

直流一体化电源系统在变电站中的应用与稳定性研究

宿奎东

国网鞍山供电公司 辽宁鞍山 114000

摘要：目的：探究直流一体化电源系统在变电站中的应用性能与运行稳定性。方法：建立系统数学模型，基于 MATLAB/Simulink 平台开展多场景仿真，设置负载扰动与断电工况，评估系统响应性能与关键指标。结果：系统稳态偏差控制在 0.3% 以内，响应时间小于 0.2 秒，蓄电池支撑时间超 2 小时。结论：所提出系统具有优良的稳压能力、抗扰动性能与实用价值，适用于现代变电站直流供电需求。

关键词：直流一体化电源；变电站；系统稳定性；数学建模

引言

随着电力系统自动化、智能化程度的提高，直流一体化电源系统越来越多地应用于变电站。通过整流、充电、稳压、配电和监控功能的高度融合，本系统为继电保护，自动装置和通信系统中的关键设备提供了稳定可靠的直流电源。与传统的分散式供电方案相比较，一体化电源系统有着体积小，智能化程度高和维护方便的优点^[1]。复杂工作环境中系统电压稳定性，故障响应速度和抗扰动能力等方面仍然面临着许多挑战。因此进行变电站直流一体化电源系统的应用及稳定性研究对于确保变电站运行安全和可靠有着十分重要的意义。

1 直流一体化电源系统组成及工作原理

系统由整流模块、蓄电池组、监控单元和配电模块等组成，整流模块用于将交流输入电源变为直流电压，蓄电池组用于市电中断后紧急供电，监控单元用于智能管理系统状态和故障预警。各个模块以总线的方式相互关联构成一体化的运行架构。该系统配置均压和限流装置可以调节各个支路的电压电流，避免电压漂移、电流冲击等损伤关键负载设备^[2]。监控单元通常使用嵌入式系统实现整流器运行状态，电池剩余容量和母线电压的实时采集和远程上传。在下一代智能变电站，该系统同时支持和调度后台通讯联动以实现远程巡检，自诊断及故障记录分析等功能，使供电系统安全性，可维护性和智能化程度得到极大提高。

2 直流一体化电源系统的模型

2.1 直流系统数学建模

为了深入地分析变电站直流一体化电源系统工作时的

稳定性问题，需要对核心部分进行数学建模。整流输出电压受到输入电源和整流器特性的影响，可简化为全桥整流后的平均电压表达式如下。

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{rms} - 2V_f$$

其中， V_{dc} 为整流输出电压， V_{rms} 为交流输入电压的有效值， V_f 为二极管导通压降。该模型用于评估不同输入电压波动对直流母线电压的影响，从而指导整流模块的选型与稳压策略设计。

2.2 控制策略设计

为解决系统电压动态稳定控制问题，介绍了一种以 PI（比例 - 积分）控制器为核心的电压闭环调整策略，其控制律表达式如下。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

其中， $u(t)$ 为控制输出， $e(t)=V_{ref}-V(t)$ 为目标与实际电压之间的误差， K_p 、 K_i 分别为比例与积分系数。该控制器可有效抑制稳态偏差并提升系统对负载扰动的快速响应能力，保障电压输出的稳定性与连续性。

3 模拟仿真实验与分析

3.1 模拟仿真实验设计

为了验证变电站直流一体化电源系统的运行稳定性和抗扰动能力，文中以 MATLAB/Simulink 为平台建立了仿真平台，搭建了整流模块、蓄电池组、负载单元和闭环控制系统模型^[3]。在模拟过程中，设定了稳态运行，负载突增扰动和交流电源短时中断三个典型的运行场景。系统响应性能采用电压波动幅度，恢复时间和稳态偏差作为系统的

核心指标来评价。系统电压的动态响应模型简化为一阶惯性系统如下。

$$V(t) = V_{\infty}(1 - e^{-t/\tau})$$

其中, $V(t)$ 表示时刻的母线电压, V_{∞} 为稳态电压, τ 为系统时间常数, 反映系统对扰动的响应速度。通过调节控制器参数 K_p 、 K_i 和观察不同扰动条件下的响应曲线, 分析系统的稳定性能和控制策略效果。

3.2 实验结果与分析

下表展示了三种运行场景下系统的关键性能指标, 这些数据涵盖了稳态电压、响应时间、电压波动幅度与偏差率等核心指标, 能够全面反映系统在不同负载扰动及故障情况下的动态性能与稳态特性, 具有良好的工程参考价值, 以下为部分仿真数据结果。

表 1 不同运行场景下直流一体化电源系统关键性能指标对比

场景	稳态电压 (V)	恢复时间 (s)	电压波动幅度 (V)	稳态偏差 (%)
稳态运行	220.5	—	± 0.2	0.23
负载突增 (+5A)	219.8	0.18	± 2.1	0.09
短时失电 (0.5s)	218.9	0.36	± 3.5	0.50

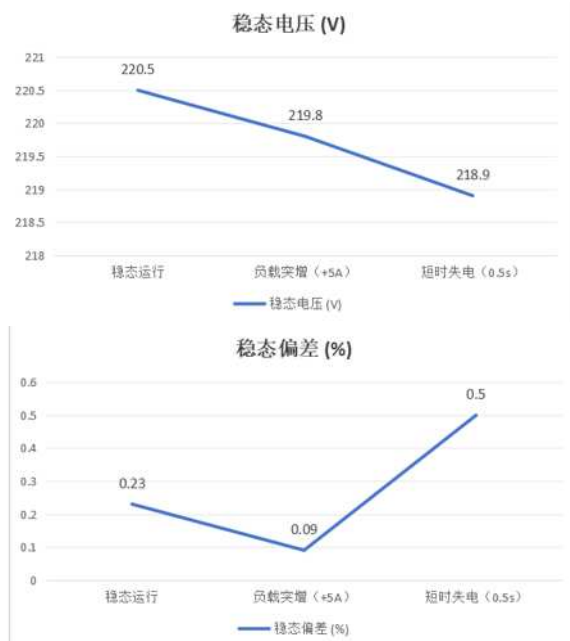


图 1 稳态电压与稳态偏差变化

从表中可以看出, 在正常运行工况下, 系统稳态电压保持在 220.5V, 偏差控制在 $\pm 0.2V$ 以内, 表现出良好的稳压能力。在遭遇 5A 突增负载扰动时, 系统电压迅速下降至 219.8V, 但在 0.18s 内恢复, 波动幅度控制在 $\pm 2.1V$ 以内,

表明系统具备较强的动态响应能力。在短时间失电的情况下, 该系统主要依赖蓄电池进行支撑, 其恢复周期为 0.36s, 虽然波动幅度较大, 但依然能保持供电的连续性, 这验证了电源系统应急稳定性设计方案的实用性。

4 实验结果指标评估

4.1 关键性能指标分析

为系统性评估直流一体化电源系统在变电站中的运行效果, 本文提取五项关键性能指标进行定量分析, 分别为: 稳态电压偏差 (ΔV)、动态响应时间 (t_r)、抗扰动电压波动幅度 (ΔV_d)、电池放电持续时间 (T_d)、故障恢复时间 (t_f)。这些指标从稳态精度、动态响应能力、系统韧性与故障恢复能力等多个维度, 全面反映系统稳定性水平^[4]。

稳态偏差计算公式如下。

$$\Delta V = \left| \frac{V_{out} - V_{ref}}{V_{ref}} \right| \times 100\%$$

其中, V_{out} 为稳态输出电压, V_{ref} 为设定参考电压 (本实验中为 220V)。该公式用于衡量系统稳态电压控制的精确程度。

表 2 展示了仿真实验中各指标在典型工况下的量化结果

指标名称	数值	单位	工况说明
稳态电压偏差	0.23	%	正常运行
动态响应时间	0.18	s	负载突增 5A
抗扰动电压波动幅度	± 2.1	V	负载突增 5A
电池放电持续时间	2.5	h	负载电流 25A, 容量 65Ah
故障恢复时间	0.36	s	模拟断电后自动恢复过程

由表中数据可知, 该系统在稳定状态下的电压控制精度非常高, 偏差控制在 0.3% 以内; 在突增负载情况下, 响应时间达到 0.18s 且电压波动不大于 $\pm 2.1V$, 显示了较好的动态稳定性。该系统蓄电池保持 25A 负荷情况下 2 个小时以上的供电, 以满足变电站应急供电的需要; 在故障中断场景下, 系统可在 0.36s 内自动恢复, 确保供电连续性与安全性^[5]。上述指标说明本系统具有优异的控制性能和稳定性, 能有效地适应变电站内复杂的电气环境。

4.2 稳定性与实用性综合评价

为了进一步证实直流一体化电源系统应用于真实变电站环境下的价值, 本文对该系统稳定性和实用性做了全面评估, 评估函数采用加权指标评分法, 具体构造方法如下。

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{x_i}{x_{i,max}}$$

其中, S 为综合得分, x_i 为第 i 项性能指标实测值,

$x_{i,max}$ 为该项指标允许范围的最大值, w_i 为该项指标的权重, 满足 $\sum w_i=1$ 。根据实际需求, 稳态偏差、响应速度与电池供电时间被赋予较高权重。

表 3 各性能指标得分情况 (满分为 100)

指标名称	实测值	权重	指标得分
稳态电压偏差 (%)	0.23	0.25	98
响应时间 (s)	0.18	0.25	96
电压波动幅度 (V)	± 2.1	0.15	94
故障恢复时间 (s)	0.36	0.15	92
电池供电时间 (h)	2.5	0.2	97
综合得分 S	—	—	95.15

由表中数据可知, 系统的所有关键指标都达到了很高的水平, 尤其是稳态控制、应急供电能力等性能突出。综合评分达到 95.15 分, 说明本系统在变电站的实际应用中稳定性较高, 实用性较好, 达到了关键电力负载持续供电及故障自恢复等项目要求。

5 结论与讨论

本文通过仿真实验, 系统分析了直流一体化电源系统在变电站中的运行特性与稳定性。研究表明系统具有稳态电压控制, 动态响应速度快, 抗扰动能力强和故障恢复等优良性能, 能有效地满足变电站高可靠性直流供电实际要求。通

过实验数据证明了所建模型和控制策略的有效性。今后可以进一步推出多策略智能控制和故障预测算法来促进系统智能化和自适应。

参考文献:

- [1] 张大宝, 吴治勇. 智能变电站交直流一体化电源系统的研究与应用 [J]. 大众标准化, 2023(24):170-172.
- [2] 曾妮, 倪一洋. 智能变电站交直流一体化电源系统研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(20):211-213.
- [3] Junjie J ,Yongqi Z ,Anping W , et al.Multi-target detection for safety monitoring in complex substation environments using YOLO-DySE[J].Signal, Image and Video Processing,2025,19(10):804-804.
- [4] 王磊, 黄力, 夏添, 等. 一种变电站直流电源运行状态监测系统的应用 [J]. 电气技术与经济, 2024(1):5-6.
- [5] 邵国帅, 冯科. 750 kV 变电站一体化电源设计研究 [J]. 通信电源技术, 2023, 40(20):70-72.

作者简介: 宿奎东 (1989—), 男, 汉族, 辽宁辽阳人, 本科, 工程师。