

基于主成分分析法的煤改电综合效益评价模型研究

张红斌¹, 冯明灿¹, 孙钦斐², 井天军³, 梁安琪²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075;
3. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要:随着我国北方地区雾霾问题日益突出,“煤改电”得到广泛关注,如何对其综合效益进行科学评价值得深入研究。为此,基于主成分分析方法提出了一种评价“煤改电”项目综合效益的模型。基于对环保效益、社会效益、经济效益的全面考虑,建立了综合效益评价指标体系。在此基础上,基于所有的评价指标,剥离出主成分因素,实现了不同“煤改电”方案的综合效益评价。以 5 个区域实施的“煤改电”项目为例进行分析,结果表明,所提模型能够在最大降低总体计算工作量的前提下实现对“煤改电”项目综合效益的高效客观评价,为“煤改电”项目的实施提供指导与参考作用。

关键词:“煤改电”项目;综合效益评价;主成分分析法;评价指标

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2023.11.014

中图分类号:TM715

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2023)11-0099-06

Research on comprehensive benefit evaluation model of coal-to-electricity based on principal component analysis

Zhang Hongbin¹, Feng Mingcan¹, Sun Qinfai², Jing Tianjun³, Liang Anqi²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China.

2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China.

3. School of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: As the problem of smog becomes more and more prominent in the northern part of China, "coal-to-electricity" has received extensive attention. How to scientifically evaluate its comprehensive benefits is worthy of further study. Therefore, based on the principal component analysis method, a model for evaluating the comprehensive benefits of the "coal-to-electricity" project is proposed in this paper. A comprehensive benefit evaluation index system is constructed by comprehensively considering environmental protection benefits, social benefits, and economic benefits. On this basis, based on all the evaluation indicators, the main component factors are stripped out, and the comprehensive benefit evaluation of different "coal to electricity" schemes is realized. Five "coal-to-electricity" projects implemented in different regions are taken as examples for analysis. The results show that the proposed model can effectively and objectively evaluate the comprehensive benefits of "coal to electricity" project on the premise of minimizing the overall calculation workload, which provides guidance and reference for the implementation of "coal to electricity" project.

Keywords: “coal-to-electricity” project, comprehensive benefit evaluation, principal component analysis method, evaluation index

0 引言

近年来,我国北方地区雾霾问题十分突出,引起社会各界广泛关注。电供暖具有低碳、高效、环保等优势,对于确保我国北方地区打赢蓝天保卫战、加快美丽中国建设具有十分重大的现实意义^[1-7]。在减排效益方面,电供暖污染小,可有效减少二氧化硫、粉尘及 PM2.5 等污染物排放,结合可再生能源消纳等措施,技

术上能够实现真正“零排放”^[1-2]。在能源利用方面,电供暖可有效减少分散低效燃煤浪费。据统计,我国每年分散低效燃煤浪费的能源超过 1.14 亿吨标煤,在北方地区通过全面推广应用电供暖,能够显著提高当地整体能效水平^[3-5]。三是在用户使用方面,电供暖可有效避免燃煤取暖带来的一氧化碳中毒、锅炉爆炸事故等潜在安全隐患,用户可按温度需求自主控制取暖热量,使用更加便捷^[6-7]。另一方面,根据规划,到 2021 年,我国北方地区电供暖(含热泵)面积达到 15 亿平方

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(52020118000M)

米。因此,如何科学有效评价不同“煤改电”方案的综合效益值得进一步深入研究。

对于“煤改电”方案的综合效益评价,已有文献从不同方面对其进行研究。文献[3]则采用全寿命周期成本的方法对“煤改电”工程的成本构成进行建模,进而对电网企业“煤改电”配网的经济效益进行评价;文章虽然对“煤改电”各个阶段的成本进行详细建模,也取得了一定效果,但文章仅仅考虑了经济效益,难以反映“煤改电”在环境效益、社会效益等方面的效益,因此其评价模型具有相当的局限性。文献[8-9]基于熵权法和层次分析法相结合的组合赋权法,从社会效益、经济效益与配网运行三个方面对“煤改电”项目综合效益进行评价;文章虽然在层次分析法的基础上结合熵权法对指标进行了组合赋权,在一定程度上减少了主观权重的影响,但考虑到层次分析法从根本上就具有较强的主观性,因此其评价模型的客观性仍具有相当的局限性。文献[10]主要从边际成本的角度对煤改电电能替代工程效益进行分析,与文献[3]一样,其评价模型并未全面考虑环境效益、社会效益等方面的效益。文献[11]从费用年值、能耗量、污染物排放量等方面对“煤改电”项目的经济、环境效益的综合评价;文献[12]针对奎屯市“煤改电”项目的经济效益与环境效益进行分析评价。文献[11-12]虽然取得了一定效果,但是一方面文章并未考虑社会效益,而另一方面,文章在方法上仅仅是孤立对经济与环境效益进行各自的评价,并未研究如何综合考虑两种效益进而得到一个综合评价值,因此其评价模型的科学性受限。

从上述文献可知,一方面,现有文献在评价“煤改电”项目的效益时,所采用的指标大多仅考虑了经济效益等少数几个方面^[3,8-9,10]。虽然有一些研究构建了相对全面的评价体系,但是其所采用的方法(如层次分析法)具有较强的主观性,难以保证对“煤改电”项目综合效益评价的客观性^[8-9];或者其评价模型仅孤立评价几个方面,无法真实反映出“综合性”^[11-12]。而另一方面,由于“煤改电”项目的评价指标之间存在相关性,上述文献所提方法难以保证结论的正确性。此外,由于“煤改电”项目的综合效益往往涉及较多的指标,如何快速准确地对综合效益进行评价需要进一步深入研究。

针对上述问题,文章基于主成分分析方法,提出了一种评价“煤改电”项目综合效益的模型。首先,文章对环保效益、社会效益、经济效益进行全面考虑,进而建立了综合效益的评价指标体系。在此基础上,基于所有的评价指标,剥离出主成分因素,实现了不同“煤改电”方案的综合效益评价。通过所提评价模型,原指标之间的相关性得到解耦,即由原指标空间映射到主成分空间之后,主成分之间相互独立,一方面保证了评

价的客观性,另一方面通过主成分分析法的降维处理,能够最大降低总体计算工作量。最后,以 5 个区域实施的“煤改电”项目为例进行分析。相关结果可为“煤改电”项目的实施提供指导与参考作用。

1 “煤改电”项目综合效益评价体系构建

针对多种“煤改电”项目典型应用场景,综合考虑地区政策及规划,综合考虑经济效益、环境效益、社会效益等方面,构建“煤改电”项目综合效益评价指标体系,得到综合效益评价指标体系层次框架,并进一步提出了各评价指标的计算方法。

建立“煤改电”项目的综合效益评价指标体系,如图 1 所示。

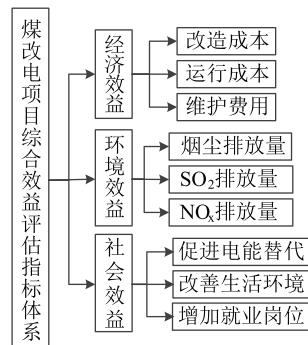


图 1 “煤改电”项目综合效益评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive benefit evaluation index system of “coal to electricity” project

1.1 经济效益

1) 改造成本。

“煤改电”项目改造成本包括用户、电网企业以及政府三方投资。用户投资包括房屋改造费用、采暖设备费用、电网企业配电网配套工程费用、政府补贴费用。

$$C_g = C_h + C_d + C_n - C_b \quad (1)$$

式中, C_h 为房屋改造费用; C_d 为采暖设备费; C_n 为配电网配套工程费用; C_b 为政府补贴费用。

2) 运行成本。

“煤改电”项目运行成本主要是电费、电采暖设备用电电费按补贴电价和正常电价分时计费,运行成本计算公式如下:

$$C_r = E_s \cdot C_s + E_{sc} \cdot C_c \quad (2)$$

式中, E_s 为补贴电价时段采暖设备用电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; C_s 为补贴电价, 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$); E_{sc} 为正常时间采暖设备用电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; C_c 为正常电价, 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

3) 维护费用。

“煤改电”项目维护费用主要是对电采暖设备维护费用。

1.2 环境效益

分散燃煤采暖会产生二氧化硫、氮氧化物、一氧化

碳,同时未经处理的煤燃烧时会产生大量烟尘,严重影响环境^[1-3]。

不同污染物对于环境的污染严重程度不同,可以折合成环境价值来体现。“煤改电”工程所创造的总环境价值 EV ,其计算公式如下所示:

$$EV = \sum \Delta m_i \times EV_i \quad (3)$$

式中, EV_i 为第 i 种污染物的环境价值,其值详见文献^[8-9]; Δm_i 为第 i 种污染物减排量,其计算公式如下所示:

$$\Delta m_i = t_i \times a - T_i \times b \quad (4)$$

式中 t_i 、 T_i 分别表示散烧煤、发电用煤的第 i 种污染物排放因子^[8-9]; a 为“煤改电”散烧煤减少用量; b 为发电用煤的新增用量。

1.3 社会效益

通过“煤改电”项目,能够促进电能替代,在全国范围开发清洁能源、提高电能在终端能源消费中的比重,进一步改善生活环境,同时能够大量增加就业岗位,具有明显的社会效益^[3,8-9,13]。

对于“促进电能替代”评价指标,假设某地区原来的总负荷量为 S_0 ,由“煤改电”项目而新增的负荷为 ΔS_n ,则采用下式计算“促进电能替代”的程度,即:

$$\alpha = \frac{\Delta S_n}{S_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中, α 表示“促进电能替代”指标。

对于“改善生活环境”评价指标,通过“煤改电”项目,居民的生活环境即采暖热环境得到了显著改善,定义相对室温合格率用于评价“改善生活环境”指标,其计算公式如下所示:

$$\alpha = \frac{\Delta N_t}{N_n} \times 100\% \quad (6)$$

式中, ΔN_t 为实施“煤改电”项目后新增的室温合格户数; N_n 为总测量户数。

对于“增加就业岗位”评价指标,其计算公式如下所示:

$$\eta = \frac{\Delta w_n}{w_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中, Δw_n 为某地区实施“煤改电”项目后的新增就业岗位; w_0 为原就业岗位数。需要说明的是,此处就业岗位数的变化仅考虑了“煤改电”的因素。

2 基于 PCA 的“煤改电”综合效益评价模型构建

主成分分析法(Principal Component Analysis,PCA)是多元统计学中一种解决多变量高维复杂系统的有效数学方法^[14-19]。PCA 的数学实质是数据的降维分析。

针对前述所建立的综合效益评价指标体系,以下进一步基于 PCA 方法构建“煤改电”综合效益评价模型。

假设给定了 n 个“煤改电”方案,并且每个方案设置有 p 个评价指标,则其构成了评价数据矩阵为 X ,即:

$$\begin{cases} X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_p] \\ x_i = [x_{1i} \ x_{2i} \ \cdots \ x_{ni}]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中, x_{ki} 表示第 i 个方案第 k 个评价指标的值。根据上节所见综合评价指标体系,可知,评价指标数 p 为 12。

首先根据下列式子对原评价数据矩阵 X 进行标准化处理,得到标准化后的矩阵 Y ,即:

$$\begin{cases} y_{ki} = \frac{x_{ki} - \bar{x}_i}{s_i} \\ \bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ki} \\ s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $Y = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_p]$, $y_i = [y_{1i} \ y_{2i} \ \cdots \ y_{pi}]^T$; y_{ki} 表示 y_i 的第 k 个分量,即表示第 i 个方案第 k 个评价指标标准化后的值。

2.1 计算相关系数矩阵

进一步计算标准化矩阵 Y 的相关系数矩阵 R ,即:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, r_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, p$) 为变量 y_i 与 y_j 的相关系数。

2.2 计算特征值与特征向量

若相关系数矩阵 R 有 q 个非负特征值,且对其进行降序排序,即:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_q \geq 0 \quad (11)$$

进一步分别求出对应于特征值 λ_i 的特征向量 e_i ($i = 1, 2, \dots, q$),并且特征向量 e_i 的模为 1,如下式所示:

$$\sum_{k=1}^q e_{ki}^2 = 1 \quad (12)$$

其中, e_{ki} 为向量 e_i 的第 k 个分量。

则主成分的计算式则可表达为:

$$Z = YE \quad (13)$$

其中, $E = [e_1, e_2, \dots, e_q]$ 为 q 个特征值对应规范正交特征矩阵, $Z = [z_1, z_2, \dots, z_q]$ 为 q 个主成分构成的矩阵, $z_i = [z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{pi}]^T$, z_{ki} 表示第 i 个主成分 z_i 的第 k 个分量。

2.3 计算贡献率及综合评价值

由于各主成分之间不存在相关性,因此第 i 个主成

分 z_i 对原始变量(评价指标)信息的贡献率为:

$$\eta_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (14)$$

累计贡献率定义如下:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (15)$$

假设累计贡献率为 0.85 ~ 0.95 的特征值包括 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, 其对应于第 1、第 2、…、第 m ($m \leq q$) 个主成分。

则“煤改电”方案的综合评价值可由上述 m 个主成分的线性加权和计算获得, 即:

$$F = \sum_{i=1}^m \eta_i z_i \quad (16)$$

式中, F 为“煤改电”方案的综合评价值。

2.4 PCA 在综合效益评价中的适用性分析

一方面, “煤改电”项目的综合效益指标复杂繁多, 若直接将所有指标全部纳入分析, 可能会因为共线性而无法得出正确的结论。而 PCA 的实质是进行降维变换, 通过对少数几个主成分进行提取, 并且使主成分之间相互正交, 在保留原始变量绝大部分信息的同时, 使得分析得到简化。

另一方面, 可行性分析的目的在于辨析所提方法是否能够应用于“煤改电”项目的效益问题。所建立的 PCA 模型需要满足两个约束条件: 其一, 指标具有关联性, 其二, 数据无量纲。对于前一约束条件, 考虑到煤改电规划与电网运行之间存在紧密的耦合联系, 因此原始评价数据矩阵的相关系数矩阵模值不为 0; 对于后一约束条件, 由于所提方法对原始数据进行标准化处理及正态分布变换, 实现了数据的无量纲化。

通过以上分析, 可知 PCA 对于“煤改电”项目效益综合评价具有很好的适用性。

3 算例分析

对北京、河北、山东、陕西、新疆 5 个典型区域的“煤改电”情况进行调研, 根据收集到的原始数据, 如表 1 所示。对上述地区的“煤改电”进行综合效益评价分析。

首先对所建 PCA 模型的原始数据矩阵进行标准化处理, 得到标准化后的评价数据, 如表 2 所示。

进一步计算得到标准化数据矩阵的相关系数矩阵。然后, 对相关系数矩阵进行特征值分析, 进而计算得到各主成分与原指标之间的映射关系、贡献率及累计贡献率, 其结果如表 3 与图 2 所示。

分析以上结果可知, 第 1 主成分对指标信息的贡献率最大(49.80%), 其次是第 2 主成分的贡献率(35.90%)、第 2 主成分的贡献率(10.11%), 而其他成

分的贡献率则很少。根据计算结果可知, 前 3 个主成分的累积贡献率大于 95%, 说明前 3 个主成分能够充分保留原始评价指标中的信息, 因此主成分的个数取为 3。

表 1 原始评价指标

Tab. 1 Original data of evaluation index

指标编号	指标名称	北京	河北	山东	陕西	新疆
1	初始投资	1.68	1.66	2.05	2.15	1.05
2	运行成本	0.3589	0.3702	0.3619	0.3400	0.1358
3	维护费用	0.09	0.08	0.06	0.07	0.05
4	烟尘排放量 ($\times 10^4$)	1.379	2.068	1.654	1.930	1.793
5	SO ₂ 排放量 ($\times 10^4$)	7.117	10.676	8.533	9.962	9.252
6	NO _x 排放量 ($\times 10^4$)	1.832	2.748	2.178	2.558	2.382
7	促进电能替代	0.1696	0.1908	0.1272	0.1908	0.1059
8	改善生活环境	0.5691	0.7317	0.4878	0.6504	0.4065
9	增加就业岗位(%)	1.848	2.079	1.617	1.386	1.155

表 2 标准化评价指标数据

Tab. 2 Standardized data of evaluation index

编 号	指 标 名 称	北京	河北	山东	陕西	新疆
1	初始投资	-0.0879	-0.1341	0.7678	0.9991	-1.5449
2	运行成本	0.4560	0.5691	0.4860	0.2667	-1.7779
3	维护费用	1.2649	0.6325	-0.6325	0	-1.2649
4	烟尘排放量	-1.4542	1.1446	-0.4189	0.6234	0.1051
5	SO ₂ 排放量	-1.4537	1.1449	-0.4199	0.6233	0.1055
6	NO _x 排放量	-1.4354	1.1553	-0.4568	0.6179	0.1190
7	促进电能替代	0.3303	0.8808	-0.7707	0.8808	-1.3212
8	改善生活环境	0	1.2649	-0.6325	0.6325	-1.2649
9	增加就业岗位	0.6325	1.2649	0	-0.6325	-1.2649

表 3 主成分的计算结果

Tab. 3 Calculation results of principal components

指标编号	指标名称	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
1	初始投资	0.2902	0.1260	-0.7924
2	运行成本	0.3953	0.2361	-0.2870
3	维护费用	0.3461	0.3117	0.3588
4	烟尘排放量	0.1811	-0.5130	-0.0023
5	SO ₂ 排放量	0.1811	-0.5130	-0.0017
6	NO _x 排放量	0.1813	-0.5131	0.0187
7	促进电能替代	0.4443	0.0167	0.0535
8	改善生活环境	0.4622	-0.0750	0.1216
9	增加就业岗位	0.3609	0.1891	0.3783
-	特征值	4.4816	3.2313	0.9100
-	贡献率	0.4980	0.3590	0.1011
	累计贡献率	0.4980	0.8570	0.9581

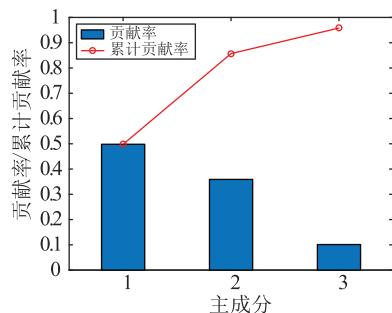


图 2 PCA 的贡献率及累计贡献率

Fig. 2 Contribution rate and cumulative contribution rate of PCA

根据上述结果,进一步计算得到各地区(方案)的主成分评价值与综合评价值,表 4、图 3 及图 4 为计算得到的结果。

表 4 各地区的评价值

Tab. 4 Evaluation results of principal components for various regions

地区编号	地区名称	第 1 主成分评价值	第 2 主成分评价值	第 3 主成分评价值	综合评价值
1	北京	0.180 8	2.844 2	0.628 5	1.174 7
2	河北	2.461 5	-1.293 6	0.866 3	0.848 8
3	山东	-0.673 4	0.713 7	-1.099 8	-0.190 3
4	陕西	1.188 5	-0.920 1	-0.974 3	0.163 0
5	新疆	-3.157 4	-1.344 2	0.579 2	-1.996 3

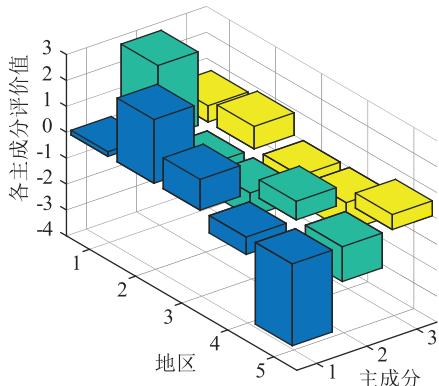


图 3 PCA 的主成分评价值

Fig. 3 Principal component evaluation value of PCA

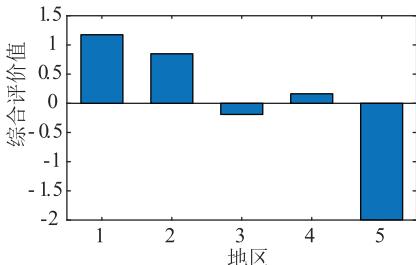


图 4 PCA 的综合评价值

Fig. 4 Comprehensive evaluation value of PCA

根据上述图表的结果可知,各地区“煤改电”方案的综合评价值分别为 1.174 7、0.848 8、-0.190 3、0.163 0、-1.996 3,由此可确定各地区“煤改电”项目综合效益的优劣排序为:北京>河北>陕西>山东>新疆。其中,北京的“煤改电”方案为最优方案,而新疆的“煤改电”方案为最劣方案。

进一步分析以上图表可见,“煤改电”项目综合效益受其等多方面因素共同影响,因此需要综合考虑各方面因素以对“煤改电”项目作更科学合理有效的规划。

4 结束语

文中基于主成分分析方法,提出了一种评价“煤改电”项目的综合效益的模型。并以 5 个区域实施的“煤改电”项目为例进行算例分析。可以得到以下结论:

- 1) 综合效益评价模型综合考虑了环保效益、社会效益、经济效益,评价指标体系较为全面客观;
- 2) 通过所提评价模型,原指标之间的相关性得到解耦,即由原指标空间映射到主成分空间之后,主成分之间相互独立,保证了评价的客观性;
- 3) 通过主成分分析法的降维处理,能够最大降低总体计算工作量;
- 4) 文章的相关结果可为“煤改电”项目的实施提供指导与参考作用。

参 考 文 献

- [1] 徐钢,王春兰,许诚,等.京津冀地区散烧煤与电采暖大气污染物排放评估[J].环境科学研究,2016,29(12):1735-1742.
Xu Gang, Wang Yulan, Xu Cheng, et al. Evaluation of Air Pollutant Emissions from Scattered Coal Burning and Electric Heating in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(12): 1735-1742.
- [2] 邢有凯.北京市“煤改电”工程对大气污染物和温室气体的协同减排效果核算[C].2016 中国环境科学学会学术年会论文集,北京:中国农业大学出版社,2016:3186-3191.
- [3] 杨珺婕.电网企业“煤改电”配网改造工程经济评价研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [4] 安佳坤,齐晓光,习朋,等.电采暖对配电网规划的影响与适应性分析[J].上海电气技术,2018,11(4):23-27.
An Jiakun, Qi Xiaoguang, Xi Peng, et al. Analysis of Influence and Adaptability of Electric Heating on Distribution Network Planning [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2018, 11(4): 23-27.
- [5] 杨露露,张红斌,陈平,等.煤改电背景下配网电压优化控制策略研究[J].控制工程,2019(12):1-6.
Yang Lulu, Zhang Hongbin, Chen Ping, et al. Research on Optimal Voltage Control Strategy for Distribution Network Under the Coal-to-electricity Background [J]. Control Engineering of China, 2019 (12): 1-6.
- [6] 袁泽,宝海龙,周鹿鸣,等.规模化电采暖设备对配电网电能质量的影响分析[J].电测与仪表,2019,56(1):1-10.
Yuan Ze, Bao Hailong, Zhou Luming, et al. Analysis on the impacts of large-scale electric heating radiators to power quality of distribution networks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1):

— 104 —

- [7] 李伟, 张帆, 张磊, 等. 计及电采暖类型差异的“煤改电”工程谐波分析与评价[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 34-41.
Li Wei, Zhang Fang Zhang Lei, et al. Analysis and Evaluation of Harmonic in the Coal-to-Electricity Project Considering Differences of Electric Heating Radiators[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(10): 34-41.
- [8] 侯斌, 于雪皎, 郑小宇, 等. 基于组合赋权法的“煤改电”综合效益评价指标体系研究[J]. 电工电气, 2018(5): 60-64.
Hou Bin, Yu Xuejiao, Zheng Xiaoyu, et al. Research on Evaluation Index System of “Coal-to-Electricity” Project Comprehensive Benefits Based on Combination Weighting Method[J]. Electrotechnics Electric, 2018(5): 60-64.
- [9] 曹敏, 杨里, 郭松, 等. 基于组合赋权法的煤改电项目综合效益评价方法研究[J]. 能源与节能, 2019(3): 1-6.
Cao Min, Yang Li, Guo Song, et al. Research on Comprehensive Benefit Evaluation Method of "Coal to Electricity" Project Based on Combination Weighting Method[J]. Energy and Energy Conservation, 2019(3): 1-6.
- [10] 朱赫炎, 张明理, 梁毅, 等. 煤改电电能替代工程效益分析[J]. 东北电力技术, 2017, 38(5): 43-47.
Zhu Heyan, Zhang Mingli, Liang Yi, et al. Coal to Electricity Analysis of Benefit and Output Ratio of Power Alternative Project[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(5): 43-47.
- [11] 周景宏, 王春建, 王静. 电采暖典型技术综合效益评价研究[J]. 价值工程, 2019(29): 122-126.
Zhou Jinghong, Wang Chunjian, Wang Jing. Research on the Comprehensive Benefit Evaluation of Typical Technology of Electric Heating [J]. Jing Value Engineering, 2019(29): 122-126.
- [12] 高国帅. 奎屯市电采暖方案选择与效益分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [13] 杨方圆, 张明理, 梁毅, 等. 辽宁省“煤改电”电能替代规划研究及成效分析[J]. 东北电力技术, 2017, 38(5): 32-36.
Yang Fangyuan, Zhang Mingli, Liang Yi, et al. Research and Analysis of Liaoning Coal to Electricity Alternative Planning[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(5): 32-36.
- [14] 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.
- [15] 曾博, 李英姿, 刘宗歧, 等. 基于均衡主成分分析的智能配电网环境效益综合评价方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 396-405.
Zeng Bo, Li Yingzi, Liu Zongqi, et al. Comprehensive Evaluation Method for Environmental Benefits of Smart Distribution Network Based on TO-PCA[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 396-405.
- [16] 颜湘武, 李君岩. 基于主成分分析法的直驱式风电场分群方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 127-133.
Yan Xiangwu, Li Junyan. Grouping method of direct drive wind farm based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 127-133.
- [17] 区伟健, 房鑫炎. 基于熵值法和主成分分析法的黑启动模式评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 22-27.
Ou Weijian, Fang Xinyan. Assessment of black-start modes based on entropy value method and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 22-27.
- [18] 齐山成, 史志鸿, 马临超, 等. 输电线路主成分状态量风险信息熵的检修计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 96-101.
Qi Shancheng, Shi Zhihong, Ma Linchao, et al. Study of maintenance schedule for the risk information entropy of principle component state of transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 96-101.
- [19] 谢晓帆, 刘秋林, 李斌, 等. 基于主成分分析法与对应分析法的县域配电网状况评估[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 68-73.
Xie Xiaofan, Liu Qiulin, Li Bin, et al. Evaluation of County Distribution Network Status Based on Principal Component Analysis and Correspondence Analysis[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 68-73.

作者简介:



张红斌(1969—),男,博士,高级工程师,研究方向为智能配电网。Email:hongbin09172015@163.com

冯明灿(1990—),女,硕士,工程师,研究方向为配电网规划设计。
孙钦斐(1987—),男,博士,高级工程师,研究方向为微电网、配用电技术、综合能源等。Email:sunney1987@163.com
井天军(1980—),男,博士,副教授,研究方向为配电自动化与分布式电源接入控制。Email:jingtianjun@126.com
梁安琪(1992—),女,工程师,研究方向为配用电及电能替代。
Email:lianganqi@bj.sgcc.com.cn

收稿日期:2020-04-11;修回日期:2021-03-12
(王家隆 编发)