

一种新型智能配电网风险评估模型

高 贺¹, 孙 莹¹, 李可军¹, 梁永亮²

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 中国石油大学(华东) 信息与控制学院 电气工程系, 山东 青岛 266580)

摘要: 为实现智能配电网风险评估, 提出一种新型智能配电网风险评估模型。根据当前智能配电网发展情况, 构建融合宏观风险和微观指标的智能配电网多级风险评估体系, 使其尽可能全面地覆盖网络风险管理过程中的关键性风险因素; 考虑专家权威性对权重分配的影响, 在模糊层次分析法的基础上应用相似度聚类分析赋予评估体系合理的静态主观权重; 为充分计及微观指标风险值的时序特征, 基于改进 CRITIC 赋权法赋予微观指标相应的动态客观权重, 并将其与静态主观权重结合为最优变权。实例验证了所提模型有较强的实用性。

关键词: 智能配电网; 风险评估; 相似度聚类分析; 改进 CRITIC 赋权法; 最优变权

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.021

0 引言

近年来, 针对智能电网的研究和建设成为世界各国的关注焦点。我国国家电网公司和相关学者密切跟踪国际形势变化, 在借鉴欧美智能电网^[1]的基础上, 根据我国基本国情, 提出了建设坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的统一坚强智能电网的发展战略^[2]。

对智能电网进行风险评估, 对于识别网络发展过程中的薄弱环节和主要风险因素、实现网络的趋优运营具有重要意义。目前针对智能电网风险评估的研究相对较多: 文献[3]阐述了从宏观战略和微观过程这 2 个方面构建智能电网评估指标体系的具体过程, 但未能针对智能电网的状态评估方法展开深入研究; 文献[4]提出了智能电网风险评估的整体思路和总体框架, 但仅局限于从工程风险和金融风险这 2 个方面进行讨论, 从而使风险评估结果过于片面、缺乏说服力; 文献[5]考虑到智能电网的时间和区域发展特性, 利用多维度风险评估矩阵对智能电网进行风险评估, 但其构建的网络风险因素结构框架过于简单粗略而使网络风险评估效果并不理想。

智能配电网作为智能电网的关键环节之一, 是实现智能电网整体建设目标的重要保障, 但目前针对智能配电网风险评估的研究很少。因此, 本文基于现有研究^[3-7], 首先建立智能配电网多级风险评估体系并划分网络风险等级; 然后综合应用模糊层次分析法 FAHP(Fuzzy Analytic Hierarchy Process)和相似度聚类分析确定评估体系的静态主观权重; 为计及微观指标风险值的时序特征, 基于改进 CRITIC 赋

权法确定微观指标的动态客观权重, 并将其与指标对应的静态主观权重结合为同时考虑专家主观经验和指标风险值客观发展趋势的最优变权; 最后在专家打分的基础上, 结合相应的权重系数求取智能配电网整体风险值以评判网络风险等级和安全级别; 实例验证了该模型能有效实现智能配电网的风险评估。

1 智能配电网风险评估模型的构建

1.1 智能配电网多级风险评估体系的建立

为保证智能配电网风险评估体系的系统性和评估指标间的独立性, 本文依据风险管理的基本原则和一般流程, 从工程风险、金融风险、安全风险、技术风险、管理风险和外部风险这 6 个宏观风险类型展开分析, 每个宏观风险均具体划分到多个微观指标。图 1 为建立的智能配电网多级风险评估体系。

风险评估体系中的 6 个宏观风险类型简述如下。

a. 工程风险(R_1): 主要指智能配电网的工程系统故障对网络运行带来的不良影响, 其下属微观指标中的新型配电设备主要包括分布式电源、大型可再生能源电源以及用户侧的智能电器等。

b. 金融风险(R_2): 主要来源于市场因素, 其中市场价格波动带来的风险为主要风险。

c. 安全风险(R_3): 主要指智能配电网利用数字化手段与用户进行互动时, 潜在的网络攻击可能导致网络重要信息的泄露以及终端用户个人信息的被侵犯, 从而给智能配电网的安全运行带来巨大威胁。

d. 技术风险(R_4): 它是目前智能配电网面临的重大风险, 其中电力、通信和软件等相关领域核心技术的开发及电力行业、相关学者强大的后续研发能力是推动智能配电网全面发展的中坚力量。

e. 管理风险(R_5): 主要包括针对管理人员的技术培训机制不健全、网络建设经费不足和终端用户

收稿日期: 2016-03-01; 修回日期: 2016-04-19

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2014GGH204002)

Project supported by the Shandong Scientific and Technology Program(2014GGH204002)

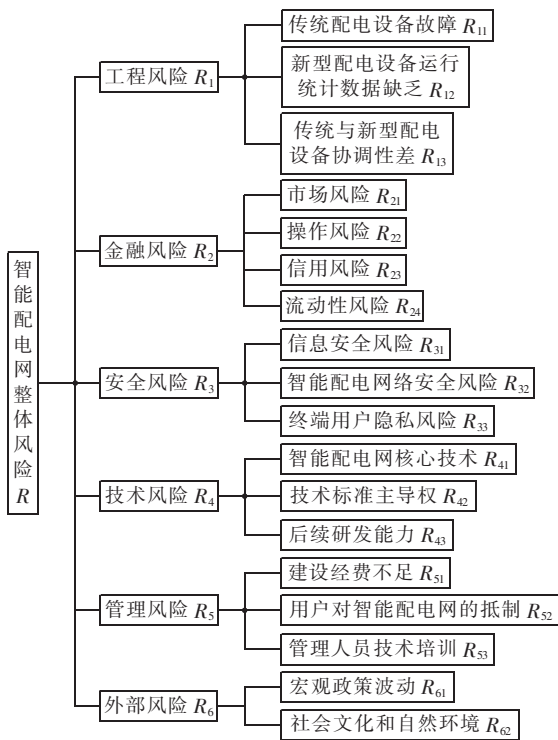


图 1 智能配电网多级风险评估体系
Fig.1 Multilevel risk assessment system
for smart distribution grid

家权威性,但现有相关文献^[8-10]大都忽略了此关键信息。因此,为弥补目前 FAHP 未计及专家权威性这一缺陷,本文根据 FAHP 建立专家小组的指标排序向量矩阵 L ,应用相似度聚类分析建立专家小组的权威因数矩阵 γ ,结合两矩阵确定智能配电网风险评估体系的静态主观权重,赋权流程见图 2。

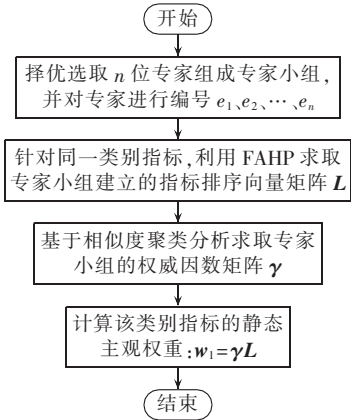


图 2 静态主观权重分配流程图
Fig.2 Flowchart of static subjective weight assignment

指标排序向量矩阵 L 的求取可参考文献^[10]中 1.1 节所述方法,鉴于篇幅,此处不再赘述。现详细说明权威因数矩阵 γ 的求取过程。

步骤 1: 根据矩阵 L 构造相似度关联矩阵 $S = [s_{pq}]_{n \times n}$ 。引入向量夹角余弦 $s_{pq}(p \neq q; p, q = 1, 2, \dots, n)$ 来量化矩阵 L 中任意 2 个行向量 l_p 和 l_q (专家 e_p 和 e_q 建立的指标排序向量) 间的相似程度,具体计算方法见式(1), l_p 和 l_q 的相似度越高, s_{pq} 的值越大。

$$s_{pq} = \frac{l_p l_q^T}{\|l_p\| \|l_q\|}$$

(1)

其中, l_q^T 为向量 l_q 的转置向量; $\|l_p\|$ 和 $\|l_q\|$ 分别为向量 l_p 和 l_q 的范数。

步骤 2: 根据矩阵 S 进行专家聚类。具体如下:

- a. 寻找矩阵 S 中的最大非对角线元素 s_{ab} , 将专家 e_a, e_b 归入集合 E ;
- b. 令 $s_{ab} = s_{ba} = 0$, 寻找并记录 S 中第 a 和第 b 行的最大非对角线元素 $s_{ac}(s_{bc})$, 将专家 e_c 归入集合 E ;
- c. 令 $s_{ac} = s_{ca} = 0(s_{bc} = s_{cb} = 0)$, 寻找并记录 S 中第 c 行最大非对角线元素 s_{cd} , 将专家 e_d 归入集合 E ;
- d. 依此类推, 直至 n 位专家全部归入集合 E ;
- e. 设定合理的阈值 T , 若记录的 $s_{ik} \leq T$, 则将专家 e_i, e_k 聚为一类, 否则将专家 e_i, e_k 分属为不同类。

步骤 3: 计算专家类别间权威因数 α 。根据各专家类别建立的指标排序向量, 计算专家类别间的一致性差异值, 某一专家类别的一致性差异值越小, 说明该专家类别确定的指标排序向量越具有代表性, 从而该专家类别的权威性越高。若通过聚类, n 位专家被分成 r 类, 其中专家 e_i 属于第 $h(1 \leq h \leq r)$ 类, 且

因个人隐私倾向而抵制使用智能设备。
f. 外部风险 (R_6): 宏观政策波动主要包括宏观经济形势的改变和相关法律政策的调整, 社会文化和自然环境的变化对人们接受智能化生活的思想意识有着潜移默化的影响。

1.2 智能配电网风险评估等级的划分

文献^[5]应用风险评估矩阵法, 综合风险因素的危害程度和风险事件的可能性得到 25 个风险值, 并将其按风险结果划分的范围标准映射为等级 1—5。本文在文献^[5]风险等级划分的基础上, 将风险等级与网络安全级别作一一对应, 如表 1 所示。

表 1 智能配电网风险评估等级的划分
Table 1 Risk levels of smart distribution
grid assessment

风险等级	风险值区间	风险描述	网络安全级别
1	[1, 5)	极低	安全
2	[5, 10)	低	较安全
3	[10, 15)	中等	警戒
4	[15, 20)	高	较危险
5	[20, 25]	极高	危险

2 风险评估体系的最优变权

2.1 基于相似度聚类分析的静态主观权重

FAHP^[8-10]建立在专家主观经验的基础上, 专家权威性的 大小直接决定其所建立的指标排序向量真实度的高低, 故基于 FAHP 的赋权过程必须考虑专

该类包括 φ_h 位专家,则该类别的权威因数 α_h 为:

$$\begin{cases} N_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \|I_i - I_j\|^2 \\ N'_h = \left(\sum_{i=1}^n N_i \right) / \varphi_h \\ \alpha_h = (\varphi_h^2 / N'_h) / \sum_{i=1}^r (\varphi_i^2 / N'_h) \end{cases} \quad (2)$$

其中, N_i 为专家 e_i 与其他专家所建立的指标排序向量间的综合一致性差异值; N'_h 为第 h 类专家与其他专家类别间的综合一致性差异值。

步骤 4: 计算专家类别内权威因数 β 。同一类别中不同专家所建立的模糊判断矩阵的一致性比例^[8-10]不同,从而导致不同专家建立的指标排序向量的权威性不同。第 h 类别中专家 e_i 的权威因数 β_i 为:

$$\beta_i = \frac{1}{1 + cC_{R_i}} / \sum_{j=1}^{\varphi_h} \frac{1}{1 + cC_{R_j}} \quad (3)$$

其中, c 为调节比例因子^[11], 本文中 $c=10$; C_{R_i} 和 C_{R_j} 分别为第 h 类别中专家 e_i 和 e_j 所建立的模糊判断矩阵的一致性比例。

步骤 5: 综合 α 和 β 计算 γ 。专家 e_i 的权威因数为:

$$\gamma_i = \alpha_h \beta_i \quad (4)$$

以智能配电网风险评估体系中技术风险(R_4)下属的微观指标(R_{41} 、 R_{42} 、 R_{43})为例来说明静态主观权重的分配过程。若专家小组由 5 位专家组成, 即 $n=5$, 利用 FAHP 求得的指标排序向量矩阵 L 为:

$$L = \begin{bmatrix} e_1 & 0.4536 & 0.3011 & 0.2453 \\ e_2 & 0.4286 & 0.2857 & 0.2857 \\ e_3 & 0.5075 & 0.2895 & 0.2030 \\ e_4 & 0.4779 & 0.3148 & 0.2073 \\ e_5 & 0.4245 & 0.3459 & 0.2296 \end{bmatrix}$$

根据矩阵 L 构造的相似度关联矩阵 S 为:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.9965 & 0.9941 & 0.9971 & 0.9956 \\ 0.9965 & 1 & 0.9832 & 0.9874 & 0.9903 \\ 0.9941 & 0.9832 & 1 & 0.9981 & 0.9862 \\ 0.9971 & 0.9874 & 0.9981 & 1 & 0.9943 \\ 0.9956 & 0.9903 & 0.9862 & 0.9943 & 1 \end{bmatrix}$$

根据矩阵 S 进行专家聚类的过程如图 3 所示。

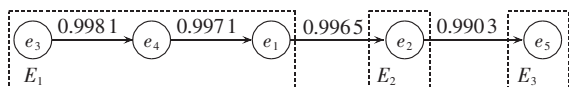


图 3 专家聚类流程图

Fig.3 Flowchart of expert clustering analysis

设阈值 $T=0.9970$, 则 5 位专家被分为 3 类: $E_1 = \{e_3, e_4, e_1\}$, $E_2 = \{e_2\}$, $E_3 = \{e_5\}$ 。根据式(2)和式(3)计算所得的专家类别间、类别内权威因数矩阵分别为: $\alpha = [0.9310, 0.0345, 0.0345]$, $\beta = [0.3398, 1, 0.2976, 0.3626, 1]$ 。根据式(4)求得的专家权威因数矩阵

为: $\gamma = [0.3164, 0.0345, 0.2771, 0.3376, 0.0345]$ 。综上所述, 指标 R_{41} 、 R_{42} 、 R_{43} 的静态主观权重为: $w_1(R_4) = \gamma L = [0.4749, 0.3036, 0.2216]$ 。

同理, 基于上述方法确定的智能配电网风险评估体系的静态主观权重如表 2 所示。

表 2 智能配电网风险评估体系的静态主观权重

Table 2 Static subjective weights of risk assessment system for smart distribution grid

风险类型	下一层级指标静态主观权重
整体风险(R)	[0.1773, 0.0725, 0.1832, 0.2525, 0.1544, 0.1601]
工程风险(R_1)	[0.4281, 0.3763, 0.1956]
金融风险(R_2)	[0.5322, 0.0896, 0.2817, 0.0965]
安全风险(R_3)	[0.2714, 0.5657, 0.1629]
技术风险(R_4)	[0.4749, 0.3036, 0.2216]
管理风险(R_5)	[0.1235, 0.6544, 0.2221]
外部风险(R_6)	[0.6801, 0.3199]

2.2 基于改进 CRITIC 赋权法的动态客观权重

实际调研表明, 关键性风险指标对智能配电网的影响程度随时间变化而逐渐演变, 即关键性风险指标的参数具有时序特征。从整体上来看, 各风险指标对智能配电网的影响程度随着网络的日趋完善而逐渐减小, 但不同指标风险值的下降幅度不同, 在网络不同发展阶段呈现出的客观分布特征也不同。

为充分计及关键性风险指标参数的时序特征对评估过程的影响, 本文基于改进 CRITIC 赋权法赋予各微观指标相应的动态客观权重, 进而将微观指标的静态主观权重和动态客观权重整合为最优变权, 使赋权过程既参考评估专家的主观经验, 又依据微观指标风险值的客观变化趋势, 从而使权重系数的确定更为严谨合理。

2.2.1 改进 CRITIC 赋权法机理

CRITIC 赋权法^[12]是由 Diakoulaki 提出的一种新型客观赋权方法, 由于其同时考虑了同一指标参数的变化幅度大小和不同指标间的冲突性大小对权重系数的影响, 因此 CRITIC 赋权法相比于熵权法和标准离差法具有明显的优势。

CRITIC 赋权法以指标的对比强度和冲突性为基础, 其中对比强度用来量化同一指标在不同决策方案中取值差异性大小, 用标准差来衡量; 冲突性用来量化不同指标间相关性大小, 用相关系数来衡量。基于 CRITIC 赋权法进行客观赋权的计算过程为:

$$\begin{cases} \sigma_i = \left[\sum_{k=1}^u (x_{i,k} - x_{i,ave})^2 / u \right]^{1/2} \\ r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^u (x_{i,k} - x_{i,ave})(x_{j,k} - x_{j,ave})}{\left[\sum_{k=1}^u (x_{i,k} - x_{i,ave})^2 \sum_{k=1}^n (x_{j,k} - x_{j,ave})^2 \right]^{1/2}} \\ w_2(i) = \left[\sigma_i \sum_{j=1, j \neq i}^v (1 - r_{ij}) \right] / \left[\sum_{i=1}^v \sigma_i \sum_{j=1, j \neq i}^v (1 - r_{ij}) \right] \end{cases} \quad (5)$$

其中, σ_i 为指标 i 的标准差; u 为决策方案的数量; $x_{i,k}$ 和 $x_{j,k}$ 分别为指标 i 和 j 在第 k 个决策方案中的归一化参数值; $x_{i,ave}$ 和 $x_{j,ave}$ 分别为指标 i 和 j 在所有决策方案中归一化参数的平均值; r_{ij} 为指标 i 和 j 的相关系数; $w_2(i)$ 为指标 i 的动态客观权重; v 为指标的数量。指标 i 和 j 的参数均经过归一化处理^[12]。

虽然 CRITIC 赋权法综合考虑了不同指标间的对比强度和冲突性,但并未考虑指标间的离散性,研究表明,熵值可以用来量化数据间的聚集程度^[12],故本文应用熵值将式(5)改进为式(6),使赋权过程同时融合指标间的对比强度、冲突性和离散性。

$$w_2(i) = \frac{(\sigma_i + s_i) \sum_{j=1, j \neq i}^v (1 - r_{ij})}{\sum_{i=1}^m (\sigma_i + s_i) \sum_{j=1, j \neq i}^v (1 - r_{ij})}$$

(6)

其中, s_i 为指标 i 的熵值,其计算方法见文献[13]。

2.2.2 改进 CRITIC 赋权法的具体应用

由于智能配电网风险评估体系中各微观指标均为定性指标,因此本文基于专家打分法^[14]对各指标进行风险评估,并将各微观指标对应的分值作为其风险值。由于各微观指标风险值的量纲相同,故在利用改进 CRITIC 赋权法进行权重计算时,无需对各微观指标的风险值进行归一化处理。

根据已有研究和专家经验预测智能配电网在中期和远期发展阶段中各微观指标风险值。将各微观指标在近期、中期和远期发展阶段的风险值作为改进 CRITIC 赋权法的 3 个决策方案,进而由式(5)和(6)确定智能配电网风险评估体系的动态客观权重。

2.3 最优变权的求取

为避免单一赋权方法的局限性和片面性,提高权重系数的科学性,本文将基于相似度聚类分析的静态主观权重和基于改进 CRITIC 赋权法的动态客观权重结合为最优变权,从而达到优势互补的效果。针对指标 i ,其最优变权的计算公式如下:

$$W(i) = \frac{w_1(i)w_2(i)}{\sum_{j=1}^t w_1(j)w_2(j)}$$

(7)

其中, $w_1(i)$ 和 $w_2(i)$ 分别为指标 i 的静态主观权重和动态客观权重; t 为与指标 i 相同类别的指标总数。

3 智能配电网风险评估具体步骤

综上所述,智能配电网风险评估具体步骤如下。
步骤 1:邀请专家参与智能配电网风险评估。本文邀请 5 位从事智能配电网相关工作的专家参与风险评估,为充分计及专家权威性对评估结果的影响,采用强制比较法^[15]从专家的职称、工龄和学历 3 个方面分析其权威性,求得的专家权重向量为: $K=[k(i)|i=1,2,3,4,5]=[0.208,0.183,0.212,0.169,0.228]$;令专家

根据自身经验和指标实际状态打出相应的分值,打分范围与表 1 中提供的各风险等级对应的风险值区间相同。将某一风险指标 R_{ij} 的所得分值(风险值) G_{ij} 定义为:

$$G_{ij} = \sum_{l=1}^5 g_{ij}(l)k(l)$$

(8)

其中, $g_{ij}(l)$ 为专家 e_l 针对指标 R_{ij} 所打出的分值; $k(l)$ 为专家 e_l 的权重值。

步骤 2:基于相似度聚类分析和改进 CRITIC 赋权法确定智能配电网风险评估体系的最优变权。

步骤 3:结合各微观指标的风险值和相应的最优变权,基于加权平均求取智能配电网的整体风险值。

步骤 4:将各风险等级对应风险值区间的中间值作为该等级的特征风险值,定义特征风险值向量为 $T=[3,7.5,12.5,17.5,22.5]$,将求取的智能配电网整体风险值与向量 T 进行比较以确定智能配电网风险等级和网络安全级别。

4 实例验证与分析

选取华东地区某智能配电网作为研究对象,结合各微观指标的风险值和相应的最优变权求取该智能配电网的整体风险值,并与网络实际发展状况进行比较分析,以验证本文建立的风险评估模型的有效性。

应用本文第 3 节步骤 1 中所述方法,求取该智能配电网各微观指标在近期发展阶段的风险值;根据专家经验和已有研究,预测各微观指标在中期发展阶段和远期发展阶段的风险值。表 3 展示了智能配电网多级风险评估体系中 6 个宏观风险类型($R_1—R_6$)下属各微观指标在网络不同发展阶段的风险值。

表 3 微观指标不同发展阶段的风险值
Table 3 Microscopic index risk for different development stages

宏观风险	微观指标	风险值		
		近期	中期	远期
R_1	R_{11}	13.204	15.741	11.556
	R_{12}	16.289	14.325	11.709
	R_{13}	17.051	15.623	10.681
R_2	R_{21}	8.344	9.872	12.593
	R_{22}	9.609	8.631	7.651
	R_{23}	11.048	9.892	7.741
	R_{24}	7.423	8.009	7.655
R_3	R_{31}	13.267	15.774	10.350
	R_{32}	15.749	12.254	9.568
	R_{33}	13.644	16.037	11.270
R_4	R_{41}	23.245	18.418	16.621
	R_{42}	21.657	16.239	14.826
	R_{43}	21.455	18.831	13.420
R_5	R_{51}	16.733	12.042	6.377
	R_{52}	14.281	11.330	7.083
	R_{53}	16.454	10.177	6.095
R_6	R_{61}	16.829	11.905	9.560
	R_{62}	12.022	10.673	7.001

根据表 2 和表 3 提供的有效信息,根据改进 CRITIC 赋权法和式(7)确定各微观指标的动态客观权重和最优变权如表 4 所示。

表 4 微观指标的权重系数
Table 4 Microscopic index weights

宏观风险	动态客观权重	最优变权
R_1	[0.444 6,0.298 2,0.257 3]	[0.539 4,0.318 0,0.142 6]
R_2	[0.420 5,0.196 8, 0.247 3,0.135 5]	[0.690 4,0.054 4, 0.214 9,0.040 3]
R_3	[0.234 9,0.533 2,0.231 9]	[0.158 1,0.748 1,0.093 8]
R_4	[0.210 1,0.266 6,0.523 3]	[0.336 4,0.272 7,0.391 0]
R_5	[0.212 9,0.257 6,0.529 5]	[0.084 2,0.539 5,0.376 3]
R_6	[0.563 6,0.436 4]	[0.733 0,0.267 0]

根据各微观指标的近期风险值和相应的最优变权,基于加权平均求得该智能配电网 6 个宏观风险类型的风险值和网络整体风险值如表 5 所示。

表 5 智能配电网风险值
Table 5 Risks of smart distribution grid

评估对象	风险值	风险描述
R_1	14.733 6	较高
R_2	8.956 8	中等
R_3	15.159 1	较高
R_4	22.114 4	极高
R_5	15.305 2	较高
R_6	15.545 5	较高
R	16.474 6	较高

现针对表 5 作简要分析如下。

a. 该智能配电网整体风险值为 16.4746,将其与特征风险值向量 T 比较可知,该网络的风险等级接近于第 4 级,参照表 1 可知该网络面临的风险较高,网络安全级别接近于较危险。由于目前我国智能配电网的发展处于初期阶段,网络智能化水平较低且发展受到多方面因素的限制,网络面临的风险较大且对风险的承受能力不足,因此基于本文建立的评估模型分析得到该智能配电网面临的风险状况与我国智能配电网的实际发展状况基本一致。

b. 该智能配电网面临的技术风险(R_4)极高。不够成熟的核心技术和不够健全的体制标准是制约智能配电网全面发展的核心因素,因此必须重视智能配电网相关领域核心技术的研发,推动智能配电网技术标准的不断完善。

c. 该智能配电网面临的工程风险(R_1)、安全风险(R_3)、管理风险(R_5)和外部风险(R_6)均较高。目前智能化和自动化配电设施大部分处于规划建设的试点阶段,运行数据匮乏且与传统设备的协调性差;信息网络和用户终端信息网均未形成规模、信息安全和相关标准均未成熟,导致网络自身存在较大的安全隐患;专业技术人员的缺乏和粗放型的管理机制使网络发展过程中面临较大的管理风险;国家

对智能配电网发展的扶持力度不够,出台的相关政策不够完善,且用户对智能化生活的接受意识较为薄弱使智能配电网的发展受外部影响较大。

d. 该智能配电网面临的金融风险(R_2)中等。随着网络发展规模的逐渐扩大,网络建设对资金的需求也会相应增大,导致在资金操作和市场交易等过程中面临的风险增大,因此在网络发展的各个阶段均应对金融风险给予一定的重视。

综上所述,本文提出的评估模型能够直观准确地实现智能配电网的风险评估,且能够识别网络发展过程中的薄弱环节和面临的主要风险,对于全面推进智能配电网的趋优发展具有重要的指导意义。

5 结论

本文提出了一种新型智能配电网风险评估模型,实例验证了该评估模型具有较强的实用性。现将该评估模型的特点总结如下:

a. 智能配电网多级风险评估体系融合了宏观风险和微观指标,尽可能全面地覆盖了网络发展过程中面临的关键性风险因素;

b. 综合应用相似度聚类分析和 FAHP 赋予评估体系合理的静态主观权重,弥补了传统主观赋权方法未能考虑专家权威性的缺陷;

c. 评估体系的最优变权同时计及了评估专家的主观经验和微观指标风险值的客观发展趋势,使静态风险评估转化为计及时序特征的动态风险评估。

随着智能配电网的逐渐发展,本文建立的智能配电网多级风险评估体系所涵盖的风险因素信息可能无法满足未来网络风险评估的需要,因此对评估体系的框架作适当的扩展,并针对指标风险值的求取方法作进一步的探索,是今后研究工作的重点。

参考文献:

[1] SLIMOES M G, ROCHE R, KYRIAKIDES E, et al. Smart-grid technologies and progress in Europe and the USA [C] //Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2011: 383-390.

[2] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评书 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15.

CHANG Kang, XUE Feng, YANG Weidong. Review on the basic characteristics and its technical process of smart grid in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 10-15.

[3] 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.

[4] 赵珊珊, 张东霞, 印永华. 智能电网的风险评估 [J]. 电网技术, 2009, 33(19): 7-10.

ZHAO Shanshan, ZHANG Dongxia, YIN Yonghua. Risk assessment

- of smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 7-10.
- [5] 孙强, 张义赋, 韩冬, 等. 多因素、多维度的智能电网风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 51-55.
- SUN Qiang, ZHANG Yifu, HAN Dong, et al. Multifactorial and multidimensional risk evaluation of smart grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 51-55.
- [6] 曾鸣, 陈英杰, 胡献忠, 等. 基于多层次模糊综合评判法的我国智能电网风险评估[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 535-539.
- ZENG Ming, CHEN Yingjie, HU Xianzhong, et al. The risk assessment of China's smart grid based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation method[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4): 535-539.
- [7] HABASH R W Y, GROZA V, KREWSKI D, et al. A risk assessment framework for the smart grid[C]//Electrical Power & Energy Conference. Halifax, NS, Canada: IEEE, 2013: 1-6.
- [8] 巫伟南, 杨军, 胡文平, 等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 129-134.
- WU Weinan, YANG Jun, HU Wenping, et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 129-134.
- [9] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
- GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [10] 田林钢, 靳聪聪, 巴超. 改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(3): 317-327.
- TIAN Lingang, JIN Congcong, BA Chao. Application of improved fuzzy AHP to safety evaluation of seawall engineering[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(3): 317-327.
- [11] 何立华, 王栎琦, 张连营. 基于聚类的多属性群决策专家权重确定方法[J]. 运筹与管理, 2014, 23(6): 65-71.
- HE Lihua, WANG Yueqi, ZHANG Lianying. A method of determining the experts' weights of multi-attribute group decision-making based on clustering analysis[J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23(6): 65-71.
- [12] 宋冬梅, 刘春晓, 沈晨, 等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1-9.
- SONG Dongmei, LIU Chunxiao, SHEN Chen, et al. Multiple objective and attribution decision making based on the subjective and objective weighting[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4): 1-9.
- [13] 傅学谦, 陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 128-132.
- FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sum ratio method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 128-132.
- [14] 徐岩, 陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 88-93.
- XU Yan, CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 88-93.
- [15] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君, 等. 变压器状态评估指标权重计算的未知有理数法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2219-2224.
- LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Calculation method of power transformer condition assessment index weight using unascertained method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2219-2224.

作者简介:



高贺

高贺(1992—),女,吉林四平人,硕士研究生,主要研究方向为电网及智能电网规划与研究(E-mail: sddxghe@126.com);

孙莹(1959—),男,山东聊城人,教授,主要研究方向为配电自动化(E-mail: sy@sdu.edu.cn);

李可军(1972—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为柔性交直流输配电技术、设备状态检修、智能配电网(E-mail: lkjun@sdu.edu.cn)。

Risk assessment model of smart distribution grid

GAO He¹, SUN Ying¹, LI Kejun¹, LIANG Yongliang²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Department of Electrical Engineering, Institute of Information and Control Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: A risk assessment model is proposed for the smart distribution grid. A multilevel risk assessment system combining the macroscopic risk and the microcosmic index is built based on the development conditions of smart distribution grid to reflect its critical risk factors during the risk management as comprehensive as possible. Based on the fuzzy hierarchy analytic process, the similarity clustering analysis is applied to consider the influence of expert authorities on the weight distribution for assigning a rational static subjective weight to the assessment system. The improved CRITIC method is applied to fully consider the sequential features of the microcosmic index risk for assigning a corresponding dynamic objective weight to the microcosmic index, which is then combined with the static subjective weight to obtain the dynamic optimal weight. A practical example verifies the better practicability of the proposed model.

Key words: smart distribution grid; risk assessment; similarity clustering analysis; improved CRITIC method; dynamic optimal weight