

# 智能电网综合评价模型与方法综述

姬 源, 黄育松

(贵州电网公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:**针对智能电网及其关键技术领域的综合评价研究,综述了该领域在模型和方法上的研究现状。详细介绍并比较分析了近年来智能电网环境下电力系统中不同领域或环节的综合评价模型和方法的研究成果,主要包括评价指标体系、成本收益分析、关键技术评估模型、评价方法等方面。同时分析了智能电网综合评价的当前研究热点,总结并概述了现有研究成果的特点、存在的主要问题以及未来可能的研究方向。

**关键词:**智能电网;综合评价;评估模型;评价方法;评价指标

**中图分类号:**TM 715

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2015)03-0081-04

随着智能电网的不断发展,智能电网综合评价体系被提出并广泛研究。美国能源部(DOE)在2010年提出了美国智能电网综合评价指标体系框架,通过6项主要特性设计的评价指标来评估美国智能电网的发展程度<sup>[1]</sup>。同时,美国电力科学研究院(EPRI)发布了用于衡量美国智能电网建设项目成本收益的综合评价指标体系<sup>[2]</sup>。欧洲输电商联盟设计了支持新能源和分布式能源的发展,综合评价指标体系<sup>[3]</sup>。我国也进行了智能电网试点项目评价指标体系的研究<sup>[4]</sup>,为智能电网中示范工程项目的评价标准提供了参考。在智能电网环境下,常规的评价方法依然适用于对智能电网的综合评价研究<sup>[5]</sup>。考虑到智能电网中出现的新技术、新因素等特点,为了评估智能电网中特殊的技术问题,较多学者提出新的评价方法适应智能电网综合评价研究的新要求<sup>[6-8]</sup>。根据这些有关评估智能电网相关问题的评价方法研究,不难发现提出具有较强适用性和良好操作性的评价方法对智能电网综合评价结果有着重要影响。文中以现有相关研究为基础,详细介绍并比较了有关研究成果的特点和解决的实际问题,并对未来可能的研究方向及应用前景进行展望。

## 1 综合评价模型

### 1.1 多指标综合评价模型

基于指标体系的综合评估是综合评价研究中最常用的方法与手段。指标体系往往由多项反映评价对象不同特性,或者实现不同评价目标而建立起来的指标集合。多指标综合评价模型适用于智能电网发展的整体水平与建设成效的综合评判研究,其意义在于为智能电网的决策者与管理者提供宏观战略层面的评估结果,考察智能电网在规划目标、内涵特性、价值功能等方面的综合效果。采用层次分析法形成的具有递阶层次结构的智能电网评价指标体系是多指标评价模型的

典型应用。现有的智能电网评价指标体系大多采用这种递阶层次结构,体现出以下的特点:

(1) 研究者基于对智能电网规划目标、基本特性的理解,设计出用于衡量智能电网规模水平的评价指标体系,并对不同指标的类型与作用作出了较为详细的说明,如战略型指标,效果型指标等。

(2) 在指标类别方面,一般为定性与定量2种指标。层次分析法完全能够兼容不同类别的指标,达到评价的预期目标。同时,定性类指标在采用模糊化处理过程中,克服了评估研究中指标值无法量化的问题,使得评价结果一样表现出客观、真实。

(3) 评价指标体系的优化设计与选取也是近年来多指标综合评价模型研究中的关注点。对冗繁的指标体系中的多项指标进行“去相关性”,“降维”等操作,可得到精简后的指标体系。这种指标筛选研究能够最大程度保留原指标体系信息量,同时极大地缩减了原指标体系规模,去除原指标数据体系内各评价指标间的相关性,减少信息的交叉重叠,实现评价过程中的客观性、简洁性和可操作性。典型的指标优化研究如主成分分析,因子分析等。

### 1.2 关键技术领域评估模型

智能电网的建设贯穿于电能生产、输送与消费的各个环节,其业务领域分布于发电侧,如新能源并网;电网侧,如分布式电源接入;用户侧,如电动汽车充放(换)电服务。因此,除了需要对智能电网建设的总体建设水平进行综合评估,还需对电网中特定环节、关键技术领域或某项业务运营进行专门的综合评估研究。

文献[9]提出了配电网规划的综合评价指标体系及评价方法,所设计的指标体系包括“抗大面积停电能力”、“输电网与配电网供电匹配度”、“电网可扩展裕度”等多项评价指标,突出了配电网规划与运行之间相协调的特点。文献[10]从可靠性、经济性、市场运营和环保性研究了微电网规划的评价指标体系及其应用,

综合评估了微电网结构设计及运行方式上的效果。这些研究的共同特点表现为针对电网某一特定的技术领域,建立该评价领域的综合评价指标体系,多项指标从不同角度反映了被评对象应实现的功能与价值特性。文献[11]提出了智能变电站自动化系统的有效度评估模型,将指标分为宏观、微观不同层面,并对指标之间进行相关性分析,反映了不同层次指标之间的反馈依存关系。这种研究思路不仅可以获得待评价技术领域的综合效果,更能进一步对其中相关因素之间的逻辑关系进行深入分析,评估与发现研究问题的本质。

### 1.3 成本效益评估模型

投资与技术是智能电网建设与发展的支撑点。从成本效益角度,评估智能电网推进过程中达到的效果与存在的问题也是一个重要的研究方向。欧盟能源研究机构发布了欧洲智能电网工程项目的成本效益分析报告<sup>[12]</sup>,介绍了项目类型及其预算的分配方案,在建设工程达到的成熟标准与规模水平,以获得的效益判断示范工程最终的成熟程度。文献[13]的研究集中体现为从智能电网示范工程项目设计目标出发,明确了工程中关键技术所能够取得的物理作用,从而获取效益的定义及其计算过程。这种较为通用的成本效益研究方法能够对单一技术的作用效果做出确切的效益定义,但对于单一技术的多个效益耦合特性和不同技术实现同一效益的参与贡献程度的量化评估方面显得无能为力。

关于智能电网成本效益分析的其他评估模型研究,文献[14]提出了一种基于系统动力学的智能电网评估模型,通过建立技术与效益之间的因果反馈关系,评估出不同的投资行为对智能电网建设效果的作用影响。这种方法不仅可以反映投资、技术与效益的时空分布特性,在影响因素辨识方面也有一定的作用。但该方法在建模上由于不同研究者对于同一问题的理解可能不同,考虑的因素及限定条件也会不同,因此模型存在不唯一性。

## 2 综合评价方法

评价方法是依据一定的权重对各评价指标的评判结果进行综合处理的技术。确定适宜的权重系数是综合评价方法的主要任务,不仅影响综合评价结果的优劣,而且决定综合评价模型的有效性。

### 2.1 基于功能驱动的综合评价方法

该方法是根据评价指标的相对重要程度来确定权重,其本质属于主观赋权法。层次分析法就是其中最为典型的方法。文献[15]采用了层次分析法设计了一种市场环境下以用户侧为导向的需求响应机制,以不同负荷控制方案相互之间重要性的影响评估建立的需

求响应机制最终效果。层次分析法作为典型主观类的综合评价方法在电力系统综合评估中已得到了成熟和广泛的应用。层次分析法具有以下优势:(1)以经验知识直接表达出评估者主观信息,突出评价者直觉判断力。(2)定性地分析评价指标之间相互的逻辑关系,以定量形式简洁地表达出来。(3)良好的可操作性,无需大量的样本观测数据也可进行评估研究。

特别地,对于智能电网的综合评价研究,从评价效果来看,采用层次分析法不仅可以评价单一电网的整体发展水平,而且可以通过分别计算不同电网的综合评价结果,比较不同电网的发展水平及优劣差距。从评价条件来看,在智能电网建设的初期,由于没有经验可循,建设目标又具有多样性,这使得其建设过程的无序性很强,决策者主观把握智能电网发展的侧重点显得尤为重要。层次分析法通过对专家与决策者的主观意见的综合,能将专家们丰富的经验、知识贯穿于整个评价体系。因此,层次分析法作为一种“贴近思想”的方法对于智能电网的综合评价研究较强的适用性。

### 2.2 基于差异驱动的综合评价方法

该类方法主要是利用观测数据所提供的信息来确定权重系数,其属性为客观赋权法。通过各个指标在指标总体中的变异程度来确定权系数,以此来反映任一指标对其他指标影响程度的度量。以熵理论为基础的客观评价方法,是关于指标可辨识性的赋权方法,通过将权重信息与指标数据信息的融合,得到体现个体差异特性的综合评价结果。文献[16]提出了配电网规划的动态评估模型,采用熵权法根据各指标在评价周期内所含信息量的大小确定指标权重,并通过系统动力学模型仿真了权重的变化规律。熵能够表示出系统无序程度,以此来反映指标之间的差异性。另一种熵理论,即反熵也被应用于智能电网的综合评价研究中。熵 $h$ 与反熵 $h'$ 的一种常用的定义如下:

$$h = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (1)$$

$$h' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(1-p_i) \quad (2)$$

式中: $p_i$ 为系统第 $i$ 种状态出现的概率。由于客观赋权法的权重制定较依赖于指标信息,因此在对智能电网进行综合评价研究中,针对不同指标信息形式,采用合理的综合评价方法成为研究中的热点。

指标信息形式按照其特点可分为基于指标性能、指标值位置和指标值分布的信息形式三类。文献[17]提出了基于区间层次分析法和逼近理想解排序法的负荷密度指标计算方法,其中逼近理想解排序法为基于指标性能的客观评价法,通过待计算的负荷密度指标与其最优性能之间的差异,完成负荷密度修正功能。对



于基于指标值位置信息的评价方法,典型代表为有序加权平均算子。文献[18]采用了诱导有序加权平均算子对短期负荷进行最优组合预测,建立了相应的权系数优化模型。该方法通过对预测精度指标值的排序,得到了预测精度的位置权重。

基于差异驱动的综合评价方法能够反映智能电网综合评价研究中评价对象之间的差异,并对协调智能电网发展的均衡性(各指标之间差异程度)与功能性(各指标数值大小)有潜在的优势。在对该类方法研究中,除了根据指标信息形式提出适宜的评价方法外,进一步考虑指标信息形式中存在的“不确定”或“模糊性”也将是未来的研究热点,但尚未见到此类研究成果。

### 2.3 具有综合集成特征的评价方法

该类方法一般是综合了功能驱动和差异驱动两类方法的优势特征,从逻辑上将两类方法进行有机结合,使获得的权重系数同时兼顾主观信息与客观信息。

一般的综合集成赋权法的关键问题是如何确定主观法与客观法的分配系数,可用如下的线性加权的优化数学模型来表达:

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (r_1 w_{1j} + r_2 w_{2j}) x_{ij} \\ \text{s.t.} & r_1^2 + r_2^2 = 1, (r_1 > 0, r_2 > 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $w_i$ 和 $w_j$ 分别为功能驱动和差异驱动两类方法获得的指标 $x_{ij}$ 的权重系数; $r_1$ 和 $r_2$ 为待定系数。应用综合集成赋权法对智能电网进行综合评价时,可根据决策者的偏好信息,电网智能化所处的发展阶段中个别指标的重要程度,及差异度的辨识要求,合理地、因地制宜地确定2类方法在综合集成中的作用大小。

## 3 存在的问题与研究前景

### 3.1 研究中存在的主要问题

(1) 智能电网综合评价指标体系研究中,所设计的评价指标一般不具有较强的可操作性。主要体现在指标计算过程中原始数据较难获取,指标规范化处理标准不唯一,只能表征有限的智能电网功能属性等。

(2) 目前对于智能电网的技术先进性评价的研究较少。文献[19]提出了基于柯布-道格拉斯生产函数的智能技术评价方法,以技术对经济收益的贡献度来反映智能电网技术的发展水平。该研究为智能电网的技术评估提供了理论参考。

(3) 目前的智能电网综合评价研究仍然存在与其他领域综合评价相同的问题,即相同的评价对象与目的,应用不同评价方法得到的评价结论可能出现非一致性的现象。例如,分别采用层次分析法和熵权法对同一指标体系的多区域智能电网进行综合评价,一般情

况下2种方法将得到完全不同的综合评价结果,即各区域智能电网的综合排序。这种现象的原因在于每种评价方法解决问题的侧重点不同,通过各自独特的获取指标权重系数的方式表示该评价方法的适用条件与作用特点。针对非一致性的现象,部分学者提出将所有方法得到的评价结果进行兼容组合,构造评价结果排序集合。尽管这已成为该领域的一个研究热点,但这种解决问题方式的实用性仍受到质疑。

(4) 综合评价理论与智能电网实际建设存在脱节问题。纵观国内外对智能电网进行综合评价的现有研究,一般遵循着固有的思路,即针对某一问题或目标,提出或应用一种评价理论,通过简单的算例证明其有效。但是,由于理论本身的限制或实际中一些关键的因素较难纳入到模型中,使得理论与实际应用尚存一定距离。

### 3.2 应用前景及未来研究方向

智能电网综合评价研究思路应该是通过选择合理的综合评价方法和理论,构建科学的评估模型,实现对智能电网的技术性能,带来的经济、社会效益,智能化发展的适应性与协调性等方面进行全面、综合地评估分析。关于智能电网综合评价的未来应用方面,需要提高以评估模型和方法的可操作性为首要目标,兼顾工程应用评价的适用性,完成对智能电网工程项目和总体智能化建设做出能够反映现实存在的工程技术和经济问题。特别是应用综合评价理论实现对智能电网综合评价软件系统的研发,在程序设计上应遵循可继承性,可靠性和稳定性的原则,系统设计上需要满足多效性,兼容性和可视化的要求,还应实现界面简洁、操作流程简单,可方便快捷地引导操作人员对智能电网建设展开评价的功能特点。

考虑到智能电网综合评价的未来研究方向,作者认为除了在加强综合评价理论和方法的基础研究外,结合智能电网的特点与属性,有必要在以下几个方面开展更加深入的研究:

(1) 针对智能电网理论、技术及其所面临的困难与挑战,结合并深化现有的综合评价理论,对智能电网的项目效益开展综合评价研究及应用。通过对典型的工程项目在技术特征、经济效益、投资规模及环保特性等方面的评估,不仅能够获得工程项目达到的技术水平和规模效益状况,而且可以了解项目对智能电网总体建设的示范效果,以及未来发展的引领程度。

(2) 注重对智能电网技术先进性的评价研究。从技术先进性和技术进步的角度,提出可行、有效的评估方法,研究并建立智能电网技术先进性评估模型,用于反映智能电网中先进技术的发展水平,并能够衡量电网智能化带来的经济社会效益。这应该成为智能电网

关于技术评估研究的一种新思路和未来研究方向。

(3) 从效率的角度, 评估智能电网及其工程项目的技术能力与分配效率。智能电网的效率评价主要目的是通过获取技术效率与分配效率指标, 评估出智能电网通过技术手段获取效益的能力和资源优化配置的分配能力。典型的研究思路是建立智能电网的投入产出模型, 计算不同的效率评价指标反映智能电网各方面的效率特性。

(4) 研究并提出适宜的综合评价方法, 形成合理的评价标准与规则, 实现对智能电网建设成熟度的有效划分。目前对智能电网建设成熟状况的评价等级划分上, 还处于定性描述阶段。如何针对智能电网建设不同发展阶段, 对众多技术发展的成熟度与均衡度进行定性判断与定量评价, 提出明确的判断的标准是未来研究应重点考虑的方面。

#### 4 结束语

综述了目前智能电网综合评价模型与方法的特点, 以及国内外关于智能电网及其工程项目综合评价在理论研究与应用上的现状, 分析了当前该领域的研究特点与存在的主要问题。从智能电网效益、效率、技术先进性以及成熟等级判定方面, 指出了其综合评价研究的未来发展应重点关注的方面。

#### 参考文献:

- [1] US Department of Energy. Smart Grid Characteristics, Values, and Metrics[R]. Washington, DC, USA; US DOE, 2009.
- [2] US EPRI. Methodological Approach for Estimating the Benefits and Costs of Smart Grid Demonstration projects[R]. Palo Alto; US EPRI, 2010.
- [3] European Commission. European Technology Platform Smart Grids: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future[R]. Brussels: European Commission, 2010.
- [4] 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.
- [5] CHEN C L, CHIA H Y, SHYUA J Z. A Comparison of Innovation Policy in the Smart Grid Industry Across the Pacific: China and the USA[J]. Energy Policy, 2013, 57: 119-132.
- [6] ZIO E, AVEN T. Uncertainties in Smart Grids Behavior and Modeling: What are the Risk and Vulnerabilities? How to Analyze Them?[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 6308-6320.
- [7] JACKSON J. Improving Energy Efficiency and Smart Grid Program Analysis with Agent-based End-use Forecasting Models[J]. Energy Policy, 2010, 38(7): 3771-3780.
- [8] 李如琦, 苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 66-70.
- [9] 肖 峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40.
- [10] 杨 琦, 马世英, 唐晓骏, 等. 微电网规划评价指标体系构建与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 13-17.
- [11] 邱 剑, 王慧芳, 陈志光, 等. 智能变电站自动化系统有效度评估模型研究[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 1-8.
- [12] GIORDANO V, Gangale F, FULLI G, et al. Smart Grid Projects in Europe: Lessons Learned and Current Developments[R]. Petten, Netherlands; European Commission Joint Research Centre, 2011.
- [13] WSDEN S, TAYLOR P C, LANG P D, et al. Evaluating the Benefits of an Electrical Energy Storage System in a Future Smart Grid[J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 7180-7188.
- [14] 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.
- [15] KIM D M, KIM J O. Design of Emergency Demand Response Analytic Hierarchy Process[J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3(2): 635-644.
- [16] 顾 洁, 秦 玥, 包海龙, 等. 基于熵权与系统动力学的配电网规划动态综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 76-83.
- [17] 刘自发, 庞铨铨, 魏建伟, 等. 基于 IAHP 和 TOPSIS 方法的负荷密度指标计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 56-60.
- [18] 黎静华, 韦 化. 基于诱导有序加权平均算子的最优组合短期负荷预测[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 177-182.
- [19] 韩 冬, 严 正, 刘玉娇. 采用柯布-道格拉斯生产函数的智能技术评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 71-77.

作者简介:

姬 源(1979), 男, 贵州贵阳人, 高级工程师, 从事电力系统自动化工作;

黄育松(1978), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 从事电力系统自动化工作。

## Review of Comprehensive Evaluation Models and Methods for Smart Grids

Ji Yuan, HUANG Yusong

(Power Dispatch and Control Center, Guizhou Power Grid Company, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** This paper presents a review of the literature about the models and methods of comprehensive evaluation on the smart grid and its key technologies. A variety of research achievements in recent years about the comprehensive models and methods for different aspects of power systems in the context of smart grids environment are introduced and discussed. The achievements include evaluation index systems, cost-benefit analysis, key technological assessment models, evaluation method and others. Moreover, current research hot spots about the comprehensive assessment for smart grids are analyzed. In addition, the properties of current achievements, problems needed to be solved and potential studying directions of the research are summarized in details.

**Key words:** smart grids; comprehensive evaluation; assessment models; evaluation methods; evaluation indices