

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.02.018

基于主成分分析法的电子式电能表计量性能影响研究

李 鹏^{1,2}, 郭鹏程¹, 李 飒³, 王 琨⁴

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司华北电力试验研究院, 北京 100040; 3. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082; 4. 国网甘肃省电力公司 电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 由于现场运行的电子式电能表数量多,常会发生计量失准等情况,严重影响电力贸易结算的准确性和公平性。虽然电子式电能表安装前会进行误差检定,但是电子式电能表的现场运行情况复杂多变,实验室单一变量对电子式电能表综合性能研究无法完全满足其现场运行可靠性的评判。现场运行的电子式电能表电能计量过程引入的不确定度种类较多,需综合评判才能保证电子式电能表计量的准确性。本文以在运行的 596 万单相电子式电能表为样本库随机选取不同种类样本 164 只,依托主成分分析方法,查找影响电子式电能表准确计量的主要影响因子,为电子式电能表综合性能评价提供试验数据支撑;对电子式电能表进行基本误差试验,并结合历史基本误差试验数据和四种影响电子式电能表计量性能的因素进行数据比对。

关键词: 电子式电能表;主成分分析;首次检定;基本误差

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)02-0263-06

Study on the influence of static electricity energy meter based on principal component analysis

LI Peng^{1,2}, GUO Pengcheng¹, LI Sa³, WANG Kun⁴

(1. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. North China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Beijing 100040, China; 3. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China; 4. State Grid Gansu Electric Power Research, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Due to the large number of static electricity energy meter (SEEM) in field operation, SEEM often occurred with measurement misalignment, seriously affecting the accuracy and fairness of electricity trade settlement. Although SEEM will be a principal component analysis before installation, the field operation of the SEEM is complex and changeable, and the laboratory single variable cannot fully meet the evaluation on the reliability of the SEEM operation. The uncertainty of the electric energy measurement process of the SEEM in the field operation is great, so it needs a comprehensive evaluation to ensure the accuracy of the SEEM measurement. Based on the principal factor analysis method, 164 samples of different kinds are randomly selected from 5.96 million single-phase SEEMs in operation, with the main factors affecting the accurate measurement of SEEMs found.

Key words: static electricity energy meter; principal component analysis; initial verification; fundamental error

随着电力电子技术的不断发展,电子式电能表作为电网终端计量器具越来越多地安装到用户家,

为电力贸易结算提供及时有效的服务。由于电子式电能表尤其单相电子式电能表具有使用量大、分布

收稿日期: 2019-04-29; 网络出版日期: 2020-05-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200522.0851.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51839010)

第一作者: 李鹏,男,博士生,高级工程师,研究方向为电气测量和电力设备故障诊断。E-mail: lixp2022@sina.com

通信作者: 郭鹏程,男,博士,教授,博导,研究方向为水电机组故障诊断和可再生能源高效利用。E-mail: guoyicheng@126.com

区域广、服务环境复杂多变等特点,其质量的优劣将直接关系到供用电双方电力交易的公平公正。文献[1]提出基于以太坊区块链技术的配网运行方法。文献[2]提出一种高效准同步谐波算法。文献[3]推导出了存在间谐波条件下的电能计算公式。电子式电能表的基本误差是一个多变量、非线性的函数,通过将电流,电压,功率和光电测量电路检测的转速作为输入元,电子式电能表运行过程各种影响因素各种不确定度会引入至电子式电能表输出的基本误差。本文基于主成分分析法对电子式电能表基本误差形成过程中运行年限、生产厂家、用户类型和运行区域四种影响因子进行分析,确定影响基本误差的运行年限和自然环境为两种主成分,通过电子电能表基本误差误差曲线验证主成分理论,并为现场运行电子式电能表提出可靠运行数据。

1 主成分分析

1.1 电子式电能表样本的选取

电子式电能表作为贸易结算的计量工具安装在客户侧,客户安装地点的自然环境、客户用电负荷等情况复杂多变,电子式电能表的计量性能因湿度、温度、沙尘、电磁干扰、振动等因素的变化而变化。本文以居民用户为主体,以现场运行的596万余只单相电子式电能表样本库,按照运行年限(现场运行1年~6年)、生产厂家(基本覆盖中国国内知名电子式电能表生产厂家)、用户类型(负荷类型:农村、城区)、运行区域(自然环境因素)等随机抽取164只电能表为样本。具体选取情况见表1。

表1 单相电子式电能表样品清单

Tab.1 Sample list of single-phase SEEM

| 变量 | 种类 | 数量 |
|------|-------------|-----|
| 运行年限 | 3年及以下 | 100 |
| | 3年以上 | 64 |
| 自然环境 | 温带大陆气候 | 42 |
| | 暖温带半湿润半干旱气候 | 39 |
| | 温暖带大陆性季风气候 | 31 |
| | 大陆性干旱气候 | 52 |
| 用户类型 | 农村用户 | 80 |
| | 城市用户 | 84 |
| 生产厂家 | 样本数第一的厂家W | 41 |
| | 样本数第二的厂家H | 22 |
| | 九个其它厂家 | 101 |

以上述样本的基本误差试验数据构成四维数组,作为电子式电能表聚类分析的评级指标。样本所在地年均温度(1~16)℃、降水量(40~600)mm、年平均日照时数2446h等。

1.2 基于主成分权重给定法

主成分分析法是在遇到用统计分析方法研究多变量的课题时,由于每只电子式电能表的影响因子作为不确定度引入至电子式电能表基本误差,当几个变量反映此课题的信息有一定的重叠时,通过降维思想把多个变量转化为少数几个包含较多信息的综合变量,使得这些新变量是两两不相关的,而且这些新变量在反映课题的信息方面尽可能保持原有的信息。

1) 原始数据的标准化^[4-8]

对于样本选出的电子式电能表,设有 p 个影响因子对 n 个采集样本进行分析,借助正交变换,将其分量相关的原随机向量表示为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p)^T = \begin{bmatrix} x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1p} \\ x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2p} \\ \dots \\ x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 组样本数据中的第 j 个变量的值。

对样本矩阵 \mathbf{X} 进行变换的 $\mathbf{Y} = [y_{ij}]_{n \times p}$:

$$y_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, & \text{对正指标} \\ -x_{ij}, & \text{对逆指标} \end{cases} \quad (2)$$

对 \mathbf{Y} 做标准化变换得标准化矩阵 \mathbf{Z} :

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{s_j} \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p; \bar{y}_j, s_j$ 分别为 \mathbf{Y} 阵中第 j 列的均值和标准差。

2) 计算标准化矩阵 \mathbf{Z} 得相关系数矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = [r_{ij}]_{p \times p} = \frac{\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}}{n-1} \quad (4)$$

3) 解样本相关系数矩阵 \mathbf{R} 的特征方程 $|\mathbf{R} - \lambda \mathbf{I}_p| = 0$,解得 p 个特征值,特征值从大到小排列为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ 。确定主成分,按:

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j \geq 0.85 \quad (5)$$

来确定 m 值,使信息的贡献率达85%以上。对每个 $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, m$,解方程组 $\mathbf{R}\mathbf{b} = \lambda_j \mathbf{b}$,得单位向量 $\mathbf{b}_j^0 = \frac{\mathbf{b}_j}{\|\mathbf{b}_j\|}$ 。

4) 求出 $\mathbf{z}_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ip})^T$ 的 m 个主成分分量 $u_{ij} = \mathbf{z}_i^T \mathbf{b}_j^0, j = 1, 2, \dots, m$,得决策矩阵:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^T \\ \mathbf{u}_2^T \\ \dots \\ \mathbf{u}_p^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1m} \\ u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2m} \\ \dots \\ u_{p1}, u_{p2}, \dots, u_{pm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: u_i 为第 i 个变量的主成分向量。

5) 计算权重

假设需确定权重的指标个数为 h 个, 确定得初级权重模型即是主成分模型:

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1m}X_m + a_1\varepsilon_1 \\ F_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2m}X_m + a_2\varepsilon_2 \\ \dots \\ F_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pm}X_m + a_p\varepsilon_p \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_1, F_2, \dots, F_m 为分析后得到的 m 个主成分; u_{ij} 为决策矩阵中系数。在用 SPSS 软件进行主成分分析时, 得到的不是决策矩阵系数 u_{ij} 而是初始因子载荷 f_{ij} 二者满足如下关系:

$$u_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}} \quad (8)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, m$ 。

构建综合评价函数:

$$F_Z = \sum_{j=1}^m (\lambda_j / K) \cdot F_j = a_1\omega_1 + a_2\omega_2 + \dots + a_j\omega_j \quad (9)$$

式中: $K = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m$; a_1, a_2, \dots, a_j 即指标 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j$ 在主成分中综合重要度。在此基础上, 可算出原有指标得分综合值:

$$V_{Z,i} = \sum_{j=1}^L a_j p_{ij} \quad (10)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, h$ 。

可得各指标权重为:

$$\omega_i = \frac{V_{Z,i}}{\sum_{i=1}^h V_{Z,i}} \quad (11)$$

以基本误差试验为例, 进行基于主成分的权重计算。结合表 2 和表 3 可知, 运行年限和自然环境对单相电子式电能表基本误差影响较大。

表 2 主成分特征值和贡献率

Tab. 2 Characteristic root and contribution rate of principal component analysis

| 变量 | 特征值 | 贡献率/% | 累计贡献率/% |
|------|-----|-------|---------|
| 运行年限 | 4.5 | 61.29 | 61.29 |
| 用户类型 | 0.7 | 5.91 | 67.20 |
| 自然环境 | 3.5 | 27.63 | 94.83 |
| 生产厂家 | 0.6 | 1.86 | 100.00 |

表 3 基本误差主成分载荷

Tab. 3 Principal component load of FE

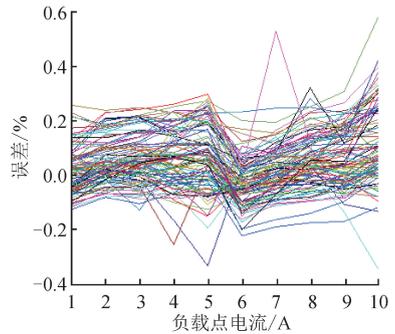
| 变量 | 主成分载荷 |
|------|-------|
| 运行年限 | 0.956 |
| 用户类型 | 0.936 |
| 自然环境 | 0.958 |
| 生产厂家 | 0.927 |

2 试验验证

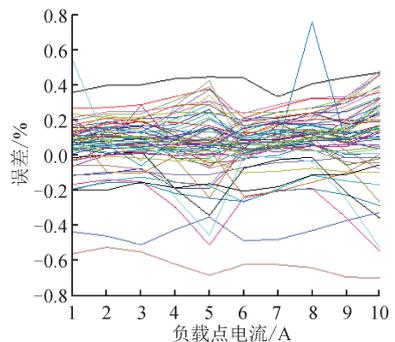
参考国际法制计量组织 OIML R4-1/R 46-2: 2012 标准, 采用准确度等级 0.05 级电能表为测量标准, 对样本在 $\cos\varphi = 1.0$ 和 $\cos\varphi = 0.5L$ 下 I_{\max} 、 $0.5 I_{\max}$ 、 $1.0 I_n$ 、 $0.1 I_n$ 、 $0.05 I_n$ 五个负载点进行比对试验, 其负载点电流用 A 为单位, 并用相对误差进行表征, 同时对照各自首次检定、验收误差数据等进行性能比对^[9-10]。用阿拉伯数字表示不同功率下不同的负载点, 对应关系为 1~5 表示为样本在功率因数 $\cos\varphi = 1.0$ 下 I_{\max} 、 $0.5 I_{\max}$ 、 $1.0 I_n$ 、 $0.1 I_n$ 、 $0.05 I_n$, 6~10 表示为样本 $\cos\varphi = 0.5L$ 下 I_{\max} 、 $0.5 I_{\max}$ 、 $1.0 I_n$ 、 $0.1 I_n$ 、 $0.05 I_n$ 。

2.1 运行年限

1) 运行年限: 三年内用户和三年外用户基本误差比对见图 1。



(a) 运行年限三年以内单相电子式电能表误差曲线分布图



(b) 运行年限三年以上单相电子式电能表误差曲线分布图

图 1 不同运行年限单相电子式电能表基本误差曲线分布图

Fig. 1 Distribution chart of FE curves of single-phase SEEM with different operating life

根据图 1 的(a)和(b)可见, 使用年限在三年以外的智能电能表比使用年限在三年以内的智能电能表误差稳定性差、波动范围大, 且误差明显变大。因此, 电子式电能表误差随着运行年限增加逐渐增大。

2) 运行年限: 三年内用户和三年外用户基本误差变差比对见图 2。

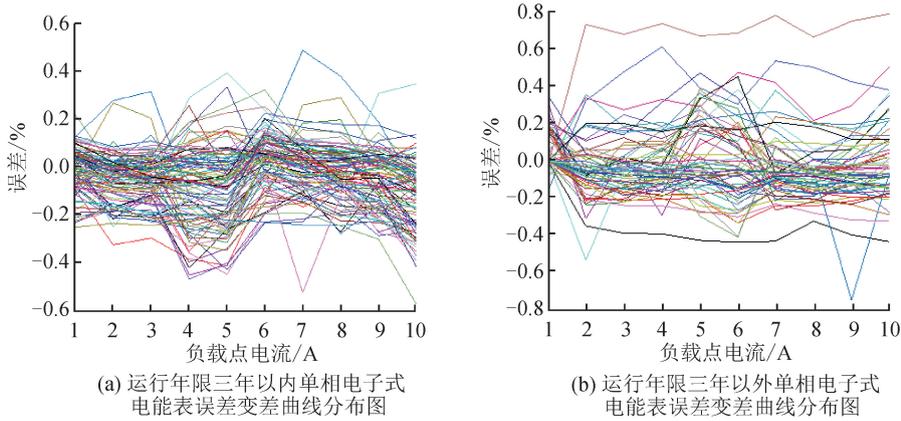


图2 不同运行年限单相电子式电能表误差变差曲线分布图

Fig. 2 Distribution chart for error variation curves of single-phase SEEM with different operating lives

根据图2的(a)和(b)可见,使用年限在三年以外的智能电能表本次基本误差和历史(全检验收)基本误差差值比使用年限在三年以内的智能电能表本次基本误差和历史(全检验收)基本误差差值变大,因此,电子式电能表随着运行年限增长误差变差变大。

2.2 自然环境

根据图3的(a)~(d)可见,自然环境中温度、湿

度对电子式电能表影响较为明显。温带大陆性气候和暖温带半湿润半干旱气候及暖温带大陆性季风气候比较,在一定范围内,电子式电能表随着湿度的增大误差变大;温带大陆性气候和大陆性干旱气候相比较,在一定范围内,电子式电能表随着温度降低误差变大。

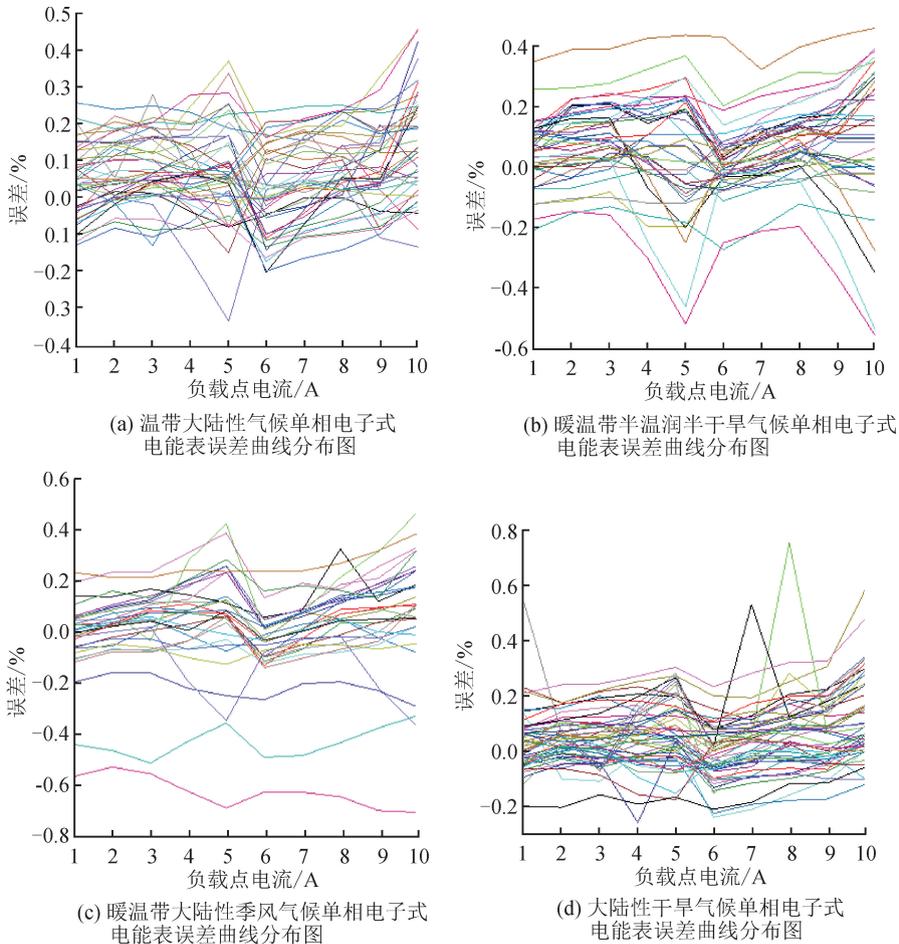
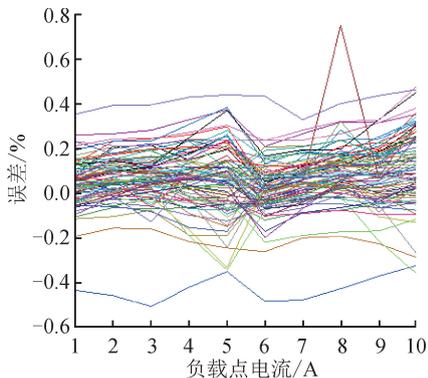


图3 不同自然环境单相电子式电能表变差曲线分布图

Fig. 3 Distribution chart for variation curves of single-phase SEEM in different natural environments

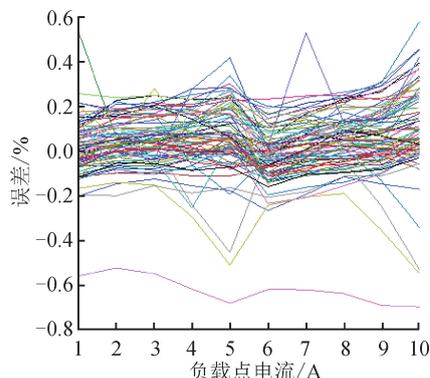
2.3 用户类型

根据图4的(a)和(b)可见,城区用户与农村用



(a) 城区用户误差曲线分布图

户误差对比,用户类型不同体现的负荷变化对电子式电能表影响不太明显。



(b) 农村用户误差曲线分布图

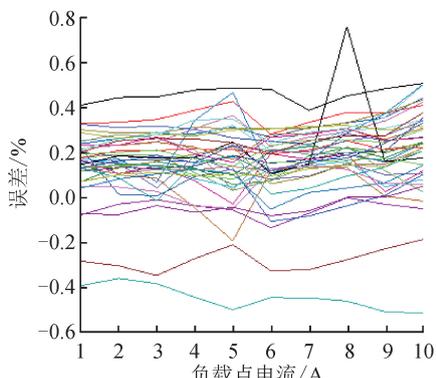
图4 不同用户类型电子式电能表基本误差分布图

Fig. 4 Distribution chart for FE curves of SEEM with different user types

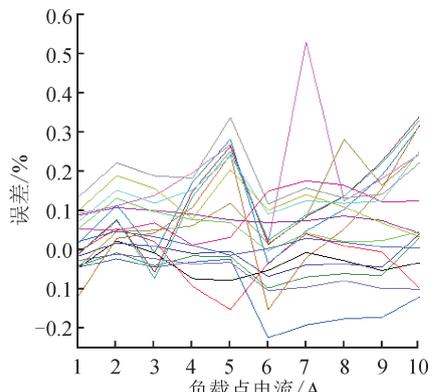
2.4 生产厂家

根据图5的(a)和(b)可见,取安装选取样本数量较多的两个厂家进行基本误差比对,用户类型不

同体现的用电负荷变化对电子式电能表误差影响不太明显。



(a) 生产厂家W误差曲线分布图



(b) 生产厂家H误差曲线分布图

图5 不同生产厂家电子式电能表基本误差分布图

Fig. 5 Distribution chart for FE curves of SEEM with different manufacturers

3 结论

本文以主成分分析法对电子式电能表四种影响因子进行数学计算,并结合596万只运行单相电子式电能表样本库抽取的164只进行基本误差试验可知:电子式电能表运行年限越久对其计量性能影响越大,湿度、温度、沙尘等综合因素组成的自然环境对电子式电能表影响较大。此外,本文对电子式电能表计量性能影响因子分析具有普适性,不仅适用于本文中涉及的2级单相智能电能表,对于其他单相智能电能表以及各类三相智能电能表也是同样适用的,可以在本文的基础上优化评级指标体系,对于各类不同电能表的性能特性、使用途径、全性能试验检测具体项目等方面的差异,对相应的性能评级

指标进行调整,保证未来评级工作的准确合理性。

参考文献:

- [1] 平健,陈思捷,张宁,等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13): 3682-3690.
PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [2] 肖勇,罗睿希,赵伟,等. 基于IEC 61850的数字化电能表用快速准同步谐波测量算法[J]. 电网技术,2018,42(2):621-627.
XIAO Yong, LUO Ruixi, ZHAO Wei, et al. Fast Quasi-synchronous harmonic algorithm for IEC61850 based digital energy metering devices [J]. Power System

- Technology, 2018, 42(2): 621-627.
- [3] 徐文佳,赵伟,黄洪涛,等. 计及间谐波的电能计量方法[J]. 电网技术,2016,40(2):656-662.
XU Wenjia, ZHAO Wei, HUANG Hongtao, et al. A method for electrical energy measurement in consideration of inter-harmonics[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 656-662.
- [4] PAN Jiuping, TEKLU Y, RAHMAN S, et al. Review of usage-based transmission cost allocation methods under open access[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1218-1224.
- [5] BIALEK J. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1185-1193.
- [6] 李元诚,邱日轩,曾婧. 基于核主成分分析的智能电网盲在线虚假数据注入攻击的研究[J]. 电网技术,2018,42(7):2270-2278.
LI Yuancheng, QIU Rixuan, ZENG Jing. Research on blind online false data injection attack using kernel principal component analysis in smart grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2270-2278.
- [7] RUBINO A, CUOMO M. A regulatory assessment of the Electricity Merchant Transmission Investment in EU[J]. Energy Policy, 2015, 85: 464-474.
- [8] 刘明华,南海鹏,余向阳. 基于非线性主元分析的水轮机调节系统传感器故障诊断[J]. 西安理工大学学报,2012,28(2):204-209.
LIU Minghua, NAN Haipeng, YU Xiangyang. Fault diagnosis for sensors of hydro turbine regulation system based on nonlinear component analysis[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012,28(2):204-209.
- [9] 田立亭,程林,郭剑波,等. 基于能值分析的多能互补综合能源系统价值评估方法[J]. 电网技术,2019,43(8):2925-2933.
TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. Multi-energy system valuation method based on emergy analysis[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2925-2933.
- [10] 褚大华. 电子式电能表[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第262页)

- [13] 黄泽荣,彭建春,肖文娟,等. 基于耗散功率转归分量的网损微增率新算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(1):31-36.
HUANG Zerong, PENG Jianchun, XIAO Wenxian, et al. Incremental transmission loss algorithm based on the imputation of an impedance-branch dissipation power[J]. Proceedings of The Chinese Society Of Universities, 2010, 22(1): 31-36.
- [14] 林弋莎,鲁宗相,乔颖,等. 中长期合同竞价市场下自主确定检修计划对系统运行影响的探讨[J]. 全球能源互联网,2020,3(3):272-279.
LIN Yisha, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Self-determined unit maintenance scheduling and its influence on system operation in medium- to long-term contract bidding market[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 272-279.
- [15] 刘明顺,马覃峰,林成,等. 考虑互动负荷的发输电一体化检修计划优化模型与方法[J]. 智慧电力,2018,46(9):19-25.
LIU Mingshun, MA Tanfeng, LIN Cheng, et al. Model and method of integrated generation and transmission maintenance schedule considering interactive load[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 19-25.

(责任编辑 王绪迪)