

DOI: 10.7667/PSPC151534

基于效果与基础互动的电网智能化水平综合评价 指标体系研究

黄飞^{1,2}, 宋璇坤², 周晖¹, 韩柳², 李金超³, 肖智宏²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209;
3. 华北电力大学经济管理学院, 北京 102206)

摘要: 为科学评价我国电网智能化水平, 提出电网智能化水平综合评价指标体系。指标体系分为建设效果与建设基础两部分。基于效果与基础间引领与推动的作用, 将基础指标与效果指标对应, 形成关联关系。为体现指标体系效果与基础互动的特点, 并提高评价结果的科学性, 初步提出针对所提出指标体系的评价流程与方法, 综合运用了层次分析法、熵权法、灰色关联分析法等评价方法。通过案例实证, 验证了指标体系的科学性和有效性。可实现电网智能化建设效果与建设基础关联度的量化测算, 有助于发现薄弱环节, 引导电网智能化建设方向。

关键词: 电网智能化; 评价; 指标体系; 效果; 基础; 互动

Research on comprehensive evaluation index system of grid's intelligence level based on interaction between effect and basis

HUANG Fei^{1,2}, SONG Xuankun², ZHOU Hui¹, HAN Liu², LI Jinchao³, XIAO Zhihong²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 3. School of Economic and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To evaluate the intelligence level of grid in our country scientifically, an evaluation index system of grid's intelligence level is presented. There are two parts of the index system, i.e. construction effect and construction basis. Based on the promotion and the guidance between effect and basis, an interaction is created by matching basis and effect indexes. To embody the interaction and to enhance the accuracy of consequence, a tentative evaluation procedure and method specific to the above index system is proposed, in which the analytic hierarchy process, entropy method and grey correlation analysis are used. Results of applying the proposed method in practical case show scientificity and effectiveness of the proposed index system. The correlation degree between effect and basis can be calculated. It's conducive to the discovery of weaknesses, and construction direction of grid's intelligence can be brought.

Key words: grid's intelligence; evaluation; index system; effect; basis; interaction

0 引言

2009年以来, 美国、欧盟等发达国家或地区根据本地区的现有条件及需求, 制定了各自的智能电网发展路线^[1]。在我国, 随着智能电网热潮的兴起, 相关电网公司提出并制订了“坚强智能电网”的发展规划并开始全面推进^[2-3]。

智能电网是在传统电力系统基础上, 通过集成

新能源、新材料、新设备和先进传感技术、信息技术、控制技术、储能技术等新技术, 形成的新一代电力系统, 具有高度信息化、自动化、互动化等特征, 可以更好地实现电网安全、可靠、经济、高效运行。现阶段, 我国电网结构发展的高速增长已经逐步放缓, 当前电网研究更关注如何发挥传统电网的效果与效能, 因此, 电网智能化建设是当前我国电网建设的重点。

在智能电网评估体系方面, 欧美发达国家进行了大量研究工作, 取得了丰富的成果^[4-6], 如美国的

“智能电网成熟度模型”、“智能电网评估框架体系”、“智能电网建设及其项目的评估指标体系”等, 以及欧洲的“智能电网效益评估指标体系”等, 但仍有一些不足之处: 一是由于电网发展情况存在差异以及关注点的不同, 评估的思路和采用的技术路线各有偏重, 如欧盟提出的评价体系更加关注于新能源接入和节能减排的实施效果^[7], 而“智能电网建设及其项目的评估指标体系”是用于智能电网整体建设进程和单个建设项目的推进程度和收益情况的评估; 二是指标体系结构较为简单, 多为以智能电网特征或环节为基础的自上而下的分支结构, 如“智能电网评估框架体系”是在总结智能电网特征的基础上提出的由 4 组共 20 项指标构成的评估体系。国内电力行业在电网的发展、建设评估方面也开展了许多研究工作, 提出了“智能电网试点项目评价指标体系与评价方法”、“电网发展水平评估指标体系”、“电网发展诊断指标体系”等^[8-9], 也有学者对智能电网评价指标体系的科学构建^[10]、绿色低碳角度的智能电网评价指标构建^[11]、评价指标的动态更新^[12]等进行了研究。目前, 我国关于智能电网评价尚未形成完备的体系, 评价的广度与深度有待进一步提高, 且建设效果与基础间的关系有待发掘。

本文针对我国电网智能化建设现状, 从建设效果和建设基础两方面出发, 建立了电网智能化水平综合评价指标体系; 通过分析效果层与基础层指标间的关联关系, 实现了效果与基础的双向互动, 即效果与基础间引导与驱动的作用; 初步提出了基于所提出的指标体系的评价流程与方法; 并通过实证, 验证了指标体系的科学性和有效性。

1 指标体系构建思路与总体框架

对电网智能化水平的评价分为两个层面: 一个层面关注电网智能化建设带来的效益, 包括电网安全性与可靠性的加强、经济效益与效率的提升、对环境影响的降低、信息的透明开放以及与电源和用户更友好地互动等; 另一个层面关注电网智能化基础建设的过程, 即对传统电网的改造, 使其具有自动化、互动化、信息化的特征并不断提升的过程。

电网智能化基础建设实现其预期效益, 进而满足其发展需求。建设基础是建设效果的基本, 建设效果是建设基础目标, 建设需求是建设效果的导向, 三者相辅相成, 如图 1 所示。

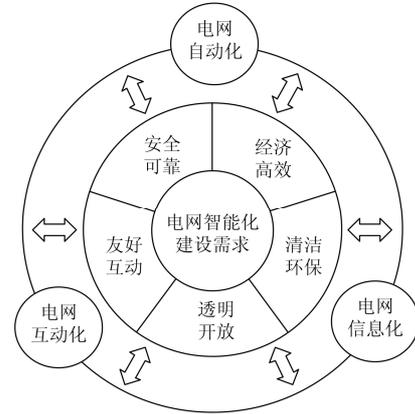


图 1 建设效果、建设基础与建设需求间的关系

Fig. 1 Relationship between and among construction effect, basis and demands

因此, 本文从预期效益及基础建设两个层面出发, 建立包含效果层、基础层的电网智能化水平综合评价指标体系。而基于两层指标体系的结构, 可定量分析效果层指标与基础层间的关联关系, 实现效果与基础指标间的互动。指标体系结构如图 2 所示。

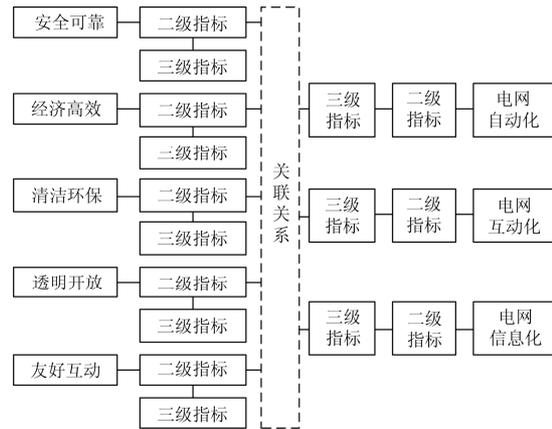


图 2 指标体系结构

Fig. 2 Architecture chart of index system

2 建设效果指标体系

智能电网是对传统电网承载的联系电源和负荷纽带作用的进一步强化, 具有传统电网的一般特性和自身个性。因此, 智能电网在继承传统电网安全性与经济性要求的同时, 在大规模可再生能源快速发展、社会公平公正需求以及电源、用户双向互动需求高涨的背景下, 发展出了清洁环保、透明开放以及友好互动的新要求。本文从安全可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动五个方面出发, 建立电网智能化建设效果评价指标体系。

2.1 安全可靠指标

安全可靠是指具有强大的电力输送能力和安全可靠的电力供应。通信信息网的建设是电网智能化建设的重要环节。因此，在关注传统的电网安全可靠性的同时，通信信息安全也十分重要。从电网安全可靠、通信信息安全两个方面建立指标体系如表 1 所示。

表 1 安全可靠指标体系

Table 1 Index system of safety and reliability

二级指标	三级指标	编号
电网安全可靠	输电事故数	E1
	变电事故数	E2
	配电网自愈速度 ^[13]	E3
	配电网自愈率	E4
	城市用户供电可靠率 ^[14]	E5
	农网用户供电可靠率	E6
通信信息安全	信息通信系统安全运行指数	E7
	信息事件数	E8

2.2 经济高效指标

经济高效是指提高电网运行和输送效率，降低运营成本，促进能源资源和电力资产的高效利用，体现在经济效益、电网效率和人员效率 3 个方面，指标体系如表 2 所示。

表 2 经济高效指标体系

Table 2 Index system of economics and efficiency

二级指标	三级指标	编号
经济效益	增值服务收益 ^[15]	E9
	当年电费回收率	E10
	电能消费公平系数	E11
电网效率 ^[16]	年最大负荷利用率	E12
	线路最大负载率	E13
	线路年运行等效平均负载率	E14
	主变年最大负载率	E15
	主变年运行等效平均负载率	E16
	输电人员效率	E17
人员效率	变电人员效率	E18
	城市配网人员效率	E19
	全员劳动生产率	E20

2.3 清洁环保指标

清洁环保是指促进可再生能源发展与利用，降低能源消耗和污染物排放，提高清洁电能终端能源消费中的比重，体现在绿色发电、绿色电网和绿色用电三个方面，指标体系如表 3 所示。

表 3 清洁环保评价指标体系

Table 3 Index system of cleanliness and green

二级指标	三级指标	编号
绿色发电	可再生能源发电量占比	E21
	可再生能源年利用小时数实现率	E22
	弃风比例	E23
	分布式电源能量渗透率	E24
绿色电网	单位电量土地扰动面积	E25
	智能变电站节约占地面积	E26
	综合线损率	E27
绿色用电	需求侧管理节约电量	E28
	电能占终端能源消费比例	E29
	电能替代电量比例	E30

2.4 透明开放指标

透明开放是指电网、电源和用户的信息透明共享以及电网的无歧视开放，体现在电网透明和电网开放两个方面，指标体系如表 4 所示。

表 4 透明开放评价指标体系

Table 4 Index system of transparency and openness

二级指标	三级指标	编号
电网透明	信息公开深度	E31
	信息更新速度	E32
	信息获知便利性	E33
电网开放	电力市场交易电量增长率	E34
	电网业务开放领域投资额	E35
	大用户直购电规模及比例	E36
	各类用户接入标准体系完备性	E37

2.5 友好互动指标

友好互动是指实现电网运行方式的灵活调整，友好兼容各类电源和用户的接入与退出，促进发电企业和用户主动参与电网运行调，体现在服务优质和互动效果两个方面，指标体系如表 5 所示。

表 5 友好互动评价指标体系

Table 5 Index system of amity and interaction

二级指标	三级指标	编号
服务优质	优质服务评价指数	E38
	电网年最大负荷利用率同比增长率	E39
互动效果	执行峰谷电价 ^[17] 的电量比例	E40
	需求侧管理节约电力	E41
	负荷监测及控制能力	E42
	电动汽车充换设施利用率	E43

3 建设基础指标体系

智能电网建设基础评价指标体系的建立应立足

于我国电网智能化建设的发展形势, 涵盖我国当前电网智能化的建设重点, 突出关键性的、作用显著的建设基础指标。

本文将电网智能化建设基础分为自动化、互动化、信息化建设三个方面并作为一级指标, 按照发电、输电、变电、配电、用电、调度六个环节和信息通信平台, 建立电网智能化水平基础层评价指标体系。

3.1 电网自动化指标

电网自动化是指电力设备、系统或生产、管理过程在没有人或较少人的直接参与下, 按照人的要求, 经过自动检测、信息处理、分析判断、操作控制, 实现预期目标, 体现在输电、变电、配电、调度自动化 4 个方面, 指标体系如表 6 所示。

表 6 电网自动化指标体系
Table 6 Index system of automation

二级指标	三级指标	编号
输电自动化	灵活交流输电装置总容量	B1
	节能导线条数占比	B2
	防灾减灾技术应用	B3
	应用状态监测技术线路占比	B4
	应用智能巡检技术线路占比	B5
变电自动化	智能变电站占比	B6
	变电站智能巡检机器人覆盖率	B7
	变电设备状态监测覆盖率 ^[17]	B8
配电自动化	配电自动化覆盖率	B9
	馈线自动化覆盖率	B10
	配电抢修指挥平台覆盖率	B11
	配电自动化终端覆盖率	B12
调度自动化 ^[18]	省/地(县)级智能电网调度控制系统覆盖率	B13
	省/地(县)级备用调度覆盖率	B14
	地调级调度数据网双接入覆盖率	B15
	厂站端调度数据网接入率	B16
	二次安全防护系统覆盖率	B17

3.2 电网互动化指标

电网互动化是指电网中源、网、荷之间使彼此发生作用或变化的过程。电网互动化可提高电网对外部环境的适应能力, 对可再生能源、分布式电源的接纳能力, 同电动汽车等用户侧用能方式的交互能力, 体现在用电互动化、电动汽车、新能源接入、分布式电源四个方面, 指标体系如表 7 所示。

3.3 电网信息化指标

电网信息化是指在电网中培养、发展以计算机、网络通信技术为主的智能化工具为代表的新生产

力, 并使之提升电网运行与管理水平的过程, 体现在通信信息平台的建设方面, 指标体系如表 8 所示。

表 7 电网互动化指标体系

Table 7 Index system of interaction

二级指标	三级指标	编号
用电互动化	用电信息采集系统覆盖率	B18
	智能电能表覆盖率	B19
	电能服务管理平台覆盖率	B20
	需求侧响应电价手段	B21
	互动化营业厅面积密度	B22
电动汽车	城市充(换)电站面积密度	B23
	高速公路充(换)电站线性密度	B24
	电动汽车与充换电设施匹配度	B25
大规模新能源接入 ^[19]	新能源功率预测系统覆盖率	B26
	风电、光伏并网检测完成率	B27
	新能源装机容量占比	B28
分布式电源	分布式电源装机容量占比	B29
	分布式发电预测实现率	B30

表 8 电网信息化指标体系

Table 8 Index system of informatization

二级指标	三级指标	编号
通信网建设	35 kV 及以上变电站光纤覆盖率	B31
	骨干通信网光缆覆盖率	B32
	通信传输网平台带宽容量	B33
	10 kV 通信接入网光纤覆盖率	B34
	电力光纤入户率	B35
信息化建设	SG-ERP 系统覆盖率	B36
	信息通信设备自动监控率	B37
	信息网络可用率	B38
	业务系统可用率	B39

4 基础与效果指标关联关系分析

通过对指标的分析, 可以得到基础层三级指标与效果层二级指标间的关联关系, 如表 9 所示。

5 电网智能化水平综合评价流程

在构建科学的指标体系之后, 选择合理的评价方法是完成评价的另一个重要方面。针对前文所述评价指标体系, 在评价方法的选取方面, 应注意以下几点:

- 1) 实现建设基础对建设效果的驱动力的测算, 体现建设效果与建设基础间的互动作用;
- 2) 拉大评价对象差距, 实现激励功能;
- 3) 主观赋权法与客观赋权法相结合, 保证评价结果的客观公正;
- 4) 对基

础与效果间的权重进行合理分配。初步给出评价流程,如图3所示。

表9 效果层与基础层指标关联关系

Table 9 Incidence relation between effect indexes and basis indexes

效果层二级指标	相关联的基础层三级指标
电网安全	B1、B3~B14、B26、B27、B30
通信信息安全	B15~B17、B31~B34、B37~B39
经济效益	B18~B21、B23~B25、B35
电网效率	B1、B13、B21
人员效率	B5~B9、B11~B13、B36
绿色发电	B13、B26~B28
绿色电网	B2、B6
绿色用电	B20、B21、B23~B25
电网透明	B21、B22
电网开放	B23~B25、B29
服务优质	B11、B20、B22
互动效果	B18、B21~B25

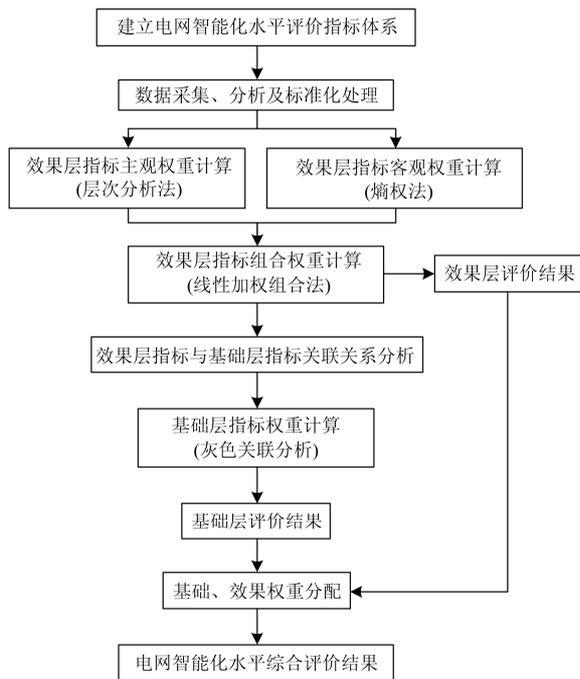


图3 电网智能化水平综合评价流程

Fig. 3 Comprehensive assessment procedure of grid's intelligence level

(1) 层次分析法计算效果层指标主观权重

运用层次分析法计算递阶层次模型中各元素的权重时,通过两两比较判断的方式确定每个层次中元素的相对重要性,并用定量的方法表示,进而建立判断矩阵;然后利用数学方法计算每个层次的判断矩阵中各指标的相对重要性权数;最后通过在递阶层次结构内各层次相对重要性权数的组合,得到全部指标相对于目标的重要程度权数。在计算过程

中,元素相对重要性的确定依赖于相关专家的经验判断,因此得到的权重分配是主观的。

(2) 熵权法计算效果层指标客观权重

熵权法是根据各指标的观测值所提供信息量的大小来确定权重的方法,它是一种客观赋权方法,体现了客观信息中指标的评价作用大小。指标的数据分布越分散,其不准确性也越大,其所包含的信息量越大,重要程度也越高,其权重也应较大;反之表明该指标的重要性低,其权重也较小;当各评价对象的某项指标值完全相同时,熵值达到最大,意味着该指标无有用信息,可以从评价指标体系中移除。运用熵权法计算效果层指标客观权重,提高了不同地区、不同时期指标值差异较大的指标的权重,可激励在某一环节发展较为薄弱的地区尽快弥补短板。

(3) 线性加权计算效果层指标组合权重

第*i*个指标线性加权组合权重 w_i 的计算公式为

$$w_i = \alpha w'_i + \beta w''_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: w'_i 为第*i*个指标的主观权重; w''_i 为第*i*个指标的客观权重; n 为效果层指标个数; α 和 β 表示主、客观赋权方法的相对重要程度,满足 $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$, $\alpha + \beta = 1$ 。

线性加权综合考虑主观和客观在赋权过程中发挥的作用,既能体现主观赋权法各指标权重系数之间排序的准确性,又能保证指标权重系数数据值的客观真实性,从而较好的避免了单一赋权法的缺陷之处,能够得出更准确、更合理的指标权重系数。

(4) 灰色关联分析计算基础层指标权重

灰色关联分析以各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述因素间关系的强弱和次序。

设第*p*个效果层指标与相关的*q*个基础层指标的*N*个历史数据经无量纲化处理后构成参考序列 $X_0, X_k(k=1, 2, \dots, q)$, $q+1$ 个数据序列形成如下矩阵:

$$[X_0, X_1, \dots, X_q] = \begin{bmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \dots & x_q(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \dots & x_q(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_0(N) & x_1(N) & \dots & x_q(N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

绝对差值 $\Delta_{0k}(l) = |x_0(l) - x_k(l)| (l=1, 2, \dots, N)$,

令 $\max\{\Delta_{0k}(l)\} = \Delta(\max)$, $\min\{\Delta_{0k}(l)\} = \Delta(\min)$,

求得第*k*个相关基础层指标的第*l*个历史数据的关联系数:

$$\xi_{0k}(l) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{0k}(l) + \rho \Delta(\max)} \quad (3)$$

式中, ρ 为分辨系数,其值越小越能提高关联系数

间的差异, 一般取 $0.1 \leq \rho \leq 0.5$ 。 X_k 与 X_0 的关联度为

$$r_{0k} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \xi_{0k}(l) \quad (4)$$

基于前文中建立的指标关联关系, 根据指标数据, 即可定量计算指标间关联度的大小, 得到基础层指标权重。第 j 个基础层指标权重 z_j 计算公式为

$$z_j = z_j^* / \sum_{a=1}^n z_a^* \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中:

$$z_j^* = \sum_{p=1}^m r_{pj} y_p \quad (6)$$

式中: r_{pj} 为第 p 个效果层指标与第 j 个基础层指标间的关联度; y_p 为第 p 个效果层指标的权重; m 为效果层指标总个数, n 为基础层指标总个数。

6 评价案例实证

运用所提出的指标体系及评价方法, 对某地区电网智能化水平进行评价, 流程如下:

(1) 指标数据填写与标准化处理;

(2) 运用层次分析法和熵权法分别计算得到效果层指标主观、客观权重值并加权(这里取 $\alpha=0.8$, $\beta=0.2$), 得到效果层指标权重; 运用灰色关联分析计算基础层指标权重。一级指标权重如表 10 所示。

表 10 一级指标权重

Table 10 Indicator weight values of first level indexes

指标	安全可靠	经济高效	清洁环保	透明开放	友好互动
权重	0.383 28	0.241 79	0.152 30	0.109 89	0.112 74
指标	自动化	互动化	信息化		
权重	0.503 92	0.281 13	0.214 95		

(3) 用各指标权重对标准化后的指标值加权求和, 得到评价结果。评价地区 2011 至 2014 年电网智能化建设效果评价结果如图 4 所示(满分为 1)。

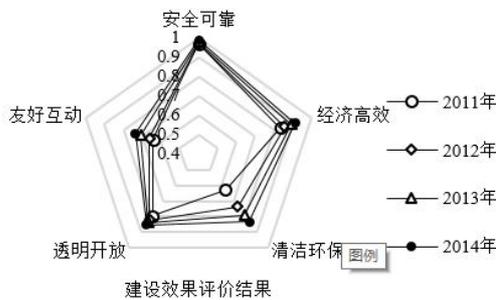


图 4 建设效果评价雷达图

Fig. 4 Radar chart of effect indexes

从图中可以看出: 该地区电网安全可靠水平保持较高; 经济高效和透明开放水平良好但提升较为

缓慢; 清洁环保水平提升速度较快; 友好互动水平较低。

对效果层二级指标“互动效果”及其关联指标进行分析, 运用灰色关联分析法得到关联度如表 11 所示。

表 11 “互动效果”指标关联度

Table 11 Correlation degree of “effect of interaction”

关联指标	B18	B21	B22	B23	B24	B25
关联度	0.2439	0.7335	0.1523	0.3174	0.2867	0.5131

可以看出, “需求侧响应电价手段”和“电动汽车与充换电设施匹配度”两个基础指标对“互动效果”的影响较大。为提高电网友好互动水平, 该地区在提高薄弱环节的同时, 应着重关注需求侧响应和电动汽车充换电设施的建设。

7 结论

本文从建设基础和建设效果两方面, 建立了电网智能化水平综合评价指标体系, 并对基础与效果指标间的关联关系进行了分析。基于所建立的指标体系, 设计了电网智能化水平综合评价流程, 可实现效果与基础间关联关系的量化测算。通过实证研究表明, 指标体系与评价方法的结合可实现建设基础与建设效果的双向互动, 可对我国电网智能化建设现状进行全方位、深层次的评价, 对今后电网智能化建设的途径和目标具有指导意义。

参考文献

- [1] 张冬霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-14.
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-14.
- [2] 高志远, 姚建国, 曹阳. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.
- [3] 中国科学院“构建符合我国国情的智能电网”咨询项目工作组. 中国智能电网的技术与发展[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 倪敬敏, 何光宇, 沈沉, 等. 美国智能电网评估综述[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 9-13.
NI Jingmin, HE Guangyu, SHEN Chen, et al. A review of assessment of smart grid in America[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 9-13.
- [5] IBM Corporation. Smart grid method and model[R].

Beijing: IBM Corporation, 2010.

[6] European Smart Grids Technology Platform. Strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future[R]. Brussels: European Commission, 2008.

[7] 孙强, 葛旭波, 刘林, 等. 智能电网多属性网络层次组合评价法及其应用研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 49-54.

SUN Qiang, GE Xubo, LIU Lin, et al. Multi-attribute network process comprehensive evaluation method for smart grid and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 49-54.

[8] 国网北京经济技术研究院. 智能电网试点项目评价指标体系与评价方法研究[R]. 北京: 国网北京经济技术研究院, 2010.

[9] 国网北京经济技术研究院. 电网发展评估方法与模型研究[R]. 北京: 国网北京经济技术研究院, 2010.

[10] 王彬, 何光宇, 梅生伟, 等. 智能电网评估指标体系的构建方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 1-5.

WANG Bin, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. Construction method of smart grid's assessment index system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 1-5.

[11] 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.

[12] 韩冬, 严正, 宋依群, 等. 基于系统动力学的智能电网动态评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 16-21.

HAN Dong, YAN Zheng, SONG Yiqun, et al. Dynamic assessment method for smart grid based on system dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 16-21.

[13] 李天友, 徐丙垠. 智能配电网自愈功能与评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 105-108.

LI Tianyou, XU Bingyin. Self-healing and its benchmarking of smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 105-108.

[14] 王宗耀, 苏浩益. 配网自动化系统可靠性成本效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 98-103.

WANG Zongyao, SU Haoyi. Cost-benefit analysis model for reliability of distribution network automaton system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 98-103.

[15] 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.

[16] 韩柳, 庄博, 王智冬, 等. 电网利用效率指标研究[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 850-854.

HAN Liu, ZHUANG Bo, WANG Zhidong, et al. The research about power grid efficiency indexes[J]. East China Electric Power, 2011, 39(6): 850-854.

[17] 程瑜, 翟娜娜. 面向智能电网的峰谷分时电价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 196-201.

CHENG Yu, ZHAI Nana. Evaluation of TOU price oriented to smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 196-201.

[18] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.

XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.

收稿日期: 2015-08-31; 修回日期: 2015-10-11

作者简介:

黄飞(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、智能电网规划与评价; E-mail: huangfeita@163.com

宋璇坤(1960-), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、智能电网评价与设计; E-mail: songxuankun@chinasperi.sgcc.com.cn

周晖(1964-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场运营、电力负荷预测、电力系统经济调度。E-mail: hzhou@bjtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)