

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.040

基于理想向量空间投影理论的微网规划方案经济性综合评价

方小飞¹, 贺铁光², 苏浩益²

(吉林铁道职业技术学院, 吉林 132001; 2. 国网湘潭供电公司, 湖南 湘潭 411104)

摘要: 为了对微网规划方案的经济性进行科学评价,提出了基于理想向量空间投影理论的微网经济性综合评估数学模型。构建了适应微网规划特点的综合评价指标体系,包括初始投资成本、运行维护成本、节能效益、环保效益、可靠性效益、政府补贴效益、降损效益、延缓电网投资效益等。在此基础上,融合理想向量空间模型和灰色矢量投影原理,实现微网规划方案优选排序。通过对一个实际的微网示范工程进行计算分析,验证了该模型的有效性和优越性,结果表明,该模型可以全面考虑影响微网规划特征的要素,量化分析微网规划方案的优劣,引导微网规划的投资方向。

关键词: 微网; 灰关联投影; 反熵权法; 综合评估; 向量空间模型

Economic Comprehensive Evaluation of Micro-grid Planning Scheme Based on the Ideal Vector Space Projection Theory

FANG Xiaofei¹, HE Tiegua², SU Haoyi²

(1. Jilin Railway Vocational and Technical College, Jilin 132001, China;
2. State Grid Xiangtan Power Supply Bureau, Hunan Xiangtan 411104, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the economics of micro-grid planning scheme, the economic comprehensive evaluation of micro-grid mathematical model is put forward based on the ideal vector space projection theory. A comprehensive evaluation index system applicable to the characteristics of the micro-network planning is built up, which includes initial investment cost, operation and maintenance costs, energy efficiency, environmental benefits, reliability efficiency, effectiveness of government subsidies, loss reduction benefits, and delay the grid investment benefit, etc. On this basis, the optimization of micro-grid planning scheme is achieved with the ideal vector space model and gray vector projection principle. Through calculation and analysis of micro-grid demonstration project on an actual, the validity and superiority of the model is verified. The results show that the model can take into account of the key index which may influence the micro-grid planning scheme and can quantize the advantages and disadvantages of micro-grid planning scheme, and guide the investment for micro-grid planning.

Key words: micro-grid; gray relation projection; anti-entropy method; comprehensive evaluation; vector space model

0 引言

微网在节能减排、降损增效、提高供电可靠性、延缓电网投资等方面具有良好的经济价值和社会效益^[1-7],促使其建设步伐也越来越快。由于技术路线、建设背景、电源结构、资金来源等不同,建设前

期会出现多个规划方案供管理者选择。传统的电网规划决策模型往往追求单一目标的最优化,忽视了规划方案的综合效益。依据专家经验进行单一的主观评价时,缺乏定量分析的严谨性,使得评估结果具有偶然性和主观性。对微网规划方案进行客观合理的评估是当前迫切需要解决的问题。

微网的相关研究引起了广大学者和电力工作

收稿日期:2017-03-12; 修回日期:2017-04-26

基金项目:广西教育厅项目(YB2014138)。

Project Supported by Education Department of Guangxi(YB2014138).

人员的关注,文[8]研究了一个由光伏电池、微型燃气轮机、风机、燃料电池、蓄电池和热负荷构成的微网,建立了同时考虑分布式电源有功无功出力的热电联供型微网多目标经济调度模型,为微网的经济运行研究开拓了新思路;文[9]考虑了微网中风力发电机和光伏电池的输出功率、用电负荷以及系统设备故障停运等不确定因素的影响,建立综合考虑可靠性与安全性的微网负荷最优分配模型,通过改进的膜计算方法对模型进行数值优化计算,为有效计算微网的运行维护成本和经济效益提供了参考依据;文[10]将微网作为等值电源或负荷,考虑间歇性分布式电源出力特性、储能装置的特性、微网孤岛运行等,提出了微网可靠性评估指标及其计算方法,为微网可靠性指标的定量计算做出了有益的探索;文[11]提出了两种微网能源管理策略,建立了计及分布式电源随机性和模糊性的微网单位节能减排投资成本函数,给出了节能减排计算方法和评估指标,为文中的研究提供了参考依据;文[12]将微网评价指标划分为可靠性、经济性、市场运营、环保性4个层面,并将传统的数学优化算法和多元决策理论相结合,对微网项目进行分级评估,但是部分指标并未明确计算方法。

笔者在现有研究成果的基础上,以传统的燃煤发电机组作为参照对象,从全社会的角度出发,构建微网规划方案经济性综合评估指标体系。分别通过改进层次分析法和反熵权法得到各指标的主客观权重值,结合灰色理论和矢量投影原理,引入理想向量空间模型,在高维特征空间通过对待评方案与理想方案的投影值进行比较,得到微网规划方案的综合评估结果,避免了只利用各个方案的单个指标值进行决策的片面性,对微网的建设管理具有一定的参考意义。

1 微网的经济性评价

1.1 微网初始投资成本

微网的初始投资成本包括一次设备、控制系统、储能装置、通信系统、安装成本等总费用,为便于比较分析,将其表示为等年值的形式,见式(1)

$$C_{cs} = \sum_{i=1}^z (C_{csi} + C_{csi2}) \frac{r(1+r)^s}{(1+r)^s - 1} \quad (1)$$

式(1)中: z 为微网所拥有的分布式电源的总数; r 为折现率,文中取0.08计算; s 为微网的使用寿命年限; C_{csi} 为第*i*个分布式电源的一次设备采购、安装、调试等费用的总称; C_{csi2} 为第*i*个分布式电源的控制系统、保护装置、通信系统等初始投资

费用的总称。

1.2 运行维护成本

微网的运行维护成本主要与分布式电源的种类、容量等有关,其表达式见式(2)

$$C_{yw} = \sum_{i=1}^z P_i k_i \quad (2)$$

式(2)中: P_i 为第*i*个分布式电源的装机容量; k_i 为第*i*个分布式电源的年运行维护成本折算系数^[1]。

1.3 节能效益

不同的分布式电源消耗的燃料不同,文中以分布式电源供应等量电能和热能相较于传统的燃煤发电机组而节约的化石燃料对应的价值作为参考依据。可再生能源分布式电源的节能效益表示为

$$B_{jn} = M_{hd} p_{mt} \sum_{i=1}^z E_i \quad (3)$$

式(3)中: M_{hd} 为传统燃煤机组单位电能所消耗的煤炭量; p_{mt} 为煤炭价格; E_i 为第*i*个分布式电源的年发电量。

1.4 环保效益

微网中的分布式电源发电相对于传统的燃煤发电机组可以减少氮氧化物、硫化物、碳化物等的排放,因减排单位量的污染物而避免的损失所创造的价值就是微网的环保效益。相对于传统的燃煤发电机组输出相同电量的条件下减排污染物而产生的效益值可表示为

$$B_{hb} = \sum_{i=1}^z \sum_{j=1}^J V_{hlyj} (Q_{CPij} - Q_{MCij}) \quad (4)$$

式(4)中: V_{hlyj} 表示减排第*j*种污染物所产生的环保价值; J 表示污染物的种类; Q_{CPij} 、 Q_{MCij} 分别表示燃煤机组第*j*种污染物和第*i*个分布式电源第*j*种污染物的排放量。

1.5 可靠性效益

在公网停电时,微网通过孤岛运行方式对负荷进行供电,提高供电可靠性。微网的可靠性效益值可表示为

$$B_{kk} = \lambda_{IEAR} \sum_H \lambda_{td} (t_{td} - \lambda_{st} t_{qd}) P_{gl} \quad (5)$$

式(5)中: λ_{IEAR} 为停电后引起的用户单位电量经济损失; H 为微网内的负荷集合; λ_{td} 为负荷集合*H*内的年平均停电频率; t_{td} 为负荷集合*H*内的年平均停电持续时间; λ_{st} 为微网转换为孤岛运行方式的不成功概率; t_{qd} 为微网内分布式电源的重新启动时间; P_{gl} 为孤岛运行方式下微网所供应的平均功率值。

1.6 政府补贴效益

根据国家有关法律法规可知,分布式发电可以

获得财政补贴,其效益表达式见式(6)

$$B_d = \sum_{i=1}^z p_{dli} E_i \quad (6)$$

式(6)中, p_{dli} 为第 i 个分布式电源单位发电量的补贴电价。

1.7 售电效益

微网内的分布式电源发出电量后供给用户,其效益表达式见式(7)

$$B_{sl} = \sum_{i=1}^z p_{sli} E_i \quad (7)$$

式(7)中, p_{sli} 为第 i 个分布式电源单位发电量的售电电价。

1.8 降损效益

合理配置分布式电源的接入点和接入容量可以降低电能损耗,其效益表达式见式(8)

$$B_{js} = (\lambda_{js1} - \lambda_{js2}) \sum_{i=1}^z E_i p_{ldj} \quad (8)$$

式(8)中: λ_{js1} 为集中供电方式下的网损百分率; λ_{js2} 为分布式供电方式下的网损百分率; p_{ldj} 为燃煤机组的上网电价。

1.9 延缓电网投资效益

科学建设微网可以减少高峰时段配网对输电容量的需求,达到满足负荷增长的同时延缓电网投资的目的,其效益表达式见式(9)

$$B_{yhtz} = (1 - \lambda_{ly}) p_{dwkj} \sum_{i=1}^z P_i \quad (9)$$

式(9)中: λ_{ly} 为电网对微网的备用率; p_{dwkj} 为新扩建电网的单位容量投资值。

1.10 指标层次结构

将上述指标进行分类,得到如图 1 所示的微网规划方案综合评估指标体系。

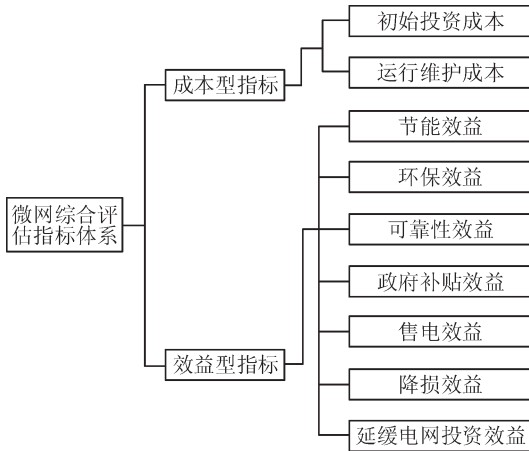


图 1 微网综合评估指标体系

Fig. 1 Comprehensive assessment system of micro-grid

2 理想向量空间投影评估模型

应用传统的向量空间模型^[13-14]时,当待评价对象发生变化时,理想指标值随之改变,这可能造成待评对象出现逆排序。为避免这种情况,引入绝对正负理想向量空间的概念,将正负理想指标值固定下来。将正负理想向量空间作为参考向量,把每一个待选评估方案也视为一个空间向量。

设 n 个微网规划方案的 m 项指标属性值构成初始评估矩阵 $P=(p_{ij})_{n \times m}$ 。为便于比较分析需对各属性值进行归一化处理,经归一化处理后的评估矩阵记为 $Q=(q_{ij})_{n \times m}$ 。

对于效益型指标归一化式为

$$q_{ij} = (p_{ij} - a_j) / (b_j - a_j) \quad (10)$$

对于成本型指标归一化式为

$$q_{ij} = (b_j - p_{ij}) / (b_j - a_j) \quad (11)$$

式(10)、(11)中: $a_j = \min_{1 \leq i \leq n} p_{ij}$; $b_j = \max_{1 \leq i \leq n} p_{ij}$; $i=1 \sim n$;

$j=1 \sim m$ 。

设利用改进的层次分析法得到的主客观权重为 V_s ,由反熵权法得到的客观权重为 V_o ,通过加法集成法,得出最终的综合权重:

$$W = aV_s + bV_o; \quad (12)$$

$$\begin{cases} a = \frac{1}{m-1} \left(\sum_{i=1}^m i S_i - \frac{m+1}{m} \right) \\ b = 1 - a \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, S_i 表示对主客观权重值按升序排列后求得的对应该分量。

设正理想向量空间为 $L_0^+ = \{1, \dots, 1\}$,负理想向量空间为 $L_0^- = \{0, \dots, 0\}$ 。第 i 个待评微网与正负理想向量空间的灰关联系数为

$$\theta_{ij}^{(+)} = \frac{\min_{j=1 \sim m} \min_{i=1 \sim n} |q_{ij}^{(+)} - q_{ij}^-| + 0.5 \max_{j=1 \sim m} \max_{i=1 \sim n} |q_{ij}^{(+)} - q_{ij}^-|}{\max_{j=1 \sim m} \min_{i=1 \sim n} |q_{ij}^{(+)} - q_{ij}^-| + 0.5 \max_{j=1 \sim m} \max_{i=1 \sim n} |q_{ij}^{(+)} - q_{ij}^-|} \quad (14)$$

式(14)中: $|q_{ij}^{(+)} - q_{ij}^-|$ 表示微网 i 与正负理想向量空间相应指标的绝对差,正理想向量空间对应上标+,负理想向量空间对应上标-。

计算待评微网 L_i 在正理想向量空间 L_0^+ 上的投影值

$$V_i^+ = \frac{L_i L_0^+}{|L_0^+|} = \frac{\sum_{j=1}^m w_j \theta_{ij}^+ w_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}} = \sum_{j=1}^m \theta_{ij}^+ \frac{w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}} \quad (15)$$

式(15)中, w_j 是综合权重 W 对应的分量。

计算待评微网 L_i 在负理想向量空间 L_0^- 上的投

影值

$$V_i = \frac{L_i L_0}{|L_0|} = \frac{\sum_{j=1}^m w_j \theta_{ij} w_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}} = \sum_{j=1}^m \theta_{ij} \frac{w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}} \quad (16)$$

正理想向量空间与负理想向量空间的模值

$$V_0^+ = V_0^- = M_0 = \sum_{j=1}^m \frac{w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j)^2}} \quad (17)$$

设待评微网 L_i 对正理想向量空间的隶属度为 u_i , 对负理想向量空间的隶属度为 $\tilde{u}_i$ 。将隶属度转化为权重, 得出微网 L_i 与正理想向量空间的广义加权距离为

$$D_{gvi} = u_i (V_i - V_0^+) \quad (18)$$

微网 L_i 与负理想向量空间的广义加权距离为

$$D_{bvi} = (1 - u_i) (V_i - V_0^-) \quad (19)$$

待评微网离正理想向量空间距离越近、离负理想向量空间距离越远就越优, 在实际应用过程中很难同时满足两个条件。根据最小平方和原则^[15-17], 建立目标函数

$$\min F(u_i) = D_{gvi}^2 + D_{bvi}^2 \quad (20)$$

令 $\frac{\partial F(u_i)}{\partial u_i} = 0$, 得

$$u_i = \frac{(M_0 - V_i)^2}{(M_0 - V_i)^2 + (M_0 - V_i^+)^2} \quad 0 \leq u_i \leq 1 \quad (21)$$

隶属度越大, 表示该方案与正理想向量空间越接近、离负理想向量空间越远, 反之亦然, 所以根据隶属度进行微网规划方案优选时, 隶属度最大的即是相对最优规划方案。

将用于各规划方案进行选优的决策数据定义为评判因子。如果最优规划方案与其他规划方案的评判因子有较大的区分度, 那么评估模型就有较大的灵敏度, 灵敏度越大模型的区分度就越大, 评价效果就越好, 反之亦然。设某评估模型以评判因子 y_{pp} 对待评规划方案进行分析, 定义模型灵敏度为

$$\varphi_{lm} = \frac{y_{pp}^{\max} - y_{pp}^{\sec}}{y_{pp}^{\max}} \times 100\% \quad (22)$$

式(22)中: $y_{pp}^{\max}$ 为最大的评判因子; $y_{pp}^{\sec}$ 为第 2 大评判因子。

3 算例分析

文中以某微网示范工程为例进行分析, 经过前期论证共编制了 4 个规划方案供选择, 4 个方案的指标值见表 1。

结合式(10)、(11)对表 1 的数据进行归一化处理,

表 1 不同方案的指标数据

指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
初始投资成本	32 800	28 950	27 640	28 470
运行维护成本	23 100	19 550	21 780	22 450
节能效益	2 850	652	1 681	2 754
环保效益	6 230	2 160	4 169	6 150
可靠性效益	1 520	1 340	1 480	1 420
政府补贴效益	8 650	7 980	7 820	8 510
售电效益	34 500	32 005	31 705	34 560
降损效益	1 680	525	1 108	1 605
延缓电网投资	6 800	5 207	4 862	5 326

得到如表 2 所示的归一化评估矩阵。为便于分析, 用 $Z_1 \sim Z_9$ 表示各指标。

表 2 归一化决策矩阵

指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
Z_1	0.000 0	0.746 1	1.000 0	0.839 1
Z_2	0.000 0	1.000 0	0.371 8	0.181 3
Z_3	1.000 0	0.000 0	0.468 2	0.956 3
Z_4	1.000 0	0.000 0	0.493 6	0.980 3
Z_5	1.000 0	0.000 0	0.777 8	0.444 4
Z_6	1.000 0	0.192 8	0.000 0	0.831 3
Z_7	0.979 0	0.105 1	0.000 0	1.000 0
Z_8	1.000 0	0.000 0	0.504 8	0.935 1
Z_9	1.000 0	0.178 0	0.000 0	0.239 4

运用改进的层次分析法得到主观权重, 结合表 2 的数据运用反熵权法得到客观权重, 代入式(12)、(13)中得到综合权重, 结果见表 3。

表 3 指标权重

指标	主观权重	客观权重	综合权重
Z_1	0.121 3	0.081 4	0.103 5
Z_2	0.093 1	0.146 8	0.117 1
Z_3	0.132 5	0.090 4	0.113 7
Z_4	0.140 7	0.089 5	0.117 8
Z_5	0.073 5	0.091 6	0.081 6
Z_6	0.092 5	0.111 1	0.100 8
Z_7	0.098 5	0.121 1	0.108 6
Z_8	0.102 4	0.088 6	0.096 2
Z_9	0.145 5	0.179 5	0.160 7

计算得出各规划方案在正负理想向量空间上的投影值及其隶属度, 结果见表 4。

根据各个规划方案的隶属度对其进行排序, 由于 $u_1 > u_4 > u_3 > u_2$, 所以第 1 个方案是相对最优规划方

表 4 待评方案的投影值及其隶属度

Table 4 Projection value and optimal membership degree of evaluation schemes

待评方案	V_i^+	V_i^-	u_i
1	0.290 0	0.161 4	0.929 3
2	0.156 0	0.259 0	0.160 4
3	0.162 8	0.236 3	0.253 6
4	0.224 5	0.221 8	0.511 7

案,与实际情况相符。

分别运用文[18–21]的方法对该算例进行分析,结果统计见表 5。从表 5 中所列数据可知,超级效率数据包络分析方法^[18]、模糊决策理论^[20]、逼近理想解排序法^[21]所得的结果与文中结果一致,方案 1 为最优规划方案,验证了文中所提模型的正确性。

表 5 评价结果比较

Table 5 Comparison of the evaluation results

待评方案	文[18]	文[19]	文[20]
1	5.013	0.741 8	0.556 1
2	0.251	0.520 7	0.496 2
3	0.896	0.694 5	0.501 7
4	4.851	0.720 5	0.532 8

结合各种算法的评估结果对模型的灵敏度进行分析,结果见表 6。

表 6 模型的灵敏度比较

Table 6 Comparison of model sensitivity

模型	文[18]	文[19]	文[20]	文中
灵敏度/%	3.23	2.87	4.19	44.94

由表 6 的数据可知,文中所提模型的灵敏度明显大于超级效率数据包络分析方法、模糊决策理论、逼近理想解排序法,使得评估结果的区分度更大,更加合理、可信。

4 结语

文中以传统燃煤发电机组为参照,构建了微网规划方案经济性综合评估指标体系。融合向量空间理论和灰关联投影原理,创造性地引入正负理想向量空间的概念,通过灰关联投影理论全面分析评估指标体系中各子指标间的相互关系,充分挖掘了整个评估指标空间的决策信息,提高了评估模型的可靠性。引入决策模型灵敏度的概念,通过比较分析表明文中所提模型的灵敏度明显大于传统模型,进一步验证了文中所提模型的优越性。

实例表明,文中所提的微网规划方案经济性评价指标体系可以抓住影响微网规划特征的要素,全面量化分析规划方案的优劣,较好地解决微网规划

方案的评估排序和择优问题,为微网的建设规划和投资决策提供依据。

参考文献:

- [1] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4): 7-14.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):7-14.
- [2] CHEN Changsong,DUAN Shanxu,CAI Tao,et al. Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(10):2762-2773.
- [3] 刘小平,丁明,张颖媛,等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):77-84.
LIU Xiaoping,DING Ming,ZHANG Yingyuan,et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):77-84.
- [4] MARNAY C,VENKATARAMANAN G,STADLER M,et al. Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):975-982.
- [5] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9):14-18.
HUANG Wei,SUN Changhui,WU Ziping,et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology,2009,33(9):14-18.
- [6] MAJUMDER R,GHOSH A,LEDWICH G,et al. Power management and power flow control with back-to-back converters in a utility connected microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(2):821-834.
- [7] 王兆宇,艾芊. 智能配电网中微电网的多目标优化配置[J]. 电网技术,2012,36(8):199-203.
WANG Zhaoyu,AI Qian. Multi-objective allocation of microgrid in smart distribution network[J]. Power System Technology,2012,36(8):199-203.
- [8] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19):57-66.
- [9] 杨毅,雷霞,叶涛,等. 考虑安全性与可靠性的微电网电能优化调度[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19): 3080-3088.
YANG Yi,LEI Xia,YE Tao,et al. Microgrid energy optimal dispatch considering the security and reliability[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3080-3088.
- [10] 罗奕,王钢,汪隆君. 微网可靠性评估指标研究[J].

- 电力系统自动化,2013,37(5):9-14.
- LUO Yi,WANG Gang,WANG Longjun. Reliability evaluation indices for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):9-14.
- [11] 袁越,曹阳,傅质馨,等. 微电网的节能减排效益评估及其运行优化[J]. 电网技术,2012,36(8):12-18.
- YUAN Yue,CAO Yang,FU Zhixin,et al. Assessment on energy-saving and emission reduction benefit of microgrid and its operation optimization[J]. Power System Technology,2012,36(8):12-18.
- [12] 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.
- YANG Qi,MA Shiyong,TANG Xiaojun,et al. Evaluation index system construction and application of microgrid planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):13-17.
- [13] SALTON G,WONG A,YANG C S. On the specification of term values in automatic indexing[J]. Journal of Documentation,1973,29(4):351-372.
- [14] 李如琦,苏浩益,曲振旭. 核向量空间模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(1):72-76.
- LI Ruqi,SU Haoyi,QU Zhenxu. Application of kernel vector space model in power quality comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control,2012,40(1):72-76.
- [15] 李如琦,苏浩益,凌武能,等. 基于云模型和灰关联投影法的烟气脱硫技术优选[J]. 中国电机工程学报,2012,32(23):21-26.
- LI Ruqi,SU Haoyi,LING Wuneng,et al. Optimization of flue gas desulphurization technologies based on cloud model and grey relation projection method[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(23):21-26.
- [16] 吕锋,崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(1):103-107.
- LYU Feng,CUI Xiaohui. Multi-criteria decision grey relation projection method and its application[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2002,22(1):103-107.
- [17] 柯宏发,陈永光,夏斌. 一种基于逼近于理想灰关联投影的多目标决策算法[J]. 电子学报,2007,35(9):1757-1761.
- KE Hongfa,CHEN Yongguang,XIA Bin. An algorithm of multiple criteria decision-making based on similarity to ideal grey relational projection[J]. Acta Electronica Sinica,2007,35(9):1757-1761.
- [18] 付学谦,陈皓勇,刘国特,等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4270-4276.
- FU Xueqian,CHEN Haoyong,LIU Guote,et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4270-4276.
- [19] 陈炜,刘涤尘,廖清芬,等. 风电接入配电网对电压质量的影响及对策研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(4):117-122.
- CHEN Wei,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Study on the influence of penetration of wind power on voltage quality of distribution grid and countermeasures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2016,37(4):117-122.
- [20] 王瑞莲,赵万里. 基于模糊决策的城市高压输电网规划方案评价方法[J]. 电网技术,2013,37(2):488-492.
- WANG Ruilian,ZHAO Wanli. A fuzzy decision-based method to evaluate planning scheme for urban high voltage transmission network[J]. Power System Technology,2013,37(2):488-492.
- [21] 张文朝,顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术,2014,38(10):2741-2746.
- ZHANG Wenchao,GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology,2014,38(10):2741-2746.
- 方小飞(1984—),女,讲师,研究生,研究方向为电气化铁道与供电系统。
- 贺铁光(1964—),男,高级工程师,研究方向为电力系统运行与管理。
- 苏浩益(1985—),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统最优运行与规划、智能电网。