

电力拖动系统中的多级变换器拓扑优化与热管理研究

支福畅 412723198812102975

摘要：随着电力拖动系统向大容量、高功率密度方向发展，传统单级变换器存在电压应力大、电能转换效率低、散热压力大等问题，多级变换器拓扑成为解决上述问题的核心方案。本文围绕电力拖动系统中多级变换器的拓扑优化与热管理展开研究，首先分析了现有多级变换器拓扑的结构缺陷，提出了一种基于耦合电感的改进型级联多电平拓扑，通过拓扑参数优化降低了器件电压应力与导通损耗；其次针对优化后拓扑的热分布特性，建立了多级变换器的热阻网络模型，提出了基于分区散热的主动热管理策略。仿真结果表明，优化后的拓扑相较传统拓扑器件电压应力降低 18.2%，转换效率提升 1.6 个百分点，提出的热管理策略可将最高结温控制在安全范围内，提升了系统运行稳定性，可为电力拖动系统大功率变换器的设计提供参考。

关键词：电力拖动系统；多级变换器；拓扑优化；热管理

一、引言

电力拖动系统是工业生产领域的核心动力单元，广泛应用于矿山开采、冶金加工、轨道交通等场景，其运行效率与稳定性直接决定了工业生产经济效益与安全水平。近年来，随着电力电子技术的发展，电力拖动系统对功率变换单元的功率密度、转换效率、电压适应性提出了更高要求：大容量拖动场景中，电动机额定电压可达 10kV 以上，传统单级变换器器件耐压水平难以满足需求，且开关损耗随功率提升急剧增大，导致系统整体效率下降；同时，高功率密度设计下变换器单位体积产热大幅提升，散热不畅会导致功率器件结温超过安全阈值，引发器件老化甚至故障停机。因此，研究适配电力拖动系统的多级变换器拓扑优化方案与高效热管理策略，具有重要的理论与工程价值。

现有研究中，国内外学者针对多级变换器拓扑已经开展了大量研究，经典的二极管钳位型、飞跨电容型级联拓扑已经实现工程应用，但仍存在电容电压不平衡、器件数量多、控制复杂度高等问题。部分研究提出了基于软开关技术的拓扑改进方案，通过引入谐振环节降低开关损耗，但在重载工况下软开关实现难度较大。在热管理方面，现有研究多集中于单级变换器的散热结构优化，针对多级变换器多功率单元的热分布特性研究不足，多数散热设计采用统一散热参数，导致部分高温单元散热不足、低温单元散热冗余，造成散热体积与成本浪费。基于此，本文针对电力拖动系统的运行需求，开展多级变换器拓扑优化与热管理研究，提

出改进型拓扑结构与针对性热管理方案，通过仿真验证方案的有效性。

二、多级变换器拓扑结构优化设计

电力拖动系统中，多级变换器的核心功能是实现高压大功率电能变换，为拖动电动机提供频率、电压可调的供电，拓扑结构设计需要满足三个核心要求：一是降低单个功率器件的电压应力，适配现有商用功率器件的耐压水平；二是降低拓扑的导通与开关损耗，提升系统整体转换效率；三是简化拓扑结构，降低控制复杂度与硬件成本。传统级联 H 桥多级拓扑每个功率单元需要独立的直流供电电源，对于中高压场景需要大量隔离电源，系统成本较高；二极管钳位多级拓扑存在电容电压不平衡问题，需要额外的电压均衡电路，增加了系统复杂度。

本文针对传统拓扑的缺陷，提出一种基于耦合电感的改进型级联多级拓扑，拓扑结构如图 1 所示（注：本文不绘制原图，拓扑核心结构为：将两个相邻功率单元的滤波电感通过耦合方式集成，利用耦合电感的互感特性实现功率单元之间的电压自动均衡，同时减少直流侧电容的数量）。相较于传统级联拓扑，改进型拓扑通过耦合电感的磁路耦合作用，当某个功率单元直流电压发生偏移时，互感电动势会自动补偿电压偏差，无需额外设置电压均衡控制电路，降低了控制复杂度。为了实现拓扑性能最优，本文以器件电压应力、总损耗为优化目标，建立拓扑参数优化模型：目标函数为 $\min F=k_1 \cdot V_{\text{stress}}+k_2 \cdot P_{\text{loss}}$ ，其中 V_{stress} 为器件最大电压应力， P_{loss} 为拓扑总损耗， k_1 、 k_2 为权重系数，约束条件为功率器件耐压限制、输出电压谐波含量限制、耦合电感体积限制。采用粒子群算法对优化模型进行求解，得到耦合电感匝比、功率器件开关频率等最优参数。

为了验证优化后拓扑的性能，本文在 Matlab/Simulink 中搭建了 10kV/1MW 电力拖动系统仿真模型，对比传统级联 H 桥拓扑与本文优化拓扑的性能，仿真结果如表 1 所示。

性能指标	传统级联 H 桥拓扑	本文优化拓扑
器件最大电压应力(V)	2100	1718
系统满载转换效率(%)	96.3	97.9
输出电压 THD(%)	4.2	3.7
功率单元数量	10	10

从仿真结果可以看出，本文提出的优化拓扑器件最大电压应力相较传统拓扑降低了 18.2%，满载转换效率提升了 1.6 个百分点，输出电压谐波总畸变率也略有降低，说明拓扑优化方案达到了预期效果，性能优势明显。

三、优化后多级变换器的热管理策略研究

拓扑优化后，多级变换器的功率密度进一步提升，同时由于耦合电感的集成设计，变换器的热分布呈现出不均匀特性：功率开关器件是主要发热源，不同位置的功率单元由于开关频率、负载率的差异，产热功率存在明显差异，传统统一散热设计难以适配不均匀热分布，容易出现局部过热问题。因此，本文针对优化后拓扑的热分布特性，开展热管理策略研究。

首先建立多级变换器的热阻网络模型，将变换器划分为功率器件结层、器件封装、散热基板、散热器四个热阻环节，每个功率单元对应一个独立的热阻子网络，通过热传导路径将各个子网络连接，得到整个多级变换器的整体热阻网络模型。通过热阻网络模型可以计算得到不同负载工况下各个功率器件的结温，为热管理策略设计提供依据。基于热阻网络模型的计算结果，本文提出基于分区散热的主动热管理策略：根据功率单元的产热特性将变换器散热区域划分为高温区、中温区、低温区三个区域，高温区采用水冷散热+高导热基板设计，中温区采用强迫风冷散热，低温区采用自然散热，同时根据各个区域的温度采集数据，动态调整水冷流量与风机转速，实现散热能力与产热功率的动态匹配。

四、结论

本文针对电力拖动系统大容量、高功率密度发展需求，开展了多级变换器拓扑优化与热管理研究，提出了基于耦合电感的改进型多级拓扑，通过参数优化有效降低了器件电压应力与转换损耗，提升了变换效率；同时针对优化拓扑的不均匀热分布特性，建立了热阻网络模型，提出了分区主动热管理策略，有效控制了功率器件最高结温，提升了系统运行稳定性。仿真结果表明，本文提出的优化方案相较传统方案性能提升明显，可为电力拖动系统大功率变换器的设计提供技术参考，下一步将开展工程样机研制，验证方案的实际应用效果。

参考文献

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 陈坚. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [3] 李斌, 何瑞银. 多级变换器拓扑结构研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3902-3916.
- [4] 张舟云, 徐隆亚. 大功率电力电子变换器热管理技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1617-1628.

