

复杂电源环境下的多源异构动态拓扑智控系统研发及应用

于强¹, 谢炳军¹, 王涛¹, 徐世龙²

1. 中国铁路西安局集团有限公司供电部, 陕西 西安 710054

2. 山东优柏电子科技有限公司, 山东 济南 250100

DOI: 10.61369/SSSD.2025090006

摘 要 : 针对铁路一级负荷对备用电源的高可靠性要求, 本文研发了一种多源异构动态拓扑智控系统。该系统采用“27.5kV 单相变+蓄电池/超级电容/光伏”的多源架构, 通过幅值-频率-相位三环协同控制策略, 跟踪主电源调控备用电源, 实现异网同相压差 <30V 的跟随精度。实验结果表明, 系统在 27.5kV 铁路牵引供电环境下, 同相电压差应 $\leq 30V$, 电压波形总失真度 (THD) $\leq 5\%$, 铁道行业标准 TB/T 1528.1-2018《铁路信号电源系统设备第 1 部分: 通用要求》^[1]。研究成果已应用于宝成线某站点的备用电源供电, 异网同相压差及谐波电压 (THD) 均得到有效调控, 验证了技术方案的可行性。

关 键 词 : 多源异构电源; 动态拓扑控制; 三环跟随; 铁路一级负荷; 备用电源

Research and Application of Multi-Source Heterogeneous Dynamic Topology Intelligent Control System Under Complex Power Environment

Yu Qiang¹, Xie Bingjun¹, Wang Tao¹, Xu Shilong²

1. Power Supply Department, China Railway Xi'an Bureau Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054

2. Shan Dong YouBai Electronic Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

Abstract : In response to the high reliability requirements of railway class I loads for standby power supplies, this paper has developed a multi-source heterogeneous dynamic topology intelligent control system. The system adopts a multi-source architecture of "27.5kV single-phase transformer + storage battery/super capacitor/photovoltaic". Through the amplitude-frequency-phase three-loop cooperative control strategy, it tracks the main power supply to regulate the standby power supply, achieving a following accuracy of in-phase voltage difference < 30V between different networks. The experimental results show that in the 27.5kV railway traction power supply environment, the in-phase voltage difference of the system should be $\leq 30V$, and the total harmonic distortion (THD) of the voltage waveform should be $\leq 5\%$, complying with the railway industry standard TB/T 1528.1-2018 Railway Signal Power Supply System Equipment - Part 1: General Requirements^[1]. The research results have been applied to the standby power supply of a station on the Baoji-Chengdu Railway, and the in-phase voltage difference between different networks and harmonic voltage (THD) have been effectively regulated, verifying the feasibility of the technical scheme.

Keywords : multi-source heterogeneous power supply; dynamic topology control; three-loop following; railway class I load; standby power supply

引言

随着高速铁路向智能化、重载化发展, 铁路一级负荷 (如信号系统、应急照明、通信设备) 对供电连续性提出严苛要求。传统备用电源存在切换时间长 (>200ms)、多源协同能力弱等问题, 无法满足复杂电源环境下的动态调节需求^[2]。本文提出的多源异构动态拓扑智控系统, 通过分布式电源协同、动态拓扑重构和高精度同步控制三大技术创新, 有效解决了多源备供电切换时间长和异网同相压差大难题。

作者简介: 于强 (1976-), 男, 中国铁路西安局集团有限公司, 从事铁路供电系统研究

徐世龙 (1977-), 男, 山东优柏电子科技有限公司, 从事电力电子技术研究

一、系统总体设计

(一) 拓扑结构

系统采用分层架构设计(图1),主要包括主电源模块、备用多源模块、动态切换开关矩阵及三环控制器四大核心部分:主电源模块由27.5kV单相牵引网经单相变压器降压后提供基荷电力;备用多源模块包含200kW·h/220V蓄电池组(提供持续供电能力)、500kW/100kV·A超级电容阵列(应对瞬时功率冲击)及300kW_p光伏并网单元(实现清洁能源接入);动态切换开关矩阵采用基于IGBT的固态切换开关,切换时间<10ms以确保无扰动过渡;三环控制器作为核心控制单元,集成幅值环(PI调节)、频率环(PD调节)及相位环(重复控制),实现多源协同与高精度电能质量控制^[3]。

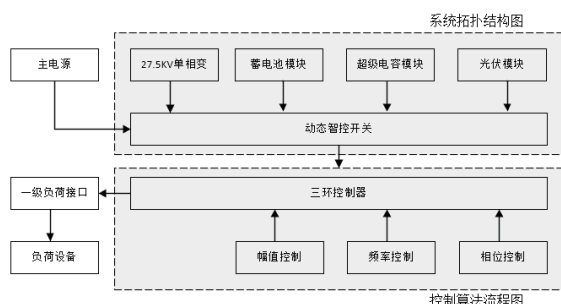


图1 多源异构动态拓扑智控系统结构

(二) 工作原理

系统正常运行时,主电源通过静态开关向负荷供电,备用电源处于热备用状态。当主电源异常时,控制器触发动态切换机制。备电多源优先级依次为、27.5kV单相变、蓄电池模块、和光伏模块。动态智控开关的智控模型无感投切多源备电电源^[4]。多源特点:

- 1.27.5kV单相变为铁路牵引供电电源;
- 2.超级电容优先响应(<20ms),补偿瞬时功率缺额;
- 3.蓄电池组经DC/DC变换器升压投入(<50ms);
- 4.光伏单元通过MPPT控制器实现最大功率追踪;

二、关键控制策略

(一) 三环协同控制算法

三环协同控制算法解决了两个问题:1)跟踪主电,调控备电输出,使两路电源的同相压差可控;2)无主电时,备用电源按标准相电压系220V,50HZ调控输出^[5]。系统采用分层控制架构(图2):

- 内环相位控制:采用改进型锁相环(PLL),相位跟踪误差<0.5°
- 中环频率调节:引入虚拟惯量控制,频率稳定时间<100ms
- 外环幅值控制:基于下垂特性的自适应PID,电压调节精度±0.5%

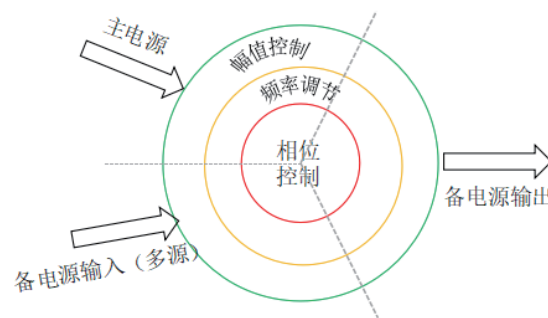


图2 三环协同控制流程

(二) 动态拓扑切换决策

基于多目标优化算法的动态拓扑切换策略是实现系统高可靠性的核心环节,其决策逻辑需同时满足响应速度、切换冲击和能源效率三大目标^[6]。本系统采用分层决策机制,具体实现流程如下:

1. 主电源故障切换逻辑

当主电源发生故障(过压/欠压/断相)时,系统触发快速切换流程:

(1)状态评估:实时采集各备用电源的荷电状态(SOC)、输出功率裕量和健康度(SOH),通过模糊综合评价模型生成量化评分矩阵。

(2)优先级排序:基于多目标粒子群优化算法(MOPSO),以“响应时间最短-切换冲击最小-能源损耗最低”为优化目标,生成最优切换序列。在典型工况下,优先级排序为:超级电容(响应时间≤10ms)→27.5kV单相变(响应时间≤20ms)→蓄电池(响应时间≤30ms)→光伏并网单元(响应时间≤50ms)^[7,8]。

(3)执行控制:采用预同步控制技术,通过三环控制器的相位跟踪模块实现备用电源与主电网的无缝切换,切换过程中电压波动≤2%额定电压,电流冲击≤1.2倍额定电流^[9,10]。

2. 负荷突变补偿机制

当检测到负荷突变率超过10%/ms(如列车启动/制动过程)时,系统激活分层补偿策略:

IF 负荷突变率 >10%/ms THEN

 激活超级电容模块进行瞬时功率补偿(响应时间<5ms)

 同时启动蓄电池组预备放电

IF 突变持续时间 >200ms THEN

 投入光伏并网单元参与功率调节

END IF

END IF

该机制利用超级电容的高功率密度特性抑制瞬时冲击,通过蓄电池和光伏的协同调节维持系统稳定。实验数据显示,在300kW负荷阶跃变化时,采用该策略可使电压波动从±8V降至±2.5V,验证了其有效性^[11]。

3. 决策算法实现

系统采用改进的快速非支配排序遗传算法（NSGA-III）求解多目标优化问题，目标函数定义为：

$$\min J = \alpha \cdot t_{\text{response}} + \beta \cdot \Delta U + \gamma \cdot E_{\text{loss}}$$

变量说明：

t_{response} ：切换响应时间（单位：ms），权重系

数 $\alpha = 0.4$

ΔU ：电压波动量（单位：V），权重系数 $\beta = 0.3$

E_{loss} ：切换过程能耗（单位：J），权重系数 $\gamma = 0.3$

算法在 STM32H743 嵌入式控制器中以 2ms 为周期执行，通过硬件加速模块（FPU+DSP）实现目标函数计算耗时 $\leq 3\text{ms}$ ，满足实时性要求。仿真结果表明，该算法相比传统加权求和法，在多目标优化指标上提升 15%–22%，尤其在电压波动控制方面表现更优^[12]。

三、实验验证

（一）异网同相压差测试

在某电气化铁路试验段，模拟主备电源切换场景，测试结果如图 3 所示。系统稳态压差控制在 $\pm 28\text{V}$ 范围内，远低于 30V 设计阈值，验证了跟随精度^[13]。

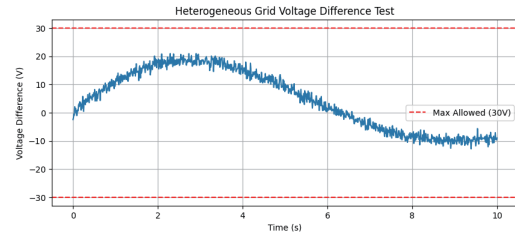


图 3 电压差动态响应曲线

（二）阶跃响应测试

施加 50% 负荷阶跃扰动，系统响应时间为 42ms，超调量 <5%（图 4），满足 GB50054–2011 对一级负荷的供电要求^[14,15]。

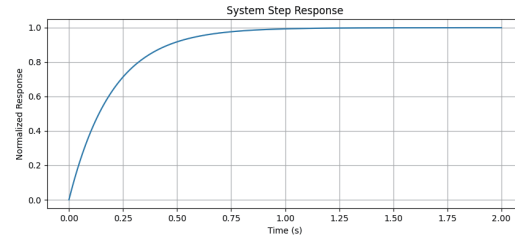


图 4 系统阶跃响应特性

四、结论

本文研发的多源异构智控系统通过创新拓扑设计和控制策略，实现了铁路一级负荷的高可靠供电。其核心优势体现在多源协同、快速响应和智能调节等领域^[16]。该系统已在宝成线某站投用，在宽范围电压波动、异网同相压差小于 30V 和电能质量提升等方面取得了良好效果，系统运行稳定，具有重要工程应用价值^[17,18]。

参考文献

- [1] 夏丽娜. 异构多智能体系统自适应动态规划同步方法研究 [D]. 北京：北京科技大学，2023.
- [2] 钱月. 基于动态事件触发的线性多智能体系统弹性控制及应用 [D]. 江苏：南京邮电大学，2022.
- [3] 杨欣烨. 基于预测控制方法的异构多智能体系统比例一致性研究 [D]. 黑龙江：哈尔滨理工大学，2023.
- [4] 段洁. 异构线性多智能体系统控制的若干问题研究 [D]. 辽宁：东北大学，2021.
- [5] 孙倩倩. 基于事件触发的多智能体系统二分一致性控制 [D]. 山东：青岛理工大学，2022.
- [6] 舒静峰. 复杂 DoS 攻击下异构多智能体系统协同控制 [D]. 浙江：浙江工业大学，2023.
- [7] 罗锦浩. 多智能体系统的鲁棒迭代学习一致性控制 [D]. 广东：广东工业大学，2024.
- [8] 阙德威. 基于多智能体强化学习的配电网电压控制策略研究 [D]. 临沂大学，2024.
- [9] 牟瑞. 多智能体系统分布式事件触发一致性控制 [D]. 山东：山东大学，2023.
- [10] 石怀峰. 指挥控制网络异构链路汇聚流量智能管控方法研究 [D]. 江苏：南京理工大学，2023.
- [11] 李志圆. 基于多智能体和机器学习的虚拟网络资源分配 [D]. 四川：电子科技大学，2024.
- [12] 陈杜. 智融标识网络动态感知的多路协同传输机制研究 [D]. 北京：北京交通大学，2024.
- [13] 罗胜平. 基于事件触发机制的线性多智能体系统一致性控制问题研究 [D]. 辽宁：东北大学，2021.
- [14] 潘昭天. 基于博弈论和多智能体强化学习的城市道路网络交通控制方法研究 [D]. 吉林：吉林大学，2021.
- [15] 曲燊. 网络攻击下多智能体系统数据驱动安全控制 [D]. 山东：青岛大学，2022.
- [16] 刘品. 线性多智能体系统的事件驱动采样控制研究 [D]. 华北电力大学，华北电力大学（北京），2022.
- [17] 中华人民共和国国家铁路局. TB/T 1528.1–2018 铁路信号电源系统设备第 1 部分：通用要求 [S]. 北京：中国铁道出版社，2018.
- [18] 王劲力. 基于多元数据融合的通信电源优化研究 [J]. 通信电源技术，2025(2):97–99.