

# 平衡约束下的光伏并网复合储能自动规划系统设计

杨欣<sup>1</sup>, 施天成<sup>1</sup>, 吴晓鸣<sup>1</sup>, 周帆<sup>1</sup>, 丛昊<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230031;

2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为解决光伏发电与并网系统间不平衡矛盾,导致的并网系统功率波动较大的问题,提出一种平衡约束下的光伏并网复合储能自动规划系统设计方案。利用升压器电路与双向变换器,组成光伏并网储能主电路;以总成本目标函数、线路损耗目标函数、无功损耗目标函数、功率补偿能耗目标函数,分析负荷系数与峰谷效应系数计算电池储能系统的功率值,以光伏并网负荷储能平衡约束条件,获取复合储能系统的入口位置,分析储能效率本体定义模型,求解参与平衡调节的光伏并网复合储能容量状态,实现复合储能自动化规划。实验结果表明,所提系统将并网功率波动量控制在80 kW/min至-80 kW/min标准范围内,规划运行时间在0.09 s-0.15 s之间。可以有效降低电池的损耗,延长储能系统的使用年限。

**关键词:**光伏并网;复合储能;电力自动化规划;平衡约束;升压器电路;负荷预测

中图分类号:TP18 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)05-0150-05

## Design of Photovoltaic Grid-connected Composite Energy Storage Automation Planning System Under Balance Constraints

YANG Xin<sup>1</sup>, SHI Tian-cheng<sup>1</sup>, WU Xiao-ming<sup>1</sup>, ZHOU Fan<sup>1</sup>, CONG Hao<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230031 China;

2. Hefei University of Technology, Hefei 230009 China)

**Abstract:** In order to solve the problem of large power fluctuations in grid connected systems caused by the imbalance between photovoltaic power generation and grid connected systems, a design scheme for photovoltaic grid connected composite energy storage automation planning system under balance constraints is proposed. The main photovoltaic grid connected energy storage circuit is composed of a booster circuit and a bidirectional converter. It calculates the power value of the battery energy storage system using the total cost objective function, line loss objective function, non functional consumption objective function, and power compensation energy consumption objective function, analyzes the load factor and peak valley effect coefficient, obtains the inlet position of the composite energy storage system using the photovoltaic grid connected load energy storage balance constraints, analyzes the energy storage efficiency ontology definition model, and solves the status of the photovoltaic grid connected composite energy storage capacity participating in balance adjustment, realizes automatic planning of composite energy storage. The experimental results show that the proposed system controls the grid connected power fluctuation within the standard range of 80 kW/min to -80 kW/min, and the planned operation time is between 0.09 seconds and 0.15 seconds. It can effectively reduce battery loss and extend the service life of the energy storage system.

**Keywords:** photovoltaic grid connection; composite energy storage; power automation planning; balance constraint; booster circuit; load forecasting

## 0 引言

随着经济的快速发展,清洁能源如何高效利用逐渐成为人类社会能否继续发展的重要议题。伴随着电力系统的快速发展,电能由传统的一次能源向二次清洁能源转变,然而,随着我国电网规模不断扩大、对电能质量要

求日益提高,配电网中多种电能混杂,使得电能质量问题也日益凸显。为解决配电网中的电能质量问题,电力企业提出了多种解决方案。其中,光伏并网复合储能系统可有效改善配电网中电能质量问题,但如何进行合理规划,确保并网存储过程中的电压稳定和谐波含量控制,成为制约光伏并网系统进一步发展的关键问题。

国外Liang L<sup>[1]</sup>等提出了一种可用于各种可再生能源的并网微电网的新能源管理系统,对光伏系统输出功率、负荷需求预测误差、微电网能源管理进行了建模,利用改进的bat算法实现存储规划。但在建模过程中没有考虑

\*基金项目:国网安徽省电力有限公司经济技术研究院基金(B6120922000B);国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助(U19A20106);安徽省自然科学基金资助项目(2108085UD05)

收稿日期:2023-09-28

电池复合储能系统的成本,实际应用效果不理想;孙阔<sup>[2]</sup>等为解决由光伏电站出力不当,造成的储能功率波动问题,提出一种电压波动抑制双层优化规划方法。通过控制并网点处电压的稳定性,增强光伏并网中的电压稳定水平,有效调节了电站出力结构。但实际应用中光伏发电与并网系统之间仍然存在矛盾。季宇<sup>[3]</sup>等提出一种无源滑模控制方法来解决电网光储系统中的光伏电池储能问题,设计储能变换器,使得电网光储系统满足能量耗散标准。但是没有对系统进行调峰,在实际应用中,会导致系统运行安全系数降低,且耗费成本也会大幅度增加。

国内外现有的储能规划方法无法对当前复杂电网结构进行合理且精细的自动化规划,存在较大不足,规划结果具有较大的滞后性。基于此,设计了一种考虑平衡约束的光伏并网复合储能自动规划系统。系统硬件部分设计了由升压器电路与双向变换器构成的光伏并网主电路<sup>[4]</sup>;系统软件部分基于功率、电压、电网运行平衡条件,从储能系统定容角度出发实现复合储能系统的自动化规划。实验结果表明,所提系统可以有效地平抑并网功率波动问题,提高了电网中电能质量,降低系统运行损耗。

## 1 光伏并网复合储能自动化规划系统设计方案

### 1.1 系统硬件

由于实际应用中系统外部设置的芯片数量有一定限制,为了提高光伏并网复合储能系统的稳定性,使用双控制芯片作为规划系统核心。光伏并网复合储能自动规划系统的硬件框架如图1所示。

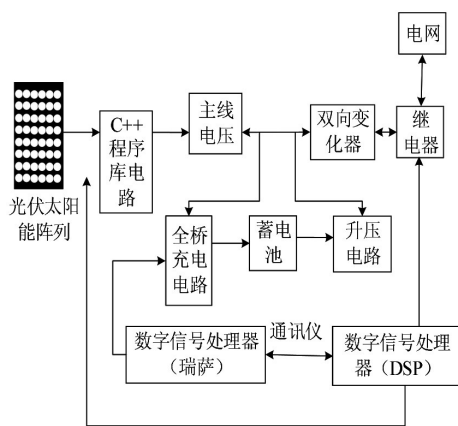


图1 硬件框架结构

光伏并网电路的主电路由两部分组成,第一部分由升压器来实现对光伏板的电能跟踪,第二部分由双向变换器构成,完成主线与电网之间的能量传递,光伏并网复合储能电路如图2所示。

第一部分:光伏并网复合储能自动化规划系统的主电路为升压器电路<sup>[5]</sup>,升压器电路在开关导通的状态下,对电能进行储存,而在开关闭停的状态下,电能会散发,

导致与输入电源能量互相冲突,会提升储能系统不稳定性。在系统功率跟踪的过程中,光伏太阳能板的主线电压全程稳定在420V。

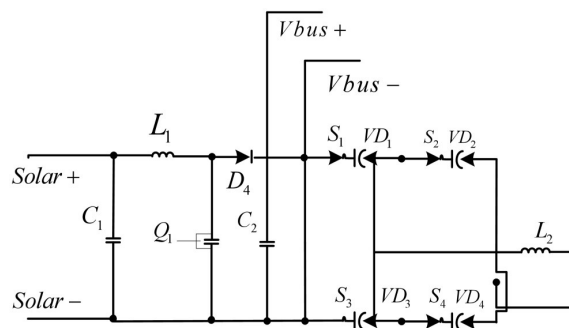


图2 光伏并网复合储能电路

第二部分:双向变换器采用的是脉宽调制与全桥电路,每个桥路都是由一个绝缘栅双极晶体管和反平行的二极管所组成。图2中L表示平衡电流,可以将无用的电能功率去除,平衡电压。当光伏并网或者发生离网的状态时,主线电能会传输到电网终端,全桥电路会发生逆变;当没有光伏输入的状态时,电能从电网终端传输到主线电路<sup>[6]</sup>,最后通过电池管理系统为电池补充能量,此时的全桥完成了整流电路。

### 1.2 系统软件

#### 1.2.1 复合储能自动化规划模型

储能自动化规划的主要目的是降低调峰压力<sup>[7]</sup>,平衡电网负荷,为此,利用电池储能的出力增强系统中的调峰深度,使用负荷系数与峰谷效应系数计算电池储能系统的功率值,计算公式如下:

$$P_{b,t} = \sigma(L_t - \bar{L}) \quad (1)$$

式中, $P_{b,t}$ 代表电池的输出功率,当电池输出功率 $P_{b,t}$ 大于0时,说明此时的电池为存储电能的状态,当电池输出功率 $P_{b,t}$ 小于或者等于0时,说明此时的电池为释放电能的状态; $\sigma$ 代表峰谷效应系数, $L_t$ 代表负荷值偏差, $\bar{L}$ 代表负荷平均值。

基于系统储能效率和输出功率,设置如下目标函数和平衡约束条件。

#### (1) 总成本目标函数

基本储能成本表达式如下:

$$\min I = I_{INV} + I_{LOSS} + I_{DG} + I_{TR} + I_{PUN} \quad (2)$$

式中, $I$ 代表储能系统的总成本, $I_{INV}$ 代表投资总成本, $I_{TR}$ 代表平衡约束条件, $I_{PUN}$ 代表光伏并网功率浮动的补偿成本, $I_{LOSS}$ 代表配电网损耗成本, $I_{DG}$ 代表无功功率成本。

电池容量量与储能的功率,是影响电池与电容器复合储能系统总投资成本的重要因素,引入二者构建总成本目标函数,表达式为:

$$I_{INV} = I_B + I_{SC} \quad (3)$$

$$I_B = (\pi_B^P P_B + \pi_B^E E_B) CRF(y_B) \quad (4)$$

$$I_{SC} = (\pi_{SC}^P P_{SC} + \pi_{SC}^E E_{SC}) CRF(y_{SC}) \quad (5)$$

式中,  $I_B$ 代表电池复合储能系统的总投资,  $I_{SC}$ 代表电容器复合储能系统的总投资,  $\pi_B^P$ 代表电池容量内存,  $\pi_B^E$ 代表电池功率,  $P_B$ 代表电池储能额定功率<sup>[8]</sup>,  $E_B$ 代表电池储能的额定电量,  $CRF(\cdot)$ 代表年限计算函数,  $y_B$ 代表电池的使用年限,  $y_{SC}$ 代表电容器的使用年限。

### (2) 线路损耗目标函数

配电网内的各个线路损耗表达式如下:

$$I_{LOSS} = 365 \times \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{t=1}^2 (\pi_{LOSS,t} P_{LOSS,t} \Delta T_P) \quad (6)$$

式中,  $t$ 代表时间段,  $\pi_{LOSS,t}$ 代表  $t$ 的网损费用,  $l$ 代表输电线路序列数,  $P_{LOSS,t}$ 代表储能系统的网损值<sup>[9]</sup>,  $\Delta T_P$ 代表时间长度,  $N_l$ 代表储能系统的输电线路总数量。

### (3) 无功功率目标函数

光伏发电机在提供无功功率时,会增加总系统的功率损耗,为了解决这一问题,需要计算各个时间段平衡约束条件下无功功率,计算公式如下:

$$I_{DG} = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T (\pi_{DG,t} Q_{DG,t} \Delta T_P) \quad (7)$$

式中,  $N_w$ 代表平衡约束条件下的光伏电源的数量,  $k$ 代表光伏电源个数,  $\pi_{DG,t}$ 代表第  $t$ 时间段无功功率的费用,  $Q_{DG,t}$ 代表第  $t$ 时间段  $k$ 个光伏电源个数的无功功率值。

### (4) 功率补偿能耗目标函数

由于光伏出力的高频浮动,以及并入电网的过程会导致电网稳定性下降,因此,通过功率补偿来抑制高频分量带来的波动,功率补偿表达式如下<sup>[10-11]</sup>:

$$I_{PUN} = \pi_{PUN} P_{pv} T_S \quad (8)$$

式中,  $\pi_{PUN}$ 代表功率补偿费用,  $T_S$ 代表整个补偿周期,  $P_{pv}^{\Delta}$ 代表光伏发电功率差值结果。

### (5) 光伏并网负荷储能平衡约束条件

光伏电源出力平衡约束表达式如下:

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{pv} \leq P_{PV}^{\max} \quad (9)$$

式中,  $P_{pv}$ 代表光伏电源的发电功率,  $P_{PV}^{\min}$ 代表光伏电源的最低发电功率值,  $P_{PV}^{\max}$ 代表光伏电源的最高发电功率值。

电池储能系统的电压平衡约束表达式如下:

$$U_l^{\min} \leq U_l \leq U_l^{\max} \quad (10)$$

式中,  $U_l$ 代表电压值,  $U_l^{\max}$ 代表电压的上限值,  $U_l^{\min}$ 代表电压的下限值。

电池储能系统的运行平衡约束条件如下:

$$E_{B,n} = P_{pv} E_{B,n-1} + T_S U_l (P_{B,n} \beta_{B,C} + \frac{P_{b,t}}{\beta_{B,D}}) \quad (11)$$

$$E_B^{\min} \leq E_{B,n} \leq 1 \quad (12)$$

式中,  $n, n-1$ 都代表运行时刻,  $E_{B,n}$ 代表运行时刻  $n$ 的电池容量值,  $E_{B,n-1}$ 代表运行时刻  $n-1$ 的电池容量值<sup>[12]</sup>,  $\beta_{B,C}$ 代表电池充电能力,  $\beta_{B,D}$ 代表电池放电能力,  $E_B^{\min}$ 代表电池最低容量能耗。

## 1.2.2 光伏复合储能效率规划模型自动化求解

以此获取复合储能系统的入口位置,求解储能效率本体定义模型,得出各个电磁复合储能匹配值,光伏复合储能效率规划模型为:

$$\eta = \frac{W_{TG}}{W_{OM} + W_{SOL}} \times 100\% \quad (13)$$

$$W_{SOL} = Q_{SOL} W_{COL} \quad (14)$$

式中,  $\eta$ 代表主系统的储能效率,  $W_{TG}$ 代表压缩机消耗的电能,  $W_{OM}$ 代表折算能耗,(即太阳能折算的电能),  $W_{SOL}$ 代表太阳能热量大小,  $Q_{SOL}$ 代表太阳能集热效率,  $W_{COL}$ 代表太阳能发电速度。

定义待求解的网格格式优化多目标函数为待优化问题<sup>[15]</sup>,其维度用  $D$ 表示,粒子种群由数量为  $N$ 个粒子组成,第  $m$ 个粒子在第  $k$ 次迭代后的位置和速度表达式为:

$$X_m^k = (x_{m,1}^k, x_{m,2}^k, \dots, x_{m,D}^k) \quad (15)$$

$$V_m^k = (v_{m,1}^k, v_{m,2}^k, \dots, v_{m,D}^k) = X_m^k / Dt \quad (16)$$

经过第  $k$ 次迭代后,第  $m$ 个粒子的最佳位置表达式为:

$$V_m^{rk} = (v_{m,1}^{rk}, v_{m,2}^{rk}, \dots, v_{m,D}^{rk}) \quad (17)$$

计算种群获取的最优位置即为全局最优解,利用复合储能系统节点的绝热装置设备运行状态、等温温度,压缩比例,机械损耗等内容,确定最小总成本  $I_{INV}$ 下的最佳接入位置,获取总成本最低、能耗最优配置、容量值最佳的最优解,求解参与平衡调节的光伏并网复合储能容量状态  $f_p$ ,公式为:

$$f_{N_s} = I_{LOSS} S_{o,i,t} - I_{DG} + I_{PUN} / V_m^{rk} E_{B,n} P_{o,is,max} \quad (18)$$

式中:  $P_{o,is,max}$ 表示复合储能系统连接线路的最大有功传输容量;  $N_s$ 表示连接节点的总数量。

确认满足相关目标函数后,确定最佳储能规划结果,可有效确认分布式光伏的可接入容量,提高电能质量。

## 2 系统性能测试

表1 运行工况参数设置

工况参数	设置值
电池储能容量	180 kW/h
光照强度	1 000 W/m <sup>2</sup>
超级电容容量	20 kW/h
并网光伏装机容量	860 kWp
周围环境温度	T=25℃
功率波动区域	-90 kW/min至90 kW/min
PCS容量	360 kW

通过(power systems computer aided design,PSCAD)平台,建立整体储能系统模型,深入研究复合储能自动规划系统性能,具体系统运行工况分析如表1所示。

选择时间为早8点到15点的PV发电功率曲线进行分析,对储能电池容量和计量容量按照1:1的比例方法进行匹配,超级电容的储能容量和计量容量按照1:10的比例方法进行匹配。

原始并网功率曲线与使用所提系统规划后的PV的功率曲线对比如图3所示。

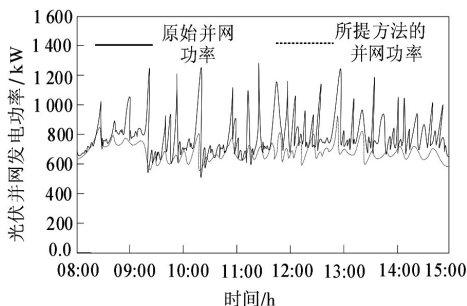


图3 原始与系统规划后并网功率曲线对比

通过图3的对比曲线可得知,原始并网功率曲线非常不稳定,说明电网中电能质量低下。与原始并网功率相比,通过使用所提系统规划后,并网功率曲线明显变得平滑,且并网功率的走势对比之前也相对稳定许多。

为了更清晰地观察所提系统对并网存储规划的有效性。对并网功率的波动量进行分析研究,设定80 kW/min至-80 kW/min为标准并网功率波动量范围。原始并网功率波动量与使用所提系统规划后的PV功率波动量的对比如图4所示。

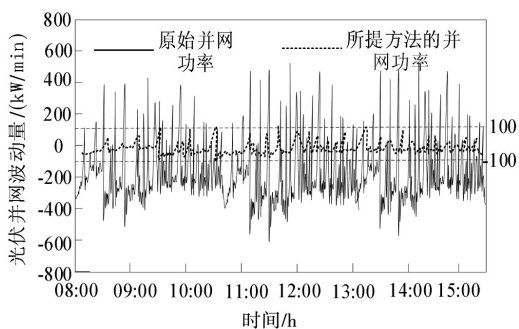


图4 原始与系统规划后并网功率波动量对比

通过图4可得知,原始并网功率波动量已经严重地超出了标准功率波动量范围,而所提系统将并网功率波动量有效地控制在了80 kW/min至-80 kW/min标准范围内,说明所提系统可以有效地稳定并网功率。

证明所提系统是否有效提高电网中电能质量,与电压波动抑制方法、无源滑模控制方法,对蓄电池的储能荷电状态进行对比研究,图5为三种方法的电池的储能荷电状态对比结果。

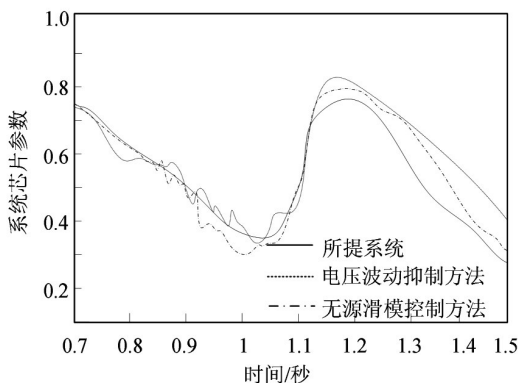


图5 三种方法的电池的储能荷电状态对比结果

通过图5的储能荷电状态对比结果可得知,使用电压波动控制方法的储能荷电状态有严重的充放电转换,使用无源滑模控制方法也存在多次的充放电转换,反观使用所提系统,蓄电池在1秒范围一直放电,没有充放电转换,说明使用所提系统减少了电池的充电次数,提高了电网中电能质量,且延长了储能系统的使用年限。

为了更深度地验证所提方法的光伏并网复合储能自动规划能力,使用所提系统与以上两种方法在进行自动规划耗时对比,规划运行耗时对比结果如图6所示。

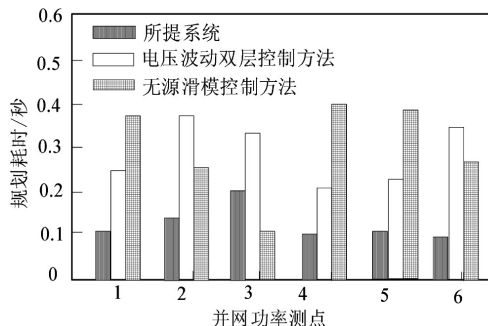


图6 光伏并网复合储能自动化规划耗时对比图

通过图6的复合储能自动规划时间对比结果可得知,所提系统的规划运行时间在0.09 s-0.15 s之间,明显低于电压波动双层控制方法与无源滑模控制方法的规划耗时,说明所提系统可以在最短的时间范围内解决平抑并网功率波动问题,降低了电池的损耗,规划效率极高。

### 3 结束语

复合储能系统作为一种新型电力系统储能技术,可有效解决这一问题,复合储能还具备良好的动态响应特性,能够在电网发生故障时自动、快速地向电网输送电能,维持区域用电稳定,因此,提出一种平衡约束下的光伏并网复合储能自动规划系统。系统硬件部分使用升压器电路与双向变换器组成的光伏并网主电路;系统软件部分凭借电能密度高与系统调峰的优化,提高系统的安全系数;设置系统定容等平衡约束条件,实现储能自动规

划,可以有效地平抑并网功率波动问题,增强了电网中电能质量,解决了储能系统的损耗问题。

### 参考文献:

- [1] Liang L, Abdulkareem S S, Rezvani A, et al. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty[J]. The Journal of Energy Storage, 2020, 28(25): 101306.
- [2] 孙阔, 张雪菲, 迟福建, 等. 光伏电站复合储能电压波动抑制双层优化控制方法[J]. 可再生能源, 2022, 40(3): 402-409.
- [3] 季宇, 苏剑, 丁保迪, 等. 直流微电网储能系统的无源-滑模复合控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 63-70.
- [4] 李丞宸, 贺新, 陶飞跃, 等. 一种压缩空气与抽水蓄能耦合的新型储能系统及热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(4): 40-49, 71.
- [5] 郭爱军, 鞠晨. 基于深度信念网络的模拟电路故障诊断[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(2): 76-80.
- [6] 程玉涛, 李宁, 李海波. 基于加密算法的电力物联网电能质量数据安全传输方法[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(7): 87-90.
- [7] 武艺, 姚良忠, 廖思阳, 等. 一种基于改进K-means++算法的分布式光储聚合调峰方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3923-3931

[8] 石俊, 彭辉, 蔡苗苗, 等. 应用于户用储能系统的电池功率自适应下垂控制[J]. 电子器件, 2021, 44(1): 141-144.

[9] 王瑞, 赵莉华, 胡帅. 基于数据关联挖掘的三相不平衡配电系统网损快速估计方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 202-206.

[10] 田艳军, 彭飞, 王毅, 等. DC/AC 并网变流器系统功率双向流动下稳定性差异分析与功率补偿控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3303-3316.

[11] 肖艳红, 欧家祥, 黄宇, 等. 配电网无功补偿装置功率控制技术[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(6): 26-29.

[12] 薛建德, 王海龙, 李盼盼, 等. 基于ST7单片机的储能供电容量优化控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(5): 27-30.

作者简介: 杨欣(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电网规划设计。

(上接第102页)

行识别, 分析所提模型能否正确识别出异常用电用户, 识别结果如表2所示。根据表2可知, 通过所提模型可精准识别出存在异常用电行为的用户, 且对不同类别的用户均能够精准识别, 识别的结果与实际情况完全一致, 未出现识别错误现象, 因此, 本文所提模型具备较高的异常用电行为识别能力。

### 3 结束语

本文研究基于电力大数据挖掘的异常用电用户识别模型, 挖掘用户大数据用电行为, 并从用户的用电行为中提取时序特征, 之后采用分类识别模型实现正常与异常用电用户的识别。同时利用实验验证本文模型的应用效果, 获取该模型应用后对异常用电用户的识别能力。在未来研究过程中, 可以此为基础, 继续优化设计识别方法, 使异常用电用户的具体情况得到精准识别。

### 参考文献:

- [1] 励力帆, 虞伟, 桑清城. 基于数据挖掘的电力系统故障自动诊断方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2): 228-231.
- [2] 胡福金, 梁锦来. 电力系统二次设备缺陷数据挖掘与分析方法研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(12): 281-286.
- [3] 姜丹, 梁春燕, 吴军英, 等. 基于大数据分析的电力运行数据异常检测示警方法[J]. 中国测试, 2020, 46(7): 18-23.
- [4] 王建元, 张少锋. 基于线性判别分析和密度峰值聚类的异常用电模式检测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 87-98.

[5] 刘宜, 唐悦, 卢继哲, 等. 基于概率预测的用电采集终端电量异常在线实时识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 99-106.

[6] 李清. 基于改进PSO-PFCM聚类算法的电力大数据异常检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 161-166.

[7] 万磊, 陈成, 黄文杰, 等. 基于BRB和LSTM网络的电力大数据用电异常检测方法[J]. 电力建设, 2021, 42(8): 38-45.

[8] 余顺坤, 闫泓序, 杜诗悦, 等. 基于SC-RS的我国工业电力用户价值画像模型研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(3): 106-116.

[9] 陶鹏, 张洋瑞, 李梦宇, 等. 基于Graph模型的海量用电数据并行聚类分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 144-151.

[10] 林涵, 郝正航, 郭家鹏, 等. 基于TCA-CNN-LSTM的短期负荷预测研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 73-80.

[11] 徐瑶, 李栓, 韩英华. 基于CNN-GS-SVM的用户异常用电行为检测[J]. 控制工程, 2021, 28(10): 1989-1997.

[12] 张毅, 郑剑, 牛佳乐, 等. 前台电力数据逻辑结构规则自动提取方法设计以及实现[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(11): 91-94.

[13] 冉哲, 李英娜, 刘爱莲. 基于RFE+Cat Boost模型的异常用电检测方法研究[J]. 电视技术, 2021, 45(8): 121-126, 132.

[14] 陈芮, 杨新, 罗珺方, 等. 基于GANs-LightGBM的序贯三支异常用户检测研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(5): 816-825.

作者简介: 郑真(1990-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电力系统及其自动化。