

大数据环境下基于影子价格的配电网综合评价方法

王森¹,王蕾²,陈飞²,王承民¹,谢宁¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240;

2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院,浙江 杭州 310008)

摘要:建立科学全面的评价指标体系,并展开合理的综合评价,能够为智能电网建设提供可靠的决策支持。以拉格朗日影子价格理论为基础,建立能够真实反映电网资源优化配置的评价指标体系,并以指标体系中的底层指标为约束条件,构建目标层指标的优化函数;结合大数据分析,依据底层指标的影子价格进行权重计算,形成对目标层指标的初级评价;根据目标层指标对综合评价的贡献程度进行目标层指标赋权,从“性能”和“效益”2个方面实现配电网的综合评价。

关键词:配电网;大数据;影子价格;拉格朗日算子;对偶;熵权法;综合评价

中图分类号:TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909027

0 引言

配电网结构复杂,设备种类多、数量大、分散广,运行方式多变,容易受到各种外部因素的影响^[1]。随着智能电表、馈线终端单元(FTU)等设备以及配电自动化(DAS)、用电信息采集(CIS)等应用系统的大范围推广,配电网逐渐积累了海量电力数据^[2]。这些数据不仅包含配电网规划、运行、检修等主要业务信息,也直接或间接与配电网的性能和效益相关。同时,智能配电网数据来源众多,如配电管理系统(DMS)、数据采集与监视控制(SCADA)系统、生产管理系统(PMS)、地理信息系统(GIS)、电网气象信息系统等,如何有效利用电力数据对区域配电网进行综合客观评价是现在需要解决的紧迫问题。采用合理的配电网综合评价方法,不仅能够有效改变现有大数据评价方法不成熟、差异化严重的特点,还能合理定位电力公司发展方向,对引导电网发展和企业经营具有十分重要的现实意义^[3]。

目前,国内众多专家和学者结合大数据分析,对配电网评价指标以及评价方法展开了广泛研究。文献[4]对配电网大数据的来源和特征进行了总结,并结合相关应用场景展开分析,如运行状态评估与预警、配电网负荷预测、基于配电网数据融合的停电优化、电能质量监测和评估等,其侧重于评价方法理论的概述,但并未针对其中某个方法进行展开;文献[5]提出了一种考虑指标灵敏度和关联度的变权重评估方法,实现了动态权重计算,但降低了计算效率,同时也将异常指标值纳入了评价范围;文

献[6]应用主成分聚类分析法对智能电网评价体系中的评估指标进行标准化和降维处理,从发电侧、输电侧、用电侧3个方面展开电网建设的综合评价,整个评价指标体系侧重于电网的流程环节,并未专门针对配电网进行展开。文献[7]将信息熵理论和主成分分析法相结合,对火电机组的运行优化、故障诊断、状态监测展开评估,并将评价结果与实际竞赛结果进行比较,二者比较吻合,但算例选取的机组数量过少,随机性较大。

考虑到电能难以大规模存储^[8]以及我国电力市场未完全开放的实际情况,本文从优化配电网资源配置的角度出发,依据影子价格能够保证电力资源最优利用、反映真实电力价值的特点,扩充影子价格的广泛意义,建立包括底层指标和目标层指标的配电网评价指标体系,并提出对应的综合评价方法。该方法首先添加底层指标的等式约束和不等式约束条件,构造拉格朗日目标层指标的优化函数,并根据对偶原则求取底层指标的影子价格和最优解以及目标层指标对应的最优值;然后,标准化底层指标实际值偏离最优解的程度,结合改进的信息熵理论,依据底层指标的影子价格进行底层评价指标的权重计算,形成针对目标层指标的初级评价公式;最后,对目标层指标进行贡献程度分析,得到目标层指标的权重值,并结合初级评价结果,得到配电网的综合评价。通过算例验证了该方法的可行性,除了常规的供电能力、安全性、可靠性评估外,本文还增加了环保效益、经济效益和社会效益的评估内容,从“性能”和“效益”2个方面实现配电网的综合评价。

1 广义影子价格

1.1 影子价格与资源优化配置

影子价格亦称之为预测价格、计算价格和最优计划价格等,是用线性规则方法计算得到的反映资

收稿日期:2018-12-19;修回日期:2019-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777121);国网总部科技项目(5211JY17000L)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777121) and the Science and Technology Project of SGCC(5211JY17000L)

保护动作以及防灾设备等,对应的底层指标见表2。

表2 安全性的底层指标

Table 2 Underlying indexes of security

指标	底层指标	数据来源	指标说明
A2	功角稳定指标	数据采集与监视控制系统	小扰动稳定
	母线电压越限裕度		母线电压偏离限值
	短路电流		短路电流在线计算
	电压稳定指标		暂态电压
	频率稳定指标	广域测量系统	实时频率测量、孤网频率
	设备风险值	企业信息管理系统	设备故障率、寿命期限等
	防灾设备比例		灾害应急处理设备拥有率
	保护不正确动作率		保护误动作和拒动作

表2中,功角稳定指标的计算方法为小扰动过程中功角随时间变化率最大值。

(3)可靠性(A3)的底层指标。

可靠性指标主要用以定量或定性评价电网对电力用户保持持续供电的能力^[14],最常见的用来评价稳定性的指标有 $N-1$ 校验、停电时间等,还可以加入环网数目等指标,对应的底层指标见表3。

表3 可靠性的底层指标

Table 3 Underlying indexes of reliability

指标	底层指标	数据来源	指标说明
A3	$N-1$ 校验通过率	企业信息管理系统	主要取决于配电网结构、规划
	$N-2$ 校验通过率		环网供电可靠性
	网络环形结构数目		静态稳定
	静态稳定校验通过率		静态稳定
	大干扰稳定校验通过率	生产管理系统	大扰动稳定
	平均停电时间		停电时间长短
	年停电次数		累计停电次数

(4)经济效益(B1)的底层指标。

经济效益指标主要用于评价电网运行和输送效率、降低运营成本、提升投入产出效益、促进能源资源和电力资产有效利用^[14]。售电量、上网电价和用电增长是经济效益的来源,线损率、发电煤耗、设备折旧是限制经济效益增长的几个重要指标,对应的底层指标见表4。

表4 经济效益的底层指标

Table 4 Underlying indexes of economic efficiency

指标	底层指标	数据来源	指标说明
B1	线损率	电能质量检测系统	线路电能损耗
	售电收入	用电信息采集系统	电力公司售电
	投资收入比	生产管理系统	建设投资与收益
	发电平均煤耗		发电企业煤耗
	增长用电量		用电量变化
	设备折损率	企业信息管理系统	设备寿命
	上网电价	营销系统	竞价上网
	月发电计划		发电计划

(5)社会效益(B2)的底层指标。

社会效益主要包括电网企业提供的就业岗位数

量、用户的满意度以及电力设备占用社会公共资源的面积以及空间等^[15],对应的底层指标见表5。

表5 社会效益的底层指标

Table 5 Underlying indexes of social benefits

指标	底层指标	数据来源	指标说明
B2	用户满意度	客服系统	用户对电力供应的评价
	新增就业效益	生产管理系统	电网建设增加就业岗位
	变电站单位占地面积		与小区变压器等设备体积等因素有关
	扩建规模		电网新建线路或扩建原有线路

(6)环保效益(B3)的底层指标。

环保效益主要是新能源并网后带来的空气质量改善和减少的化石资源消耗等。环境问题日益突出,环保效益已成为一个重要指标,对应的底层指标见表6。

表6 环保效益的底层指标

Table 6 Underlying indexes of environment

指标	底层指标	数据来源	指标说明
B3	新能源发电占比	数据采集与监视控制系统	新能源发电量占总电量比值
	新能源并网率	空气监测平台	并网率越高越环保
	碳排放量		减少碳排放
	SO ₂ 排放量		减少SO ₂ 排放
	烟尘浓度		发电环节产生的烟尘
	氮氧化物排放量		减少氮氧化物排放

表6中,新能源发电占比指新能源发电量所占的比例;新能源并网率指容量所占的比例,即并网的总容量与新能源总容量的比值。

由于区域电网存在网架模式、政策驱动、气候环境等因素的差异,评价指标体系包含的底层指标可以在现有基础上结合区域电网实际状况动态调整,以逐步完善。如在“性能”和“效益”对应指标集合增添骨干网架电压等级、电动汽车^[16]充电桩、跨区输电、智能电表普及情况等相关指标。

3 综合评价模型

3.1 影子价格和最优解的对偶解法

配电网的底层指标如频率、节点电压水平、线损率等都有一定的范围。根据电网安全性和稳定性要求,不允许任何指标越限,因此可以通过这些指标的集合构建配电网综合评价的约束条件。同理,配电网的综合评价也需要建立目标层指标,这些目标层指标如经济效益、供电能力、环保效益等不能直接获得,需要通过底层指标整合计算得到作为目标函数。

由影子价格的拓展意义可知,所有底层指标都有对应的广义影子价格。以构造环保效益目标函数为例,设新能源发电占比为 x_1 、新能源并网率为 x_2 、CO₂排放为 x_3 、SO₂排放量为 x_4 ,依此类推,即 $x_{B3} =$

$(x_1, x_2, \dots, x_6)$, 则其对应的环保效益目标函数为 $f_{B3}(x_1, x_2, \dots, x_6)$ 。

依照文献[17]中不等式约束处理的拉格朗日对偶方法, 形成以下的求解过程。

(1) 建立约束条件集合。

综合某目标层指标和对应的底层指标, 分别构造目标层指标函数 $f(\mathbf{x})$ 和底层约束条件集合。等式约束集合为 $\{h(x_i)|h_i(\mathbf{x})=0\}$, 不等式约束集合为 $\{g(x_i)|g_i(\mathbf{x})\leq 0\}$, 且 $1\leq i\leq 6$ 。

(2) 构造环保效益(B3)的目标优化函数。

$$L_{B3}(x_1, x_2, \dots, x_6) = f_{B3}(x_1, x_2, \dots, x_6) + \sum_{i=1}^6 \alpha_i h_i(x_i) + \sum_{i=1}^6 \beta_i g_i(x_i) \quad (2)$$

其中, α_i 为对应等式约束的影子价格; β_i 为对应不等式约束的影子价格。

(3) 建立原问题函数。

若 $f_{B3}(\mathbf{x}_{B3})$ 为环保效益的总成本, 则原问题函数为:

$$\min_{\mathbf{x}_{B3}} f_{B3}(\mathbf{x}_{B3}) = \min_{\mathbf{x}_{B3}} \max_{\alpha, \beta; \beta_i \geq 0} L(\mathbf{x}_{B3}, \alpha, \beta) \quad (3)$$

(4) 建立对偶问题函数。

$$\max D(\alpha, \beta) = \max_{\alpha, \beta; \beta_i \geq 0} \min_{\mathbf{x}_{B3}} L(\mathbf{x}_{B3}, \alpha, \beta) \quad (4)$$

(5) 结合原问题和对偶问题求解。

文献[18]证明: $\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) = \max D(\alpha, \beta)$ 时, 可行解 $\mathbf{x}^*$ 和影子价格 α^*, β^* 也是原始问题和对偶问题的最优解。求取底层指标最优解 $\mathbf{x}_{B3}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_6^*)$, 底层指标对应的影子价格 $\alpha_{B3}^* = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6)$ 和 $\beta_{B3}^* = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_6)$ 以及目标层指标的最优值 L_{B3}^* 。

3.2 标准化

3.2.1 底层指标标准化

不同评价指标的量纲一般不同, 不同系统数据的采集时间间隔各异, 数据的时间标签和精度也存在差异性, 在进行计算时需要特别处理。在数据量充足的条件下, 考虑到历史数据丰富, 即使很多数据都是按照“天”、“小时”等阶段化数据来进行计量的, 但系统本身对其时效性要求不高, 甚至某些时段可以看成是不变的, 能够通过数据清洗和拟合等方法对各系统间断数据点进行插值, 补全每 2 个采集点之间的数据, “化点为线”实现数据完整性和连续性。

每个系统各自指标的精度一致, 不涉及不同指标间的精度比较, 只需要进行标准化处理消除量纲影响, 然后再控制标准化后各系统数据精度一致。传统标准化方法按照正向指标和反向指标分别进行处理, 基于影子价格的方法可以简化进行统一处理。

采集多个区域配电网的底层指标数据, 设区域 i 的某个底层指标的实际值为 x_i 、底层指标的最优解

为 x^* 、指标范围为 $[x_{\min}, x_{\max}]$, 进行标准化处理如下:

$$X = 1 - \frac{|x_i - x^*|}{|x_{\max} - x_{\min}|} \quad (5)$$

其中, $X \in [0, 1]$ 。 X 越接近于 1, 该指标评价内容越好; X 越接近于 0, 该指标评价内容越差。含有 n 个底层指标的评价体系, 其标准化集合为 $\{X|X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。

3.2.2 影子价格标准化

底层指标 x 既可以参与等式约束, 也可以参与不等式约束, 只参与其中一项时, 另一项的影子价格为 0。综合影子价格 α 和 β 的影响, 若采集 m 个区域配电网的底层指标影子价格, 记区域 i 的某个底层指标的影子价格为 α_i 和 β_i , 取综合影子价格为:

$$\lambda_i = (\alpha_i + \beta_i) / 2 \quad (6)$$

然后对 m 个样本的综合影子价格进行标准化处理:

$$p_j = \lambda_j / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (7)$$

其中, p_j 为第 j 个区域配电网某项底层指标 x 的综合影子价格比重, 且 $1 \leq j \leq m, p_j \in [0, 1]$ 。得到标准化集合 $\{p|p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 。

3.2.3 目标层指标标准化

根据 3.1 节, 结合对应 6 个目标层评价指标的拉格朗日优化函数和对偶方法, 得到目标层指标的最优解 $L^* = (L_{A1}^*, L_{A2}^*, L_{A3}^*, L_{B1}^*, L_{B2}^*, L_{B3}^*)$ 。采集 m 个区域配电网数据, 根据实际值 L 偏离最优值 L^* 程度, 进行标准化处理:

$$l_{Ai} = |L_{Ai} - L_{Ai}^*| / L_{Ai}^* \quad (8)$$

$$l_{Bi} = |L_{Bi} - L_{Bi}^*| / L_{Bi}^* \quad (9)$$

其中, $1 \leq i \leq 3$, 分别对应 3 个性能类(A)和 3 个效益类(B)的目标层指标。得到目标层指标的标准化集合 $\{l|l_{A1}, l_{A2}, l_{A3}, l_{B1}, l_{B2}, l_{B3}\}$, 且每个 l 包含 m 个元素。

3.3 权重和评价计算

信息熵理论是一种客观赋权法, 它通过区别比较各个评价指标自身的信息有序度来判定其权重值, 从而能够对一组不确定性数据所包含的信息量进行有效度量^[19]。熵权法是基于信息熵理论的一种权重计算方法, 利用原始数据和众多样本来提高计算结果的准确性和合理性, 但对样本数量有限或者指标过多的情形都难以充分发挥作用, 需要进行改进。

3.3.1 权重计算

结合影子价格对熵权法进行改进, 利用影子价格指标贡献微增率的概念, 将其纳入权重计算的基本单元, 替换原始指标数据, 弱化对原始数据的依赖, 该方法特别适用样本较多情形, 以提高计算效率。

(1) 底层评价指标的权重计算。

根据信息熵的不确定性分析和判断,信息量与关联度有着密切关系,信息量大小也反映了对评价目标的贡献度大小,因此可以根据信息熵理论构造评价指标权重值计算公式,定义 n 个底层指标中的第 i 个指标 x_i 的信息熵为:

$$E_i = -\left(\sum_{j=1}^m p_j \ln p_j\right) / \ln m \quad (10)$$

由上式可得包含 n 个底层指标的信息熵集合为 $\{E|E_1, E_2, \dots, E_n\}$ 。一般地, E_i 越大,第 i 个底层评价指标提供的信息量越少; E_i 越小,第 i 个底层评价指标提供的信息量越多。根据熵权公式计算每个底层指标 x_i 对应的权重 w_i 为:

$$w_i = (1 - E_i) / \left(n - \sum_{j=1}^n E_j\right) \quad (11)$$

得到底层指标 x 的权重值集合 $\{w|w_1, w_2, \dots, w_n\}$,且满足 $0 < w_i < 1, w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$ 。

(2) 目标层评价指标权重值计算。

以 L 的标准化集合 $\{l|l_{A1}, l_{A2}, l_{A3}, l_{B1}, l_{B2}, l_{B3}\}$ 为基本元素,同样对2类目标层指标 A 和 B 分别赋权。可得性能类目标层指标权值集合 $\{u|u_{A1}, u_{A2}, u_{A3}\}$ 和效益类目标层指标权值集合 $\{u|u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}\}$,且满足 $u_{A1} + u_{A2} + u_{A3} = 1$ 和 $u_{B1} + u_{B2} + u_{B3} = 1$ 。

3.3.2 评价值计算

(1) 初级评价计算。

根据底层指标 x 的标准化得到相应的集合 $\{X|X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 和对应权重值集合 $\{w|w_1, w_2, \dots, w_n\}$,展开初级评价:

$$f_i = w_1 X_1 + w_2 X_2 + \dots + w_n X_n \quad (12)$$

其中, f_i 为对应目标层指标的初级评价值,且 $1 \leq i \leq 6$ 。最终得到 $\{f|f_{A1}, f_{A2}, f_{A3}, f_{B1}, f_{B2}, f_{B3}\}$ 。

(2) 百分制综合评价计算。

根据“性能”指标权重值集合 $\{u|u_{A1}, u_{A2}, u_{A3}\}$,和“效益”指标权重值集合 $\{u|u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}\}$,结合初级评价结果 $\{f|f_{A1}, f_{A2}, f_{A3}, f_{B1}, f_{B2}, f_{B3}\}$,并引入可变系数 ζ ,展开综合评价计算:

$$F = \left[\zeta \sum_{i=1}^3 u_{Ai} f_{Ai} + (1 - \zeta) \sum_{i=1}^3 u_{Bi} f_{Bi} \right] / 2 \quad (13)$$

其中, $F \in (0, 1)$; ζ 为调节系数,且 $\zeta \in (0, 1)$,其选值取决于“性能”和“效益”在综合评价中的整体影响力。总体而言,在电网建设的初期,综合评价更加注重“性能”,即取 $0.5 < \zeta < 1$;在电网安全稳定运行达到成熟阶段,综合评价更加注重“效益”,即取 $0 < \zeta < 0.5$ 。如在现有评价体系基础上,更改网架结构或者引进新的设备都会影响调参系数:电网扩建后, ζ 取值应变小;设备更新换代时, ζ 取值应变大。在没有特别

说明的情况下,取 $\zeta=0.5$ 即可,也可以结合专家意见,根据评价要求实现动态调整。

最后建立配电网百分制综合评价方法,对整个区域配电网形成一个总体评价结果:

$$P_{\text{final}} = 100(\sqrt{F - 0.5} / 0.5)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

其中, P_{final} 为区域配电网综合评价得分。分值越高,表示评价结果越好,有以下的评定等级。

(1) $F < 0.5$ 时,表示综合评价结果较差,需要对配电网结构以及资源进行重新布局。

(2) $F > 0.5$ 时, P_{final} 为正值,有:① $[0, 60]$ 分表示配电网符合一般运行状态,但可以进一步优化配电网结构;② $(60, 80]$ 分表示配电网状态稳定,符合经济性、可靠性等原则;③ $(80, 90]$ 分表示配电网运行在最优解边缘,达到智能配电网发展要求;④ $(90, 100]$ 分表示资源优化配置已达到最大化程度,且此时配电网接入了可靠稳定的新能源。

3.4 综合评价流程

综合评价流程可以分成2个主要步骤:一是基于底层指标展开的初级评价,二是基于初级评价结果的综合评价。开展评价的前提是建立合理的评价指标体系,包括底层指标和目标层指标;关键是建立含约束条件的目标优化函数,求取最优解、影子价格和对应的目标最优值;主要方法是大数据采集与分析、数据预处理、标准化处理、熵权法等,其流程如下。

(1) 建立评价指标体系:包含“性能”和“效益”的6个目标层指标以及每个目标层指标对应的众多底层指标。

(2) 构造目标优化函数和对偶函数:通过底层指标的约束条件建立目标层指标的优化函数,结合对偶问题计算最优解、影子价格和对应的目标最优值。

(3) 数据预处理:数据预处理技术是大数据分析的必要步骤,各系统数据在存储过程中存在数据缺失、数据异常、数据冗余等情况,主要应对措施是数据筛选、数据清洗、数据质量检测与整理等。

(4) 大数据采集与分析处理:各系统存储的数据形态各异,既有能直接处理的结构化数据,也有不能直接进行处理的非结构化和半结构化数据。现阶段,运用大数据分析处理技术能够有效应对数据量大和处理速度快的要求,采集多个区域的配电网数据,提取价值数据,并进行标准化处理、熵权法赋值计算,使实时评价成为可能。

(5) 评价计算:根据以上步骤所得结果展开计算,先针对6个目标层指标进行初步评价,最终得到区域配电网的综合评价值,为智能配电网资源配置、网络扩建以及设施更新维护等提供决策依据。

4 算例分析

选取某省 3 个具有代表性的城市配电网为评价对象:城市 1 为某小型城市,乡镇民营企业众多,投资成本低,商业氛围浓厚,售电收入比同级地市高;城市 2 为省会城市,是该省政治和军事中心,医疗、教育和旅游业发达,是电力保障的首要目标;城市 3 为某中等规模城市,GDP 总量大,社会福利、公共服务水平较高,生活成本较低,为该省宜居城市。依据 3.4 节中综合评价流程,结合配电网数据,对 2017 年 2 月某时刻 3 个城市配电网状态展开综合评价。限于篇幅,算例分析仅列出部分重要计算过程和结果。

4.1 初级评价

根据 3.2.1 节和 3.3.1 节计算得到底层指标 x 的标准化数值 X 和权值 w ,并按照 2.2.2 节指标体系结构进行编号,如 A1-1 为最大负荷的标准化数值,A1-2 为总用电量标准化数值,依此类推得到底层指标权值和标准化结果见附录中表 A1。

结合 3.3.2 节计算各目标层指标的评价值,得到初级评价结果见附录中表 A2。绘出初级评价雷达图对 3 个城市的 6 个目标层评价指标进行对比分析,结果如图 3 所示。

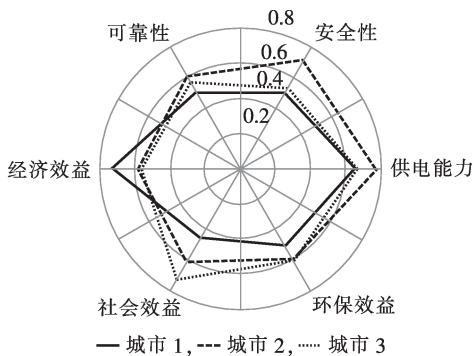


图 3 初级评价雷达图

Fig.3 Radar diagram of primary evaluation

同理,可选取固定时间间隔采集多个时间点数据对某一时间段内配电网状态展开评价,并且绘出初级评价曲线,如图 4 所示。图中,选取时间间隔为 15 min,采集全天 96 个数据节点。

分析图 3 和图 4 可知,城市 1 除了经济效益指标外,其他 5 个指标均处于劣势,说明该小型城市有很大的改造和发展空间;城市 2 和城市 3 的主要差别在于供电能力、安全性和社会效益 3 个指标,且城市 2 稍好于城市 3;在可靠性、经济效益和环保效益方面,城市 2 和城市 3 差别不大,说明省会城市各项指标比较均衡,要稍好于一般中等规模城市。

4.2 综合评价

通过初级评价结果 f 、权值 u 、调节参数 ζ ,得到综合评价百分制结果。算例中选取的区域电网已实

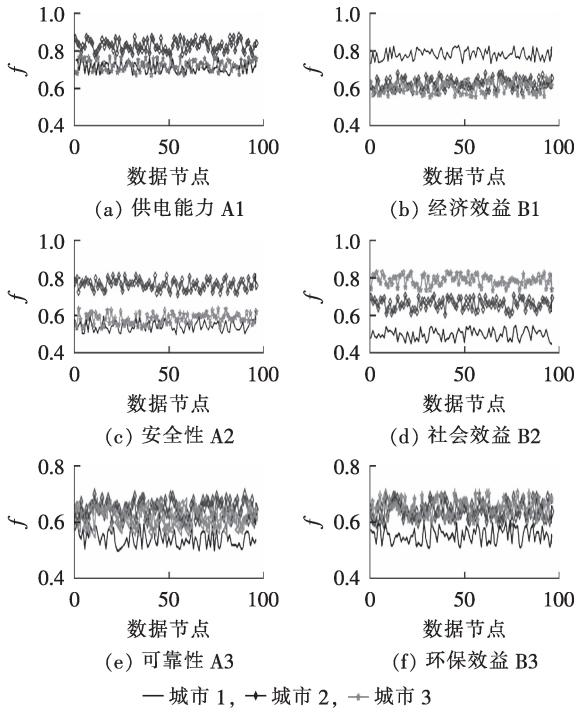


图 4 初级评价曲线图

Fig.4 Curves of primary evaluation

现数年安全稳定运行,网架结构无太大变化,且智能化数字设备占比逐步提升,对应的调参系数取 0.45,计算结果见附录中表 A3。根据百分制评价方法,得出 3 个城市配电网的最终综合评价分数和等级,如表 7 所示。

表 7 综合评价分数和等级

Table 7 Comprehensive evaluation scores and ratings

评价方式	评价结果		
	城市 1	城市 2	城市 3
P_{final} / 分	52.685	87.402	78.352
等级	一般	很好	较好

分析表 7 可知,城市 2 综合评价分数最高,在区间(80,90]分,说明该省省会城市的配电网资源得到了充分利用,各运行指标偏离最优值程度较小,初步达到智能电网的发展要求;城市 3 综合评价分数在区间(60,80]分,说明该中等城市运行状态稳定,符合一般可靠性、经济性等原则,但还有进一步优化改造的空间;城市 1 综合评价分数低于 60 分,说明该小型城市配电网虽然能正常运行,但是存在资源浪费和利用效率比较低的问题,需要针对相应的评价指标进行合理改造。

5 结论

本文提出一种大数据环境下基于影子价格的配电网综合评价方法,该方法先将评价问题与优化问题相结合,依据最优解和拉氏算子展开标准化处理,然后基于底层指标进行目标层指标评价,最后动态

调参实现配电网的综合评价。通过算例分析,验证了该评价方法的准确有效性,得出以下结论:

(1)基于影子价格的综合评价方法依赖于原始数据进行标准化处理,避免人为赋值干扰,而且在权重计算过程中将指标影子价格作为熵权法的基本元素,克服传统方法严重依赖大量数据进行计算的特点,提高评价计算的速度和效率;

(2)在现有评价体系的基础上,综合评价部分引入调参因子,实现在电网建设或者运行的不同阶段,指标权重依据“性能”或者“效益”侧重方面进行动态调整,满足配电网扩建或设备升级改造后继续进行综合评价的要求;

(3)该方法最终不仅能实现全时段评价,形成综合评价结果,还能根据初级评价中各目标层指标雷达图来了解配电网薄弱方面,从而有针对性地对配电网实施改造或优化,甚至结合数据值预测方法,展开预评价;

(4)评价指标体系过于依赖能够量化的指标,目前无法处理定性的指标,而且涉及的分布式电源指标较少,底层指标还需要结合区域电网特点和实际情况进行完善;

(5)对于按照“小时”、“天”、“周”长时间节点采集的数据,在连续性和同步化过程中,数据有效性存疑,下一步要深入研究定性和定量指标的联合建模以及提高数据时效性的大数据方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐铭铭,曹文思,姚森,等.基于模糊层次分析法的配电网重复多发性停电风险评估[J].电力自动化设备,2018,38(10):19-25,31.
XU Mingming,CAO Wensi,YAO Sen,et al. Risk assessment of repeated multiple blackouts for distribution network based on fuzzy AHP[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):19-25,31.
- [2] 孙丰杰,王承民,谢宁.面向智能电网大数据关联规则挖掘的频繁模式网络模型[J].电力自动化设备,2018,38(5):110-116.
SUN Fengjie,WANG Chengmin,XIE Ning. Frequent pattern network model for association rule mining of big data in smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):110-116.
- [3] 薛振宇,胡航海,宋毅,等.基于大数据分析的县公司综合评价策略[J].电力自动化设备,2017,37(9):199-204.
XUE Zhenyu,HU Hanghai,SONG Yi,et al. Comprehensive evaluation based on county electric power big data analysis for company[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):199-204.
- [4] 刘科研,盛万兴,张东霞,等.智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J].中国电机工程学报,2015,35(2):287-293.
LIU Keyan,SHENG Wanxing,ZHANG Dongxia,et al. Big data application requirements and scenario analysis in smart distri-

- bution network[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(2):287-293.
- [5] 周名煜,谢宁,王承民.基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):130-137.
ZHOU Mingyu,XIE Ning,WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation[J]. Power System Protection and Control,2017,45(13):130-137.
- [6] 高新华,严正.基于主成分聚类分析的智能电网建设综合评价[J].电网技术,2013,37(8):2238-2243.
GAO Xinhua,YAN Zheng. Comprehensive assessment of smart grid construction based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Power System Technology,2013,37(8):2238-2243.
- [7] 齐敏芳,付忠广,景源,等.基于信息熵与主成分分析的火电机组综合评价方法[J].中国电机工程学报,2013,33(2):58-64.
QI Minfang,FU Zhongguang,JING Yuan,et al. A comprehensive evaluation method of power plant units based information entropy and principal component analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(2):58-64.
- [8] 黄碧斌,李琼慧.储能支撑大规模分布式光伏接入的价值评估[J].电力自动化设备,2016,36(6):88-93.
HUANG Bibin,LI Qionghui. Value assessment for energy storage in supporting large-scale integration of distributed PVs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):88-93.
- [9] 孙长伟,李翔.节点边际电价与阻塞费用影子价格线性化模型研究[J].华北电力技术,2008(5):7-10,20.
SUN Changwei,LI Xiang. Locational marginal price and shadow price of congestion in linear model[J]. North China Electric Power,2008(5):7-10,20.
- [10] 叶斌.基于资源优化配置的我国电力行业碳减排成本研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
YE Bin. Research on carbon emission reduction cost of the power industry of China based on resource allocation optimization[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2013.
- [11] 郑山水,马赞甫.影子价格长短期划分及其计算[J].生产力研究,2011(8):79-81.
ZHENG Shanshui,MA Zhanfu. The definition and calculation of shadow price in the long and short term[J]. Productivity Research,2011(8):79-81.
- [12] 高岩.带有边际效用非递减用户的智能电网实时电价定价方法[J].工业工程与管理,2018,23(1):10-13.
GAO Yan. Real-time pricing strategy for smart grid with users of non-decreasing marginal benefit[J]. Industrial Engineering and Management,2018,23(1):10-13.
- [13] 田书欣,程浩忠,常浩,等.特高压电网社会效益分析及评价方法[J].电力自动化设备,2015,35(2):145-153.
TIAN Shuxin,CHENG Haozhong,CHANG Hao,et al. Analysis and evaluation of social benefit from UHV power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):145-153.
- [14] 赵良,李立理,何博,等.适合我国国情的智能电网评价指标体系及计算方法[J].电网技术,2015,39(12):3520-3528.
ZHAO Liang,LI Lili,HE Bo,et al. Study on smart grid's evaluation index system and calculation method suited to China's situation[J]. Power System Technology,2015,39(12):3520-3528.

- [15] 刘汕. 特高压试验研究基地社会经济效益评价方法研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 115-119.
LIU Shan. Study on social and economical benefits evaluation methods for ultra high voltage test base[J]. China Southern Power Grid Technology, 2013, 7(2): 115-119.
- [16] 陈丽丹, 张尧, Antonio Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 1-10.
CHEN Lidan, ZHANG Wei, Antonio Figueiredo. Charging load forecasting of electric vehicles based on multi-source information fusion and its influence on distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 1-10.
- [17] 朱泽安, 王承民, 马明, 等. 基于拉格朗日函数鞍距分配的广义内点法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 18-24.
ZHU Ze'an, WANG Chengmin, MA Ming, et al. Generalized interior-point method based on Lagrange function saddle space distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 18-24.
- [18] WOOD A J, WOLLENBERG B F. Power generation, operation and control[M]. 2nd ed. New York, USA: Wiley, 1996.
- [19] 边疆. 基于模糊信息熵理论的城市电网风险评估研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
BIAN Jiang. The risk assessment of urban distribution net-

work based on fuzzy weight theory[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2015.

作者简介:



王 森

王 森(1993—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为电网大数据(**E-mail**: wangsensjtuer@sjtu.edu.cn);

王 蕾(1982—), 女, 北京人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电网发展规划、电力系统分析(**E-mail**: wang_ng_lei1@zj.sgcc.com.cn);

陈 飞(1974—), 男, 浙江东阳人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电网规划设计、综合能源系统(**E-mail**: fei_ei_chen@zj.sgcc.com.cn);

王承民(1970—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统规划与经济运行(**E-mail**: wangchengmin@sjtu.edu.cn);

谢 宁(1973—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定性分析(**E-mail**: xiening@sjtu.edu.cn)。

Comprehensive evaluation method of distribution network based on shadow price under big data environment

WANG Sen¹, WANG Lei², CHEN Fei², WANG Chengmin¹, XIE Ning¹

(1. School of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Economic and Technology Research Institute, Hangzhou 310008, China)

Abstract: Establishing a scientific and comprehensive evaluation system and adopting reasonable evaluation methods can provide reliable decision support for the construction of smart grids. Based on the Lagrange shadow price theory, an evaluation index system that can truly reflect the optimal allocation of power grid resources is established, and the underlying indexes are used as constraints to construct the optimization function of target-level indexes. Then, combined with the big data analysis method, the weights are calculated based on the shadow prices of underlying indexes to form a primary evaluation of target-level indexes. According to the contribution degree of target-level indexes for the comprehensive evaluation, the target-level indexes are weighted, and the comprehensive evaluation of the distribution network is realized from the aspects of “performance” and “benefit”.

Key words: distribution network; big data; shadow price; Lagrange operators; duality; entropy method; comprehensive evaluation

附 录

根据 3.2.1、3.3.1 节计算得底层指标 X 的标准化数值和权值 w ，底层指标权值和标准化结果表 A1。

表 A1 底层指标权值和标准值
Table A1 Underlying indicator weights and standard values

指标	权重 w	城市 1	城市 2	城市 3
A1-1	0.1475	0.6933	0.8807	0.6585
A1-2	0.3466	0.6933	0.8627	0.6585
A1-3	0.2064	0.6933	0.7591	0.6585
A1-4	0.0089	0.3067	0.4749	0.3415
A1-5	0.0206	0.6933	0.4729	0.8829
A1-6	0.2042	0.6933	0.7008	0.6585
A1-7	0.0659	0.3067	0.5271	0.8201
A2-1	0.0534	0.5431	0.5271	0.6585
A2-2	0.3477	0.3067	0.8367	0.3415
A2-3	0.106	0.3067	0.6952	0.3415
A2-4	0.0208	0.3067	0.5271	0.8458
A2-5	0.1242	0.6933	0.4729	0.773
A2-6	0.0062	0.6933	0.4729	0.7009
A2-7	0.2859	0.6933	0.7587	0.6585
A2-8	0.0558	0.6933	0.4729	0.6923
A3-1	0.4034	0.3376	0.5271	0.6585
A3-2	0.0145	0.7984	0.5271	0.6585
A3-3	0.1684	0.6933	0.6037	0.6585
A3-4	0.0434	0.8702	0.5271	0.6585
A3-5	0.0808	0.8437	0.4729	0.3415
A3-6	0.2125	0.3067	0.819	0.3415
A3-7	0.077	0.8129	0.5271	0.6585
B1-1	0.051	0.6933	0.7518	0.6585
B1-2	0.0461	0.3067	0.709	0.3415
B1-3	0.1646	0.3067	0.7302	0.3415
B1-4	0.0018	0.6933	0.8739	0.6585
B1-5	0.0707	0.9894	0.4729	0.3415
B1-6	0.0864	0.3067	0.5271	0.4661
B1-7	0.0533	0.7127	0.5271	0.6585
B1-8	0.526	0.9305	0.5271	0.6585
B2-1	0.4043	0.3067	0.5271	0.7163
B2-2	0.0145	0.5255	0.5271	0.6585
B2-3	0.3599	0.6933	0.4729	0.985
B2-4	0.2213	0.3067	0.9718	0.3415
B3-1	0.2833	0.6933	0.7894	0.6585
B3-2	0.0949	0.6933	0.4729	0.7569
B3-3	0.1885	0.3303	0.4729	0.3415
B3-4	0.2959	0.3195	0.5271	0.6585
B3-5	0.0158	0.3067	0.5677	0.3415
B3-6	0.1216	0.6933	0.6175	0.6585

结合 3.3.2 节计算每个目标层指标的评价值，得到初级评价结果表 A2。

表 A2 初级评价结果
Table A2 Primary evaluation results

目标层指标	城市 1	城市 2	城市 3
A1	0.6644	0.7773	0.6709
A2	0.5018	0.7087	0.5350
A3	0.4982	0.5977	0.5655
B1	0.7252	0.5772	0.5526
B2	0.4490	0.6060	0.7293
B3	0.5082	0.5977	0.6031

通过初级评价结果 f ，得到调节参数计算结果表 A3。

表 A3 目标层指标权值和调参系数
Table A3 Target layer indicator weights and adjustment parameters

指标	A1	A2	A3	B1	B2	B3
调参	0.45					
权重	0.1219	0.7709	0.1072	0.1056	0.2277	0.6667