确预测未来网络最佳结构,在制定调度运行策略中具有重要作用^[3-4]。

目前,有关配电网重构技术的研究主要分为2大类,第一是以节点和支路重要程度为依据的网络重构;第二是以网损、电压偏移量等性能指标为目标建立数学模型的网络重构。

文献[5]通过评价节点和支路的重要程度,提出一种基于Hadoop平台的分布式粒子群算法,对大规模网络进行高效率的重构。文献[6]提出一种节点重要度的新评价方法,并建立了双层优化模型,该模型以最大化系统可用发电容量确定发电节点恢复顺序、以最大化恢复路径的平均重要度和最小化路径的充电电容为目标,确定恢复路径。文献[7]利用节点收缩后的网络凝聚度定量评价网络中电源和负荷的重要性,进而提出一种基于节点重要度评价的骨架网络重构策略。文献[8]考虑了具有

收稿日期:2020-12-15;修回日期:2021-02-17

基金项目:国网冀北电力有限公司科技项目(52010119006U)

间歇性的DG和负荷的多状态,建立了含DG的配电网动态重构机会约束规划模型。文献[9]从配电网本质出发,建立考虑网损和载荷均衡的多目标网络重构模型。文献[10]将网络损耗和电压偏移量作为衡量系统运行性能的指标,以二者归一化的综合指标为标准建立网络重构模型。文献[11]提出了含DG的配电网重构和检修计划优化,从一定程度上说明了检修计划对配电网重构的影响。文献[12]分析了检修计划对电网运行的影响,并提出了变电站计划检修时过负荷率以及减供负荷率的计算方法,将检修计划对负荷的影响具体化。

上述文献中考虑节点和支路重要程度的网络重构研究,多是在静态下进行的,面对实时变化的负荷值很难满足需求。以网损、电压偏移量等性能指标为目标更适用于动态网络重构研究,但现有文献中很少有考虑BES的网络重构研究。

本文在现有文献的基础上,考虑BES在配电网中的应用,研究动态下的配电网重构技术。以网络损耗最小为最终优化目标,根据负荷变化和BES充放电情况设定网络重构条件,并考虑网络拓扑结构、开关动作次数等约束条件,建立数学模型;将嵌入fmincon函数的遗传算法作为求解方法。最后通过算例分析验证本文所提方法的有效性。

1 BES的数学模型

本文从剩余电量水平(state of charge, SOC)和充放电功率等方面对BES进行数学建模。

充电过程时

$$SOC(t) = (1 - \varepsilon) \cdot SOC(t-1) - \frac{P_{bat,c}(t) \cdot \Delta t \cdot \alpha}{E_e} \quad (1)$$

放电过程时

$$SOC(t) = (1 - \varepsilon) \cdot SOC(t-1) - \frac{P_{bat,d}(t) \cdot \Delta t}{E_e \cdot \beta} \quad (2)$$

式中: $SOC(t)$ 为第 t 个采样间隔处BES的剩余电量水平; ε 为BES剩余电量每小时的损失率,简称自放电率; $P_{bat,c}(t)$ 、 $P_{bat,d}(t)$ 分别为BES充、放电功率大小; α 和 β 分别为BES充、放电效率; E_e 为BES的额定容量; Δt 为采样间隔,本文取1 h。

为避免电池过充过放, SOC 有一定范围限制, BES不能将电量全部放完也不能完全充满。

$$SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \quad (3)$$

$$-P_{bat,c,max} < P_{bat}(t) < P_{bat,d,max} \quad (4)$$

式中: SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为电池最小剩余电量水平和最大剩余电量水平; $P_{bat}(t)$ 、 $P_{bat,c,max}$ 、 $P_{bat,d,max}$ 分别为BES电功率、最大允许充电功率、最大允许放电功

率,负号表示BES充电。

2 网络重构模型

由于配电网中各节点的电压等级比较低,网损成为不可忽视的一部分。配电网重构作为一项重要的配电网自动化技术,可以在不投入更多额外设备的情况下,仅对线路上开关的状态进行调整,就可实现降低网络损耗,改善电压质量的目的。本文将网络损耗最小作为网络重构最终的优化目标建立数学模型,并列出具体的目标函数和约束条件。

本文在动态网络重构中考虑BES,相应的重构模型建立时需要BES的运行过程;而BES运行策略的制定又是以网络结构为基础的。二者互相迭代才能计算,与双层优化模型相匹配。在双层优化模型中,上层优化结果作用于下层目标函数和约束条件,下层优化以最优值反馈到上层,实现上下层之间的相互作用。

2.1 上层优化数学模型

2.1.1 上层目标函数

优化的目标是在系统安全稳定的基础上实现网络损耗最小化,具体优化时分为静态优化和动态优化。动态优化目标函数为

$$\min f(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (I(t)_i^2 \cdot Z_i \cdot \Delta t) \quad (5)$$

式中: $X_1, X_2, \dots, X_n$ 分别为配电系统中的 n 个开关状态量,是控制变量; N 为系统中总的支路数; T 为系统需重构的总的时间段; $I(t)_i$ 为第 i 条支路在 t 时刻时的电流值; Z_i 为第 i 条支路的阻抗值。

对于静态优化,其为在单一时间断面上的优化,目标函数为

$$\min f(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^N (I_i^2 \cdot Z_i \cdot T) \quad (6)$$

式中: I_i 为第 i 条支路的电流值。

2.1.2 上层约束条件

无论是静态网络重构模型还是动态网络重构模型,都需要一定的约束条件,实现所求解的正确性,以及更加符合实际性。

(1) 节点电压约束

$$U_{j,min} \leq U_j \leq U_{j,max} \quad (7)$$

式中: $U_{j,min}$ 、 $U_{j,max}$ 分别为第 j 节点处电压 U_j 的下限和上限; b 为配电网节点总数 ($j=1, 2, \dots, b$)。该约束是电能质量对BES运行的要求。

(2) 支路电流约束

$$I_i \leq I_{i,max} (i=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

式中: $I_{i,max}$ 为第 i 条支路电流 I_i 的上限。该约束是

系统安全稳定对BES运行的要求。

(3) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}$ 分别为节点 i 处电源的有功和无功出力; $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 处的有功和无功负荷; U_i 、 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素的实部和虚部; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相角差。

(4) 配电网络拓扑约束

重构后的配电系统应满足辐射状拓扑结构的要求,无环网、孤岛形成。

(5) 开关开断次数约束

考虑开关寿命问题,避免开关在一段时间内连续多次开断,保障其可靠性。即

$$0 \leq S_T \leq S_{T,\max} \quad (10)$$

式中: S_T 、 $S_{T,\max}$ 分别为 T 时间段内某一开关的开断次数和最大开断次数。

2.2 下层优化数学模型

2.2.1 下层目标函数

优化的目标是经济效益最大,即

$$\max \{f(p_1, p_2, \dots, p_{24}) = C_{\text{loss}} + C_s - C\} \quad (11)$$

式中: $p_1, p_2, \dots, p_{24}$ 为 BES 在 24 个小时段上的充放电功率(一个时间段内 BES 既可以充电也可以放电),是控制变量; C_{loss} 为 BES 运行后配电网降低能耗日收益; C_s 为 BES 一天的低储高放套利; C 为日周期内充放电次数大于一定值时的惩罚项。

各分量计算公式为

$$C_{\text{loss}} = m_a \cdot \sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(t) \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$C_s = C_{s,\text{dis}} - C_{s,\text{c}} \quad (13)$$

$$C = \gamma(h_{\max} - h) \quad (14)$$

式中: $P_{\text{loss}}(t)$ 为在第 t 个采样间隔内配电网的有功线损; m_a 为配电网从主网购电电价; h 为电池一日中的充放电次数(将一个充电阶段加上一个放电阶段算做一次充放电); $h_{\max}$ 为一日中的充放电次数限制值; γ 为惩罚系数; $C_{s,\text{dis}}$ 、 $C_{s,\text{c}}$ 分别为 BES 一天的放电收入费用和充电支出费用。

计算公式如下

$$C_{s,\text{dis}} = \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^{24} (m_{\text{dis}} \cdot P_{\text{ess},k,\text{dis}}(t) \cdot \Delta t) \quad (15)$$

$$C_{s,\text{c}} = \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^{24} (m_{\text{ch}} \cdot P_{\text{ess},k,\text{c}}(t) \cdot \Delta t) \quad (16)$$

式中: k 为 BES 类型; N 为 BES 的个数; m_{dis} 、 m_{ch} 分

别为 BES 放电电价和充电电价,都为对应时段处的分时电价; $P_{\text{ess},k,\text{dis}}(t)$ 、 $P_{\text{ess},k,\text{c}}(t)$ 分别为 BES 在 t 时刻的放电功率和充电功率(负数表示充电、正数表示放电)。

2.2.2 下层约束条件

下层约束条件除了和上层约束中的式(7)一式(9)一样外,还有充放电功率约束。即

$$-P_{\text{ess},k,\text{max}} < P_{\text{ess}}(t) < P_{\text{ess},k,\text{dis},\text{max}} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{ess}}(t)$ 为 BES 各小时段处的充放电功率; $P_{\text{ess},k,\text{max}}$ 、 $P_{\text{ess},k,\text{dis},\text{max}}$ 分别为电池最大允许充电功率和最大允许放电功率,负号表示电池充电。

3 算例分析

3.1 算例描述

为验证本文所提方法的有效性,以修改的 IEEE33 节点配电系统^[13]作为算例,系统结构如图1所示。其中虚线为联络线,联络线参数参考其他支路设置,如表1所示。节点15和节点28上分别配有容量为420 kWh和562 kWh的BES。BES位置和容量参照文献[13]与文献[14]进行确定。参考文献[15]设定分时电价,高峰时段:9:00—14:00和19:00—21:00,电价为1.0元/kWh;低谷时段:1:00—8:00,电价为0.35元/kWh;其余时段的平时段电价为0.55元/kWh。从主网购电电价为0.55元/kWh。某地典型日负荷曲线如图2所示。日充放电次数最大值为3。

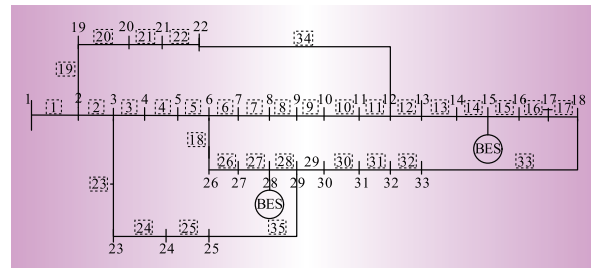


图1 配电网算例系统图

Fig. 1 System diagram of distribution network example

单个蓄电池储能单元(1 kWh)最大充、放电功率均为0.5 kW。对于SOC的上下限,实际工程中考虑了储能的寿命问题,一般取80%和20%;本算例为突出BES运行后的经济效益,其上下限分别取90%和10%。充、放电效率均为95%,剩余电量损失率为10%。SOC初始值设置为10%。电压波动上下限为 $\pm 7\%$ 。支路电流上限取静态运行时支路电流的1.5倍。单个开关日开断次数最大值为3。遗传算法中进化代数30,种群规模为50,交叉率0.6,变异率0.01。

表1 联络线参数表
Table 1 Tie line parameter table

支路编号	33	34	35
电阻(标么值)	0.344 5	0.541 2	0.541 2
电抗(标么值)	0.430 2	0.330 2	0.630 2

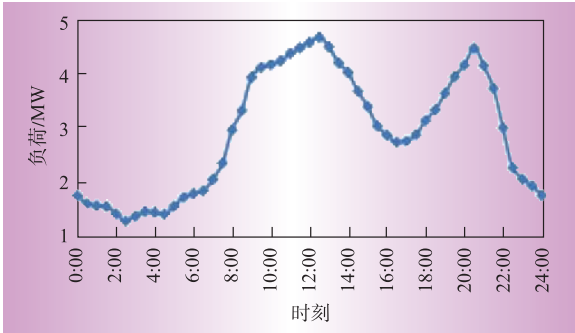


图2 典型日负荷曲线

Fig. 2 Typical daily load curve

3.2 求解方法

本文通过嵌入fmincon函数的遗传算法对双层优化模型进行求解。该函数对初始值的选择无任何要求,收敛速度快,使用简便,结果准确。其中fmincon函数求解下层BES运行策略,遗传算法计算上层网络重构结果。

3.3 算例分析

静态网络重构、动态网络重构结果如表2所示,其中静态网络重构时各节点负荷为动态网络重构时节点负荷的日平均值。

表2 网络重构结果

Table 2 Network reconfiguration results

方案	重构时刻	断开支路编号	日周期网络损耗 kWh
原始网络	不重构	33,34,35	5 758.7
静态重构	—	8,16,35	3 374.9
动态重构	9:00	8,16,35	3 344.2
	16:00	9,16,35	
	20:00	8,28,32	
	23:00	8,28,32	

从表2中可以看出9:00时动态网络重构结果与静态网络重构相同,23:00时动态网络重构结果与20:00时相同;静态重构后周期内的网络损耗较原始网络少2 383.8 kWh。在考虑负荷变化的动态重构中,9、16、20和23时都满足重构条件进行重构,但9:00重构结果与静态重构结果一致,23:00重构结果和20:00重构结果一致,因此开关开断次数为3次,满足动作次数约束条件。动态重构后的周期内网络损耗比静态时少30.7 kWh,说明在同时满足一定约束条件下动态重构优于静态重构。

BES运行前、后的负荷曲线如图3所示,考虑

BES运行的网络重构结果如表3所示。BES日经济效益为609.1元,其中低储高放套利559.5元,降低能耗收益49.6元。

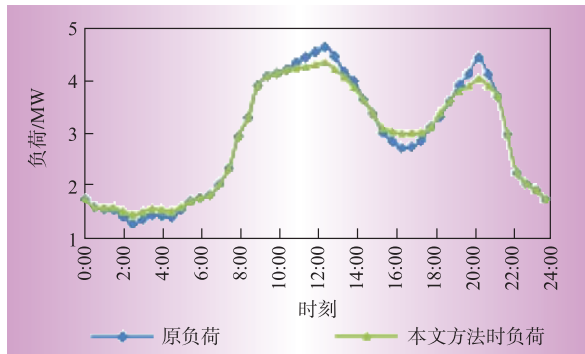


图3 BES运行前后的负荷曲线

Fig. 3 Load curves before and after BES operation

表3 考虑BES的网络重构结果

Table 3 Network reconfiguration results considering BES

方案	重构时刻	断开支路编号	日周期网络损耗 kWh
静态重构	—	8,16,35	3 274.9
动态重构	12:00	9,16,35	3 254.1
	20:00	8,28,32	

由表3得考虑BES运行的动态网络重构日损耗比静态网络重构少20.1 kWh。对比表3和表2可以看出,考虑BES运行的静态网络重构比不考虑BES时降低损耗97.8 kWh;考虑BES运行的动态网络重构比不考虑BES时降低损耗90.1 kWh,且重构次数由3次减少为2次,重构时间由9:00、16:00、20:00和23:00变为12:00、20:00。

BES优化运行后的负荷曲线波动相对平缓,网络损耗变少,验证了BES削峰填谷的能力。相比原负荷变化情况,考虑BES运行的网络动态重构会因负荷曲线相对平缓而减少重构次数,避免开关长期多次切换。

4 结束语

本文考虑BES的实际运行情况,研究动态网络重构方法,通过算例分析表明:

(1) 利用本文方法,在满足拓扑结构、开关切换次数等约束条件下,动态网络重构日周期内网络损耗小于静态网络重构。

(2) BES合理的充放电策略可以对负荷进行削峰填谷,减少网络损耗,具有一定经济效益。

(3) 考虑BES运行的动态网络重构时,BES运行策略与网络重构策略可以相互作用,共同实现网络运行最优化。D

参考文献:

- [1] 李秀磊,耿光飞,季玉琦,等.含分布式电源的配电网中电池储能系统运行策略[J].电力自动化设备,2017,37(11):65-71.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Operation strategy of battery energy storage system in distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):65-71.
- [2] 郭莉,薛贵元,吴晨,等.储能系统应用于削峰填谷的经济效益分析研究[J].电力需求侧管理,2019,21(5):31-34.
GUO Li, XUE Guiyuan, WU Chen, et al. Research on economic evaluation of energy storage applied to load shift[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(5):31-34.
- [3] 戴志辉,陈冰研,谢军,等.含多微网的主动配电网分层调度策略[J].电力系统保护与控制,2018,46(18):121-127.
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18):121-127.
- [4] 周伏秋,蒋焱,邓良辰,等.能源变革新时代综合能源服务市场机遇[J].电力需求侧管理,2019,21(4):3-6.
ZHOU Fuqiu, JIANG Yan, DENG Liangchen, et al. Comprehensive energy service market opportunities in the context of energy transformation[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):3-6.
- [5] 谢彦祥,刘天琪,苏学能. Hadoop 架构下基于分布式粒子群算法的骨架网络重构方法[J].电网技术,2018,42(3):886-893.
XIE Yanxiang, LIU Tianqi, SU Xueneng. A novel skeleton network reconfiguration method based on distributed PSO algorithm and Hadoop architecture[J]. Power System Technology, 2018, 42(3):886-893.
- [6] 张璨,林振智,文福拴,等.电力系统网络重构的多目标双层优化策略[J].电力系统自动化,2014,38(7):29-38.
ZHANG Can, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. A multi-objective bi-level optimization strategy for network reconfiguration of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7):29-38.
- [7] 刘艳,顾雪平.基于节点重要度评价的骨架网络重构[J].中国电机工程学报,2007(10):20-27.
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based on skeleton-network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007(10):20-27.
- [8] 丛鹏伟,唐巍,张璐,等.基于机会约束规划考虑DG与负荷多状态的配电网重构[J].电网技术,2013,37(9):2 573-2 579.
CONG Pengwei, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Chance-constrained programming based on distribution network reconfiguration considering multi-states of distributed generation and load[J]. Power System Technology, 2013, 37(9):2 573-2 579.
- [9] 汲国强,吴文传,张伯明,等.以降损和载荷均衡为目标的地区电网网络重构快速算法[J].电网技术,2012,36(11):172-178.
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Regional network reconfiguration algorithm for loss reduction and loading equilibrium[J]. Power System Technology, 2012, 36(11):172-178.
- [10] 田昊,吕林,高红均,等.计及电网运行特性的配电网动态重构[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):9-14.
TIAN Hao, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1):9-14.
- [11] 张沈习,袁加妍,程浩忠,等.主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J].中国电机工程学报,2016,36(S1):1-9.
ZHANG Shenxi, YUAN Jiayan, CHENG Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1):1-9.
- [12] 黄强,吴杰康,郑风雷,等.考虑检修计划的减供负荷功率概率计算方法[J].电气工程学报,2016,11(5):30-39.
HUANG Qiang, WU Jiekang, ZHENG Fenglei, et al. A probability calculation method for reduced supplying load power considering maintenance planning[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(5):30-39.
- [13] 李秀磊,耿光飞,季玉琦,等.主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J].电网技术,2016,40(12):3 803-3 810.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Integrated optimal planning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3 803-3 810.
- [14] 段开锋.电池储能系统在配电网中的应用研究[D].北京:北京交通大学,2014.
DUAN Kaifeng. The application of battery energy storage system in the distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [15] 陈沧杨,胡博,谢开贵,等.计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J].电网技术,2014,38(8):2 141-2 148.
CHEN Cangyang, HU Bo, XIE Kaigui, et al. A peak-valley TOU price model considering power system reliability and power purchase risk[J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2 141-2 148.

作者简介:

谢亮(1980),男,安徽安庆人,高级工程师,主要从事电力系统调度控制工作;

李远卓(1980),男,安徽安庆人,高级工程师,主要从事电力系统调度控制工作;

张志伟(1982),男,通信作者,北京人,工程师,主要研究方向为电力系统优化控制。

(责任编辑 郝洁)