

11-16-2021

Research on incremental distribution network cooperation model based on dynamic comprehensive fuzzy evaluation

Xuan Liu

Economic and Technical Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100038 , China

Caixia Tan

School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206 , China

Mianbin Wang

Economic and Technical Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100038 , China

Lei An

Economic and Technical Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100038 , China

Zhongfu Tan

School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

Liu, Xuan; Tan, Caixia; Wang, Mianbin; An, Lei; and Tan, Zhongfu (2021) "Research on incremental distribution network cooperation model based on dynamic comprehensive fuzzy evaluation," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 36: Iss. 5, Article 11.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.011

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol36/iss5/11>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

基于动态综合模糊评估的增量 配网合作模式

刘 宣¹, 谭彩霞², 王绵斌¹, 安 磊¹, 谭忠富^{2,3}

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100038; 2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206;
3. 延安大学经济与管理学院, 陕西 延安 716000)

摘 要: 由于新增配网的投资建设存在多主体问题, 同时各主体之间的合作模式尚未明确。因此, 进行了增量配网与供电公司合作模式的研究, 首先基于显著性—冗余分析构建评价指标体系; 其次, 为保证赋权的准确性, 结合客观法与主观法构建了基于熵权法修正的层次分析法指标赋权模型; 然后, 基于变化速度状态模型与变化速度趋势预测模型, 构建增量配网合作模式动态综合模糊评估模型; 最后, 设置供电公司绝对控股、供电公司相对控股、供电公司参股、供电公司不参股 4 种情景进行算例分析。算例结果表明, 动态综合评估模型相对于静态评估模型更能反映成效的真实水平。

关 键 词: 增量配网; 熵权法—层次分析法; 动态综合模糊评估; 合作模式

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.011 中图分类号: TM71 文章编号: 1673-9140(2021)05-0087-10

Research on incremental distribution network cooperation model based on dynamic comprehensive fuzzy evaluation

LIU Xuan¹, TAN Caixia², WANG Mianbin¹, AN Lei¹, TAN Zhongfu^{2,3}

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100038, China;
2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. School of Economics and Management, Yan'an University, Shanxi 71600, China)

Abstract: Due to the multi-agent problem in the investment construction of a newly added distribution network and the unclear cooperation mode between the agents, the paper studies the cooperation mode between the incremental distribution network and the power supply company. Firstly, the paper constructs an evaluation index system based on saliency-redundancy analysis. Then, in order to ensure the weighting accuracy, an objective weighting method and a subjective method are utilized to construct an index weighting model based on the analytic hierarchy process method modified by the entropy weighting method. After that, on the basis of the changing speed state model and the changing speed trend prediction model, a dynamic dynamic-comprehensive fuzzy evaluation model for the Cooperation

收稿日期: 2019-10-06; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(71573084); 国网冀北经研院科技创新成本类项目(B3018F20000G)

通信作者: 谭忠富(1964-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场、综合能源系统研究; E-mail: tanzhongfu@sina.com

Mode of the incremental distribution network is constructed. Finally, four scenarios are set up: absolute control of power supply company, relative control of power supply company, the shareholding of power supply company, and non-shareholding of power supply company to perform example analysis. The calculation examples show that the dynamic-comprehensive evaluation model can reflect the actual level of effectiveness better than the static evaluation model.

Key words: incremental distribution network; entropy weight method-analytic hierarchy process; dynamic comprehensive fuzzy evaluation; cooperation model

随着《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》的发布,其鼓励符合条件的市场主体参与到增量配网业务的投资建设之中,通过混合所有制方式,实现增量配网业务的投资运营。同时,供电企业与社会资本进行合作,充分利用双方优势,实现互惠共赢^[1]。供电公司与增量配网园区合作模式包括供电公司绝对控股、供电公司相对控股、供电公司参股以及供电公司不参股等多种模式,意见对于增量配网园区建设具体采用模式并未进行明确规定,深入研究适合增量配网发展的合作模式迫在眉睫,因此国内外学者对于增量配网展开了评价研究^[2-4]。目前关于增量配网的评价研究,主要集中在投资决策评价与供电可靠性。

关于投资决策评价方面,分为投资决策前评价与投资决策后评价。文献[5-7]均为投资决策前评价,其中,文献[5]通过停电损失评价,从源荷 2 侧构建增量配网投资效益评价模型;文献[6-7]从投入产出的关联关系出发,构建了不同类别配网的指标体系。文献[8-11]则对增量配网进行了投资决策后评价,其中文献[8-10]组合了层次分析法与德尔菲法,从静态评价角度对 10 kV 及以下配网展开了后评价;文献[11-12]同样从静态评价出发对配网投资进行了后评价,促进了配网的精准投资。关于供电可靠性评价方面,文献[13-14]通过主成分分析法对配网可靠性评价指标体系实行降维,筛选非线性相关性较弱的指标;文献[15-16]从静态评估出发,基于网络拓扑结构,利用聚类可靠度进行可靠性评价。

由现有投资决策方面的研究可知,增量配网评价获得国内外学者的重点关注,但是现有研究存在以下问题。

1) 大多研究主要关注初始指标体系构建,但对于初始指标体系有效性的验证筛选并未进行深入研究。

2) 大多研究从静态角度进行综合价值评价,但是随着增量配网的不断发展,计及时间与变化速度的动态综合价值评价还较少涉及。

3) 现有研究主要关注配网的投资决策评价与供电可靠性评价,但对于供电公司与增量配网园区明确的合作模式还较少涉及。

基于国内外学者的研究,该文首先通过显著性分析与信息冗余分析,构建增量配网园区与属地供电公司的指标体系,以此解决对于指标体系有效性的验证筛选并未进行深入研究的问题;然后构建计及变化速度状态和变化速度趋势的动态综合模糊评价模型,以此解决现有研究仅从静态角度进行评价的问题;最后设置多种合作模式进行实证分析。

1 基于显著性—冗余分析的指标体系构建

综合评价的前提是构建科学有效的评价指标体系,该文从投资效益、发展潜力、重要性 3 个维度衡量增量配网与供电公司合作模式成效。投资效益维度结合动态财务评价指标,考虑增量配网投资建设的经济效益及成本。由于自动化与智能化成为增量配网的重要内容,发展潜力维度在传统增量配网功能水平基础上,考虑其自动化与智能化水平;重要性维度主要考虑各合作模式对各方主体影响。

为了使增量配网园区与供电公司的合作模式成效评价指标体系更具代表性,一方面,需对初始指标体系进行显著性检验,筛选出对合作成效评价价值影

响较大的指标;另一方面,由于各个指标之间并不独立,对各指标进行信息冗余分析。主成分负载系数值能反映指标对综合评价显著性影响程度,主成分负载系数越大,指标对综合评价影响越显著,反之亦然。Person 相关系数能度量指标之间的相关

程度,Person 相关系数越大,指标间的相关程度越大。因此,首先通过主成分负载系数筛选出对综合评价影响显著的指标,然后通过指标之间的相关性分析,剔除信息冗余较大指标。可得增量配网园区与供电公司的评价指标体系如表 1 所示。

表 1 增量配网合作模式评价指标体系

Table 1 Evaluation index types of incremental distribution network cooperation model			
目标层	准则层	决策层	含义
投资效益	财务指标	内部收益率	增量配网投资建设净现金流量为零时的折现率
		净现值	增量配网投资建设投产后净现金流入与先进流出差额
		建设成本	增量配网建设阶段所发生的成本
	成本指标	运行成本	增量配网在运营阶段所发生的成本
		故障成本	增量配网运营阶段发生故障产生的成本
		售能收入	增量配网园区售电、售热、售冷获得的收入
	效益指标	单位投资增供电量	每一单位投资增加的供电量
		容载比	变电容量占相应电压等级负荷的比值
	供电能力	分布式能源发电利用率	分布式能源发电在新增配电园区就近消纳能源减少损耗量,以此提高能源利用率
		主变 N-1 通过率	电网中的一台主变故障或计划退出运行时,对用户正常持续供电能力量化描述
发展潜力	技术装备	配变运行年限	配变运行年限的平均情况
		用电信息采集系统覆盖率	使用用电信息采集系统用户所占总用户的比例
		智能化	区域内配置终端的中压线路条数占该区域中压线路总条数的比例
		智能电表覆盖率	安装智能电表用户所占比例
		分布式能源发电周边协调程度	分布式电源点与周边环境的融入程度
	政策需求	电动汽车减排量	新增配电园区参与电动汽车减少的污染物排放量
		分布式能源发电减排量	新增配电园区由分布式能源发电减少的污染物排放量
	重要性	社会需求	用户平均停电次数
		公司需求	售能量在用户端用能量中所占的比重
			重要用户在所有用户中所占比例

2 基于熵权法修正的层次分析法标赋权模型

在进行指标体系构建、各指标的无量纲处理与指标筛选后,进一步对各指标进行赋权。现有赋权方法由主观赋权法与客观赋权法组成。其中主观赋权法中的层次分析法具有思路清晰、方法简便、适用面广、系统性强等特点,但由于其受专家知识水平的影响,相对较为主观,为了解决这个问题,引入客观赋权法中的熵权法,综合熵权—层次分析法确定指标权重。

2.1 熵权法赋权

熵权法通过信息熵定量反映指标变化对系统的影响程度。指标的变化程度越小,信息熵越小,说明该指标提供的信息量越小,权重就越小^[17]。

首先,计算第 i 个指标中第 j 个评价对象比例为

$$Z_{ji} = \frac{x_{ji}}{\sum_{j=1}^n x_{ji}}$$

(1)

式中 x_{ji} 为评价对象 j 第 i 个指标的原始数据值。

其次,计算第 i 个指标的信息熵为

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n Z_{ji} \ln(Z_{ji})$$

(2)

式中 e_i 为第 i 个指标的信息熵, $k = \frac{1}{\ln n} > 0$, 所以满足 $e_i > 0$ 。

最后, 计算第 i 个指标的熵权重为

$$s_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)}$$

(3)

2.2 层次分析法赋权

层次分析法将一个复杂的多目标决策问题看成是一个系统, 转变成为若干个目标层次, 然后模糊量化定性指标, 计算不同层次下各元素的权数并作为该元素的分值, 最后按照分值的大小进行排序^[18]。层次分析法赋权具体如下。

假设判断矩阵为

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

(4)

其中, 因素 i 比因素 j 的重要程度比例标度如表 2 所示, 具体计算形式为

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

(5)

为了能够准确、详细检验判断矩阵的一致性, 引入平均随机一致性比值计算衡量, 即

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(6)

$$R_1 = \frac{\lambda'_{\max} - n}{n - 1}$$

(7)

$$C_R = \frac{C_1}{R_1}$$

(8)

式中 C_R 为随机一致性比率, 如果 $C_R < 0.1$, 说明一致性比较满意, 不一致程度能够接受; 否则进行修正, 直至通过一致性检验。

通过一致性检验后, 方案层 C 内各因素 $C_1 \sim C_n$ 合并权重计算为

$$C_i = \sum (c_{jk} \cdot b_j)$$

(9)

表 2 重要程度比例标度

Table 2 Importance scale

因素 i 比因素 j	标度值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8

2.3 熵权法—层次分析法综合赋权

基于熵权法—层次分析法的指标组合赋权方法, 将层次分析法得到的主观权重 C_i 与熵权法得到的客观权重 s_i 进行线性加权优化, 求解最优组合系数, 得到兼顾主观权重和客观权重优点的组合权重为

$$w_i = \alpha C_i + \beta s_i$$

(10)

其中, $\alpha \beta \geq 0$, $\alpha + \beta = 1$, $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$, α 、 β 分别为主观和客观权重系数。

为了求出最优的权重 w_i 。假设增量配网项目 j 的主客观加权属性值一致水平为

$$F_j = \sum_{i=1}^m (\alpha C_i x_{ij} + \beta s_i x_{ij})^2$$

(11)

式中 $\alpha C_i x_{ij}$ 为主观加权属性值; $\beta s_i x_{ij}$ 为客观加权属性值。为了使主客观加权属性值一致性水平趋于最小化, 利用线性加权法建立优化模型, 即

$$\min F = \min \sum_{j=1}^n F_j = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (\alpha C_i x_{ij} + \beta s_i x_{ij})^2$$

(12)

利用拉格朗日乘法求解 α 和 β 的二元优化模型, 解得指标的权重系数并代入式(10)~(12), 从而获得 w_i 。

3 增量配网合作模式动态综合模糊评估模型

在综合评价中, 由于信息技术的发展, 除了静态评价, 计及时间变化速度的动态评价在市场竞争中的优势凸显。在投资阶段, 一方面增量配网在原有配网的基础上投资建设, 增量配网与供电公司合作所产生的合作成效无法明确; 另一方面, 采取静态评价无法针对特定阶段供电公司与增量配网合作成效展开评价, 只能对总成效进行评价, 但由于不同地区增量配网基础水平不一致, 特定阶段的合作成效无法用总成效进行替代。由此急需引入动态综合评价, 对供电公司与增量配网园区的合作成效进行评估。

具有速度特征的动态综合评价模型, 充分利用评价对象不同时段的变化速度及变化趋势对评价对象进行评价, 该模型同供电公司与增量配网园区合

作成效评估需求高度契合,由此引入该模型。假设评价对象集为 $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 评价时间为连续的 n 个时期 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, d_i 在 t_j 时期的评价结果为 s_{ij} 。得评价时序矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1(n+1)} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2(n+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{m(n+1)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

设 d_i 在 $[t_j, t_{j+1}]$ 内的变化速度为 v_{ij} , 据此得变化速度时序矩阵为

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$v_{ij} = \frac{s_{i,j+1} - s_{ij}}{t_{j+1} - t_j}$$

3.1 变化速度状态测度模型

由于增量配网与供电公司合作成效凸显所需时间至少在 1 a 及以上, 因此假设合作成效的变化速度在时间段 $[t_j, t_{j+1}]$ 均匀变化, 变化速度状态有上升、下降、不变 3 种状态, 分别对应 v_{ij} 为正、负、零。连接 v_{ij} 与 $v_{i,j+1}$, 即可得变化速度的运动轨迹如图 2 所示。

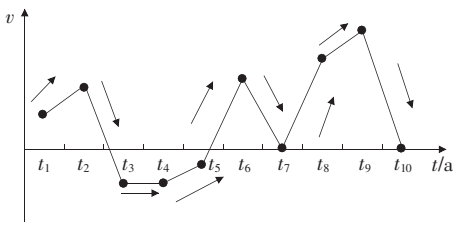


图 1 变化速度运行轨迹

Figure 1 Running Track of Changing Speed

由图 1 可知, v_{ij} 为正值时, 处于横轴上方; v_{ij} 为负值时, 处于横轴下方。供电公司与增量配网园区合作模式 i 在时间段 $[t_j, t_{j+1}]$ 内的动态综合评价价值即为变化速度与横轴所围成面积值, 具体为

$$Y_v^i(t_j, t_{j+1}) = \int_{t_j}^{t_{j+1}} v_{ij} dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} (t - t_j)(v_{i,j+1} - v_{ij}) / (t_{j+1} - t_j) dt \quad (15)$$

其中, $Y_v^i(t_j, t_{j+1})$ 为合作模式 i 在时间段 $[t_j, t_{j+1}]$ 内的动态综合评价价值。

3.2 变化速度趋势测度模型

由式 (15) 可得 t_j, t_{j+1} 的变化速度值 $v_{ij}, v_{i,j+1}$, 设合作模式 i 在时间段 $[t_j, t_{j+1}]$ 内的线性增长率为

$$k_{ij} = \begin{cases} \frac{v_{i,j+1} - v_{ij}}{t_{j+1} - t_j}, & t_{j+1} > 1 \\ 0, & t_{j+1} = 1 \end{cases} \quad (16)$$

其中, $v_{ij} = v_i(t_j)$, $v_{i,j+1} = v_i(t_{j+1})$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

为了预测变化速度的发展趋势, 构造关于 k_{ij} 的变化趋势测度 ρ 函数为

$$\rho(k_{ij}) = \frac{\epsilon}{1 + e^{-k_{ij}}} \quad (17)$$

由式 (17) 可知, ρ 为单调递增函数, 并且 ρ 具有拐点, 在拐点前增速不断增长; 在拐点后增速不断下降。该函数的递增及拐点性质与合作模式变化速度趋势对综合评价结果的激励作用相匹配。为了充分利用该特性, 当 $k_{ij} = 0$ 时, 即变化增长率为 0, 对于没有变化的阶段不予以激励与惩罚, 因此 $\rho(k_{ij}) = 1$, 求解得 $\epsilon = 2$ 。若 $k_{ij} > 0$, 则 $\rho(k_{ij}) > 1$, 说明对变化速度呈上升趋势, 乘以大于 1 的系数进行奖励; 若 $k_{ij} < 0$, 则 $\rho(k_{ij}) < 1$, 说明对变化速度呈下降趋势, 乘以小于 1 的系数进行惩罚。 $\rho(k_{ij})$ 具体取值由专家结合自身经验及综合评价对象特征差异确定。

3.3 动态综合模糊评估模型

基于变化速度状态测度模型与变化速度趋势测度模型进行动态综合评价, 得到合作模式成效的动态综合评价函数为

$$P_{ij} = y_v^i(t_j, t_{j+1}) = (y_v^i(t_j, t_{j+1}), \rho(k_{ij})) \quad (18)$$

式中 P_{ij} 为在 $[t_j, t_{j+1}]$ 时段内结合变化速度状态和趋势所得的综合动态评价价值。

根据增量配网与供电公司合作成效特性, 利用牛顿第二定律表示合作模式的综合评价结果为

$$P_{ij} = y_v^i(t_j, t_{j+1}) \cdot \rho(k_{ij}) \quad (19)$$

其中, $y_v^i(t_j, t_{j+1})$ 变化速度状态相当于牛顿第二定律中的质量, $\rho(k_{ij})$ 变化速度趋势相当于牛顿第二定律中的加速度。

由牛顿第二定律原理 $F = ma$ 可知, 质量 m 一定时, 合外力 F 与加速度 a 成正比; a 一定时, 合外

力 F 与质量 m 成正比。由增量配网合作特性可知,当变化速度状态值 $y_v^i(t_j, t_{j+1})$ 一定时,变化趋势测度值 $\rho(k_{ij})$ 越大,综合评价值 P_{ij} 应该越大; $\rho(k_{ij})$ 一定时, $y_v^i(t_j, t_{j+1})$ 越大,则综合评价值 P_{ij} 应该越大。由此可看出增量配网合作成效各变量之间的关系变化与牛顿第二定律所表达的一致,利用牛顿第二定律表示合作模式的综合评价结果具备合理性。

基于式(19),综合评价结果值可变换为

$$P_{ij} = \theta_i y_v^i(t_j, t_{j+1}) \left[\int_{t_j}^{t_{j+1}} v_{ij} dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} (t - t_j)(v_{i,j+1} - v_{ij}) / (t_{j+1} - t_j) dt \right] \quad (20)$$

根据式(20)可得在时间段 $[t_1, t_n]$ 内,合作模式 i 的总动态综合评价值为

$$y_v^i = \sum_{j=1}^{n-1} y_v^i(t_j, t_{j+1}) \quad (21)$$

4 算例分析

4.1 基础数据

为了验证该文所提评价模型的有效性,选取供电公司绝对控股、供电公司相对控股、供电公司参股、供电公司不参股分别对应情景 1~4 下的实际增量配网园区合作成效进行动态综合评价。该园区 2016~2020 年为投资建设阶段,运营阶段为 2021~2035 年。不同情景下,增量配网园区中各投资方的股权分配比例如表 3 所示。指标原始数据根据实地调查与资料查阅相结合的方法获取。

表 3 增量配网园区各股权分配比例

Table 3 Incremental distribution network park equity distribution ratio %

投资方	不同情景下的股权分配比例			
	equity distribution ratio			
	1	2	3	4
供电公司	60	40	15	0
社会资本	40	60	85	100

4.2 结果分析

根据指标标准化结果,通过 spss 软件计算得指标赋权结果、各情景动态综合评估值如下所示。

1)指标赋权结果。根据式(1)~(12)可得指标的权重如表 4 所示。

表 4 指标赋权结果

Table 4 Indicator weighting results

准则层	决策层	赋权分析法		
		熵权	层次	熵权—层次
财务指标	内部收益率	0.039 9	0.068 6	0.057 1
	净现值	0.048 1	0.079 2	0.066 8
成本指标	建设成本	0.056 4	0.043 1	0.048 4
	运行成本	0.060 6	0.042 7	0.049 9
	故障成本	0.058 2	0.047 8	0.052 0
效益指标	售能收入	0.044 1	0.091 7	0.072 7
	单位投资增供电量	0.039 7	0.042 2	0.041 2
供电能力	容载比	0.045 7	0.031 7	0.037 3
	分布式能源发电利用率	0.053 6	0.037 5	0.043 9
电网结构	主变 N-1 通过率	0.049 8	0.036 8	0.042 0
技术装备	配变运行年限	0.049 8	0.027 9	0.036 6
	用电信息采集系统覆盖率	0.047 4	0.032 7	0.038 6
智能化	配电自动化覆盖率	0.045 3	0.040 9	0.042 6
	智能电表覆盖率	0.048 0	0.031 8	0.038 3
政策需求	分布式能源发电周边协调程度	0.057 0	0.052 7	0.054 4
	电动汽车减排量	0.060 5	0.055 6	0.057 6
	分布式能源发电减排量	0.055 0	0.058 8	0.057 3
社会需求	用户平均停电次数	0.047 0	0.045 9	0.046 4
公司需求	市场占有率	0.046 6	0.079 9	0.066 6
	重要用户比例	0.047 1	0.052 5	0.050 3

由表 4 可知,权重排名前 3 的指标分别为售能收入、净现值、市场占有率,其权重分别为 0.072 7、0.066 8、0.066 6,说明增量配网园区的合作成效一方面关注经济效益,另一方面注重市场开拓,提高市场占有率。从表 6 还可看出增量配网园区建设对于政策需求也比较重视,因为分布式能源发电周边协调程度、电动汽车与分布式能源发电减排量权重都比较高。

2)各情景动态评价结果。基于指标权重与指标体系,运用式(13)~(21)计算各情景投资建设阶段的变化速度状态值、变化速度趋势测度值如图 2、3 所示。

由图 2、3 可知,情景 1、2、4 的变化速度均大于 0,说明 3 种情景的评价指标值也即合作模式成效逐年递增,由此对应各时间段内 3 种情景下变化速度趋势值均大于 1。而情景 3 的变化速度状态值在

2016~2017、2018~2019、2019~2020 年时间段内大于 0,在时间段 2017~2018 年时间段内小于 0,由此对应情景 3 在时间段 2016~2017、2018~2019、2019~2020 年内变化速度趋势值大于 1,在时间段 2017~2018 年内,变化速度趋势值小于 1。同时还可看出情景 1 的变化速度最快,而情景 3 的变化速度最慢。运营阶段的变化速度状态值、变化速度趋势测度值如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知,运营阶段的变化速度状态值在 2021~2024 年的过程中,情景 1 的变化速度状态值最高,然而在 2024 年后,情景 3 的变化速度状态值超过情景 1,一直到 2035 年年底,情景 3 的变化速度状态值维持最高状态;情景 4 的变化速度状态值一直处于最低状态。运营阶段的变化速度趋势值在 2021~2033 年中,情景 3 的变化趋势值最高,情景 1 与情景 2 相对于情景 3 较平缓,情景 4 的变化趋势值则最低。

3)基于不同评价方法的各阶段结果分析。为了充分验证该文所提动态综合模糊评估模型的有效性,设置表 5 所示的 3 种场景进行对比分析评价。

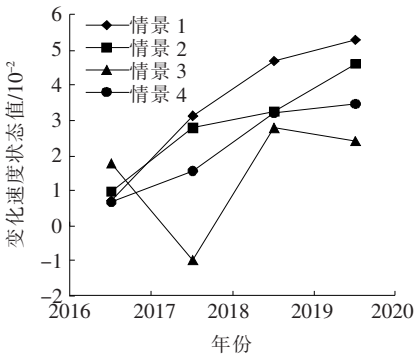


图 2 投资阶段变化速度状态值

Figure 2 State value of changing rate in investment phase

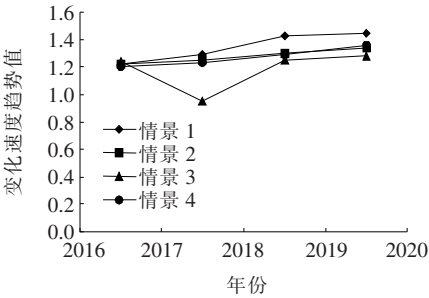


图 3 投资阶段变化速度趋势值

Figure 3 Trend Value of Change Rate in the Investment Phase

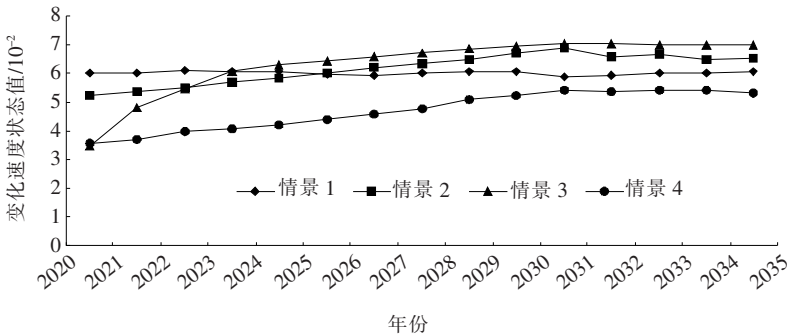


图 4 运营阶段变化速度状态值

Figure 4 State Value of ChangingSpeedin the Operation Phase

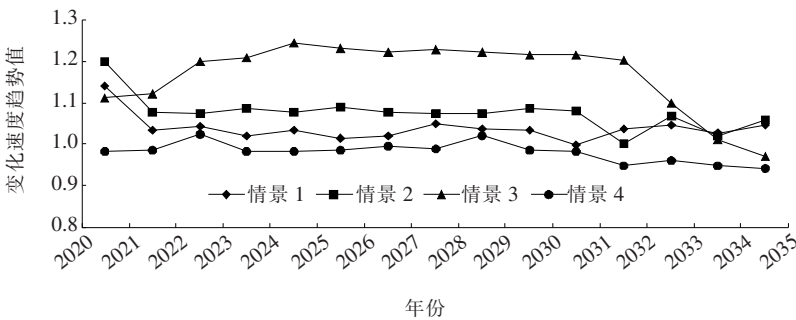


图 5 运营阶段变化速度趋势值

Figure 5 Trend Value of Changing ratein the operation phase

表 5 场景设置

Table 5 Scene settings

变化速度	不同场景下是否考虑变化速度		
	I	II	III
状态值	N	Y	Y
趋势值	N	N	Y

根据投资阶段与运营阶段的变化速度状态值及趋势值,可得不同情景不同阶段下,3 种场景的综合评价价值如表 6 所示。

表 6 3 种场景综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation results of three scenarios

情景	投资阶段不同场景综合评价价值			运营阶段不同场景综合评价价值		
	I	II	III	I	II	III
1	8.34	8.43	8.60	15.33	15.94	15.57
2	7.86	7.82	7.78	15.78	16.31	16.13
3	7.26	7.39	7.31	16.27	16.89	17.50
4	7.08	7.28	7.34	15.46	15.23	14.71

不同评价方法对比分析。由表 6 可知,一方面不考虑变化速度状态与变化趋势的场景 I,仅考虑变化速度状态值评价结果相比,投资阶段两者评价结果顺序一致,均为情景 1>情景 2>情景 3>情景 4;但是在运营阶段场景 I 与场景 II 的评价结果存在差异,场景 1 的评价结果为情景 3>情景 2>情景 4>情景 1,场景 II 的评价结果为情景 3>情景 2>情景 1>情景 4,造成差异的原因是场景 II 考虑了增量配网园区与供电公司合作成效的变化速度,真实地反应成效水平,所以考虑变化速度状态值的场景 II 与场景 1 相比,评价结果更加真实可靠。

另一方面,场景 II 与同时考虑变化速度状态值和变化速度趋势值的场景 III 相比,无论是投资阶段还是运营阶段,场景 III 的各情景之间综合评价价值的差距更为明显,这是因为场景 III 引入了变化趋势速度,变化趋势速度会针对变化速度情况进行惩罚与奖励,拉开各个综合评价价值之间的差距,所以场景 III 与场景 II 相比,更能有效地引导增量配网园区与供电公司合作成效的发展。

投资阶段综合评价结果分析。在投资阶段,3

种场景下评价结果均显示在情景 1 下,增量配网园区与属地供电公司的合作成效最高。这是因为增量配网园区在投资建设阶段需要投资大量的现金流,仅仅依靠社会资本,一方面难以获得如此巨大的现金流;另一方面社会资本来源不稳定,在增量配网投资建设过程中无法维持稳定持续的资金流,由此需要依靠规模大、资金流量大的属地供电公司做保障。所以投资阶段增量配网园区与供电公司最佳的合作模式为供电公司控股。

运营阶段综合评价结果分析。在运营阶段,3 种评价结果均显示增量配网园区与供电公司合作成效最高的是电网公司参股的情景,这是由于电网公司参股一方面引入社会资本能够加强业务拓展,提高售能收入以及其他收入,而售能收入所占权重最高;另一方面供电公司成熟的技术与运维经验引入增量配网,降低增量配网园区的运营风险,同时兼顾政策与社会需求,带来最高的合作成效。供电公司绝对控股虽然能够很好的满足社会需求、政策需求,但是传统体制不利于效率提升与创新;供电公司不参股,全部引入社会资本,虽然会激发活力,但是缺乏供电公司成熟的技术支持,会导致较大的风险。所以运营阶段增量配网园区与供电公司最佳的合作模式为供电公司参股。

5 结语

该文为提高增量配网投资运营效率,对增量配网与供电公司的合作模式展开研究。首先引入显著性—冗余分析方法进行指标筛选,避免指标对评价结果影响不显著与指标信息冗余的问题;然后为了反映增量配网园区与供电公司合作成效的时间发展变化,构建了增量配网园区动态综合模糊评估模型;最后设置 4 种情景进行算例分析,算例分析结果如下。

- 1)考虑变化速度和变化趋势的动态综合模糊评价模型,通过引入动态综合评价系数,能够反映合作成效的真实水平,提高评价的真实性与有效性。
- 2)投资阶段增量配网园区与供电公司最好的合

作模式为供电公司控股的合作模式,以此提供稳定持续的现金流。

3)运营阶段增量配网园区与供电公司最好的合作模式为供电公司参股的合作模式,即引入社会资本,提高创新能力;同时充分利用供电公司的成熟技术,互利共赢,创造最佳的合作成效。

参考文献:

- [1] 董红,刘敦楠,马冠雄,等. 电网企业参与竞争性业务的适应性策略及业务模式[J]. 电力大数据,2018,21(4): 82-87.
DONG Hong,LIU Dunnan,MA Guanxiong,et al. Adaptive strategy and business model for grid enterprises to participate in competitive business[J]. Power Systems and Big Data,2018,21(4): 82-87.
- [2] 杨楠,隆舰艇,黄悦华,等. 考虑增量用电负荷分配的煤改电/煤改气联合分阶段规划[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(17):55-67.
YANG Nan, LONG Jianting, HUANG Yuehua, et al. Joint staged planning of coal-to-electricity/coal-to-gas considering incremental electricity load distribution[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (17): 55-67.
- [3] 王淇,刘继春,杨阳方. 考虑主动管理措施的增量配电网网架规划[J]. 电测与仪表,2019,56(22),37-43.
WANG Qi, LIU Jichun, YANG Yangfang. Framework planning of incremental distribution network considering active management[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22), 37-43.
- [4] 胡源,熊天军,薛松,等. 增量配售电公司评价方法研究[J]. 智慧电力,2020,48(6):47-53.
HU Yuan, XIONG Tianjun, XUE Song, et al. Comprehensive evaluation of incremental electricity distribution and retail company[J]. Smart Power, 2020, 48 (6): 47-53.
- [5] 韩一鸣,靳盘龙,郭宁. 基于停电损失评价的固原市配网投资效益研究[J]. 机电信息,2019,7(9):10-12.
HAN Yiming, JIN Panlong, GUO Ning. Research on the investment benefit of Guyuan distribution network based on the evaluation of outage loss[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019, 7(9): 10-12.

- [6] 周鹏程,吴南南,曾鸣. 考虑投入产出关联关系的配网效益评价研究[J]. 山东电力技术,2017,44(12):1-5+11.
ZHOU Pengcheng, WU Nannan, ZENG Ming. Study on the benefit evaluation of distribution network considering the relationship between input and output[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(12): 1-5+11.
- [7] 贾梦雨,李猛,韩松,等. 基于博弈论组合赋权的农村电网综合评价体系研究[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(2):69-75.
JIA Meng Yu, LI Meng, HAN Song, et al. Research on comprehensive evaluation system of rural power grid based on game theory combination weighting[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35 (2): 69-75.
- [8] 杨波. 10 kV 及以下配网建设与改造投资后评价指标体系研究[J]. 南方电网技术,2009,3(S1):8-14.
YANG Bo. Research on the evaluation index system of 10 kV and below distribution network construction and transformation investment[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(S1): 8-14.
- [9] Macedo M N Q, Galo J J M, Almeida A L, et al. Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 6(41): 128-133.
- [10] 郭艳飞,任雪桂,鞠力,等. 基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法研究及应用[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(4):121-128.
GUO YanFei, REN XueGui, JU Li, et al. Research and application of comprehensive energy system energy efficiency evaluation method based on AHP[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33 (4): 121-128.
- [11] 肖康,朱洁. 配电网后评价助力配网建设精准投资[J]. 中国电力企业管理,2019,4(5):56-57.
XIAO Kang, ZHU Jie. Post evaluation of distribution network helps precision investment in distribution network construction[J]. China Power Enterprise Management, 2019, 4(5): 56-57.
- [12] Hejazi H A, Araghi A R, Vahidi B, et al. Independent distributed generation planning to profit both utility and DG inventors[J]. IEEE Transaction on Power Sys-

- tems,2013,28(2):1170-1178.
- [13] 张辰,杨鸿珍,黄红兵,等.基于社团结构的电力通信网可靠性评估方法[J].电网与清洁能源,2019,35(10):17-22+27.
- ZHANG Chen, YANG Hongzhen, HUANG Hongbing, et al. Reliability evaluation method of power communication network based on community structure [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 17-22+27.
- [14] 张家安,安世兴,陈建,等.考虑分布式电源灵活接入下的配电网风险评估[J].供用电,2019,36(5):29-33.
- ZHANG Jiaan, AN Shixing, CHEN Jian, et al. Distribution network risk assessment considering the flexible access of DG[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5):29-33.
- [15] 曾瑛,朱文红,张乃夫,等.基于聚类可靠度的电力通信网可靠性评价方法[J].计算机应用,2014,34(S1):21-23+27.
- ZENG Ying, ZHU Wenhong, ZHANG Naifu, et al. Reliability evaluation method of power communication network based on clustering reliability[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(S1):21-23+27.
- [16] 王瑞峰,王庆荣.基于改进双层聚类多目标优化的配电网动态重构[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):92-99.
- WANG Ruifeng, WANG Qingrong. Multi-objective optimization of dynamic reconfiguration of distribution network based on improved Bilayer clustering [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 92-99.
- [17] 任鹏,李翀,陶鹏,等.基于加权熵 TOPSIS 法的电网节点脆弱度评估[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):143-149.
- REN Peng, LI Chong, TAO Peng, et al. Grid node vulnerability assessment based on weighted entropy TOPSIS method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):143-149.
- [18] 谭忠富,蒲雷,吴静,等.基于负荷率差别定价的分时输电电价优化模型[J].系统工程理论与实践,2019,39(11):2945-2952.
- TAN Zhongfu, PU Lei, WU Jing, et al. Time-sharing transmission and distribution price optimization model based on load rate differential pricing[J]. System Engineering Theory and Practice, 2019, 39(11):2945-2952.