

DOI: 10.7667/PSPC152035

基于超效率 DEA 模型的配电网智能化发展综合效率评价

韩柳¹, 李金超², 胡殿刚³, 彭竹奔¹, 靳攀润³, 庄博⁴

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209; 2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206;
3. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053)

摘要: 为了全面评价配电网智能化发展综合效率, 针对我国配电网智能化建设发展特点, 从规模、性能、效果三个方面出发, 构建了配电网智能化建设效率与运营效率两阶段投入产出评价指标体系, 建立了基于超效率数据包络分析法(DEA)和考虑非期望产出的超效率 DEA 的综合评价模型。对配电网智能化建设效率和运营效率分别进行了测算, 通过专家法制定了智能电网不同发展阶段建设效率与运营效率权重, 最后加权求和得到了配电网智能化发展综合效率。算例分析验证了所提评价指标体系和方法的可行性和有效性, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 配电网; 智能化; 评价指标; 评价模型; 数据包络分析

Development efficiency evaluation of distribution network intelligent planning based on super-efficient DEA

HAN Liu¹, LI Jinchao², HU Diangang³, PENG Zhuyi¹, JIN Panrun³, ZHUANG Bo⁴

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China; 4. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to evaluate the distribution network intelligent development efficiency fully, combined with the characters of the distribution network development, the evaluation index system of distribution network intelligent construction efficiency and operation are set up from scale, performance and result. An evaluation model based on super efficiency data envelopment analysis (SE-DEA) and undesirable output SE-DEA is proposed. The comprehensive development efficiency of distribution network intelligent is got by weighted summation with consideration of distribution network intelligent development stage. The feasibility and the effectiveness of the evaluation index system and method are verified by the analysis of the case. The proposed model is of pragmatic value to engineering applications.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014ZD21) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2012M520221).

Key words: distribution network; intelligent planning; evaluation index; evaluation model; data envelopment analysis

0 引言

随着社会经济的快速发展, 分布式电源、电动汽车、储能等高新技术得以推广应用, 配电网电力负荷呈现出多样化、智能化特征, 传统配电网需要与通信信息技术广泛结合, 逐步形成能够满足中小

型分布式电源的开放接入和电力需求侧互动管理的需求、向用户提供差异化服务的主动智能配电网。目前, 我国配电网智能化建设工作已经全面展开, 投资力度不断加大, 尤其 2015 年是我国智能电网全面建设阶段的收官年, 评估配电网智能化建设效率已经成为一项十分紧迫的工作。国内外学者和研究机构从不同角度对智能电网相关内容开展了大量的评价研究。文献[1]建立了用于智能电网试点项目的评价指标体系与评价方法。文献[2]从发展成熟度角度建立了智能电网评价指标模型。文献[3]从智能电网功能属性角度建立了评价指标体系。文献[4]

基金项目: 国家电网公司科技项目资助; 中央高校基本科研业务费专项资金重点项目资助(项目编号: 2014ZD21); 北京市青年育英才项目资助(YETP0709); 中国博士后科学基金(2012M520221)

从成本效益角度建立了美国智能电网项目评估体系。文献[5]绿色高效角度出发建立了智能电网评价体系。文献[6]从智能配电网基础建设和建设绩效两个角度出发建立了智能配电网规划评价体系。文献[7]以智能配电网为评价对象,从技术性、经济性、智能化和社会性四维度出发,设计了包含 55 个基础指标的评价体系。文献[8]从投资分摊类型、盈利模式和效益测算分析了智能电网中的智能小区运营方案的优缺点。这些研究成果侧重于绝对效果的评价,主要反映了智能电网以及配电网多方面的直接效果,不能满足城市配电网智能化建设效果评比的需要。另外,传统的电力系统评价方法对本文研究具有一定的借鉴意义,如文献[9-11]中的组合权重思想,文献[12]中的指标度量方法,文献[13]中的多属性综合评价模型设计思想。在以上研究的基础上,

本文将对配电网智能化建设效率和运营效率开展评价研究,致力于了解配电网智能化建设现状,为后续发展提供决策依据。

1 配电网智能化发展效率评价指标体系

1.1 指标构成

配电网智能化发展效率包含建设效率和运营效率两个方面,其中智能化建设效率投入指标包括人、财、物三个方面,智能化建设效率产出指标包括配电自动化系统建设、配电网信息集成系统建设、配网柔性/定制电力技术以及智能配电台区建设四个方面的规模;在运营阶段,以上述规模指标为输入,运营效率产出指标包括电网性能、环境效益、社会效益三方面的指标,按照系统性、一致性、独立性、可测性及科学性原则筛选得到评价指标,具体如图 1 所示。

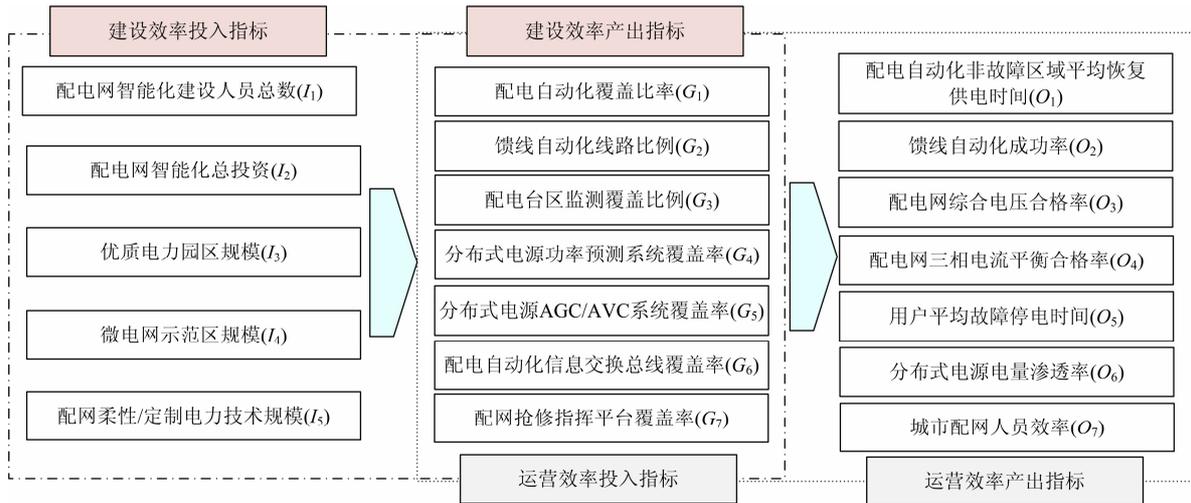


图 1 配电网智能化建设效率与运营效率投入产出指标体系

Fig. 1 Input/output index system of distribution network intelligent construction and operation efficiency

1.2 指标说明

1.2.1 建设效率投入指标

(1) 配电网智能化建设人员总数

统计期间从事配电网智能化建设的管理、技术及技能人员总数。

建设人员总数=(期初人数+期末人数)/2

(2) 配电网智能化总投资

统计期间配电网智能化固定资产和流动资产投资之和。

(3) 优质电力园区规模

统计评估区域内优质电力园区数量。

(4) 微电网示范区规模

统计评估区域内微电网示范区个数。

(5) 配网柔性/定制电力技术规模

统计固态切换开关(Solid State Transfer Switch, SSTS)、统一电能质量控制器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)、动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorers, DVR)、电力电子变压器(Electronic Power Transformer, EPT)等配网设备的应用规模。

1.2.2 建设效率产出指标

以下指标在计算配电网智能化建设效率时作为产出指标,在计算配电网智能化运营效率时作为投入指标。

(1) 配电自动化覆盖率

该指标为评估公司经营区域内市辖、县域和整体的配电自动化覆盖率,定义如下:

配电自动化覆盖率(%)=统计区域内配置终端的中压线路条数(条)/统计区域内中压线路总条数

(条)×100%。

(2) 馈线自动化线路比例

馈线自动化线路比例(%)=统计区域内实现馈线自动化功能的中压线路条数(条)/区域内中压线路总条数(条)×100%。

(3) 配电台区监测覆盖率

配电台区监测覆盖率(%)=统计区域内具备配变监测的配电台区座数(座)/统计区域内在运配电台区座数(座)×100%。

(4) 分布式电源功率预测系统覆盖率

省级分布式电源功率预测系统覆盖率(%)=已安装分布式电源功率预测配电网数(个)/应安装分布式电源功率预测系统配电网数(个)×100%。

(5) 分布式电源 AGC/AVC 系统覆盖率

分布式电源 AGC/AVC 系统覆盖率(%)=已具备 AGC/AVC 系统的分布式电源个数(个)/分布式电源总个数(个)×100%。

(6) 配电自动化信息交换总线覆盖率

配电自动化信息交换总线覆盖率(%)=上级区域配电自动化信息交换总线覆盖下级区域数量(座)/下级区域数量(座)×100%。

(7) 配网抢修指挥平台覆盖率

配网抢修指挥平台覆盖率(%)=已建配网抢修指挥平台主站覆盖下级区域数量(座)/所辖区域中下级区域数量(座)×100%。

1.2.3 运营效率产出指标

(1) 配电自动化非故障区域平均恢复供电时间

配电自动化非故障区域平均恢复供电时间(分钟)=配电自动化建设区域内自故障停电至恢复供电的时间之和(分钟)/配电自动化建设区域内故障总次数(次)×100%。

(2) 馈线自动化成功率

馈线自动化成功率(%)=馈线自动化成功次数(次)/馈线自动化启动总数(次)×100%。

(3) 配电网综合电压合格率

配电网综合电压合格率(%)=0.5×A类监测点合格率(%) + 0.5×((B类监测点合格率(%) + C类监测点合格率(%) + D类监测点合格率(%))/3)。

(4) 配电网三相电流平衡合格率

配电网三相电流平衡合格率(%)=0.5×A类监测点合格率(%) + 0.5×((B类监测点合格率(%) + C类监测点合格率(%) + D类监测点合格率(%))/3)。

(5) 用户平均故障停电时间

用户平均故障停电时间(min/户)=Σ(每次故障停电时间(min)×每次故障停电用户数(户))/总用户数(户)。

(6) 分布式电源电量渗透率

分布式电源电量渗透率(%)=统计区域内 10(6)kV 及以下电压等级的分布式电源年发电量(MWh)/统计区域全社会 10(6)kV 及以下用电量(MWh)×100%。

(7) 城市配网人员效率

该指标反映配电环节减员增效的效果。智能化技术是城市配电人员减员增效的重要推动因素。

城市配网人员效率(人/百台)=城市配网人员数量(人)/10(20)kV 城市配变数量(百台)。

2 基于 DEA 的综合效率评价模型

2.1 综合评价模型流程

依据配电网智能化建设效率和运营效率投入产出指标的特点，建立了包含超效率 DEA 模型和非期望超效率 DEA 模型的配电网智能化发展效率两阶段综合评价模型。DEA 评价模型流程如图 2 所示。

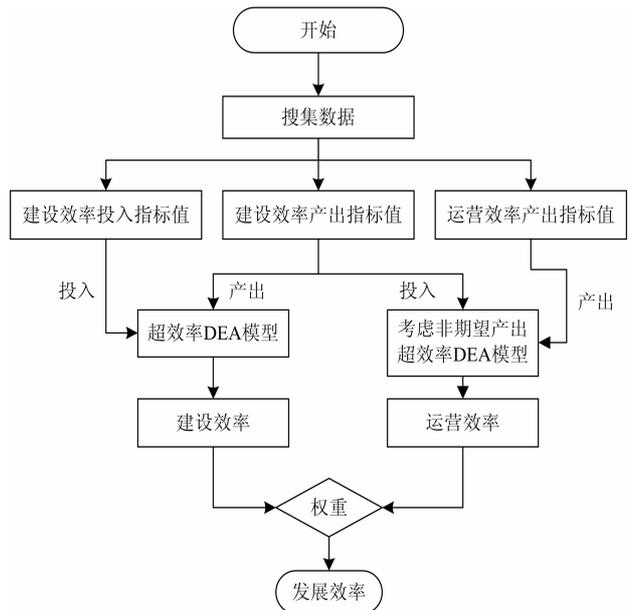


图 2 综合评价流程图

Fig. 2 Flow chart of comprehensive evaluation

2.2 超效率 DEA 模型

DEA 的 C²R 模型将决策单元分为两类，即有效和无效，对于多个同时有效的决策单元则无法做出进一步的评价与比较。为了弥补这一缺陷，Andersen 和 Petersen(1993)提出了一种 DEA 的“超效率”(Super-Efficiency)模型，使有效决策单元之间也能比较效率的高低。这个模型的基本思路是：在评估决策单元时，将该决策单元本身排除在决策单元的集合之外。超效率模型如下

$$\begin{aligned}
 & \min \theta \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 0}}^n x_{ij} \lambda_j + S_i^- = \theta x_0, i=1, \dots, m \\
 & \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 0}}^n y_{rj} \lambda_j - S_r^+ = y_0, r=1, \dots, s \\
 & \quad \lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n, \theta \in E_1^+, S^- \geq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: θ 为决策单元的效率值; 评价指标体系由 m 个投入和 s 个产出指标组成。设 x_{ij} 为第 j 个决策单元对第 i 种类型投入的投入量, y_{rj} 为第 j 个决策单元对第 r 种类型产出的产出量, S_r^+ 与 S_i^- 分别为松弛变量。 $\lambda_j, S_i^-, S_r^+, \theta$ 为待估计参量。

2.3 考虑非期望产出超效率 DEA 模型

为了解决非期望产出问题, Fare 等人^[14]提出了距离函数, 具体形式如下所示。

$$\text{Max} \{ \theta | (D + \beta \xi_g, U - \beta \xi_b) \in P(X) \} \tag{2}$$

式中: $P(X)$ 表示可能集; X 代表输入向量; 产出包含期望产出 D 和非期望产出 U ; $\xi = (\xi_g, -\xi_b)$ 表示为处理期望和非常产出的方向向量; 参数 β 表示每个决策单元 DMU 在生产集中增加期望产出的同时降低非期望产出的程度。这一变化受到方向向量的影响。根据经验判断, Fare 等人提出应用如下的方向向量:

$$\xi = (\xi_g, -\xi_b) = (1, 1, \dots, -1, -1, \dots, -1)^T, \text{ 包含}$$

$s+h$ 个元素。

Mandal 和 Madheswaran 将考虑非期望产出的 DEA 模型定义如下:

$$\begin{aligned}
 & \min \theta \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n x_{ij} \lambda_j \leq x_{ik} \quad (i=1, \dots, m) \\
 & \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n g_{rj} \lambda_j \geq g_{rk} + \theta g_{rk} \quad (r=1, \dots, s) \\
 & \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n b_{fj} \lambda_j \leq b_{fk} - \theta b_{fk} \quad (f=1, \dots, h) \\
 & \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\
 & \quad \theta \geq 0, \lambda_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, n)
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中, 第 j 个决策单元 DMU 的产出被分开为期望

产出 g_{rk} 和非期望产出 b_{fk} 。

3 实证

3.1 原始数据

本文以五家省级电网配电网智能化(DN₁, DN₂, DN₃, DN₄, DN₅)相关数据进行模型验证, 具体数据如表 1 至表 3 所示。

表 1 建设效率投入指标值

	DN1	DN2	DN3	DN4	DN5
I_1	8152	12481	20743	16421	16940
I_2	190193	79272	54911	61305	42338
I_3	10	6	7	6	8
I_4	15	20	15	17	19
I_5	6	7	8	6	7

表 2 建设效率产出指标值

	DN ₁	DN ₂	DN ₃	DN ₄	DN ₅
G_1	58%	53%	53%	56%	41%
G_2	8%	10%	8%	7%	6%
G_3	86%	91%	86%	88%	95%
G_4	2%	3%	2%	2%	3%
G_5	3%	5%	2%	2%	4%
G_6	16%	18%	18%	15%	21%
G_7	82%	87%	77%	77%	75%

表 3 运营效率产出指标值

	DN1	DN2	DN3	DN4	DN5
O_1	8.61	8.44	9.72	8.88	8.12
O_2	80%	71%	71%	57%	57%
O_3	99.89%	99.87%	99.91%	99.98%	99.99%
O_4	98.75%	91.58%	93.45%	95.35%	97.30%
O_5	4.53	7.68	6.648	5.886	4.872
O_6	0.40%	0.50%	0.20%	0.50%	0.20%
O_7	2.92	2.66	2.4	2.15	1.93

3.2 计算结果

选取 15 名专家对我国智能电网发展规划试点、全面发展及引领提升三阶段中配电网智能化建设效率和运营效率权重进行了分配, 将所有专家评价结果进行算数平均, 结果如表 4 所示。

表 4 建设效率与运营效率权重

权重	规划试点	全面建设	引领提升
建设效率	0.7	0.5	0.3
运营效率	0.3	0.5	0.7

2015 年是智能电网全面建设阶段的完成年,因此本文选择建设效率和运营效率的权重各为 0.5。

在运营效率产出指标中,配电自动化非故障区域平均恢复供电时间、用户平均故障停电时间、城市配网人员效率三个指标为非期望产出,因此运营效率采用考虑非期望产出的超效率 DEA 模型。本文运用 Matlab 软件编写了超效率 DEA 和考虑非期望产出的超效率 DEA 程序,将数据代入程序中完成计算,计算结果如表 5 所示。

表 5 计算结果

Table 5 Calculation results

	DN1	DN2	DN3	DN4	DN5
建设效率	1.6755	1.9385	1.2627	1.2722	1.8967
运营效率	6.6677	2.8537	7.1013	4.8366	1.525
发展效率	4.1716	2.3961	4.1820	3.0544	1.7109
排序	2	4	1	3	5

计算结果表明,该评价方法能够实现对配电网智能化发展的全过程评价,有助于开展针对性的完善工作。如 DN1 省在建设效率和运营效率均取得了较好的结果,表明该省配电网智能化发展比较均衡;DN2 省配电网智能化建设效率最高,而运营效率低,说明该省配电网智能化基础设施建设完成率比较好,但配电网智能化整体运营效果没有得到充分发挥;DN3 省配电网智能化建设效率低,但运营效率最高,表明该省配电网智能化建设速度趋缓,而整体运营水平较好;DN4 省配电网智能化建设效率处于较低水平,运营效率处于中等水平,表明该省需要在以上两个方面都需要加强;DN5 省配电网智能化建设效率较高,而运营效率得分最低,表明该省迫切需要提高配电网智能化整体运营效果。

4 结论

配电网智能化发展具有阶段性特点,因此设计了包含建设和运营两个阶段的效率测算研究。在充分考虑的我国配电网智能化发展的实际情况的基础上,构建了评价指标体系,并依据建设效率、运营效率各自的投入产出指标特点,选择超效率 DEA 模型和考虑非期望产出的超效率 DEA 模型分别计算建设效率和运营效率,然后依据专家评判得到的建设效率和运营效率权重值,加权计算得到配电网智能化发展效率。最后,运用配电网智能化数据进行了模型验证。计算结果为管理者提供了评价配电网智能化发展效率的有效信息,为确定配电网智能

化发展的合理投入提供了依据。

参考文献

[1] 张健,蒲天骄,王伟,等. 智能电网示范工程综合评价指标体系[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 5-9.
ZHANG Jian, PU Tianjiao, WANG Wei, et al. A comprehensive assessment index system for smart grid demonstration projects[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 5-9.

[2] IBM Corporation. Smart grid method and model[R]. Beijing: IBM Corporation, 2010.

[3] U.S. Department of Energy. Smart grid system report annex A and B[R]. New York: U.S. Department of Energy, 2009.

[4] The Electric Power Research Institute Inc. EPRI methodological approach for estimating the benefits and costs of smart grid demonstration projects[R]. Palo Alto: The Electric Power Research Institute Inc., 2010.

[5] 张海瑞,韩冬,刘玉娇,等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 24-29.
ZHANG Hairui, HAN Dong, LIU Yujiao, et al. Smart grid evaluation based on anti-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 24-29.

[6] 杨丽君,王硕,卢志刚. 配电网智能化规划评价指标[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 83-87.
YANG Lijun, WANG Shuo, LU Zhigang. Indices of distribution network intelligent planning evaluation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 83-87.

[7] 刘苑红,信诚,王浩国,等. 智能配电网技术经济综合评价指标体系与方法[J]. 电气应用, 2014, 33(11): 22-30.
LIU Yuanhong, XIN Cheng, WANG Haoguo, et al. Intelligent power distribution network technology economic comprehensive evaluation index system and method[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(11): 22-30.

[8] 王澄,徐延才,魏庆来,等. 智能小区商业模式及运营策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 147-154.
WANG Cheng, XU Yancai, WEI Qinglai, et al. Analysis of intelligent community business model and operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(6): 147-154.
- [9] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕, 等. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 10-17.
HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi, et al. Research on multi-dimensional post evaluation methodology of new energy power generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 10-17.
- [10] 陈卫, 杨波, 张兆云, 等. 计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 27-35, 45.
CHEN Wei, YANG Bo, ZHANG Zhaoyun, et al. Distribution networks supportability evaluation and optimization considering electric vehicles charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 27-35, 45.
- [11] 顾雪平, 王大江, 梁海平, 等. 电力系统扩展黑启动方案动态综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 44-52.
GU Xueping, WANG Dajiang, LIANG Haiping, et al. Dynamic comprehensive assessment of power system extended black-start plans[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 44-52.
- [12] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 119-125.
- LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 119-125.
- [13] 黄雄峰, 翁杰, 张宇娇. 微电网建设规划方案评估与选择[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 76-81.
HUANG Xiongfeng, WENG Jie, ZHANG Yujiao. Evaluation and selection of microgrid construction planning schemes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 76-81.
- [14] FARE R, GROSSKOPF S, NOH D, et al. Characteristics of a polluting technology: theory and practice[J]. Journal of Econometrics, 2005, 126: 469-492.
-
- 收稿日期: 2015-11-22; 修回日期: 2016-03-10
- 作者简介:
韩柳(1975-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计; E-mail: hlhanliu@163.com
李金超(1978-), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 研究方向为智能电网评价与决策; E-mail: lijc@ncepu.edu.cn
胡殿刚(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能电网。E-mail: hudg@gs.sgcc.com.cn
- (编辑 张爱琴)