

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.006

基于层次分析法的区域电能替代技术选择研究

王延杰, 徐国智

(国电华研电力科技有限公司, 广州 510075)

摘要: [目的]电能替代是促进新能源消纳、提升能源利用效率、提高电能占终端能源消费比重等问题的有效解决措施,因此选择适合地区特点的电能替代技术并加以实施显得至关重要。[方法]通过研究电能替代技术,梳理各领域潜在的电能替代技术,提出了一种基于地区适用性、经济性和推广难度的评价体系,并应用改进的层次分析法(IAHP)确定各指标权重系数。[结果]针对南方某区域进行分析验证建立的模型,结果表明:模型分析结果与实际情况相符合,说明了本模型的正确性与合理性;其次,模型排除了人为干预因素以及提供了一个科学的方法论,能实际指导地区电能替代发展。[结论]通过实际算例分析,所建立的体系对电能替代技术实施具有一定的指导意义。

关键词: 电能替代; 新能源消纳; 能源利用效率; 层次分析法

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0044-06

Research on Alternatives of Regional Electric Energy Based on Analytic Hierarchy Process

WANG Yanjie, XU Guozhi

(HY Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510075, China)

Abstract: [Introduction] Energy alternatives is an effective measure to promote new energy consumption, improve energy efficiency, and increase the proportion of electricity in terminal energy consumption, it is crucial that rationally select technology of energy alternatives and implement it. [Method] This paper proposed an evaluation system based on regional applicability, economy and popularization difficulty, and the improved analytic hierarchy process(IAHP) was applied to determine the weight coefficient of each index. [Results] Finally, the model is verified by researching object in a southern region. The results show that the model analysis results are consistent with the actual situation, indicating the correctness and rationality of the model. Secondly, the model excludes human intervention factors and provides a scientific methodology, which can actually guide the regional electric energy replacement development. [Conclusion] At the same time, this paper put forward measures to promote the development of energy alternatives, combining the precedence order conclusion and its technology.

Key words: energy alternatives; new energy consumption; energy efficiency; analytic hierarchy process

近年来,我国北方地区和中部地区雾霾天气出现频繁,严重地影响了人们的日常生活和身体健康,也引起了政府和学者的广泛关注,并相继提出重大措施进行管制^[1]。但在经济、资源和环境严重冲突的当下,如何利用现有资源,最大化促进经济发展

并且还能不影响或较小影响环境问题成为关注重点。

2016年5月16日,国家发改委、国家能源局等八部委联合印发了《关于推动电能替代的指导意见》(发改委能源[2016]1054号),指出电能替代技术作为解决空气污染、促进我国能源革命和供给侧结构性改革的一种重要措施和技术,具有至关重要的地位,成为我国能源发展战略。相关电力、能源发展报告中也提出提高电力消费占终端能源消费比重以及增加电能作为二次能源的使用量。

电能替代作为解决新能源利用和治理环境问题

收稿日期: 2018-02-28 修回日期: 2018-05-21

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目“南方区域电能替代潜力分析及措施研究”

的有效措施,被国家大力推广。但电能替代在我国尚处于起步与发展阶段,部分学者研究内容主要针对单一电能替代领域,对区域电能替代技术选择研究较少。文献[2]主要针对地区供暖技术的潜力及效益进行评估与分析,没有多种电能替代技术选择研究。文献[3]针对学校供水系统,提出收益与投资比的方法进行量化分析经济与环境效益。文献[4]量化了电能替代潜力及环境负荷模型,从而在多种情景下分析电能替代潜力及环境分析。

为此,梳理该区域所有电能替代技术,通过层次分析法进行评估体系建立及电能替代技术评估,分析出该区域电能替代技术的优先实施顺序或需要大力推广的技术,从而指导区域电能替代的实施。

1 电能替代技术及简介

电能替代技术主要指通过用电能来对存量及增量煤炭、石油、天然气进行替代,通过集中式、大规模利用以提高能源利用效率以及减少空气污染物的排放。同时,也能促进新能源就地利用情况,提升终端能源消费中的电能占比^[4]。

电能替代技术主要包括三个方面:(1)发电侧。主要强调电力源头的清洁化和绿色化,从源头上降低对化石能源的依赖,从而加快对环境的保护及改善作用;(2)电网侧。主要强调电能从远方的远距离、清洁传输。由于我国能源资源的分配不均,造成的我国西南、西北地区的太阳能、风能等可再生能源通过交直流特高压输送到东南沿海一带,降低传统能源的新增以及继续大量使用;(3)用户侧。主要强调终端能源消费中优先利用电能。首先是将工业锅炉、供暖锅炉等改为用电取热利用,减少煤炭的直燃利用;其次是将传统燃油汽车、港口岸电等以石油提供动力或者生活用能的项目改成用电;最后是为了改善作业环境,利用厨房电气化等项目的电能替代实施。

本文首先对区域潜在的电能替代技术进行梳理^[5-6],如表1所示。

2 层次分析法及改进

层次分析法^[7](Analytic Hierarchy Process,简称AHP)主要是将一系列分析元素分为方案层、准则层和目标层,在此分类方法基础上进行定量与定性分析的决策方法。匹兹堡大学 Saaty 教授于七十

年代中期提出层次分析法 AHP,于20世纪80年代初由 Saaty 的学生介绍到我国。

表1 区域电能替代潜在领域
Tab. 1 Regional electric potential area of substitution

| 行业领域 | 技术类别 | 适用领域 | 替代对象 |
|------|---------|------------|--------------|
| 建筑领域 | 热泵 | 建筑物集中采暖和制冷 | 化石集中供暖、供热 |
| | 分散电采暖 | 新建和既有建筑采暖 | 集中采暖和分散采暖 |
| | 电蓄冷空调 | 建筑物空调制冷 | 使用燃气的制冷机组 |
| | 供暖电锅炉 | 建筑采暖、生活热水 | 燃煤、燃气供暖锅炉 |
| 工业领域 | 厨房电气化 | 宾馆、企业、学校等 | 燃气、燃煤炉灶及热水 |
| | 工业电窑炉 | 陶瓷生产、铸造行业等 | 燃煤、燃气隧道窑等 |
| 交通领域 | 工业电锅炉 | 适用于工业用热 | 燃煤、燃气、燃油工业锅炉 |
| | 钻机油改电 | 油田钻探 | 燃油钻机 |
| | 管线电力加压 | 石油管道压气站 | 燃油压气站 |
| 农业领域 | 电动汽车 | 交通运输领域 | 燃油汽车 |
| | 轨道交通 | 交通运输领域 | 内燃机车 |
| | 船舶岸电 | 港口码头船用电需求 | 船舶辅助柴油发电机 |
| | 机场桥载APU | 机场 | 飞机燃油辅助装置 |
| 其他领域 | 港口装卸 | 港口货场 | 燃油港口装卸机械 |
| | 农业电排灌 | 灌溉、排涝等 | 柴油机泵 |
| | 农业电气化 | 农业生产、加工辅助等 | 燃煤、沼气小锅炉 |
| 其他领域 | 电制茶/电烤烟 | 人工制茶、制烟 | 烧煤、烧柴制茶烟 |
| | 破碎机/挖掘机 | 矿石加工、煤矿开采等 | 燃油破碎机和挖掘机 |
| | 采矿电铲 | 矿场开采 | 油压铲 |
| | 皮带廊油改电 | 物料运输环节等 | 污染严重、成本高等 |

2.1 层次分析法分析步骤

层次分析法主要是将复杂的问题分解后简单化,并将对量化指标构造成递阶层次结构。将量化指标进行两两对比分析,确定指标相对重要性,由相关专家进行判断,从而对要决策的方案进行排序。应用 AHP 方法分析问题时,主要分为4个关键的步骤^[8-9]:

- 1) 确立各因素或指标的关系,构建递阶层次结构。
- 2) 相对重要性判断,建立判断矩阵。
- 3) 由判断矩阵求得该准则层权重。
- 4) 计算目标方案各层级合成权重,然后进行优

先排序。

2.2 层次分析法数学模型

计算各个指标权重的一种方法步骤为:

1) 判断矩阵的归一化处理, 其元素一般项为:

$$\bar{C}_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_1^m C_{ij}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

2) 将每一列经归一化处理后的判断矩阵按行相加, 即为:

$$\bar{W}_i = \sum_1^n \bar{C}_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

3) 对向量 $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)$ 进行归一化处理:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_1^n \bar{W}_j} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

所得的向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 即为所求特征向量的近似解。

4) 计算判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \sum_1^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

式中: $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个元素。

2.3 一致性检验

在整个 AHP 方法应用过程中, 还必须进行一致性检验。相关计算步骤为:

1) 一致性指标 CI (Consistency Index) 的计算:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

2) 一致性指标 RI (Random Index) 的查找:
进行多次正互反矩阵的平均随机一致性指标。

3) 计算一致性比例 CR (Consistency Ratio):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

当 $CR < 0.1$ 时, 即能接受判断矩阵的一致性; 当 $CR \geq 0.1$ 的时候, 认为需要对判断矩阵进行修正。

2.4 层次分析法的改进

本文中的层次分析法为改进后的层次分析法^[10-11], 主要思想是将聚类分析方法^[12]的主要思想融入到层次分析法当中, 然后依据每个指标的容量从而确定相应指标权重; 并且根据相关判断矩阵的一致性程度从而判断指标权重, 最后将两者结合得到最终的指标权重, 最后与专家个体排序向量进行加权从而确定指标权重。因此, 本文的层次分析法在考虑专家宝贵经验的同时, 也应用统计分析方

法中的聚类分析法以提高方法的准确性及尽量除去太多主观因素, 从而提升该方法的可靠性。

本文对 AHP 法进行改进思路为: 传统的 AHP 法在计算出各指标权重后, 则计算结束, 但针对各个专家在经验、能力和专业背景等的异同没有考虑, 而是对所有专家同等对待。因此本文对不同专家进行量化对比, 从而区分专家权重值, 具体实施步骤为:

1) 根据专家构造判断矩阵的特征值来分析计算每个专家的相对权重, 然后根据公司进行极值指标进行转换。

$$F_i = (m + 2) - (\lambda_{\max})_i \quad (7)$$

式中: F_i 为对应第 i 名专家判断矩阵的一致程度; m 为判断矩阵的对应阶数; $(\lambda_{\max})_i$ 为第 i 名专家判断矩阵的最大特征值。

2) 然后针对通过一致性检验的专家进行统计分析方法 - 聚类分析法进行分析, 不同类别之间包含的信息或权重不同, 同时类别中数量较多的则比较符合实际真实情况, 类别中数量小的与之相反, 求解各个权重系数, 求解权重系数具体公式为:

$$\lambda_i = \frac{\varphi_p}{\sum_{p=0}^t \varphi_p^2} \quad (8)$$

式中: λ_i 为专家权重数; t 为聚类分析的类别数; φ_p 为聚类分析的容量级; p 为个体排序向量的个数。

3) 然后根据判断矩阵的一致性程度与 Step2 中的聚类分析权重相结合 (乘积关系), 求解综合的专家权重, 然后对专家权重进行归一化处理。

4) 将从多专家打分进行加权求和从而得到专家对各指标的综合权重值。

3 基于层次分析法的区域电能替代技术选择

3.1 体系构建目标与原则

电能替代技术选择体系的建立主要遵循科学性、合理性、全面性和可操作性, 从而使体系设计简单明了, 保证指标的健全性与相互独立性^[12-13]。然后, 根据上文梳理的电能替代技术, 按照本体系进行评估, 从而筛选出区域应该发展的电能替代技术优先级, 进而指导电能替代推广方向。

3.2 区域电能替代技术选择的指标体系

本文中相关电能替代领域选择的体系应该包含所有可能存在的电能替代领域, 然后综合考虑, 建立健全的指标体系^[14-16], 进行形成科学、合理的

评估体系。本文中的指标体系如图1所示。

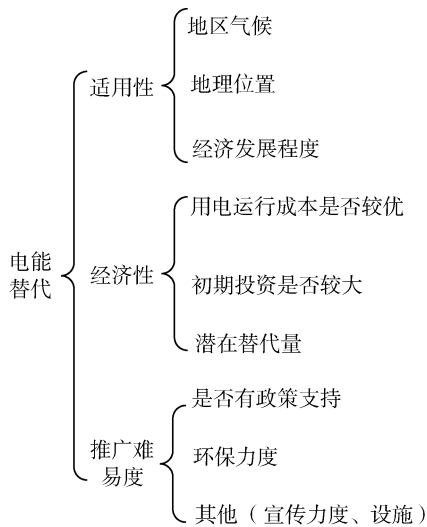


图1 区域电能替代技术评估指标体系

Fig. 1 Regional power alternative technology assessment index system

1) 地区气候: 该指标主要考虑如冬季供暖、电蓄冷空调、电制茶(茶叶种植受气候影响等)等方面情况。

2) 地理位置: 主要从交通、海岸位置等考虑, 例如港口岸电、港口装卸等沿海才具有的情况, 同时也考虑地形, 如部分轨道交通不适合建在山区等情况。

3) 经济发展程度: 一个地区或区域的经济发展情况直接影响了部分电能替代技术的推广应用。例如电动汽车的充电设施配套设置建设以及公路发达程度等都会影响电动汽车的广泛推广应用。

4) 用电运行成本是否交优: 例如工业锅炉需要高温以利用, 通过比较发现利用电能的成本和用煤炭的成本相比还是较高。但是通过相关技术突破、能源枯竭以及电力市场发展, 用电代替煤炭会有经济优势。

5) 初期投资是否较大: 初期投资问题是影响电能替代的一个重要因素。例如厨房电气化在农村推广就比较容易受到该指标影响, 因此国家推出家电下乡相关活动, 大大降低部分初期投资。同时也有电动汽车, 纯电动汽车是相同类型燃油汽车的6倍左右。

6) 潜在替代量: 该指标主要考虑区域现有替代对象的存量以及未来发展的增量情况。例如供暖电锅炉在北方区域就较多, 而在南方则完全不用考

虑。同时, 分析各种潜在替代量对后期选择也有重要指导意义。

7) 是否有政策支持: 该指标主要考虑国家政策及发展的方向, 例如船舶岸电、电动汽车都有相应国家支持以及指标下达, 因此要力度更大才行。

8) 环保力度: 国家现在正在关停一些高能耗、高污染的企业, 而且对于环境的保护也更加重视, 因此, 电能替代后的环境效益也在本文中被重点考虑。例如, 一些高污染的工业锅炉等。

9) 其他(宣传力度、设施): 针对部分电能替代技术例如制茶、制烟和农业排灌等, 在不发达地区有依然使用秸秆、木材或者煤炭作为燃料的情况, 除效率低不易控制外, 工作环境也能较大改善。

3.3 指标权重确定

本文根据改进的层次分析法相关原则, 收集89位相关专家或者学者的调查表, 并在首轮辨识和筛选后, 再次进行咨询, 求得相关梯阶矩阵以及一致性校验满足小于0.1要求。求出各个指标权重如表2所示:

表2 区域电能替代指标权重

| Tab. 2 Regional electricity alternative indicator weights | | | |
|---|-------|-----------|--------|
| 一级指标 | 指标权重 | 二级指标 | 二级指标权重 |
| 适用性 | 0.236 | 地区气候 | 0.167 |
| | | 地理位置 | 0.290 |
| | | 经济发展程度 | 0.543 |
| 经济性 | 0.419 | 运行成本 | 0.415 |
| | | 初期投资 | 0.268 |
| | | 潜在替代量 | 0.317 |
| 推广难易度 | 0.345 | 政策支持 | 0.456 |
| | | 环保强度 | 0.321 |
| | | 其他(宣传、设施) | 0.223 |

由表2可知, 在一级指标中经济性与环保性对应指标权重较大, 因为在运行成本、投资是用户比较在意的。对于政策支持、潜在替代量和环保是投资人士较为看中的, 而适用性作为一个电能替代项目的初选指标, 因此权重相对不是特别高。

3.4 算例分析

本文以南方某区域为例进行分析, 同时以全国该领域平均水平为依据进行相关原则制定。由于篇幅限定, 本文不再一一列举相关数据。针对文中的评价对象, 主要依据南方地区数据为依据, 一些定

量数据主要通过国家统计局、气象局、行业协会等获得；针对一些定性的指标主要通过模糊评判集的方法进行量化^[4]，在百分制中以20为单位进行划分五个区间，即0~20，>20~40，>40~60，>60~80，>80~100，从而将定性指标量化在该区间中，以表示该地区的对应指标发展情况。19个电能替代领域排名如表3所示。最后依据综合排名前十一位为大力发展电能替代技术。

表3 区域电能替代技术选择

Tab. 3 Regional power alternative technology options

| 序号 | 技术分类 | 地区适用性排名 | 经济性排名 | 推广难易度排名 | 综合评价排名 |
|----|-----------|---------|-------|---------|--------|
| 1 | 港口岸电 | 4 | 2 | 2 | 1 |
| 2 | 机场桥载APU | 11 | 6 | 9 | 9 |
| 3 | 热泵 | 1 | 3 | 5 | 3 |
| 4 | 电蓄冷空调 | 2 | 1 | 6 | 2 |
| 5 | 厨房电气化 | 9 | 8 | 7 | 10 |
| 6 | 工业电锅炉 | 7 | 11 | 3 | 6 |
| 7 | 农业电排灌 | 6 | 5 | 8 | 5 |
| 8 | 工业电窑炉 | 8 | 10 | 4 | 7 |
| 9 | 电动汽车 | 3 | 9 | 1 | 4 |
| 10 | 港口装卸 | 5 | 7 | 10 | 8 |
| 11 | 电制茶/电烤烟 | 10 | 4 | 11 | 11 |
| 12 | 油田钻机油改电 | 17 | 13 | 14 | 13 |
| 13 | 农业生产电气化 | 12 | 12 | 15 | 12 |
| 14 | 电动破碎机/挖掘机 | 14 | 17 | 17 | 17 |
| 15 | 皮带廊油改电 | 13 | 14 | 16 | 14 |
| 16 | 供暖(蓄热)电锅炉 | 19 | 15 | 13 | 16 |
| 17 | 油气管线电力加压 | 15 | 19 | 19 | 19 |
| 18 | 采矿电铲 | 16 | 18 | 18 | 18 |
| 19 | 分散电采暖 | 18 | 16 | 12 | 15 |

通过表3可知，依据国家发展改革委、国家能源局等八部分共同发文《关于推进电能替代的指导意见》以及南方电网相关电能替代指导意见，共梳理该地区电能替代相关技术19项，通过本文建立的区域电能替代技术选择体系筛选出11项该地区需要大力发展及广泛推广的项目。根据上文中选择出的电能替代技术与国家政策及指导意见比较相似，因此，也能说明本文中建立的体系的正确性与合理性。通过对本地区电能替代领域的分析与选择，对于促进节能减排与建设美丽中国、治理环境

污染与经济发展、优化能源结构和能源的可持续发展具有重要意义。

但技术梳理与分析发现，我国电能替代发展也存在着诸多问题，例如电价问题、电能替代配套财政补贴和税收减免等等诸多问题。通过相关技术与理论分析促进电能替代快速发展，可以采取的措施如下^[17-19]：

1) 宣传鼓励类：例如农业电排灌、港口岸电等电能替代领域经济与减排效果较好因用户认识不足而增加推广的，可以电能替代纳入地区发展规划并大力宣传。

2) 资金补贴类：例如工业电窑炉、电动汽车等电能替代领域用电设备初期投资较大从而限制推广的，建议出台类似家电下乡等绿色电器政策，加大补贴力度和广度。

3) 电价政策类：例如电蓄冷空调等电能替代技术运行成本受限于电价，因此为提高清洁能源消纳、提高终端电能占比，可以考虑相应电价补贴并制定用电方案，达到削峰填谷的双赢效果。

4) 环保限制类：自备电厂、高能耗燃煤锅炉等领域，细化、完善各类企业和耗能设备的环保排放标准，提高标准，加强考核。

5) 技术规范类：例如厨房电气化、电动汽车等领域存在相关设备品质与相关技术标准参差不齐，因此需要相关技术部门或者业界知名企业制定与规划相关标准，从而引导电能替代及相关行业的长足发展。

4 结论

随着全世界对气候和经济矛盾问题的关注，电能替代成为解决该类问题的重要措施之一。本文依据国家下达相关政策和学者研究，梳理南方某区域共存在19项潜在的电能替代技术，并创新性地根据改进的层次分析法建立指标评估体系，最后进行测算得出11项需重点发展电能替代技术，为地区后期发展电能替代相关项目提供依据与方向。

本文创新地提出地区电能替代技术优选评估体系，为电能替代精准投资及快速发展提供理论支持。随着环境保护观念与能源危机加剧，电能替代成为后续能源发展的必然趋势，本文的评估体系能有效解决电能替代过程中的优先发展次序问题，促进电能替代的发展。

参考文献:

- [1] 王伟, 黄珂. 电能替代战略: 机遇、挑战与政策选择 [J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2014(4): 1-5.
- [2] 曲子清, 辛洁晴, 吴亮, 等. 商业用户电能采暖替代技术选型的边界条件论证 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 48-54.
QU Z Q, XIN J Q, WU L, et al. Demonstration of the boundary conditions for selection of commercial electric heating substitutes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 48-54.
- [3] 曹东莉, 袁越, 李志祥. 电能替代应用及效益评价 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(4): 30-34.
CAO D L, YUAN Y, LI Z X. Application and efficiency evaluation of alternative energy [J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(4): 30-34.
- [4] 孙毅, 张璐, 单葆国, 等. 基于信息熵融合多层次灰色关联分析法的电能替代综合评估 [J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 44-50.
SUN Y, ZHANG L, SHAN B G, et al. Comprehensive assessment of electric power alternation based on multi-level grey relational analysis method combined with information entropy [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 44-50.
- [5] 全志强. 河北南网实施电能替代相关问题研究 [D]. 河北: 华北电力大学, 2016.
- [6] 张鹏. 天津港件杂货码头装卸作业效率改善研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [7] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150+195.
YANG X B, LI H M, YIN Z D, et al. Distribution network energy efficiency index system based on analytic hierarchy process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150+195.
- [8] 马小雨. 基于 AHP 的煤炭科研项目评价系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [9] 郭晨望, 徐笑, 唐晟. 基于 AHP 和熵权法的中压配电网项目投资效益综合评价方法 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 9-13.
GUO C J, XU X, TANG S. Comprehensive evaluation for medium-voltage distribution system construction based on AHP and entropy weight method [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 9-13.
- [10] 夏萍, 汪凯, 李宁秀, 等. 层次分析法中求权重的一种改进 [J]. 中国卫生统计, 2011, 28(2): 151-154+157.
XIA P, WANG K, LI N X, et al. An improvement of weight in analytic hierarchy process [J]. Chinese Health Statistics, 2011, 28(2): 151-154+157.
- [11] 种倩倩, 成岭, 钟鸣, 等. 基于改进 ANP 的电能替代技术环保效益模糊综合评价 [J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 103-109.
- [12] 蔡秋娜, 刘思捷, 陆秋瑜. 基于 GMM 聚类 and SVM 的用户负荷行业分类辨识方法 [J]. 广东电力, 2017, 30(12): 91-96.
CAI Q N, LIU S J, LU Q Y. Identification method for user industry classification based on GMM clustering and SVM [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 91-96.
- [13] 王印松, 李士哲, 张涛, 等. 基于协方差指标的火电机组负荷控制系统性能评价 [J]. 热力发电, 2015, 44(4): 56-61.
WANG Y S, LI S Z, ZHANG T, et al. Performance evaluation of thermal power unit load control system based on covariance [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(4): 56-61.
- [14] GE S, LI T, LIU H. Research on low carbon electricity under the probabilistic reliability evaluation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2374-2381.
- [15] 单葆国, 赵佳, 贾德香, 等. 基于 STIRPAT-岭回归的电能替代潜力分析方法 [J]. 供用电, 2018(1): 68-74.
SHAN B G, ZHAO J, JIA D X, et al. Electric power substitution potential analysis method based on STIRPAT-ridge regression [J]. Distribution & Utilization, 2018(1): 68-74.
- [16] 成岭, 金璐, 钟鸣, 等. 电能替代标准体系研究与设计 [J]. 智能电网, 2016, 4(9): 875-880.
- [17] 焦丰顺, 张劲松, 唐晟, 等. 智能配电网项目综合效益分析评价方法研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 134-137.
JIAO F S, ZHANG J S, TANG S, et al. Research on comprehensive benefits evaluation of smart distribution grid [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 134-137.
- [18] 黎洪光, 林家俊, 庄远灿, 等. 基于全寿命周期成本的配电网合环运行经济性评估方法 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 162-166+161.
- [19] 孙毅, 周爽, 单葆国, 等. 多情景下的电能替代潜力分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(1): 118-123.

作者简介:



WANG Y J

王延杰(通信作者)

1990-, 男, 河南信阳人, 工程师, 硕士, 主要从事微电网和能源互联网规划设计 (e-mail) wang1452236658@163.com。

(责任编辑 李辉)