

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180965

基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策

刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 叶圣永, 陈博, 刘洁颖

(国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 随着电网建设规模增大, 完善配电网建设改造方案, 做好配电网投资, 对保证优质的电力供应和地区经济社会发展具有重要的意义。针对大量可选改造措施, 提出一种适用于配电网经济改造的投资效益评估和决策模型。首先, 考虑分布式清洁能源、配电自动化等主动元素, 从技术性能和经济效益两方面出发, 建立了配电网技术经济评估指标体系。根据配电网改造项目的投资效益单体评估结果, 结合信息熵和模糊分析法建立了改进的配电网投资效益综合评估方法和评估模型。在量化打分和综合排序基础上, 以资金约束和性能约束为条件, 建立了针对项目组合优选的配电网投资决策模型。通过算例验证了所提模型的有效性。研究结果对于指导未来配电网投资效益评估与投资决策发展有重要意义。

关键词: 配电网改造; 技术经济效益评估; 投资效益评估模型; 投资决策

Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method

LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, YE Shengyong, CHEN Bo, LIU Jieying

(State Grid Sichuan Electric Power Company Economic Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: It is of great significance to ensure high quality power supply and regional economic and social development by the means of improving distribution network reconstruction schemes and doing well invest in distribution network with the development of power grid. In order to deal with large amount of candidate measures, an investment benefits evaluation and decision model used for distribution network reconstruction is established in this paper. In the view of technical performance and economic benefit, a tech-economic evaluation index system of distribution network considering more reconstructed schemes such as distributed generation and distribution automation is established. Based on the evaluation result of the investment benefit of the distribution network reconstruction project, the investment benefit evaluation method and model are analyzed by combining the information entropy and the fuzzy analytic process. In addition, on the basis of quantitative scoring and comprehensive sorting, the investment decision model of distribution network constrained by funds and performance is established. Finally, the effectiveness of the model is verified. It is important to the investment evaluation and decision for future distribution network.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSCJY00GHJS1800020).

Key words: distribution network reconstruction; tech-economic benefits evaluation; investment benefits evaluation method; investment decision

0 引言

随着智能电网和能源互联网战略的推进^[1], 大量电气设备接入配电网, 用电需求不断增长, 分布式

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSCJY00GHJS 1800020)

能源、电动汽车广泛使用, 配电网亟需进行建设改造和扩容。我国正处于配电网建设全面推进阶段, 如何投资建设安全可靠、经济高效、技术先进、环境友好的配电网设施和服务体系是关系到国民经济和社会发展的重要议题。配电网发展建设规模大、涉及因素多, 盲目的建设改造不仅会造成资金浪费, 也不能很好地满足实际要求。面对不断增长的配电网

网投资, 投资方向和投资效益成为电网公司重点关注的问题。传统配电网改造项目侧重于项目的必要性与可行性论证, 未考虑分布式能源并网的情况, 对项目的技术经济评估不足, 在投资决策方面往往仅根据历史数据简单地按比例分配^[2]。因此, 面对大量的资金, 为了使投资效益最大化, 建立科学的分析评估方法和决策工具, 进行配电网技术经济评估与投资决策研究至关重要。

配电网评估主要包括可靠性^[3-5]、安全性^[6]、供电质量^[7-8]、运行水平^[9]等方面, 目前有较多文献对其指标体系或评估方法进行研究, 研究对象主要是中低压配电网, 部分针对高压配电网进行研究^[10-11], 建立指标体系的方法以层次分析法^[2]为主, 对指标值的定量计算主要利用德尔菲法、灰色关联分析法^[12]、主成分分析法^[13]、模糊分析法^[14]等。文献[7]利用模糊综合评判方法给出了客观、全面、综合的电能质量评价指标; 文献[11]提出能够用于配电网投资建设项目的效益分析和投资建设方向分析的评价方法, 但所建立的指标体系只适用于高压配电网; 文献[15]以适应性、协调性为重点, 应用层次分析法, 提出了适应配电网规划特点的综合评价指标体系和评价方法; 文献[16]从配电网供电安全性角度出发, 以风险理论为基础, 结合 $K(N-1+1)$ 准则和效用理论提出了配电网失负荷风险指标、过负荷风险指标和电压越限风险指标为主的评估指标体系, 能够较好地评估配电网静态安全性; 文献[17]在电力市场的背景下, 采用实物期权法评估了电网投资的经济性; 进一步, 文献[18]围绕规划成效、投资计划、投资效益, 按照层次分析法建立的评价指标体系具有一定的优越性, 对配电网投资效益评估指标体系做出了积极的贡献, 但是以上研究并未考虑配电网发展存在的分布式电源、储能等主动元素的接入情况, 评估过程中权重确定也过于主观, 亟需主观赋权法和客观赋权法相结合的权重确定方法。

此外, 在配电网投资效益评估模型与决策模型方面, 评估模型主要包括上述的投资效益评估指标体系与评估方法, 大多单一地采用主观打分法对大量统计指标进行评估, 难以客观认识配电网的建设发展; 而投资决策属于数学优化类问题, 需要建立相应的目标函数和约束条件, 但现有研究大多未能考虑实际项目实施的可能性, 或是忽视了电网企业的实际改造需求。文献[2]从配电总体投资效益、单体项目投资效益、投资决策等方面全方位地建立了 35 kV 及以下配电网投资效益评估与决策模型; 文献[12]从项目效益和管理效益出发, 构建了配电网投资效益综合评估指标体系, 结合理想解法和灰色

关联度建立了配电网投资效益评估模型, 利用相对贴近期度来评估各样本的优劣; 文献[19]建立以项目集决策值最大为目标函数的数学模型, 并以投资总额和投资分配比例为约束条件, 并采用遗传算法求解模型得到最优项目集, 但是可选项目集仍存在主动元素考虑不充分的问题。

当前配电网建设改造的投资对象除了传统的线路网架、变电站等设备升级改造措施以外, 还包括分布式清洁能源、储能装置、配电自动化等主动元素, 如何精确评估、测算不同技术路径配置的可选项目集下的投资效益是投资决策优先需解决的问题。因此, 本文考虑主动元素, 从安全性、可靠性、经济性等方面建立一个科学合理、能够反映投资效益的配电网技术经济评估指标体系; 在多指标权重分配上, 结合熵理论^[20]和模糊层次分析法建立组合权重决策方法; 并根据所提指标体系建立了相应的投资效益评估模型和投资决策模型, 确定配电网改造的投资方案。

1 技术经济评估指标体系

1.1 技术经济指标体系建立原则

科学合理的指标体系是配电网投资效益评估的基础。既要合理选取指标, 保证指标体系的完整性与指标间的相互独立性, 同时需要对每个指标进行详细定义并给出计算方法^[21]。建立指标应遵循科学性、全面性、实用性的原则, 需保证各个指标之间的独立性, 避免出现指标重复交叉的情况, 指标含义明确, 计算简单, 易于比较。此外, 能够有效反映配电网运行的主要状态和工作水平, 能够尽可能全面地反映配电网规划的实际情况。

1.2 技术经济效益评估指标体系

配电网技术经济指标体系旨在全面衡量配电网发展状况。一方面, 对配电网的供电质量、网架结构、运行水平、负荷供应能力和技术装备等要素进行评估, 深入了解配电网现状及存在问题; 另一方面, 对配电网经济效益进行定量评估, 明确每一种投资方案的投资收益, 促进配电网规划方法和规划手段的创新和实践, 推进配电网各项工作的精细化、精准化。按照《配电网规划设计导则》^[22]要求, 结合现有配电网建设改造主要技术原则包括供电能力、网架结构、装备升级、分布式电源建设等方面。

根据上述内容, 本文考虑分布式电源接入的情况, 建立了技术经济效益评估指标体系。如图 1 所示, 该指标体系包含 7 个一级指标, 即供电质量、电网结构、技术装备、供电能力、信息化水平、成本类和收入类。部分指标的计算公式详见表 1, 其

中, T_{up} 、 T_{down} 分别为电压超上限时间和超下限时间; T_{all} 为电压检测总时间; λ_F 为馈线总故障率; P_L 为馈线负荷总量; β_1 、 β_2 、 β_3 为停电用户分布系数, 分别表示馈线中任意设备发生故障时, 不同类型用户的平均分布比例; N_c 为每次停电用户数; N_{total} 为用户总数; N_{l_p} 为线路总分段数; N_1 线路总条数; N_{link} 为有联络的线路数量; N_{N-1}^{line} 为满足 $N-1$ 的线路条数; N_s 为主变总台数; N_{over} 为重载线路条数; L_{ca}

为电缆线路长度; L 为线路总长度; C_{re} 为清洁能源装机容量; C_n 为常规发电容量; P_{total} 为供电总量; C_{total} 为电网资产总量; P_g^{n+1} 为次年供电量; P_g^n 为本年供电量; P_{load}^{n+1} 为次年供最大负荷; P_{load}^n 为本年供电最大负荷; P_{loss}^{n+1} 为次年线损率; P_{loss}^n 为本年线损率; M_{in} 为投资额。

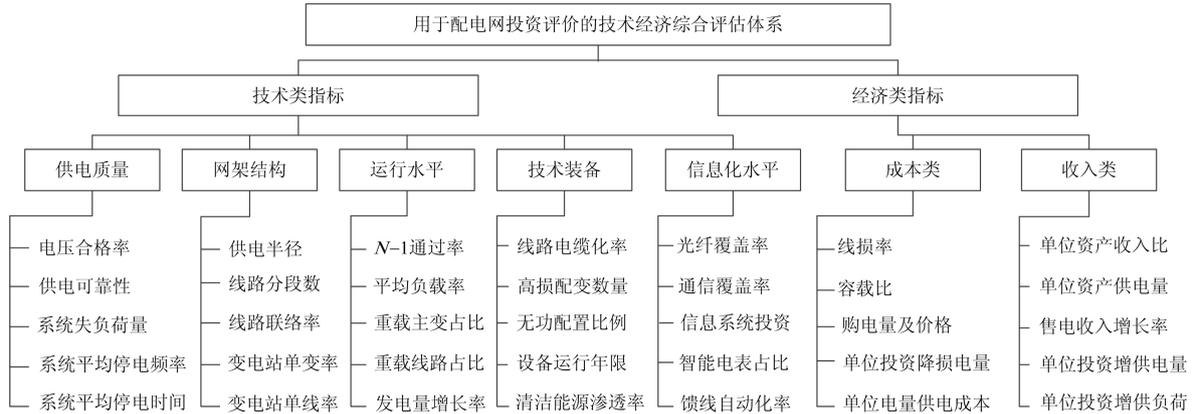


图 1 配电网技术经济综合评估体系

Fig. 1 A framework of tech-economic benefits evaluation for distribution network

表 1 配电网技术经济效益评估指标

Table 1 Tech-economic benefits evaluation indices of distribution network

名称	计算公式	单位
电压合格率 I_v	$I_v = 1 - \frac{T_{up} + T_{down}}{T_{all}} \times 100\%$	%
供电可靠率 I_{RE}	$I_{RE} = \frac{8760 - I_D}{8760} \times 100\%$	%
系统平均停电时间 I_D	$I_D = \lambda_F(\beta_1 T_1 + \beta_2 T_2 + \beta_3 T_3)$	min/次
系统期望缺供电量 I_E	$I_E = I_D P_L$	MWh
系统平均停电频率 I_F	$I_F = \sum N_c / N_{total}$	次
线路平均分段数 I_{l_p}	$I_{l_p} = N_{l_p} / N_1$	条
线路联络率 I_{link}	$I_{link} = N_{link} / N_1 \times 100\%$	%
线路 $N-1$ 通过率 I_{N-1}^{line}	$I_{N-1}^{line} = N_{N-1}^{line} / N_1 \times 100\%$	%
主变平均负载率 I_s	$I_s = (\sum I_{load}) / N_s \times 100\%$	%
线路重载比例 I_{over}	$I_{over} = (\sum N_{over}) / N_1 \times 100\%$	%
线路电缆化率 I_{ca}	$I_{ca} = L_{ca} / L \times 100\%$	%
清洁能源渗透率 I_{re}	$I_{re} = C_{re} / C_n \times 100\%$	%
单位资产供电量 I_a	$I_a = P_{total} / M_{total}$	kWh
综合线损率 I_{loss}	$I_{loss} = (P_g - P_l) / P_g \times 100\%$	%
单位投资增供电量 $P_{\Delta g}$	$P_{\Delta g} = (P_g^{n+1} - P_g^n) / M_{in}$	MWh
单位投资增供负荷 $P_{\Delta l}$	$P_{\Delta l} = (P_{load}^{n+1} - P_{load}^n) / M_{in}$	MW
单位投资降损电量 $P_{\Delta loss}$	$P_{\Delta loss} = (I_{loss}^{n+1} - I_{loss}^n) / M_{in}$	MWh

2 配电网投资效益评估

2.1 指标权重确定方法

在综合评估方面, 对各评估指标赋权是计算过程中的重要环节。权重的确定方法主要有主观赋权法、客观赋权法。主观赋权法多是采用综合咨询评分的定性方法, 如层次分析法、德尔菲法等, 这种赋权方法虽然能较好地反映专家的经验 and 意见, 但是过于依赖决策者的主观判断, 往往会夸大或降低某些指标的作用, 致使排序的结果不能完全真实地反映事物间的现实关系, 有失公平性和合理性, 有诸如“ A 比 B 重要, B 比 C 重要, 而 C 又比 A 重要”违反常识的情况出现^[23]。客观赋权法即根据各指标间的相关关系或各项指标值的变异程度来确定权数, 避免了人为因素带来的偏差。如主成分分析法、均方差法等, 这种方法虽不随主观因素变化, 但是有时也可能出现权重与实际相违背的情况, 即不重要的指标具有较高的权重系数, 而最重要的指标不一定有最大的权重系数。

信息熵可以较好地综合上述两种方法的特点, 既能体现决策者对于评估指标的主观意愿, 又能反映指标权重系数的客观真实性。熵表征了一个物质系统中能量衰竭程度的度量。信息熵反映了信息无序化的程度, 具有一定的客观性。当信息熵越小,

熵权越大时, 信息向决策者提供的信息效用值就会越大^[20]。目前, 信息熵方法用来确定权重已在社会经济、工程技术等各领域得到了广泛应用。

基于信息熵理论和结构熵权法^[24]的改进熵权法, 将采集专家意见的德尔菲专家调查法与模糊分析法相结合, 用熵理论对权重排序进行量化分析, 能够消除指标权重分配中的不确定性问题^[24]。此外, 决策者可根据不同规划周期配电网的建设目标合理修正模糊矩阵, 使得评估结果更能反映当前配电网发展的实际情况。

专家依据自己的知识和经验独立地给出自己对测评指标定性判断。考虑 m 个专家、 n 个指标的综合决策问题的决策矩阵 X 如式(1)所示。

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

式中, x_{ij} 表示第 i 个专家关于第 j 个指标的评估。

那么, 关于 j 指标的熵 E_j 如式(2)所示, 熵值越小, 评估值的准确性就越高, 可信度也越高, k 为随机数。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln x_{ij}, \forall j \quad (2)$$

所以, 信息偏差度为

$$\theta_j = 1 - E_j \quad (3)$$

若决策者没有指标间的偏好, 根据不确定理论可以认为 n 个指标具有相同偏好, 权重如式(4)所示。

$$w_j = \frac{\theta_j}{\sum_{j=1}^n \theta_j}, \forall j \quad (4)$$

$$w'_j = \frac{\mu_j w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j w_j}, \forall j \quad (5)$$

如果决策者对于指标集有偏好, 需要赋予指标集个人的主观认知, 权重按式(5)进行修正。因此, 给出不同指标对测评指标集重要性“排序”意见的定性判断后, 采用信息熵理论对“专家排序”所产生的不确定性进行测量, 结合模糊分析法, 建立模糊集上熵函数(隶属函数), 得到排序决策矩阵的隶属函数 M ^[24]为

$$M(x) = -\lambda p_n(x) \ln p_n(x) \quad (6)$$

其中

$$p_n(x) = \frac{d-x}{d-1}, \lambda = \frac{1}{\ln(d-1)} \quad (7)$$

式中: x 为专家对各指标的排序数, $x \in$ 自然数集 $\{1, 2, \dots, n\}$, $x=1$ 表示该专家认为此指标最为重要; 若定义最大序号为 r , d 为转化参数量, 那么取 $d=r+2$ 。

排序数 x 对应的隶属度 $u(x)$ 为

$$u(x) = -\frac{\ln(d-x)}{\ln(d-1)} \quad (8)$$

为得到更为科学的决策, 模糊矩阵 U 由多名专家共同构建, 若认为每个专家的重要性一致, 那么 m 个专家对指标 j 的平均认识度为

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^m u_{ij}}{m} \quad (9)$$

所有专家对于第 i 个指标的综合认识度如式(10)所示。

$$c_j = u_j(1 - z_j) \quad (10)$$

式中, z_j 表示专家主观认识的不确定性, 可表示为

$$z_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (u_{ij} - u_i)^2} \quad (11)$$

将综合认识度 c_j 按式(9)进行归一化, 得到各指标的权重 w_j 为

$$w_j = c_j / \sum_{i=1}^n c_j \quad (12)$$

2.2 投资效益综合评估方法

投资效益综合评估的流程如图 2 所示, 具体评估方法的步骤如下。

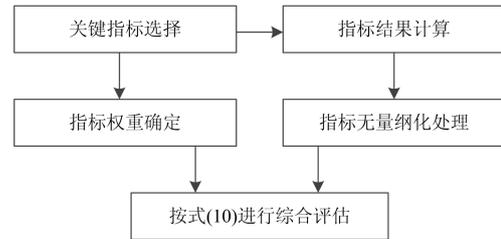


图 2 投资效益综合评估流程图

Fig. 2 Flowchart of comprehensive evaluation of investment benefit

1) 差异化指标挑选

通过指标评分可以很直观地看出各种方案的优劣, 图 1 所示的技术经济综合指标体系中, 有的指标明显不受配电网某一改造措施的影响, 如电缆化率不会随电网清洁能源容量增大而变化。所以, 在进行配电网投资效益评估时, 首先需要针对具体地区实际可选项目集灵活地挑选关键指标, 并且所选指标数量应尽可能广泛地涵盖上述指标体系的类别。

2) 指标标准化处理

由于不同指标可能具有不同的特性、量纲和数量级，所以需要计算得到的各指标进行无量纲化处理。常用的方法有差值法、最大值法、模糊分析法等^[25]，本文采用等级打分差值法进行指标评估，能够满足标准化的要求且不影响评估结论，这种方法还克服了查表或曲线拟合法无法适应不同时期、不同地区差异化考核标准的问题，且在计算效率上有明显的优越性。

3) 指标权重确定

通过分析系统的指标及其相互关系，将其分解为7个互不相同的层次结构，并对同一层次各指标的相对重要性排序结构，确定出每一层次同类指标重要程度数值，采用2.1节介绍的基于信息熵和模糊分析法的改进熵权法，得到各指标的归一化结果，确定指标权重。

2.3 投资效益综合评估模型

将指标进行无量纲化处理后得到综合评估结果，投资效益综合评估模型为

$$Y = \sum_{j=1}^n w_j y_j \quad (13)$$

式中： Y 为某投资方案下的综合评估值； w_j 为权重系数； y_j 为单项指标评分值。

考虑到层次结构的指标体系，可以使用上述方法来确定相同级别指标之间的权重。最后，从上到下计算系统各指标的得分。

$$Y^{(t+1)} = \sum_{j=1}^n w_j^{(t)} y_j^{(t)} \quad (14)$$

式中，上标 $t+1$ 表示自顶向下第 $t+1$ 层指标。

3 配电网投资决策

现阶段配电网投资决策正逐渐演变成成为候选投资技术路径繁多、多投资需求、需考虑系统复杂运行特征、多重不确定性、多主体收益均衡的超大规模超高维度动态组合优化问题。在配电网升级改造的关键环节中，通过可选资源或采取相应的改造措施，以提升期望技术性能并满足配电网动态发展的需要，并以投资效益最大化为目标实现投资分配最优。

传统的粗放式项目管理投资方式已经无法满足未来配电网发展下的投资需求，迫切地需要建立新的投资决策模型来引导在配电网发展下的技术路径配置，以适应社会分布式能源接入、国家政策、企业发展等需求。实际配电网建设改造过程中，由于投资可选措施种类多，单项投资项目与多种投资

手段共同实施的组合投资项目都可能发生，而一定时间内建设需求多、总投资规模有限，这就要求电网企业既要对项目进行优选，又要对投资组合进行优化。建立配电网投资决策模型之前，需要对可选的改造项目进行归纳总结，根据在某电力公司的实际调研情况，本文考虑24项较为典型的配电网建设改造措施，措施内容如表2所示。

表2 配电网建设改造措施

Table 2 Reconstruction measures of distribution network

类别	编号	措施内容	实施单位
技术 装备 改造	M ₁	破损和老化设备更换	片区
	M ₂	架空裸导线绝缘化改造	馈线
	M ₃	架空线路电缆化改造	馈线
	M ₄	无功配置升级改造	片区
	M ₅	配变容量、数量合理配置	片区
	M ₆	加强设备抵御自然灾害的能力	片区
供电 质量	M ₇	架空线路增设分段开关	馈线
	M ₈	电缆线路增设其他备供线路	馈线
	M ₉	增设备供电源	片区
	M ₁₀	接入分布式备供电源	片区
	M ₁₁	加强故障定位技术水平	片区
	M ₁₂	按标准时间隔离、修复	片区
网架 结构	M ₁₃	增设联络转供线路	候选线路
	M ₁₄	架空多分段适度联络改造	候选线路
	M ₁₅	增加电源布点，缩短供电半径	片区
运行 水平	M ₁₆	增设分布式电源	片区
	M ₁₇	按标准时间隔离、修复	片区
	M ₁₈	加强日常巡视预防外力破坏	片区
信息 化 水平	M ₁₉	光纤线路敷设安装	片区
	M ₂₀	增设二遥终端	馈线
	M ₂₁	增设三遥终端	馈线
	M ₂₂	配电自动化通信通道建设	片区
	M ₂₃	配电自动化信息系统建设	片区
	M ₂₄	配电自动化采集与监测装置升级	片区

每个投资项目的实现与否可以用0-1整型变量描述，对于 a 种投资项目组合的改造方案，可以用式(15)表示。

$$g_a = \begin{cases} 0, & \text{未投资} \\ 1, & \text{已投资} \end{cases} \quad (15)$$

因此，在投资方案各指标计算结果的基础上，根据实际配电网建设和技术性能的需求，综合考虑不同投资手段的优先关系，确定配电网建设改造项目的优选次序，能够提高求解的效率。

在一定的投资规模下，配电网改造投资组合目

标函数为

$$F = \max \{X_1, X_2, \dots, X_h\} \quad (16)$$

式中, X_h 表示第 h 个技术性能需求对应的指标评分。

对应的约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n C_i \leq P_{\max} \\ I_R^{\min} \leq I_R \leq I_R^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_i 为按项目优先次序排列的第 i 个单体项目投资金额; P_{\max} 为配电网改造项目投资限额; I_R 为需要计算的其他指标; I_R^{\max} 、 I_R^{\min} 分别为其容许的指标最大值、最小值。

4 算例分析

4.1 算例描述

以我国某城市配电网为例, 考虑光伏 DG、储能装置等主动元素如图 3 所示, 系统中含有 0.2 MW 分布式储能、0.5 MW 光伏、0.3 MW 风电、7 个分段装置(以实心正方形表示), 基础负荷峰值为 5.028 MW, 通过配电网各类元件时序模拟, 获取运行数据。采用配电网改造的目的是提升配电网性能, 改善现有电网的运行效果, 配电网建设与改造实施手段主要从配电系统的网架结构、分布式电源的容量协调以及设备(包括线路、断路器、分段开关等)配置等方面进行。电力企业一般以满足用户可靠性需求为前提, 以社会综合效益最大为目标, 对各类改造项目是否实施进行分析与决策。因此, 本文以提升可靠性为例进行说明, 从以上 3 个方面分析配电网建设与改造方案对配电网运行状态的影响, 应用投资效益评估模型评估不同方案的投资效益。各

方案详细情况如表 3 所示。

表 3 各方案详细情况

Table 3 Details of each program

方案序号	方案描述			可靠性提升建设
	主动元件建设			
	风机	光伏	储能	
方案一	27 节点	14 节点	6 节点	同初始方案
S1	0.3 MW	1.5 MW	0.2 MW	
方案二	27 节点	14 节点 0.5 MW	6 节点	同初始方案
S2	0.3 MW	30 节点 1 MW	0.2 MW	
方案三	27 节点	14 节点	6 节点	9 节点、26 节点
S3	0.3 MW	0.5 MW	0.2 MW	装 3 遥
方案四	27 节点	14 节点	6 节点	13-31 增设线路
S4	0.3 MW	0.5 MW	0.2 MW	
方案五	27 节点	14 节点	6 节点	31 节点加 1 MW
S5	0.3 MW	1.5 MW	0.2 MW	备供

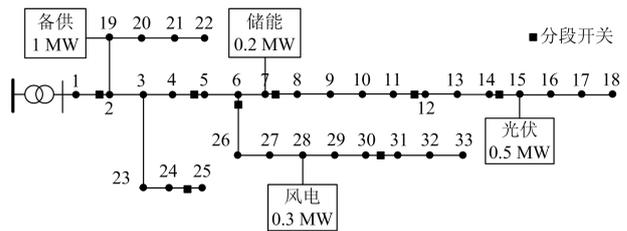


图 3 算例城市配电网拓扑结构

Fig. 3 Network topology of city distribution network in case study

4.2 结果分析

该城市部分单体项目技术经济投资效益评估部分结果如表 4 和图 4 所示。

表 4 各方案技术经济指标结果

Table 4 Comprehensive indexes of each program

指标	S1	S2	S3	S4	S5
停电频率/(次/年)	0.720 3	0.720 3	0.726 3	0.720 3	0.720 3
电压合格率/%	100	100	100	100	100
最大负荷/kW	5.05	5.036	5.056	5.056	5.056
年供电量/kWh	22 223.66	22 223.56	22 230.37	22 230.37	22 230.37
网损量/kW	704	660.8	816.3	816.3	816.3
系统期望缺供电量/kWh	2 814	2 646	3 029	3 047	2 318
供电可靠率	99.985 98	99.986 22	99.985 874	99.986 246	99.989 013
单位投资减少的停电时间/(min/万元)	0.008 9	0.0149	0.060 6	0.006 3	0.029 5
单位投资降低的失负荷量/(kWh/万元)	1.557	2.396 7	4.820 9	0.157	1.613 8
单位投资增供电量/(kWh/万元)	-0.036 85	-0.034 05	-0.036 85	-0.036 85	-0.036 85
单位投资增供负荷/(kW/亿元)	-0.055	-0.965	-0.055	-0.055	-0.055
单位投资减少的网损/(kW/万元)	0.562 4	0.777 8	0.562 4	0.562 4	0.562 4

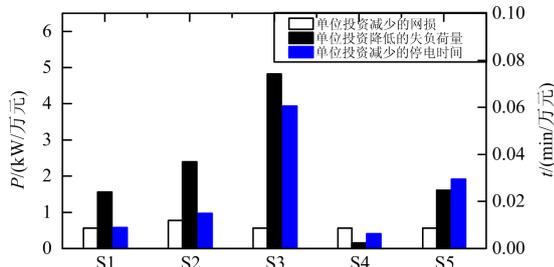


图4 部分指标结果对比

Fig. 4 Comparison of partial indexes

分析上述指标结果可以得到如下结论:

1) 各方案没有单位投资增供负荷和单位投资增供电量收益, 说明这些方案还没有拉动电量增长的效果; 2) 各方案都获得了网损减少的收益, 说明清洁能源的加入能够减小系统网损; 3) 各个方案都减少了停电时间, 方案三在添加开关后效果最明显, 说明原系统本身结构有待优化, 其次, 方案二、五的效果较好, 单位投资减少的停电时间比较大, 说明 DG 和备电源有提高系统可靠性的作用; 4) 方案四对可靠性的提升效果并不明显, 单位投资减少的停电时间和单位投资降低的失负荷量较小, 说明增设线路对于当前网架来说成本较大、收益较小, 这种方案可以在电网的开关和备供建设之后考虑; 5) 各个方案都获得了降失负荷量收益, 方案三减少的失负荷量最大, 说明现有网架有必要建设新开关。方案五减少失负荷量的效果较好地说明目前系统中的备供容量还有提升的空间, 但是方案二和方案一增加分布式能源也对这一指标有提升作用, 备供容量不能无限制的扩大, 这不利于经济性。说明可以将备供和分布式能源配合使用, 具体如何配合还需进一步的投资决策分析。

进行技术经济综合评估时, 采用 2.1 节的指标权重确定方法, 以表 4 中第 3—9 个指标为关键指标来说明权重确定方法, 后续可采用更多的指标进行综合评估。在此, 选取了 10 位专家关于评估对象的关键指标问卷调查, 采集到的专家排序矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} 6 & 5 & 3 & 2 & 4 & 1 & 1 \\ 5 & 6 & 4 & 1 & 3 & 1 & 2 \\ 6 & 3 & 4 & 1 & 5 & 1 & 1 \\ 6 & 4 & 5 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 5 & 4 & 2 & 1 & 3 & 2 & 1 \\ 4 & 5 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 6 & 5 & 3 & 1 & 4 & 2 & 1 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 5 & 5 & 4 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 7 & 6 & 4 & 3 & 5 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

取 $d = 9$, 将得到的隶属度矩阵 U 代入式(10)一式(12), 得到专家主观认识度矩阵 Z 和各指标的综合认知度矩阵 C 为

$$Z = [0.1158 \ 0.0988 \ 0.0721 \ 0.0843 \ 0.0257 \ 0.0453 \ 0.0315]$$

$$C = [0.5083 \ 0.6128 \ 0.7558 \ 0.7360 \ 0.9618 \ 0.9231 \ 0.9312]$$

经过归一化处理, 得到所选指标集权重为

$$W = [0.0936 \ 0.1129 \ 0.1392 \ 0.1356 \ 0.1772 \ 0.1700 \ 0.1715]$$

投资效益综合评估模型将各指标权重代入, 并对各指标按差值法打分, 最优指标值为 100, 差值为 10。所以, 改造方案一的综合得分为 78.877 分, 方案二的得分为 88.801 分, 方案三的得分为 90.987 分, 方案四的得分为 60.975 分, 方案五的得分为 86.385 分, 综合分析结果表明, 方案三在提升可靠性方面具有最好的技术经济效益。

5 结论

本文从技术、经济两方面效益出发, 建立了考虑分布式电源的包括供电质量、网架结构、运行水平、技术装备、信息化水平、成本类经济性、收入类经济性七大类指标的配电网技术经济评估指标体系, 并以此为基础建立了投资效益评估模型和投资决策模型。其中, 结合信息熵和模糊层次分析法的权重确定方法, 具有主观赋权法和客观赋权法的双重优点。实际上, 针对某一性能提升的改造方案, 还伴随其他不宜打分的成效, 比如: 分布式电源在提高可靠性的同时能够降低电网损耗、减小环境污染, 馈线电缆化改造能够美化都市市容等。因此, 下一步的研究可以考虑更加多样的性能要求和更加精细的投资决策模型。

参考文献

- [1] 别朝红, 李更丰. 能源互联网的规划、运行与交易[J]. 供用电, 2018, 35(11): 12-13.
- [2] 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.
- [3] 刘坤, 王克文, 祁小鹏. 基于元件故障率曲线的配电网可靠性评估和配电终端优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 49-56.

- LIU Kun, WANG Kewen, QI Xiaopeng. Reliability evaluation and distribution terminal optimal configuration of power distribution system based on bathtub curve of component failure rate[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 49-56.
- [4] 殷自力, 郑佩祥, 陈宇星, 等. 含电动汽车和分布式电源的配电网的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 77-83.
- YIN Zili, ZHENG Peixiang, CHEN Yuxing, et al. Reliability evaluation for distribution network with electric vehicle and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 77-83.
- [5] 蒋卓臻, 刘俊勇, 向月. 配电网信息物理系统可靠性评估关键技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 30-42.
- JIANG Zhuozhen, LIU Junyong, XIANG Yue. Key technologies for reliability assessment of distribution network cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 30-42.
- [6] 刘伟, 郭志忠. 配电网安全性指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 85-90.
- LIU Wei, GUO Zhizhong. Research on security indices of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 85-90.
- [7] 陈伟, 何家欢, 裴喜平. 基于相空间重构和卷积神经网络的电能质量扰动分类[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 87-93.
- CHEN Wei, HE Jiahuan, PEI Xiping. Classification for power quality disturbance based on phase-space reconstruction and convolution neural network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 87-93.
- [8] 郭焱林, 刘俊勇, 魏震波, 等. 配电网供电能力研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 33-43.
- GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 33-43.
- [9] HOU K, SHAO G, WANG H, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [10] 羌丁建, 寿挺, 朱铁铭, 等. 高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 52-57.
- QIANG Dingjian, SHOU Ting, ZHU Tieming, et al. An evaluation index system and comprehensive evaluation model on high-voltage distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 52-57.
- [11] 吴哲慧, 王光增, 钟伟, 等. 配电网发展与投资决策动态评估方法[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 10-14.
- WU Zhehui, WANG Guangzeng, ZHONG Wei, et al. Dynamic assessment method for power distribution network development and investment decision-making[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 10-14.
- [12] 李娟, 李晓辉, 刘树勇, 等. 基于理想解法和灰色关联度的配电网投资效益评价[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 13-17.
- LI Juan, LI Xiaohui, LIU Shuyong, et al. Investment benefit evaluation for distribution network based on TOPSIS and grey correlation degree[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 13-17.
- [13] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.
- XIAO Jun, WANG Chengshan, ZHOU Min. An IAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.
- [14] 杨卫红, 何永秀, 李德智, 等. 模糊区间评价与层次分析相结合的电网改造项目综合后评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 33-37.
- YANG Weihong, HE Yongxiu, LI Dezhi, et al. Comprehensive post-evaluation method of power network renovation project based on fuzzy interval evaluation and analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 33-37.
- [15] 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.
- XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.
- [16] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.
- LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.
- [17] 闫庆友, 颀超. 基于实物期权的电网项目投资决策经

- 济性评价[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 151-153.
YAN Qingyou, XIE Chao. Study on economic evaluation for grid investment based on real option method[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 151-153.
- [18] 王国权, 乔琨, 侯荣均, 等. 配电网投资效益评价及投资项目的优选[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 146-150.
WANG Guoquan, QIAO Kun, HOU Rongjun, et al. Evaluation on investment returns of distribution network and optimization of investment projects[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(12): 146-150.
- [19] 马倩, 王博, 胡蔚, 等. 配电网建设与改造项目评价及决策优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 11-17.
MA Qian, WANG Bo, HU Wei, et al. Study on evaluation and decision optimization of distribution network construction and innovation reconstruction projects[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 11-17.
- [20] 熊金石, 秦洪涛, 李建华, 等. 基于信息熵的安全风险评估指标权重确定方法[J]. 系统科学学报, 2013, 21(2): 82-84.
XIONG Jinshi, QIN Hongtao, LI Jianhua, et al. Method of determining index weight in security risk evaluation based on information entropy[J]. Journal of System Science, 2013, 21(2): 82-84.
- [21] 韩震焘, 黄志伟, 葛少云, 等. 城市配电网综合评价体系[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 95-99.
HAN Zhentao, HUANG Zhiwei, GE Shaoyun, et al. A comprehensive evaluation system of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 95-99.
- [22] 赵明欣, 刘伟, 陈海, 等. 《配电网规划设计技术导则》解读[J]. 供用电, 2016, 33(2): 2-7.
ZHAO Mingxin, LIU Wei, CHEN Hai, et al. Analysis on the guide for planning and design of distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(2): 2-7.
- [23] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 107-112.
LAN Jibin, XU Yang, HUO Liangan, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2006, 26(9): 107-112.
- [24] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.
CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228.
- [25] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46.
ZHANG Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46.

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-09-06

作者简介:

刘旭娜(1986—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电能质量评估。E-mail: liuxuna86@126.com

(编辑 许威)