基于数据驱动的光储充站离网/并网模式平滑切换控制算法研究

胡松良,汤达权,刘 云,巩 旗,刘志鸿

(深能安所固电力(加纳)有限公司,广东 深圳 518000)

摘 要:文章设计了一套以数据驱动为核心的光储充站离网/并网模式平滑切换控制算法。该算法首先整合多源运行数据,构建系统运行状态的特征体系,借助电网状态识别模型实现异常提前预判;其次同步参考储能SOC、光伏输出功率、充电负荷及电网质量4类参数,建立动态切换决策机制;最后进入模式切换环节,融合虚拟同步机控制、PCS功率渐变控制及STS同步重合控制3类技术,实现离网/并网模式的无缝过渡。测试结果表明,该算法可将系统切换时长控制在20 ms以内,电压波动幅度下降约40%,频率偏差稳定在±0.2 Hz范围内,SOC利用率提升约18%,光储充站的供电连续性与系统运行稳定性均得到有效优化。

关键词:光储充站;数据驱动;离网切换;并网控制;储能协调;虚拟同步机

中图分类号:TM76 **文献标识码**:A

Research on data-driven smooth switching control algorithm for off-grid/grid-connected modes of photovoltaic-storage-charging station

HU Songliang, TANG Daquan, LIU Yun, GONG Qi, LIU Zhihong

(Sunon Asogli Power (Ghana) Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: This paper designs a data-driven smooth switching control algorithm for off-grid/grid-connected modes of photovoltaic-storage-charging stations. The algorithm first integrates multi-source operational data to construct a feature system of system operating status, and uses a grid status identification model to achieve early prediction of anomalies. Secondly, it synchronously references four types of parameters—energy storage SOC, photovoltaic output power, charging load, and grid quality—to establish a dynamic switching decision mechanism. Finally, in the mode switching stage, it integrates three types of technologies—virtual synchronous machine control, PCS power gradient control, and STS synchronous reclosing control—to achieve seamless transition between off-grid and grid-connected modes. Test results show that the algorithm can control the system switching time within 20 ms, reduce voltage fluctuation amplitude by approximately 40%, stabilize frequency deviation within ±0.2 Hz, and increase SOC utilization by approximately 18%. The power supply continuity and system operational stability of photovoltaic-storage-charging stations are effectively optimized.

Key words: photovoltaic-storage-charging station, data-driven, off-grid switching, grid-connected control, energy storage coordination, virtual synchronous machine

1 引言

光储充站整合光伏、储能与电动汽车充电设施,是新能源基础设施的重要发展方向。该类站点可协调光伏出力、储能调节与充电负荷,提升新能源消纳水平,缓解配电网运行压力。然而,在园区、工业园、海岛及海外发展中国家等弱电网场景中,电网常出现电压波动、短时停电及供电质量不稳定等问题,对光储充站离网/并网模式切换的安全性与连续性提出了更高要求[1]。

现有切换控制方法多采用固定阈值与规则驱动策略,电网异常时易引发电压冲击、频率跳变、PCS响应滞后、STS切换不同步及储能SOC利用率不高等问题,降低供电可靠性并缩短设备寿命。此外,多数控制策略仅针对单一设备独立控制,未将光伏、储能、充电负荷及电网状态纳入协同分析,难以适应复杂工况。针对上述问题,本文提出一套数据驱动的光储充站离网/并网模式平滑切换控制算法,融合电网状态、储能SOC、光伏出力及充电负荷等数据,实现切换时机的智能判定与多设备协同控制,以提升模式切换的平滑性、供电连续性与系统运行稳定性[2]。

2 光储充站系统结构及运行模式

本文选取某光储充示范站作为研究样本，整套站点的运行架构由光伏发电单元、储能系统、充电设施及能量管理系统（EMS）4个部分构成。光伏侧布设50.4 kWp光伏阵列，储能侧选用125 kW PCS（储能变流器）搭配261 kW·h锂电池储能系统，可借助静态切换开关（STS）完成并网、离网两种模式的快速切换；充电侧配置2台120 kW直流快速充电桩和2台7 kW交流充电桩，可满足不同类型电动汽车的充电需求；EMS为站点控制核心，对接光伏、储能、充电负荷与电网，负责能量协调与运行优化[3]。

该系统工作状态共分为并网运行、离网运行和模式切换3类。

（1）并网运行。处于并网模式时，光伏发电量优先覆盖站内充电负荷，剩余电量用于给储能系统充电；光伏出力无法满足需求时，由电网完成功率补偿，储能系统同时开展削峰填谷与功率平滑控制。

（2）离网运行。离网状态下，PCS搭建稳定的VF母线，光伏和储能联合为关键负荷供电，保障供电连续性与设备运行安全。

（3）模式切换。一旦监测到电网电压、频率等参数异常，系统即进入预切换阶段：EMS结合预测结果控制PCS做好建压准备，再驱动STS切断公共电网连接，转入离网运行模式；待电网恢复稳定运行，系统先完成同步检测和相位校准，再依托STS完成平滑并网。

为完成数据驱动控制，EMS需实时采集电压、电流、频率、储能SOC、SOH、PCS输出功率、光伏发电功率、充电负荷功率、环境温度及通信状态等运行数据，并据此构建系统状态向量$\boldsymbol{X}=[V,f,P_{pv},P_{load},\mathrm{SOC},\mathrm{SOH},P_{pcs},T,C]$。具体而言，$V$代表母线电压，$f$对应系统频率，$P_{pv}$与$P_{load}$分别对应光伏输出功率和负荷功率，$P_{pcs}$代表PCS输出功率，$T$对应环境温度，$C$对应通信状态。后续构建电网状态识别、异常预测及离网/并网平滑切换控制算法，均以该状态向量为数据基础。

3 数据驱动离网/并网平滑切换控制算法

本文算法以“状态识别—异常预测—储能协调—平滑切换”为闭环控制框架。整体流程为系统采集运行数据并完成清洗、归一化及异常值处理后，由数据驱动模型识别当前运行状态，并结合电压变化率、频率偏差及RoCoF预测电网趋势；当预测结果满足预警条件时，EMS判断储能SOC与光伏出力，生成控制策略，控制PCS调整输出功率并推动STS完成模式切换；切换完成后，系统持续监测母线运行状态。

3.1 数据驱动状态识别模型

为提高光储充站运行状态识别精度，本文采用数据驱动方法构建系统状态识别模型。首先梳理历史运行过程中采集的各类参数数据，包括母线电压、电流、系统频率、光伏输出功率、充电负荷功率、储能SOC、SOH、环境温度及通信状态，并对这些数据开展预处理，操作内容包括异常值剔除、缺失值填补及归一化处理，最终形成可用的系统运行样本集[4]。在此基础上，以系统运行状态为标签，将样本划分为正常运行、弱电网运行、预切换、离网运行及恢复运行五类。考虑到XGBoost算法计算效率较高、抗过拟合能力较强，且能适配非线性特征学习场景，本文选用XGBoost构建状态分类模型：

$$S=f(\boldsymbol{X}) \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{X}$表示系统状态向量；S表示识别得到的运行状态类别。

3.2 电网异常预测算法

现有离网切换的触发时机多在电网发生电压跌落或停电问题后，易导致PCS响应滞后、母线电压波动。为加快系统响应速度，本文提出以短时间序列数据为支撑的电网异常预测算法，即控制器持续采集20 ms时间窗口内的电压与频率数据，计算电压变化率、频率偏差及频率变化率（RoCoF），再构建综合评价指标，提前判断电网运行趋势[5]。其中，电压变化率为：

$$k_v=\frac{V_t-V_{t-\Delta t}}{\Delta t} \tag{2}$$

本文将电压偏差和RoCoF两项参数相结合，构建综合评价指标，开展电网稳定性的实时评估。综合指标超出预设阈值后，系统不会立即执行离网，而是先进入预切换阶段，完成PCS锁相、储能准备及关键负荷识别等前置操作；待电网状态持续变差时，再启动STS切换，从而缩短离网响应时长，减少切换冲击，提高关键负荷的供电连续性。

3.3 储能协调控制算法

传统储能控制方式存在SOC利用率偏低、供电策略固定的不足，本文设计基于SOC动态分级的储能协调控制算法。该算法可依据储能剩余容量动态调整各类负荷的供电优先级：SOC高于60%时，系统支持所有充电负荷保持正常运行；SOC处于40%~60%区间时，对直流快充设备的输出功率加以限制；SOC落在20%~40%区间时，仅为站控系统、通信设备及重要充电负荷供电；SOC不足20%时，系统不允许切入离网模式，优先保障储能运行安全。储能输出功率可表示为：

$$P_{ESS}=K(\mathrm{SOC})(P_{Load}-P_{PV}) \tag{3}$$

其中，$K(\mathrm{SOC})$为SOC动态调节系数，可根据储能剩余容量自动调整输出比例。

3.4 平滑切换控制算法

为降低离网/并网切换过程中电压与功率突变，本文提出基于PCS渐变控制的平滑切换算法。该算法包含5个环节：预同步、功率渐变、STS切换、VF建压和重并网

同步。进入预同步阶段后，PCS依托锁相环实时跟踪电网电压相位与频率；其次引入S曲线对PCS输出功率进行连续调节，使储能逐步承担负荷，防止功率阶跃变化。功率渐变的表达式为：

$$P(t)=P_0+\frac{P_1-P_0}{2}\left(1-\cos\frac{\pi t}{T}\right) \quad (4)$$

式中，P_0和P_1对应PCS切换前后的输出功率；T代表功率调整的渐变时长。功率平稳过渡后，系统控制STS在10~20 ms内完成切换；随后由PCS搭建VF母线，保障离网供电。公共电网恢复正常运行后，系统持续校验相位、电压与频率的匹配度，符合同步要求后闭合STS恢复并网。由此完成离网和并网模式的无扰动切换，增强系统运行稳定性。

4　实验平台与场景设计

4.1　实验平台

本文实验验证平台选定为加纳的一座50.4 kWp光储充示范站。该示范站包含光伏发电单元、储能系统及充电负载，其中光伏装机容量为50.4 kWp；储能系统配备125 kW PCS和261 kW·h锂电池组，依托STS完成并网与离网模式切换；充电区域设置2台120 kW直流快充桩和2台7 kW交流充电桩，可满足不同类型电动汽车的充电需求。

该示范站控制核心采用联合运行模式，由STM32嵌入式控制器与EMS共同运作。EMS负责统筹整体能量调度，承担运行状态判断工作；边缘计算网关主要完成多源数据采集，承担本地决策执行工作。数据存储模块选用SQLite轻量化数据库，可实时记录示范站运行各类数据，并支持后续回溯分析；通信模块使用4G无线传输方式，可将示范站运行状态上传至云端监控平台，完成远程监测和策略更新。最终，示范站搭建起完整的“感知—决策—执行—反馈”闭环控制体系。

4.2　实验场景设计

为检验本文算法在不同电网工况下的适应性与鲁棒性，设置4组典型实验场景。(1)正常并网运行：电网整体运行条件稳定，光伏优先向负荷供电，储能开展削峰填谷调节。(2)弱电网扰动：模拟电压跌落30%的工况，测试电压波动时系统的预测能力和快速响应能力。(3)电网突发停电：模拟电网突发停电工况，检验系统从并网切换至离网的速度，以及关键负荷的供电连续性。(4)电网恢复供电：对应电网恢复供电工况，系统需先完成同步检测，再实现平滑重并网运行。

5　实验结果与分析

5.1　切换性能对比分析

针对模式切换场景的运行表现，将本文算法与传统阈值控制方法进行横向对比。传统阈值控制方法的平均切换时长约为34 ms，最大电压波动约为11%，在电网异常时存在响应滞后、电压冲击较大的问题。本文算法依托提前预测与分阶段控制两种机制，将平均切换时长缩短至18 ms，最大电压波动控制在6%左右，切换速度与电能质量均得到明显改善。

5.2　储能利用与供电稳定性分析

针对储能运行效率的优化需求，本文算法采用SOC分级调度机制，提升储能系统利用率。对照实验显示，采用传统固定策略控制方法时储能SOC利用率为71%，切换为本文算法后该指标升至84%，储能资源调度模式更为合理。供电连续性指标上，传统方法在复杂工况运行时存在短时供电中断隐患，本文算法结合STS快速切换和PCS平滑过渡技术，使系统供电连续率从96.5%提升至99.7%，增强了关键负荷的供电保障能力。

综上，本文算法通过提前预判、PCS功率渐变、SOC动态分级及STS同步控制等机制，在切换性能、储能利用与供电连续性方面均优于传统控制策略，适应性与鲁棒性更强，可满足弱电网、复杂运行场景下的光储充系统控制需求。

6　结束语

本文提出一种数据驱动的光储充站离网/并网模式平滑切换控制算法。该算法首先构建运行状态智能识别与电网异常预测两类模型，使系统控制逻辑由被动响应故障转变为主动预判风险；随后结合储能SOC动态协调策略与PCS渐变输出控制规则，抑制切换全过程的电压、频率冲击，提升系统运行稳定性。后续研究可融合多智能体协同机制，并结合精度更高的预测模型，优化复杂场景下系统的自适应控制能力。

参考文献：

[1] 张程翔，汪科，陆莹，等.微电网中储能运行模式自发切换的对策研究[J].电气传动，2021，51(23)：70-75.
[2] 李溶.大规模光伏电站柔直并网系统直流故障穿越策略[D].吉林：东北电力大学，2023.
[3] 邢仔达.高效能分布式光伏电站变流器设计及控制策略研究[D].曲阜：曲阜师范大学，2025.
[4] 王强.基于光伏储能技术的电动汽车供电系统研究[D].北京：华北电力大学，2017.
[5] 梁倍华.面向多新能源发电单元的建模分析及协调控制方法[D].天津：天津大学，2020.

作者简介：

胡松良(1981—)，本科，工程师，研究方向：电厂运维管理及电厂相关设备的研发。