

低温环境下通信电源的启动性能优化

杨金凤, 辛文启, 李新阳, 刘泰琪

中国人民解放军32125部队, 山东, 济南 250004

DOI:10.61369/ERA.2026030024

摘要 : 通信电源是保障通信系统稳定运行的核心基础设施, 其在低温环境下的启动可靠性至关重要。本文针对低温环境下通信电源启动失败的问题, 深入分析了其影响机理。低温通过改变关键元器件的物理化学特性, 引发蓄电池容量锐减、功率半导体开关性能恶化、电容电感参数漂移等一系列问题, 进而导致系统出现启动电流不足、电压波动剧烈、热失衡及保护机制误触发等系统性挑战。为应对这些问题, 本文提出了一套系统性的优化策略, 在元器件层面, 优选低温性能优异的器件并优化电路拓扑与布局; 在热管理层面, 集成 PTC 辅助加热与智能温控技术; 在系统控制层面, 采用分段启动、自适应调节与智能故障预判等软件算法。此外, 构建了包含仿真验证、实验平台测试和量化指标体系的综合评估方案, 以验证优化策略的有效性。

关键词 : 通信电源; 低温启动; 性能优化; 辅助加热

Startup Performance Optimization of Communication Power Supplies in Low-Temperature Environments

Yang Jinfeng, Xin Wenqi, Li Xinyang, Liu Taiqi

Unit 32125 of the Chinese People's Liberation Army, Jinan, Shandong 250004

Abstract : Communication power supplies are the core infrastructure ensuring the stable operation of communication systems, and their startup reliability in low-temperature environments is of paramount importance. This paper delves into the issue of startup failures in communication power supplies under low-temperature conditions, thoroughly analyzing the underlying mechanisms. Low temperatures alter the physicochemical properties of key components, leading to a sharp decline in battery capacity, deterioration in power semiconductor switching performance, and drift in capacitor and inductor parameters, among other issues. These, in turn, result in systemic challenges such as insufficient startup current, severe voltage fluctuations, thermal imbalances, and false triggering of protection mechanisms. To address these problems, this paper proposes a systematic optimization strategy. At the component level, it involves selecting devices with superior low-temperature performance and optimizing circuit topology and layout. In terms of thermal management, it integrates PTC auxiliary heating and intelligent temperature control technologies. At the system control level, it employs software algorithms such as staged startup, adaptive adjustment, and intelligent fault prediction. Additionally, a comprehensive evaluation scheme encompassing simulation verification, experimental platform testing, and a quantitative indicator system is constructed to validate the effectiveness of the optimization strategy.

Keywords : communication power supply; low-temperature startup; performance optimization; auxiliary heating

引言

随着全球信息化的飞速发展, 通信网络的稳定运行直接关系到国计民生与社会安全。通信电源为整个网络提供着持续、稳定的能量供给, 是保障通信畅通的基石。然而通信设备部署环境日趋复杂, 从高寒地区的户外基站到偏远山区的微波中继站, 极端低温环境对通信电源的可靠性构成了严峻挑战。在低温条件下, 电源启动失败的事件时有发生, 一旦发生, 将可能导致通信中断, 造成巨大的经济损失和社会影响。因此, 深入研究并优化通信电源在低温环境下的启动性能, 已成为业界和学术界共同关注的重要课题。

一、低温对通信电源启动性能的影响机理分析

（一）关键元器件的低温特性变化

通信电源源自国家电网输出的能源，对日常生活至关重要，不能容忍任何故障。一旦出现问题，将对整体和全局产生严重影响。因此，通信电源需要在各种环境下可靠运行，以满足不同客户的需求^[1]。作为核心储能部件，蓄电池在低温下容量锐减、内阻激增，甚至触发保护机制而无法输出，是启动失败的首要原因。同时 MOSFET、IGBT 等功率半导体因阈值电压升高、导通电阻增大而难以驱动且功耗增加，开关速度变慢也影响了电流控制的稳定性^[2]。此外，电容因 ESR 剧增和容值衰减而无法有效滤波储能，电感则因磁芯特性变化削弱了电流调节能力，共同导致启动电压波动。继电器等元件在低温下易出现吸合不牢、触点弹跳等问题，直接威胁启动电路的通断可靠性。

（二）启动过程的系统级挑战

低温环境下，电源启动面临多重严峻挑战。蓄电池与功率器件性能双双衰减，导致启动电流严重不足，系统难以建立正常工作电压^[3]。同时电容滤波效果减弱与器件开关变慢，共同引发剧烈的电压波动与尖峰，极易冲击控制电路并触发误保护^[4]。此外，系统内部产热不均与散热过快的矛盾，不仅可能触发过热保护，更会形成“低温 - 性能衰减 - 热量不足”的恶性循环。而这一切，又因低温导致元器件参数漂移，使得过流、欠压、过热等保护机制频繁误判，导致启动失败。

（三）影响机理总结

低温对通信电源启动性能的影响是“元器件特性衰减 - 系统级协同失调”的链式反应过程^[5]。从本质上看，低温通过改变元器件的物理结构与化学特性，导致其电气参数发生异常变化；这些变化进一步影响了电源系统启动过程中的电流输出、电压稳定、热量平衡等关键环节，引发启动电流不足、电压波动、热失衡等问题；在多重因素的叠加作用下，可能导致电源启动失败或保护机制误触发，严重影响通信电源的低温启动可靠性^[6]。因此，优化低温启动性能需从根源上解决元器件的低温适应性问题，同时通过系统级设计提升各部件的协同工作能力，打破上述链式反应。

二、通信电源低温启动性能优化策略

（一）元器件选型与电路设计优化

提升通信电源的低温启动能力，需从元器件、电路和热管理三方面进行系统性优化^[7]。在元器件选型上，应优先选用符合低温标准的军品或工业级产品，包括采用低温性能优异的锂电池或改进型铅酸电池并搭配高性能 BMS，选用低温特性好的 MOSFET/IGBT 功率器件，以及用钽电容或陶瓷电容替代传统电解电容，同时确保继电器、变压器等也满足耐低温要求^[8]。在电路设计上，需优化拓扑结构与参数，例如设计预充电电路以避免启动冲击，采用交错并联结构降低电流纹波，并增强驱动与滤波能力以保障低温下的电压稳定性。在电路布局阶段，应运用热集中设计理念，将功率器件等发热元件靠近电池等敏感元器件以实现被动加热，

同时通过选用高导热 PCB 和优化散热路径来确保热量高效传导，避免局部过热，从而全面提升电源的低温启动性能。

（二）辅助加热与热管理技术

为确保通信电源在 -40°C 以下极端低温环境中可靠启动，必须集成主动加热与智能热管理策略^[9]。通过在蓄电池、功率器件等关键区域安装具有自限温特性的 PTC 加热器进行精准预热，同时利用智能温控系统根据环境与元器件温度，自动执行启动前预热、动态功率调节及启动后停机等操作，以节约能源。此外，配合高效保温材料、密封外壳及可调通风口设计，最大限度减少热量散失，将加热能量集中于关键部位，从而确保电源在极端低温下能够成功、高效地启动。

（三）系统级控制与软件算法优化

为提升电源系统在低温下的启动可靠性，可通过优化控制策略与软件算法，实现启动过程的智能化^[10]。核心在于采用分段启动策略，根据环境温度动态调整各模块的启动时序与参数，依次完成辅助加热、电池检测、预充电和功率变换，避免瞬间冲击。同时基于实时数据构建自适应调节模型，动态优化启动电流与电压，保护电池并稳定输出。此外，还需优化保护机制，引入温度补偿防止误触发，并构建故障预判模型，通过数据趋势分析提前识别潜在风险，实现从启动时序、参数调节到故障防护的全链路智能化管理，从而全面提升低温启动的可靠性与安全性。

三、优化方案的验证与评估体系

（一）仿真实验方法

仿真实验需依次完成模型构建、场景设计与结果分析三大核心环节，基于 MATLAB/Simulink、PSpice 等仿真软件，构建通信电源的整机仿真模型，包含蓄电池、功率器件、电容、电感、控制电路等关键模块，并引入低温下的元器件参数模型，例如根据蓄电池的低温特性曲线建立不同温度下的容量 - 内阻模型，根据功率器件的 datasheet 提供的低温参数修正器件模型的阈值电压、导通电阻等参数，根据电容的低温容值衰减特性建立容值与温度的函数关系，同时在模型中集成辅助加热模块、智能热管理控制算法、自适应启动调节算法等优化模块，确保仿真模型能真实反映优化方案的工作状态。在此基础上设计多组不同低温环境的仿真场景，覆盖通信电源可能面临的典型低温工况，如 -10°C 、 -20°C 、 -30°C 、 -40°C 等不同温度等级，同时考虑不同启动负载条件（如轻载、满载、冲击负载），在各仿真场景下模拟优化方案的启动过程，采集启动时间、启动电流峰值、输出电压波动幅度、元器件温度变化、保护机制触发情况等关键数据，通过对比优化前（未采用任何优化策略）与优化后的数据，分析优化方案对启动性能的提升效果，此外还需进行极端工况下的仿真测试，如最低温度（ -40°C ）+ 满载启动、温度骤变（从 -40°C 快速升至 0°C ）下的启动，验证优化方案的鲁棒性。对各仿真场景下的测试数据进行整理与分析，重点关注启动成功率（不同温度下启动成功的次数与总测试次数的比值）、启动时间（从启动指令发出到电源输出稳定的时间）、启动电流峰值（启动过程

中的最大电流值)、输出电压纹波系数(电压波动幅度与额定输出电压的比值)、元器件最高温度(启动过程中功率器件、蓄电池等元件的最高温度)等指标,通过数据分析判断优化方案在不同低温场景下的启动性能是否满足设计要求,识别优化方案中可能存在的不足(如加热模块功率不足、算法调节响应滞后等),并针对性地进行方案迭代优化。

(二) 实验验证平台构建

为验证通信电源优化方案,需搭建一个包含低温实验箱(-50°C~+80°C)、示波器、电子负载等设备的实验平台,并准备原始与优化两组样机进行对比。测试将遵循标准化流程,在目标低温(如-40°C)下恒温2小时,然后在不同负载条件下启动样机,实时采集启动时间、电流峰值、电压纹波等数据,并通过重复测试计算成功率。此流程将覆盖-30°C至-10°C等多种温度与负载组合,除常规测试外,还需进行极端工况与长期可靠性验证,包括最低温下的百次连续启动、温度骤变、低电压启动,以及将优化样机置于-20°C环境中连续运行1000小时,以全面评估优化方案的有效性与长期可靠性。

(三) 评估指标体系

为全面评估通信电源的低温启动性能,建立包含启动能力、启动稳定性、安全性与可靠性四个维度的量化指标体系。启动能力要求在-40°C满载条件下启动成功率不低于99%、启动时间不超过60秒,且最低启动温度不高于-40°C、最低启动电压不高于额定电压的70%。启动稳定性要求启动过程中的输出电压纹波系数不超过2%、启动电流波动幅度不超过10%,以及关键元器件的

温度变化速率不超过5°C/秒。安全性与可靠性指标要求保护机制误触发率不超过1%,元器件最高温度不超过其额定上限,且绝缘电阻不低于100MΩ。长期可靠性则要求在-20°C环境下累计启动次数不低于1000次,连续运行1000小时后关键性能指标变化率不超过5%,且故障后恢复时间不超过10秒。通过该体系可全面客观地评估优化方案的低温启动性能,为工程化应用提供支撑。

四、结束语

本文围绕低温环境下通信电源启动性能优化的核心问题,深入剖析了低温对关键元器件电气特性的影响机理,揭示了由元器件性能衰减引发启动电流不足、电压波动、热失衡及保护误判等一系列系统性挑战的链式反应过程。在此基础上,提出了一套涵盖元器件选型与电路设计、辅助加热与智能热管理、系统级控制与软件算法三个层面的综合性优化策略。该方案不仅关注单个环节的性能提升,更强调各子系统间的协同工作,旨在打破“低温-性能衰减-启动失败”的恶性循环。通过构建包含仿真验证、实验平台测试和量化指标体系的综合评估方法,为优化方案的有效性与可靠性提供了科学、客观的评判依据。研究成果对于提升通信电源在极端低温环境下的适应性和启动成功率具有重要的理论指导意义和工程应用价值,通过实施本文提出的优化策略,能够显著增强通信网络在高寒、高原等恶劣环境下的生存能力和服务保障能力,为我国通信基础设施的稳定运行提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 王雪涛. 通信电源启动冲击电流与电磁干扰性能优化 [D]. 吉林化工学院, 2024.
- [2] 王浩. 通信系统电路单板电源缓启动的设计 [J]. 应用科技, 2011, 38(3): 38-41. DOI: 10.3969/J.ISSN.1009-671X.2011.03.009.
- [3] 刘伟. 通信电源系统能效提升策略 [J]. 通信电源技术, 2025, 42(1): 102-104. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2025.01.034.
- [4] 郭鲁光. 电力通信系统中通信电源常见故障分析及处理 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(13): 221-223. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.13.074.
- [5] 岳江生, 谭亚斌, 孟祥月. 通信电源实时监测系统开发及应急预案研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(15): 128-131. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.15.043.
- [6] 马胜男. 基于大数据技术的通信电源运行维护系统设计 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(13): 188-190. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.13.063.
- [7] 娄占东. 基于多能源融合技术的通信电源能效优化研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(2): 116-118. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.02.038.
- [8] 郭晓勇. 新时期电力智能通信电源技术的关键点研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(16): 121-123. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.16.041.
- [9] 秦磊磊. 通信电源故障诊断技术与维护策略 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(8): 125-128. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.08.042.
- [10] 黄乐祥. 电力通信系统中通信电源常见故障分析及处理 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(24): 135-137. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.24.044.