

基于 EKF 的无人装备导航控制单元储能参数在线监测技术研究

王金玉¹ 胡磊² 陈雪莲² 詹婧²

1 上海电子信息职业技术学院, 上海, 201411;

2 上海北极星云空间技术股份有限公司, 上海, 200438;

摘要: 针对风光储混合系统中储能单元参数监测精度不足及分布式储能系统功率分配不均的问题, 提出一种基于扩展卡尔曼滤波 (EKF) 的储能单元参数在线监测方法, 并结合剩余容量动态下垂控制策略实现功率均衡分配。通过建立储能单元的充放电支路模型, 利用 EKF 算法实现剩余容量 (SoC)、输出电压及内阻的高精度动态监测; 进一步设计基于剩余容量的下垂控制方法, 通过调节下垂系数与 SoC 的幂次关系, 优化多储能单元的功率分配。仿真结果表明: 所提方法在短时和长时尺度下均能准确跟踪 SoC (误差<1%), 储能单元间 SoC 均衡速度提升约 40%, 验证了控制策略的有效性与稳定性。

关键词: 无人装备; 扩展卡尔曼滤波 (EKF); 光储能源系统 (PVES); 能量管理

DOI: 10.69979/3060-8767.25.03.023

引言

随着可再生能源渗透率的提高, 风光储混合系统因具备灵活的能量调度能力成为研究热点。然而, 储能单元的剩余容量监测误差累积问题及分布式储能系统功率分配失衡现象, 制约了系统整体效率。现有方法如安培计数法易受噪声干扰, 传统下垂控制难以实现 SoC 均衡。为此, 本文提出一种基于 EKF 的无人装备导航控制单元储能参数在线监测方法, 并结合 SoC 动态下垂控制策略, 旨在提升监测精度与功率分配效率。

1 无人装备高精度导航控制单元能源需求分析

无人装备高精度导航控制单元的能源需求具有动态变化、峰值功率高、对电源质量要求严格等特点。在正常工作状态下, 导航控制单元的功率需求相对稳定, 但在执行某些特定任务时, 如精确定位、快速姿态调整等, 会出现瞬时高功率需求。此外, 导航控制单元对电源的电压稳定性、纹波系数等指标。

高精度无人装备的能源需求具有以下特征:

- (1) 动态负载特性: 在姿态调整、避障决策等任务中, 功率需求呈现脉冲式波动 (峰值功率可达稳态值的 3~5 倍);
- (2) 电能质量敏感: 电压波动需控制在 $\pm 2\%$ 以内, 纹波系数低于 1.5%;
- (3) 环境适应性: 需在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度范围及强振动条件下稳定运行。

传统锂电池系统因功率密度限制 (通常 $< 5\text{kW/kg}$) 和循环寿命衰减问题, 难以满足上述需求。PVES 通过超

级电容器 (功率密度 $> 10\text{kW/kg}$) 与光伏发电的协同, 可显著提升系统综合性能。

2 基于扩展卡尔曼滤波的储能单元参数监测

2.1 控制原理与模型构建

为了利用扩展卡尔曼滤波方法对储能单元的参数进行检测, 首先需要得到储能单元的模型^[1]。此处为了充分考虑充放电过程对储能单元参数的影响, 对充放电支路分辨进行建模, 得到的模型结构如图所示。

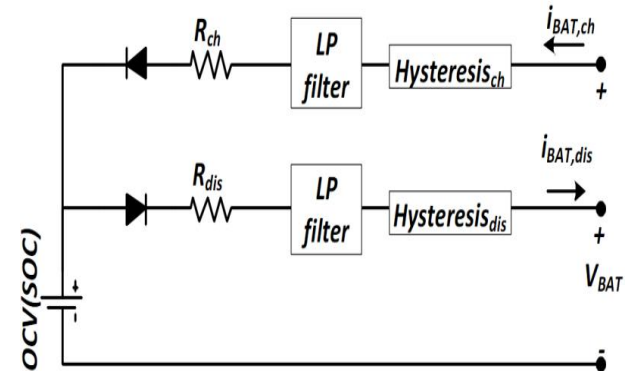


图 1 储能单元模型

考虑电压 OCV 的取值和 SoC 有关, 其遵循如下的表达式:

$$OCV(SOC_k) = 0.035582 \cdot SOC_k + 47.698 \quad (1)$$

在扩展卡尔曼滤波的迭代计算中, SoC 的取值更新方法满足如下关系, 即满足库伦计数关系:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \eta \frac{i_{BAT,k}}{C_{BAT}} \Delta t \quad (2)$$

2.2 仿真验证

利用扩展卡尔曼滤波方法对储能单元进行监测的仿真结果如下所示。图 2 所示为充电和放电过程中剩余容量的监测结果^[2]。从图中可以看出，监测结果和实际的剩余容量取值基本相同。图 3 和图 4 所示为储能单元的输出电压波形和内阻波形。同样，监测结果和实际测量结果基本相同。

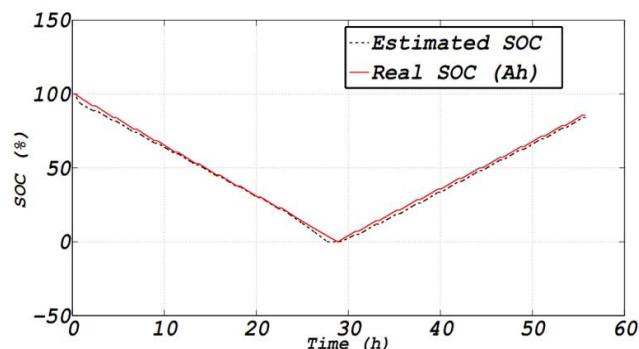


图 2 充电和放电过程中剩余容量监测结果

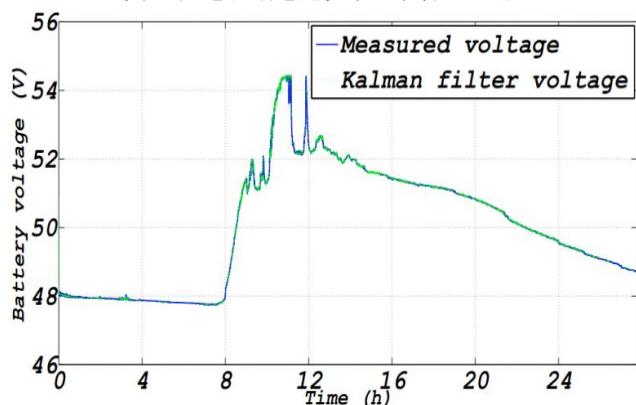


图 3 储能单元输出电压监测结果

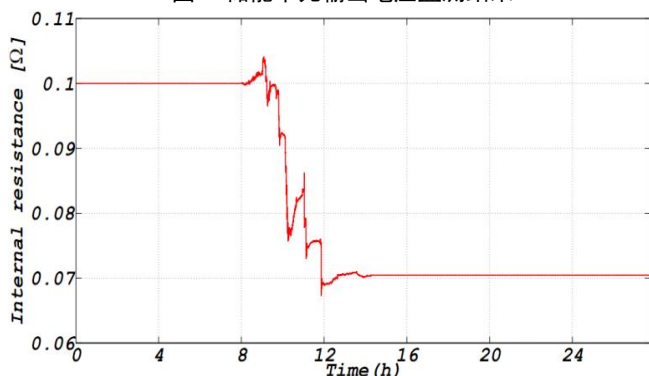


图 4 储能单元内阻监测结果

上面的测量结果给出了较短时间尺度内的性能测试结果。在较长的时间尺度内，上述方法同样有效^[3]。图 5 所示为较长时间尺度下剩余容量的监测结果。同时，频繁的充放电过程也考虑在内^[4]。从图中可以看出，在较长的时间尺度内，即使存在频繁的充放电过程，剩余容量仍然可以获得准确的监测。

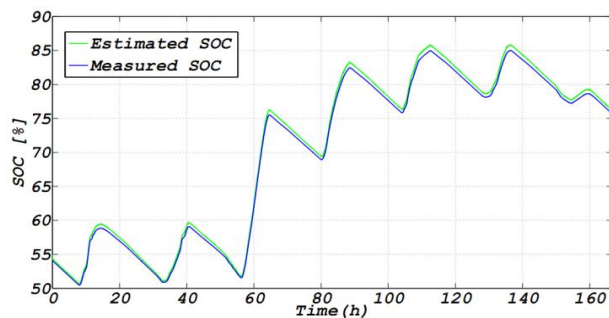


图 5 较长时间尺度频繁充放电情况下的剩余容量监测

结果

结果表明:EKF 算法在充放电过程中 SoC 监测误差 $<1\%$ ，输出电压与内阻跟踪误差 $<2\%$ ；长期频繁充放电工况下，SoC 仍能保持高精度监测，验证了算法的鲁棒性。

3 基于剩余容量的分布式储能系统控制

3.1 动态下垂控制设计

提出改进下垂控制方法，下垂系数与 SoC 的 n 次幂成反比：

为了简化分析过程，选择包含两个储能单元的分布式储能系统作为研究对象，其中的两台接口变换器并联接入负荷母线^[5]。

传统的下垂控制方法可以表示为

$$v_{dc} = v_{dc}^* - m_p \cdot P \quad (3)$$

其中 v_{dc} 为每台变换器的输出电压， P 为经过低通滤波器滤波的输出有功功率， m_p 为下垂系数。

所提出的基于储能单元剩余容量的改进下垂控制方法如式 (4)、(5) 所示。

$$v_{dc1} = v_{dc}^* - (m_0 / SoC_1^n) \cdot P_1 \quad (4)$$

$$v_{dc2} = v_{dc}^* - (m_0 / SoC_2^n) \cdot P_2 \quad (5)$$

其中 m_0 为当电池剩余容量为 100% 时的初始下垂系数，SoC (State-of-Charge) 为储能单元的剩余容量， n 为储能单元剩余容量的幂指数。

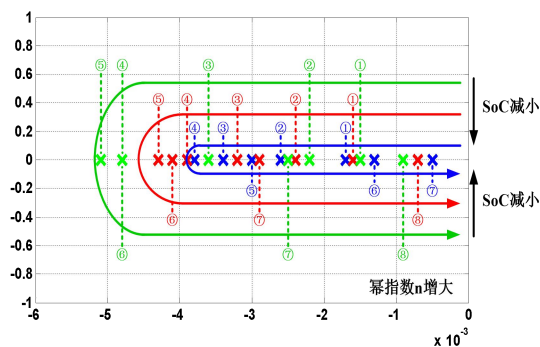
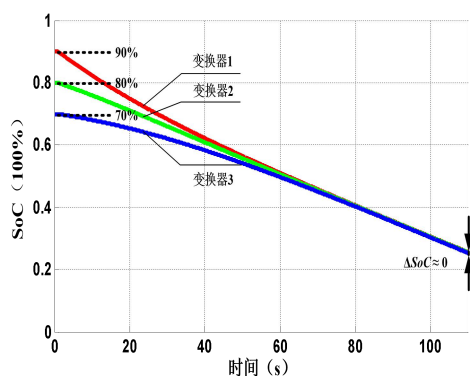


图 6 剩余容量和幂指数 n 变化情况下控制系统主导极点的变化情况

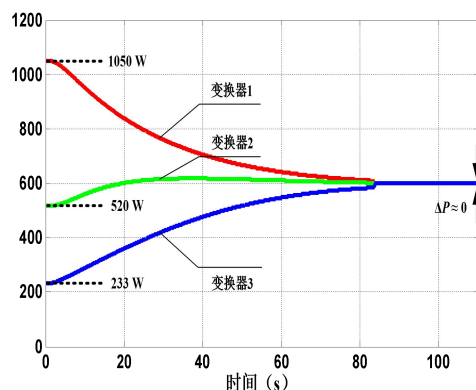
通过调节 n 值, 优化功率分配速度与稳定性。特征方程分析表明, 主导极点始终位于左半平面, 系统稳定性得以保障。

3.2 多场景仿真分析

三储能单元协同供电: SoC 与功率逐步均衡, 故障单元切除后, 剩余单元仍可快速恢复平衡。

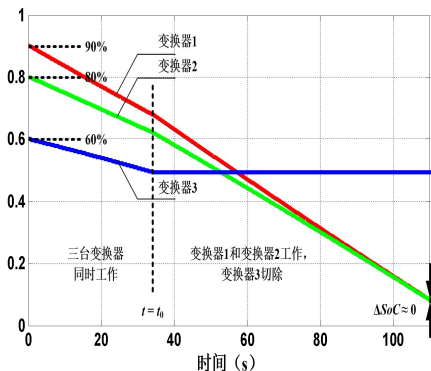


(a) SoC 波形

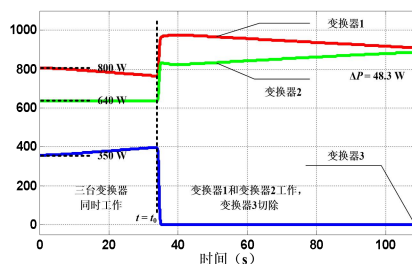


(b) 输出功率波形

图7 三个储能单元公共供给负载的SoC和输出功率波形 (仿真结果)



(a) SoC 波形



(b) 输出功率波形

图8 储能单元切除后的暂态 SoC 和输出功率波形 (仿真结果)

幂指数 n 的影响: $n=6$ 时, SoC 均衡速度较 $n=2$ 提升 40%, 功率分配响应时间缩短 30%。

4 结论

经仿真验证, EKF 算法可有效抑制 SoC 监测误差累积, 适用于动态工况下的储能参数高精度估计; 基于 SoC 的下垂控制策略通过调节幂指数 n , 显著提升多储能单元间的功率均衡效率; 所提方法在交流/直流微电网中均具有普适性, 为风光储系统的优化运行提供理论支撑。

参考文献

- [1] 徐杰. 基于卡尔曼滤波的动力电池组 SOC 精确估计 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2009.
- [2] 李赛, 庞晓琼, 林慧龙, 基于相关向量机的锂离子电池剩余寿命预测 [J], 计算机工程与设计, 2018, 39 (8): 2682-2686. 7.
- [3] Kim JY, King DE, Kumta PN, Chemical synthesis of tin oxide-based materials for li-ion battery anodes influence of process parameters on the electrochemical behavior [J], Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(12): 4411-4420.
- [4] 刘淑杰, 郝昆昆, 王永, 基于改进粒子滤波算法的动力锂离子电池荷电状态估计 [J]. 大连理工大学学报, 2020, 60 (4): 392-401.
- [5] 刘芳, 马杰, 苏卫星, 基于自适应回归扩展卡尔曼滤波的电动汽车动力电池全生命周期的荷电状态估算方法 [J], 电工技术学报, 2020, 35 (4): 698-707.

基金项目: 上海市产业协同创新项目 XTCX-KJ-2023-18, 面向“高远边无”场景的无人装备高精度导航控制系统