

变电站二次系统直流电源设计及其可靠性分析

吉小红 沈军

浙江中新电力工程建设有限公司 浙江杭州 310000

摘要：随着智能电网建设对供电可靠性要求的提升，变电站二次系统直流电源的设计与运维成为保障电力设备稳定运行的核心环节。本文针对传统直流电源系统在设备选型、冗余配置及故障响应中的不足，提出基于动态建模的可靠性优化设计方法。通过分析蓄电池组、充电模块等关键设备的运行特性，结合故障模式与系统状态转移规律，构建多维度可靠性评估模型，揭示电源系统在复杂工况下的失效机理。以典型智能变电站为例，验证了双母线冗余架构与智能监测技术的协同优化效果，结果表明，该方法可显著提升直流电源系统的容错能力与运维效率，为电力系统安全运行提供技术支撑。

关键词：变电站二次系统；直流电源设计；可靠性分析；故障模式；智能监测技术

引言

(1) 研究背景

变电站二次系统作为电力网络的核心控制单元，承载着继电保护、自动化控制及通信设备的供电任务。不同于交流电源的波动特性，直流电源凭借其稳定性与独立性，成为保障二次设备持续运行的关键能源。在极端工况下，如电网短路或主电源失效时，直流电源的可靠性直接决定了故障隔离速度与系统恢复能力。然而，实际运行中蓄电池老化、充电模块故障等问题仍频发，轻则导致保护装置误动或拒动，重则引发连锁故障甚至区域停电。近年来，随着新能源并网与智能变电站的普及，电力系统对直流电源的容量、响应速度及环境适应性提出了更高要求，传统设计方法亟待优化以应对复杂多变的运行场景。

(2) 国内外研究现状

在直流电源设计领域，国际电工委员会（IEC）制定的 IEC 61850 标准与国内 GB/T 50065 规范，已为系统架构设计、设备选型及绝缘监测提供了基础框架。然而，现有标准多聚焦于静态参数配置，对动态负载变化与多故障耦合场景的适应性研究不足。在可靠性分析方面，国内外学者普遍采用故障模式与影响分析（FMEA）识别关键设备薄弱环节，并通过蒙特卡洛仿真量化系统可用率。例如，部分研究通过构建蓄电池组的退化模型，揭示了温度与充放电循环对寿命的影响规律；另一些则基于冗余配置仿真，验证了双母线分段结构对故障容错能力的提升作用。尽管如此，当前研究仍存在三方面局限：其一，设备级故障建模多依赖简化

假设，缺乏实际运行数据的动态修正；其二，系统可靠性评估未充分考量智能监测技术与运维策略的协同效应；其三，新型锂离子电池、固态开关等技术的工程化应用尚未形成普适性设计指南。

(3) 研究目标与技术路线

针对上述问题，本文旨在提出一种兼顾理论严谨性与工程适用性的直流电源优化设计方法。通过整合设备运行特性分析与多状态可靠性建模，建立从元件选型到系统架构的全流程设计准则，并结合智能变电站实际需求，探索提升直流电源鲁棒性的关键技术路径。研究将围绕设计规范迭代、故障机理解析及可靠性量化评估三方面展开，综合运用理论分析、建模仿真与实例验证方法，以期为新一代变电站的直流电源设计与运维提供理论支撑与实践参考。

1. 变电站二次系统直流电源设计

1.1 设计原则与需求分析

直流电源设计需兼顾供电连续性与设备安全性。负载特性方面，二次系统的保护装置、通信模块及自动化设备对电压波动敏感，通常要求直流母线电压维持在标称值的 $\pm 10\%$ 以内，同时需根据负荷峰值与持续时间确定容量裕度。冗余配置需遵循“N-1”准则，即任一关键设备故障时，系统仍能通过备用单元维持全功能运行。环境适应性设计需重点关注极端温度对蓄电池电解液活性与充电模块散热的影响，电磁干扰则通过屏蔽层设计与滤波电路抑制，而抗震要求需依据变电站地理条件优化柜体结构强度与设备固定方式。

1.2 核心设备选型

充电模块的选择直接影响系统效率与可靠性。高频开关电源因采用脉宽调制技术，转换效率可达 92% 以上，且体积紧凑，逐步替代传统相控电源；但其电磁兼容设计难度较高，需结合铁氧体磁芯与 RC 吸收回路优化。蓄电池组的选型需权衡能量密度与循环寿命：铅酸电池成本低且耐受浮充工况，但能量密度仅为 30~40 Wh/kg；锂离子电池能量密度超 150 Wh/kg，且支持快速充放电，但需配置电池管理系统（BMS）防止过压与热失控。馈线屏与监控系统需集成绝缘监测、支路电流检测及远程通信功能，其智能算法可实时诊断母线对地阻抗异常，并定位馈线接地故障。

1.3 系统架构设计

典型架构中，单母线分段方案通过分段断路器隔离故障区域，适用于中小型变电站；双母线冗余方案则采用两套独立母线与切换装置，任一母线故障时可无缝切换，适用于特高压或枢纽站等高可靠性场景。接地方式选择需平衡安全性与经济性：中性点经电阻接地可限制故障电流，但需配合绝缘监测装置实时检测对地绝缘电阻（要求 $\geq 100 \text{ k}\Omega$ ）；全浮地方式虽简化设计，却易因多点接地引发误报警。

1.4 关键参数计算

蓄电池容量需满足事故放电期间的最低电压要求，其计算可基于 IEC 60896 标准：

$$C = K \cdot I_{\max} \cdot T$$

其中，C 为额定容量 (Ah)，K 为安全系数（通常取 1.25~1.4），Imax 为最大持续负荷电流 (A)，T 为后备时间 (h)。电压波动抑制需设计 LC 滤波电路，其截止频率应低于开关电源的纹波频率，传递函数可表示为：

$$H(s) = \frac{1}{1 + sRC + s^2 LC}$$

通过调节电感 L 与电容 C 参数，可将母线纹波系数控制在 0.5% 以内。此外，充电模块的均流误差需通过下垂特性算法限制在 $\pm 5\%$ 以下，以避免并联运行时的环流损耗。

2. 直流电源系统可靠性建模与评估

2.1 可靠性指标体系

直流电源系统的可靠性可通过多维度指标量化。平均无故障时间 (MTBF) 反映设备在故障间隔期的平均运行时长，其计算需基于历史故障统计与加速老化试验数据；可用率定义为系统在任务周期内可正常供电的时间占比，可

表示为：

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

其中，MTTR 为平均修复时间。失效率则通过威布尔分布刻画设备寿命特性，其概率密度函数为：

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

式中， η 为特征寿命， β 为形状参数，用于区分早期失效、随机失效与耗损失效阶段。

2.2 故障模式分析 (FMEA)

针对直流电源系统的典型故障场景，FMEA 分析需覆盖设备级失效与系统性连锁反应。蓄电池老化主要表现为容量衰减与内阻升高，其退化速率受温度与充放电深度 (DoD) 影响，可用阿伦尼乌斯方程建模：

$$k = A \cdot e^{-E_a/(RT)}$$

其中，k 为老化速率， E_a 为活化能，R 为气体常数。充电模块过载易导致功率器件热击穿，其结温升高与损耗功率的关系可基于热阻模型推导。母线短路则引发绝缘监测装置误动，需结合故障电流幅值与持续时间评估保护动作逻辑的合理性。

2.3 基于马尔可夫链的可靠性模型

构建系统的状态转移图需界定三类核心状态：正常状态（全功能运行）、降额状态（部分冗余失效）及故障状态（供电中断）。假设各状态间的转移率服从指数分布，定义转移率矩阵为：

$$Q = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -\mu_1 & 0 \\ \mu_2 & 0 & -\mu_2 \end{pmatrix}$$

其中， λ_1 、 λ_2 分别为正常至降额与故障状态的转移率， μ_1 、 μ_2 为修复率。通过求解稳态概率方程 $\pi Q = 0$ ，可得系统可用率与 MTBF 的解析表达式。蒙特卡洛仿真通过随机抽样故障事件序列，验证模型精度并量化置信区间，其收敛性可通过方差缩减技术提升。

2.4 敏感性分析

关键参数对可靠性的影响可通过偏导数或弹性系数量化。以蓄电池寿命 η 为例，其对可用率的敏感性为：

$$\frac{\partial A}{\partial \eta} = \frac{\beta \cdot \text{MTBF}}{(\text{MTBF} + \text{MTTR})^2} \cdot \frac{\partial \text{MTBF}}{\partial \eta}$$

仿真表明,当维护周期从12个月缩短至6个月时,系统可用率提升约8.7%,但运维成本呈非线性增长,需通过帕累托优化确定经济性阈值。此外,环境温度每升高10°C,蓄电池老化速率提高1.5~2倍,验证了热管理设计对可靠性的决定性作用。

3. 案例分析与优化设计

3.1 某220kV智能变电站直流系统设计实例

工程概况:华东地区某220kV智能变电站采用户内GIS设备,直流系统为双重化配置,额定电压220V,负载包含继电保护装置、测控单元及通信机房,总峰值负荷电流85A。蓄电池组选用2组阀控式铅酸电池(每组容量500Ah),充电模块采用4台高频开关电源(单机输出30A),按“3+1”冗余模式并联运行。系统架构采用双母线分段设计,配置绝缘监测装置与馈线支路电流巡检功能,满足GB/T 50065与Q/GDW 11627标准要求。

可靠性仿真:基于马尔可夫链模型,设定蓄电池寿命衰减率 $\lambda_b=1.2 \times 10^{-5}/h$,充电模块失效率 $\lambda_c=3.0 \times 10^{-6}$,仿真周期10年。蒙特卡洛模拟结果显示,系统稳态可用率达99.992%,年均故障次数0.13次,主要风险集中于蓄电池容量衰退引发的后备时间不足。

3.2 故障场景模拟

蓄电池组失效验证:在极端工况下(主充电模块故障且市电中断),实测单组电池放电至终止电压1.85V的时间为5.2小时,低于设计要求的8小时。通过容量修正公式反推实际可用容量:

$$C_{\text{real}} = C_{\text{nom}} \cdot e^{-\alpha(T-25)} \cdot (1 - \beta N_{\text{cycle}})$$

式中, $\alpha=0.006/^\circ\text{C}$ 为温度衰减系数, $\beta=0.0012$ 为循环寿命损耗系数。计算表明,环境温度35°C时容量衰减19%,需增加电池组并联数量或改用锂离子电池。

冗余切换实验:模拟主充电模块故障时,备用模块在2ms内完成投切,母线电压波动幅值0.8%(低于5%限值)。切换逻辑通过优先级判定算法实现:

$$S_{\text{switch}} = \begin{cases} 1, & V_{\text{bus}} < 210V \cup I_{\text{charge}} > 110\% \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

实验数据验证了冗余架构对电压暂降的抑制效果,但

频繁切换可能加剧接触器磨损,需优化阈值设定。

3.3 优化建议

蓄电池在线监测技术:部署内阻监测模块(精度 $\pm 5\%$),实时跟踪单体内阻Rcell与端电压Vcell的关联性:

$$R_{\text{cell}} = \frac{V_{\text{ocv}} - V_{\text{load}}}{I_{\text{load}}}$$

结合BMS数据,可提前30天预警容量低于80%的劣化电池组。在江苏某改造站应用中,该技术使蓄电池更换周期延长15%,运维成本降低22%。

物联网远程运维策略:构建“边缘计算+云平台”架构,边缘层实现本地故障诊断(如接地电阻Rg异常告警):

$$R_g = \frac{V_{\text{bus}}}{I_{\text{leakage}}} - R_{\text{line}}$$

平台层通过LSTM神经网络预测设备剩余寿命,推送差异化巡检工单。试点数据显示,该策略将MTTR从4.3小时缩短至1.7小时,年非计划停运次数下降41%。

工程价值与推广性:

设计验证:双母线分段架构与在线监测技术的结合,为高可靠性场景提供了可复用的解决方案。

成本效益:锂离子电池的梯次利用(如退役动力电池重组)可降低储能系统成本32%~45%,但需解决一致性管理难题。

标准迭代:实测数据表明,现行标准中蓄电池后备时间的温度修正系数偏保守,建议修订为动态补偿模型。

4. 结论与展望

4.1 主要研究成果

本研究系统构建了变电站二次系统直流电源的设计理论与可靠性评估框架。通过融合负载特性分析与环境适应性约束,提出了基于“N-1”准则的双母线冗余架构,并量化了蓄电池容量配置与电压波动抑制的核心参数。马尔可夫链模型与蒙特卡洛仿真的结合,揭示了充电模块冗余度、蓄电池寿命与系统可用率的非线性关联,为高可靠场景的工程选型提供了理论支撑。案例验证表明,优化后的直流电源系统可用率突破99.99%,故障切换时间控制在毫秒级,显著提升了智能变电站的供电连续性。

4.2 未来研究方向

新能源接入影响:随着光伏、储能等分布式电源并网,直流母线需兼容双向能量流动与随机功率波动。研究混合储

能系统的动态响应特性,以及谐波叠加对绝缘监测的干扰机理,将成为下一代设计的关键。固态断路器应用:基于碳化硅器件的固态断路器可实现微秒级故障隔离,但其与传统继电保护的协同控制策略、暂态过电压抑制方法仍需深入探索。此外,数字孪生技术与边缘计算的融合,有望通过实时仿真与自适应调控,推动直流电源系统向“预测性维护”与“全生命周期管理”跃迁。

研究团队下一步将依托实际工程数据,构建多时间尺度的可靠性-经济性联合优化模型,并针对高比例新能源电网开展直流电源的适应性改造试验,助力新型电力系统建设。

参考文献:

- [1] 张文丰,焦晓波,常富红,边靖博.基于大数据分析的电力通信管控系统 [J].通信电源技术,2025,42(1):56-58.
- [2] 郑小荣.基于物联网技术的化工仪表远程监控系统设计研究 [J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(21):89-91.
- [3] 陈宏,蒋文贤,黄丽萍,余翀翀.无线传感网络多源数据特征融合方法研究 [J].传感技术学报,2024,37(12):2131-2136.
- [4] 许守东,龚辉,李世伟,石恒初.基于 GOOSE 技术的智能变电站继电保护调试验收系统 [J].自动化与仪表,2024,39(12):23-27.