

# 基于电化学储能系统的高精度功率识别与预测系统的设计与实现

李润源 赵钢超 糜膺

(上海勘测设计研究院有限公司 上海市 200335)

**摘要:** 本篇论文的研究目标是设计和实现一种基于电化学储能系统的高精度功率识别与预测系统。当前, 随着全球对能源的需求不断攀升, 以及可再生能源的蓬勃发展, 电化学储能系统已成为备受关注和广泛应用的重要能源储存方式。然而, 在实际应用中, 准确的功率识别和预测对于储能系统的控制和优化具有重要的意义。因此, 本论文提出了一种基于电化学储能系统的高精度功率识别与预测系统的设计 and 实现。该系统通过对电化学储能系统进行建模和分析, 提取系统关键参数, 利用先进的算法和技术进行功率识别和预测。

**关键词:** 电化学储能系统; 高精度功率识别; 预测系统; 设计与实现

Design and implementation of high-precision power identification and prediction system based on electrochemical energy storage system  
Li Runyuan, Zhao Gangchao, Mi Ying

Shanghai Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200335

**Abstract:** The research objective of this paper is to design and implement a high-precision power identification and prediction system based on electrochemical energy storage system. At present, with the continuous growth of energy demand and the rapid development of renewable energy, electrochemical energy storage system as an important energy storage method has been widely concerned and applied. However, in practical applications, accurate power identification and prediction is of great significance for the control and optimization of energy storage systems. Therefore, this paper presents the design and implementation of a high-precision power identification and prediction system based on electrochemical energy storage system. By modeling and analyzing the electrochemical energy storage system, the key parameters of the system are extracted, and the power is identified and predicted by using advanced algorithms and technologies.

**Key words:** electrochemical energy storage system; High precision power identification; Prediction system; Design and implementation

**引言:** 随着能源需求的不断增长和可再生能源的快速发展, 电化学储能系统作为一种重要的能源储存方式, 备受瞩目并广泛应用于各行各业。目前, 电化学储能系统已经被应用于电动汽车、微电网和可再生能源的集成等领域。然而, 电化学储能系统在实际应用中面临着一些挑战, 其中之一是对其功率进行准确的识别与预测。准确的功率识别和预测对于储能系统的控制和优化具有重要的意义。

## 一、电化学储能系统概述

电化学储能系统利用化学反应将电能转化为化学能, 并将其储存在系统中, 随后根据需要将其转化为电能并释放。由于它具有能量密度高、环境友好等优点, 被认为是一种理想的绿色能源存储技术。电化学储能系统由电池组、电池管理系统(BMS)、电力电子变换器和控制系统构成, 这些组件相互协作, 共同构成了一个完整的电能储存系统。电池组是储能系统的核心部分, BMS负责监控和管理电池组的状态和性能, 电力电子变换器实现电能的转换和调节, 控制系统实现对储能系统的控制和调度<sup>[1]</sup>。以一座容量为一兆瓦的储能电站为例, 其拓扑结构如图1所示, 为了保证电化学储能系统能够长期稳定工作, 必须对充放电速率进行合理控制。通常情况下, 每个电池模的构成由四串和十六串电池。针对BMS不同单元模块, 飞凌内嵌嵌入式ARM核心板为高适配选择, 可为用户提供灵活快速的构建稳定BMS系统的帮助。

## 二、功率识别与预测方法

### (一) 超标功率幅度特征

在确定偏差考核标准后, 我们准确计算并分析超标功率幅度特点。其次根据电网运行实际提出了计及系统负荷波动和峰谷差变化时的修正方法<sup>[4]</sup>。在遵循中国电网历年按各调度时段平均 $\delta = 15 \text{ min}$ 计算考核电量的基础上, 定义了WPF实发功率和计划曲线超标功率幅度相对应的时段指标, 如公式(1)和(2):

$$\Delta P_t = \begin{cases} \Delta P_t^{(+)} = P_t^r - P_t^{f,\max} & P_t^r > P_t^{f,\max} \\ \Delta P_t^{(-)} = P_t^r - P_t^{f,\min} & P_t^r > P_t^{f,\min} \\ 0 & P_t^{f,\min} \leq P_t^r \leq P_t^{f,\max} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} P_t^{f,\max} = (1 + R_{up})P_t^r \\ P_t^{f,\min} = (1 - R_{dn})P_t^r \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)、(2)中:

$\Delta P_t$  ——WPF在时段 $t$ 的平均超标功率;

上标(+)、(-) ——分别对应正、负成分;

$P_t^r$  ——时段 $t$ 的计划功率;

$R_{up}$  ——正偏差考核标准系数 ( $R_{up} > 0$ );

$R_{dn}$  ——负偏差考核标准系数 ( $R_{dn} \in [0, 1]$ );

$P_t^{f,\max}$  ——时段 $t$ 的实发功率上限;

$P_t^{f,\min}$  ——时段 $t$ 的实发功率下限。

根据定义, 时间段 $t$ 内发生了超出标准的事件, 其超出程度可以通过与 $\Delta P_t$ 的偏离程度来反映。当 $\Delta P_t \neq 0$ 时, 表示在该时间段内发生了一次超标事件。本文提出的基于时间序列分析技术的方法, 对超标事件进行识别。在此基础上, 可以深入研究某一历史数据统计窗口中超标事件的发生频率和相应幅度概率的分布规律, 可以得出更为精准的结论。

假设WPF统计窗口的历史数据所记录的异常事件被归纳为一个集合, 其中包含了正负超标事件的子集 $O^{(+)}$ 和 $O^{(-)}$  ( $O^{(+)} \cap O^{(-)} = \emptyset$ ),

同时, 总超标数量为 $N_o$ 。通过对超标事件比和超标电量比进行明确的划分, 我们能够区分它们之间的差异如式(3)所示:

$$\begin{cases} R_{cv} = \frac{N_o}{N_d N_t} \\ R_{em} = \frac{\left( \sum_{t \in O^{(+)}} \Delta P_t^{(+)} + \sum_{t \in O^{(-)}} -\Delta P_t^{(-)} \right) \Delta t}{E_{em}} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$E_{qua} = \left( \sum_{t \in O^{(+)}} P_t^{f,max} + \sum_{t \in O^{(-)}} P_t^{f,min} + \sum_{t \in O} P_t^f \right) \Delta t \quad (4)$$

在式中 (3) 中:

$N_d$  ——统计窗口的天数;

$N_t$  ——为每日时段数 (取 96)

$R_{ev}$  ——超标事件数占全部时段的比重;

$R_{en}$  ——超标电量占合格计划电量  $E_{qua}$  的比重。

对于不同的功率超标幅度, 我们需要对事件子集合  $(\Delta P)$  进行相应的处理, 其所占据的密度函数为  $f_n(\Delta P)$ , 该函数如式 (5) 所示, 且存在一系列具体的限制条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_n(\Delta P) d\Delta P = 1 \quad (5)$$

所考虑到的方向性可以分别得到  $O^{(+)}$  与  $O^{(-)}$  中正负超标功率振幅期望值指数  $\Delta P_{sta}^{(+)}$  与  $\Delta P_{sta}^{(-)}$  以及两者振幅差异指数  $\Delta P_{sta}$  如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} \Delta P_{sta}^{(+)} = \frac{1}{A_{bas}} \int_0^{+\infty} f_n(\Delta P) \Delta P d\Delta P \\ \Delta P_{sta}^{(-)} = \frac{1}{A_{bas}} \int_{-\infty}^0 f_n(\Delta P) \Delta P d\Delta P \\ \Delta P_{sta} = \Delta P_{sta}^{(+)} - \Delta P_{sta}^{(-)} \end{cases} \quad (6)$$

在式 (6) 中:  $A_{sba}$  —— WPF 额定 (基准) 容量。

若  $R_{ev}$ 、 $R_{en}$  未达到 WPF 设定的预期阈值, 所以, EESS 不需要考虑到分配; WPF 发电曲线偏离度与 EESS 分配容量需求正相关, 即  $R_{ev}$  和  $R_{en}$  的值均高于预期阈值, 而  $\Delta P_{sta}$  的值则越大, 这表明 EESS 的配置容量要求也越高。

(二) 控制精度

在规定的功率下, 储能系统进行充电, 以满足结束时的电压、电流或温度条件。如果要继续保持运行状态, 则需要进行能量转换或释放。在额定功率条件下, 储能系统具备放电的能力, 并在结束时满足电压、电流或温度等条件。表明电力系统中储能系统的设置非常关键, 这是因为其能够改善电能质量、提高系统经济性与可靠性以达到更加有效的目的。在额定功率放电状态下, 储能系统所输出的能量与在同一周期内额定功率充电状态下的输入能量之比, 以百分数的形式呈现。在稳定的储能系统工作状态下, 输出功率的稳定性是通过储能系统设定值进行调整后得出的计算式 (7) 所决定的:

$$\delta P = [(P_m - P_s) / P_s] \times 100\% \quad (7)$$

在式 (7) 中:

$\delta P$  ——功率控制精度;

$P_m$  ——功率测量值;

$P_s$  ——功率设定值。

三、频率响应测试

符合 GB2894 储能系统标识, 外观检查无异常。在储能系统测试中, 测试设备和被测设备必须保持距离, 并且要确保有足够大的电压值。达到 GB50057、DL/T620 和 DL/T621 等标准要求的储能系统防雷接地装置应具备的。储能系统在接入电力系统时, 必须进行接地检测和防护。为了保证储能系统接入点设备绝缘强度满足 GB50150 要求, 接入点各电路交直流电缆绝缘满足 GB/T12706.1 及 GB/T12706.2 标准, 需要对其进行绝缘处理。基于此, 还要测量储能系统的交流阻抗, 根据检测结果来判断是短路故障还是漏电, 保证储能系统的正常工作。图 2 所示为储能系

统互联接口对频率, 电压响应测试。以此为基础, 对影响储能系统中故障电流幅度的大小和分布的各因素进行了分析和研究, 并进行了全面对比。电力系统中储能系统的设置非常关键, 这是因为其能够改善电能质量、提高系统经济性与可靠性以达到更加有效的目的。为了模拟电网频率的变化, 我们需要使用模拟电网装置进行试验。

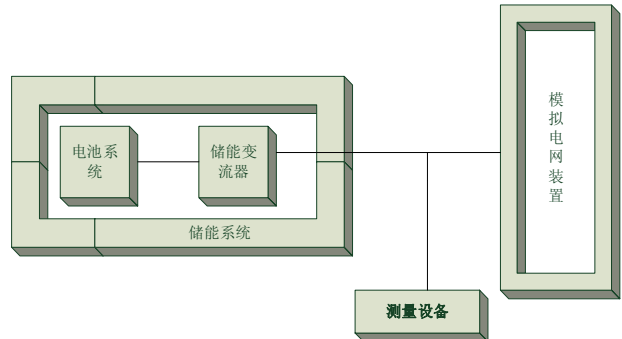


图 2 频率/电压响应测试

(一) 测试方法

第一步, 将储能系统与模拟电网设备相连, 在进行下一步操作时。第二步, 需要将储能系统置于充电状态以确保其正常运行; 第三步, 对模拟电网装置的频率进行调整, 使其处于 49.52Hz~50.18Hz 的范围内, 并在此范围内合理选择若干个关键点, 其中至少有三个关键点。每个点应连续工作至少 5 分钟, 不得跳闸, 否则应停止测试 (将储能系统设为放电状态运行, 重复步骤 3 的操作)。

(二) 经 380V 电压级别与电网连接储能系统

储能系统充电状态下工作时, 为模拟电网装置频率, 需在 49.3Hz~49.5Hz 及 50.2Hz~50.5Hz 范围内调整, 在该范围内要合理选取多个点, 包括至少 3 个临界点, 且每个点须连续工作不低于 4 秒钟; 故障发生后, 由控制开关切断储能系统和负荷的联系, 让负荷退出运行, 并使相应的断路器在合闸过程中失去电力供应。记录能量储存系统的运行状态, 包括其相应的动作频率和时间信息, 保证系统能连续稳定工作; 通过对电压电流波形的分析, 探究节点之间的能量交换关系和功率流向, 从而推断该区域的负荷状况。通过对蓄电池进行充电与放电的交替操作来达到均衡负载的目的。设定储能系统处于放电状态下运行, 并重复执行上述步骤。

四、功率控制能力测试

(一) 功率控制和功率因数测试

考察储能系统的调节能力, 包括有功功率、无功功率和功率因数, 如图 3 所示。将其接入模拟电网装置 (公共电网), 并对所有参数进行调整, 使其恢复到正常工作状态。

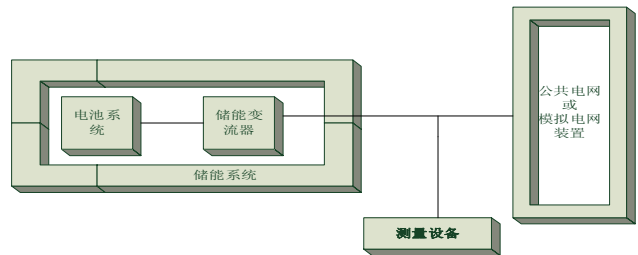


图 3 功率控制和功率因数测试

(二) 功率调节能力测试

功率调节能力的步骤如下:

(1) 设定储能系统有功功率为 0, 逐级调节有功功率设定值到

$-0.2P_n$ 、 $0.2P_n$ 、 $-0.5P_n$ 、 $0.5P_n$ 、 $-0.7P_n$ 、 $0.7P_n$ 、 $-P_n$ 。每个功率点至少维持 30 秒; 在上述时间间隔中, 从所述一个或多个采样点获取与所述采样时刻相对应的有功功率值。执行时序功率测量并对储能系统并网功率输出进行评估; 每记录 0.2 秒以上, 实际测量曲线中有功功率的平均值为一点;

(下转第 98 页)

(上接第 91 页)

(2) 设置储能系统有功功率为 1, 逐级调节有功功率设定值至  $-P_n$ 、 $0.7P_n$ 、 $-0.7P_n$ 、 $0.5P_n$ 、 $-0.5P_n$ 、 $0.2P_n$ 、 $-0.2P_n$ 。重复 (1)。

(3) 根据第二个 15 秒的有功功率变化情况, 推算出 15 秒的有功功率平均值;

(4) 推导出 (1) 至 (2) 各个测点的有功功率控制精度、响应时间和调节时间的数值。在该时间间隔内, 从一个或多个采样点处获得对应于该采样时刻的有功功率值。功率设定值的控制精度如式(8):

$$\Delta P\% = \frac{P_{set} - P_{meas}}{P_{set}} \times 100\% \quad (8)$$

在式 (8) 中:

$P_{set}$  —— 设定的有功功率值;

$P_{meas}$  —— 实际测量每次阶跃后第二个 15 秒有功功率的平均值;

$\Delta P\%$  —— 功率设定值控制精度。

(三) 功率识别模型的训练

使用历史数据对模型进行训练, 优化模型参数, 以提高功率预测的准确性。将功率识别和预测模型与数据采集系统进行集成, 搭建完整的高精度功率识别与预测系统。确保系统能够实时采集数据、进行特征提取、进行功率识别和预测, 并输出准确的功率识别和预测结果。

**结论:**

综上所述, 随着能源需求的不断增长和可再生能源的快速发展, 电化学储能系统作为一种重要的能源储存方式得到了广泛的关注和应用。

然而, 在实际应用中, 准确地功率识别和预测对于储能系统的控制和优化具有重要的意义。因此, 本文提出了一种基于电化学储能系统的高精度功率识别与预测系统, 该系统通过对电化学储能系统进行建模和分析, 提取系统关键参数, 利用先进的算法和技术进行功率识别和预测。通过采集电化学储能系统运行过程中的关键数据, 利用机器学习和神经网络等方法进行数据分析和处理, 提取出系统的关键参数。同时, 针对不同的应用场景和需求, 设计并实现了适应性强的功率识别与预测算法。

**参考文献:**

[1] 胡旦, 杨智皋, 顾正建. 电化学储能系统接入电网现场检测方案[J]. 电池工业, 2022, 26(3): 126-131.

[2] 乐源, 张贺. 光储一体化项目电化学储能系统方案设计研究[J]. 电力设备管理, 2023(5): 111-113.

[3] 闫崇, 陈翔, 张强. 电化学储能系统中的电位智能传感与应用[J]. 中国科学基金, 2023, 37(2): 218-229.

[4] 应磊鸣, 郝晓琳. 标准助力电化学储能系统消防安全规范发展[J]. 质量与认证, 2023(5): 38-39.

作者简介: 第一作者: 李润源 (1989.10.29 - ), 男, 汉, 江西瑞金, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 新能源及储能。

第二作者: 赵钢超 (1988.08.03 - ), 男, 汉, 浙江金华, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 电力系统。

第三作者: 糜膺 (1981.11.30 - ), 男, 汉, 陕西, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 电气工程。