

# 高速铁路动车组网侧变流器的温升特性仿真

王成涛<sup>1</sup> 韦敬<sup>2,3</sup> 韩伟<sup>1</sup> 张逸飞<sup>2,3</sup> 齐玉文<sup>1</sup> 刁利军<sup>2,3</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春; 2. 北京交通大学电气工程学院, 100044, 北京; 3. 北京交通大学载运装备多源动力系统教育部重点实验室, 100044, 北京)

**摘要** [目的]网侧变流器是高速动车组牵引传动系统中的核心电气设备,其可靠性直接关系到列车的安全运行。因此,有必要对高速铁路动车组网侧变流器的温升特性进行仿真分析,探索温升与运行工况、环境条件之间的关系,为实际运行过程中的温度评估提供理论支持。[方法]研究功率器件温升特性,构建了包括功率损耗模型和热网络模型在内的电热仿真模型。功率损耗模型用于量化功率器件在不同运行状态下的损耗情况;热网络模型则结合列车运行环境条件,模拟功率器件内部热传导和散热过程。在仿真过程中,考虑了运行工况、环境温度等多种影响因素,动态分析了功率器件的温度变化趋势及其对变流器性能的影响。[结果及结论]仿真结果表明,所建立的电热仿真模型能够准确反映功率器件的温升特性。该研究结果为列车实际运行中评估网侧变流器温度变化提供了重要数据支持。

**关键词** 高速铁路动车组;网侧变流器建模;功率器件温升特性

中图分类号 U266

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.025

## Simulation of Temperature Rise Characteristics of High-speed Railway EMU Grid-side Converters

WANG Chengtao<sup>1</sup>, WEI Jing<sup>2,3</sup>, HAN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Yifei<sup>2,3</sup>, QI Yuwen<sup>1</sup>, DIAO Lijun<sup>2,3</sup>

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China; 3. Key Laboratory of Vehicular Multi-Energy Drive Systems of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] The grid-side converter is a core electrical component in high-speed railway EMU traction drive system, and its reliability is directly related to the safe operation of the train. Therefore, it is essential to simulate and analyze the temperature rise characteristics of the grid-side converter in high-speed EMU to explore the relationship between tem-

perature rise, operating conditions, and environmental factors, providing theoretical support for temperature evaluation during actual train operation. [Method] The temperature rise characteristics of power devices are examined, and an electrothermal simulation model is established incorporating the power loss model and thermal network model. The former is used to quantify the losses of power devices under different operating conditions, while the latter simulates internal heat conduction and dissipation processes of power devices considering the train's operating environment. The simulation accounts for multiple influencing factors such as operating conditions and ambient temperature, dynamically analyzing the temperature variation trends of power devices and their impact on converter performance. [Result & Conclusion] Simulation results demonstrate that the established electrothermal simulation model accurately reflects the temperature rise characteristics of power devices. This research provides critical data support for evaluating temperature changes in grid-side converters during actual train operation.

**Key words** high-speed railway EMU; modeling of grid-side converters; temperature rise characteristics of power device

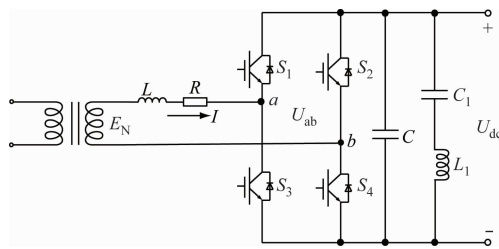
## 0 引言

高速铁路动车组因其安全性和舒适性而迅速发展,其速度的提升导致列车电气设备容量增大,伴随的温升问题日益显著,对电气设备温升特性的观测变得至关重要<sup>[1]</sup>。网侧变流器作为动车组牵引传动系统的关键部件,负责为牵引逆变器和电机等提供稳定直流电压,其功率模块的故障概率高达牵引变流器总故障的30%,且主要由功率器件散热引起<sup>[2]</sup>。因此,研究功率器件的温升变化对反映网侧变流器的温升特性具有重要意义。

目前,动车组变流器功率模块温升特性的仿真建模研究主要分为两类<sup>[3]</sup>:一是基于器件物理结构的精确模型,虽准确性高,但需全面结构数据,计算

量大,适用于器件级仿真;二是基于器件输入输出特性的行为模型,通过合理等效内部结构,优化仿真速率,适用于系统级仿真。综合考虑列车工况、容量、拓扑结构等因素,对动车组网侧变流器温升特性的仿真需结合系统级与器件级结果。

本文以京张高铁复兴号动车组为背景,针对其采用的二电平双重化整流结构网侧变流器(功率器件为 IGBT(绝缘栅双极型晶体管))进行温升特性仿真研究,该变流器实现了单位功率因数控制、功率双向流动及稳定直流电压输出功能<sup>[4]</sup>。图 1 为该高铁动车组网侧变流器整流模块的拓扑结构。



注:  $S_1$ — $S_4$  为功率器件,包括 IGBT 和 FWD(续流二极管);  $E_N$  为网侧电压;  $I$  为网侧电流;  $U_{dc}$  为直流侧电压;  $U_{ab}$  为变流器交流侧输入电压。  $L$ 、 $R$  为交流侧电感和电阻;  $C$  为直流侧支撑电容;  $C_1$  和  $L_1$  组成滤波电路,用以消除二次脉动。

图 1 高铁动车组网侧变流器整流模块拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of rectifier module for high-speed EMU grid-side converters

针对上述应用背景,本文首先针对网侧变流器的功率器件展开结构分析,并依据器件结构构建了相应的温升模型。该模型核心涵盖功率损耗模型与热网络模型两大组成部分。随后,基于所建立的模型原理,成功搭建了仿真模型,并利用现有的温升试验数据对仿真结果进行验证,确保了模型的准确性。最终,针对京张高铁动车组在运行过程中网侧变流器的特性进行了深入仿真分析。

## 1 功率器件温升模型

功率器件的温升模型由功率损耗模型和热网络模型两大核心部分构成<sup>[5]</sup>。在功率器件的工作过程中,其功率损耗主要转化为热量,故而功率损耗模型的计算结果被用作热网络模型的输入参数。热网络模型则进一步由热阻和热容两大要素组成,其中热阻用于表征功率器件在稳态工作时的温度变化特性,而热容则用于描述其瞬态温度变化特性。依据器件的具体结构,温度被等效为电压,功率被等效为电流进行处理<sup>[6]</sup>。此外,该模型还须整

合网侧变流器的仿真模型、功率器件的信息及线路的环境条件等作为额外的输入条件。

### 1.1 功率损耗模型

动车组网侧变流器功率器件的功率损耗模型主要聚焦于 IGBT 的开关损耗与导通损耗,以及 FWD 的反向恢复损耗与导通损耗的计算。其中,导通损耗的数值是通过已构建的网侧整流器仿真模型,在不同工况下获取功率器件的导通电压和电流,进而进行计算得出的。而开关损耗与反向恢复损耗的具体数值,则是参考功率器件的器件手册获取。

本文所研究的应用背景使用的 IGBT 型号为英飞凌 FZ750R65KE3。IGBT 的导通损耗为<sup>[7]</sup>:

$$P_{\text{cond\_IGBT}} = \int V_{ce} I_c dt \quad (1)$$

式中:

$V_{ce}$ ——IGBT 的导通压强;

$I_c$ ——IGBT 集电极电流;

$t$ ——IGBT 导通时间。

FWD 的导通损耗为:

$$P_{\text{cond\_FWD}} = \int V_{ce} I_f dt \quad (2)$$

式中:

$I_f$ ——二极管的流过的电流。

依据功率器件的开关能量曲线数据,使用曲线拟合工具箱分别拟合出 IGBT 的开、关能量,以及 FWD 的反向恢复能量为:

$$E_{\text{on}} = 0.003\ 004 I_c^2 + 6.698 I_c \quad (3)$$

$$E_{\text{off}} = 5.679 I_c \quad (4)$$

$$E_{\text{rec}} = -0.001\ 965 I_f^2 + 5.601 I_f \quad (5)$$

式中:

$E_{\text{on}}$ 、 $E_{\text{off}}$ ——IGBT 的开、关能量,单位 mJ;

$E_{\text{rec}}$ ——FWD 的反向恢复能量,单位 mJ。

进一步根据器件的导通和关断时间,可以计算 IGBT 的开通损耗  $P_{\text{on}}$  和关断损耗  $P_{\text{off}}$ ,以及 FWD 的反向恢复损耗  $P_{\text{rec}}$  为:

$$P_{\text{on}} = \frac{E_{\text{on}}}{t_{\text{on}}} \quad (6)$$

$$P_{\text{off}} = \frac{E_{\text{off}}}{t_{\text{off}}} \quad (7)$$

$$P_{\text{rec}} = \frac{E_{\text{rec}}}{t_{\text{rec}}} \quad (8)$$

则功率器件的总损耗可以表示为:

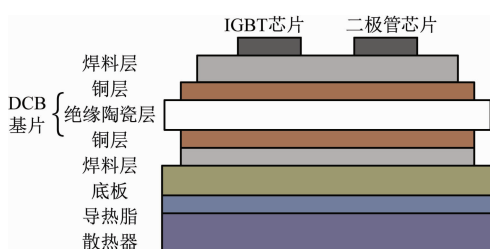
$$P_{\text{IGBT}} = P_{\text{cond\_IGBT}} + P_{\text{on\_IGBT}} + P_{\text{off\_IGBT}} \quad (9)$$

$$P_{\text{FWD}} = P_{\text{cond\_FWD}} + P_{\text{rec\_FWD}} \quad (10)$$

此外,开关能量函数是基于恒定环境温度的。当环境条件发生变化时,可利用插值法对功率损耗进行相应修正。由于开关器件的导通特性,IGBT与FWD呈现交替导通状态,因此它们的功率损耗亦呈现交替产生。

## 1.2 热网络模型

功率器件的热网络模型依据其结构特征进行构建<sup>[8]</sup>,IGBT功率器件的结构示意图如图2所示。

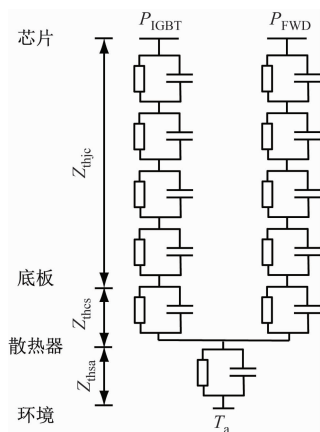


注:DCB—覆铜陶瓷。

图2 IGBT功率器件结构示意图

Fig.2 Diagram of IGBT (insulated gate bipolar transistor) power device structure

依据器件结构图,Foster方法及Cauer方法均可被用于等效为热网络结构。Foster方法主要基于器件结构,忽略内部各层具体影响,仅关注器件结壳间的温度关系,其参数获取相对简便。而Cauer方法则需根据结构图,对各层间的热阻与热容进行逐一等效,能够反映各层温度的变化情况,但参数获取过程较为复杂。在多数情况下,采用Foster方法来构建功率器件的热网络模型更为普遍。功率器件等效热网络模型如图3所示。



注: $Z_{\text{thjc}}$ 为芯片到器件表壳的阻抗; $Z_{\text{thcs}}$ 为表壳到散热器的阻抗; $Z_{\text{thsa}}$ 为散热器到环境的阻抗。

图3 功率器件等效热网络模型

Fig.3 Equivalent thermal network model of power devices

功率器件的结壳间的热阻抗可以表示为:

$$Z_{\text{thjc}}(t) = \sum_{i=1}^4 R_i (1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}}) \quad (11)$$

式中:

$i$ ——阶次;

$R_i, C_i$ ——各自阶次的等效热阻和热容。

功率器件的温度可以表示为:

$$T_{\text{IGBT}}(t) = (P_{\text{IGBT}} + P_{\text{FWD}})(Z_{\text{thcs\_I}} + Z_{\text{thsa\_I}}) + P_{\text{IGBT}} Z_{\text{thjc\_I}} + T_a \quad (12)$$

$$T_{\text{FWD}}(t) = (P_{\text{IGBT}} + P_{\text{FWD}})(Z_{\text{thcs\_D}} + Z_{\text{thsa\_D}}) + P_{\text{FWD}} Z_{\text{thjc\_D}} + T_a \quad (13)$$

式中:

$T_a$ ——环境温度。

功率器件采用水冷方式进行冷却,其环境条件主要对功率器件中散热器至环境的热阻和热容产生影响。环境温度条件,包括气温和气压等参数,均可表示为海拔高度的函数。

$$T(h) = T_0 - 0.015h \quad (14)$$

$$p(h) = p_0 (1 - 2.25577 \times 10^{-5} h)^{5.2559} \quad (15)$$

$$\rho(h) = \frac{p(h)}{RT(h)} \quad (16)$$

式中:

$h$ ——海拔高度,单位 m;

$T$ ——气温,单位  $^{\circ}\text{C}$ ;

$p$ ——气压,单位 kPa;

$p_0$ ——平原处的气压,单位 kPa;

$\rho$ ——空气密度,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$R$ ——气体常数,一般取  $287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

由于功率损耗的持续交替产生,开关器件的状态呈现不断变化的特点,温度波形遂在较大范围内呈现波动。此现象归因于所构建的温升模型旨在反映器件瞬态温度的变化情况,该模型基于器件在持续导通与关断过程中温度的累积效应。

图4为功率器件的温度累积原理。通过对图4分析可知:在功率器件开关导通过程中,伴随着功率损耗的产生,结温随之上升;而当功率器件开关断开后,结温则开始下降;若器件在未达到稳定状态前再次导通,则将引发结温的再次上升。

## 2 模型仿真实证

根据模型建立原理,在MATLAB软件中搭建功率器件的温升仿真模型,其功率器件热阻、热容参数如表1所示。

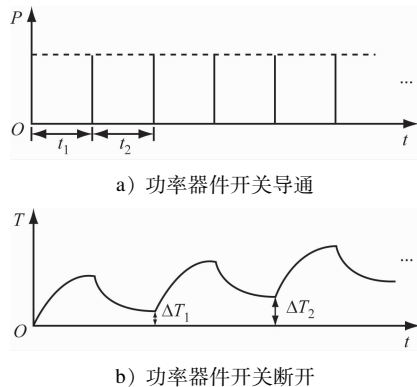


图 4 功率器件温度累积原理

Fig. 4 Power device temperature accumulation principle

表 1 功率器件热阻参数

Tab. 1 Thermal resistance parameters of power devices

阶次	IGBT 热阻/ (K/kW)	时间常数/s	FWD 热阻/ (K/kW)	时间常数/s
1	0.44	0.004	2.69	0.005
2	5.62	0.044	11.49	0.048
3	1.67	0.405	2.82	0.313
4	0.96	3.930	1.61	3.348

根据表 1 及设计经验计算 IGBT 芯片与二极管芯片的表壳至散热器之间的热阻值,其热阻值分别为 8.80 K/kW 和 14.00 K/kW。此外,进行功率损耗计算时,还需参考网侧变流器的相关仿真参数,具体如表 2 所示。

表 2 动车组网侧整流器仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of EMU grid-side rectifier

名称	参数
变流器额定输入电压/V	1 900
变流器额定输入电流/A	810
额定频率/Hz	50
中间直流环节电压/V	3 300
最大开关频率/Hz	350
直流侧支撑电容/mF	6
直流侧滤波电感/mH	0.5
直流侧滤波电容/mF	5

器件的功率损耗计算仿真结果如图 5 所示。

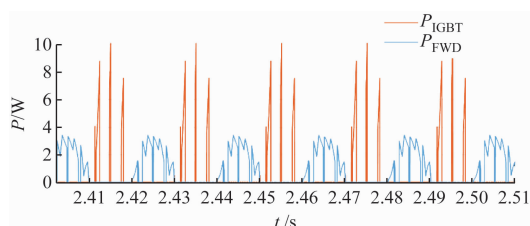


图 5 功率损耗仿真结果

Fig. 5 Power loss simulation results

按照网侧变流器额定工况下进行仿真,结壳温度仿真结果如图 6 所示。

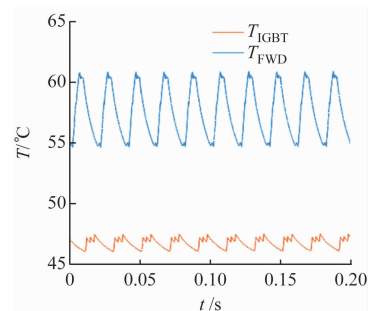


图 6 功率器件结壳温度仿真结果

Fig. 6 Simulation results of power device junction temperature

根据图 5 和图 6 的仿真结果,可以观察到功率器件的结温累积变化趋势。为进一步验证模型的准确性,对牵引变流器在额定工况下的温升进行了仿真,如图 7 所示。

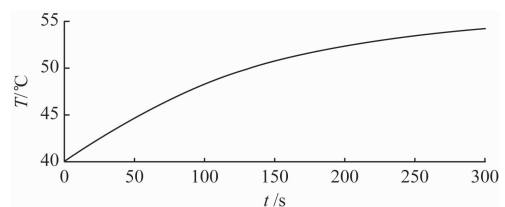


图 7 功率器件散热器温度仿真结果

Fig. 7 Power device heat dissipation device temperature simulation results

图 7 的仿真结果显示,功率器件的温度稳定在大约 54 °C,这与温升试验报告中的结果相吻合。因此,通过仿真验证,确认该模型可用于反映京张高铁动车组网侧整流器的温升情况。

### 3 动车组网侧变流器温升特性仿真

北京—张家口线路直流侧等效负载曲线如图 8 所示<sup>[9]</sup>。

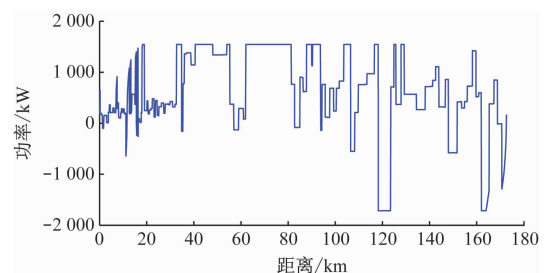


图 8 北京—张家口线路直流侧等效负载曲线

Fig. 8 Equivalent load curve of Beijing-Zhangjiakou Line DC-side



根据环境条件及京张高铁动车组负载变化情况,可以仿真得到动车组运行过程中网侧整流器的温度的变化情况。功率器件结温仿真结果如图9所示,功率器件散热器温度仿真结果如图10所示。

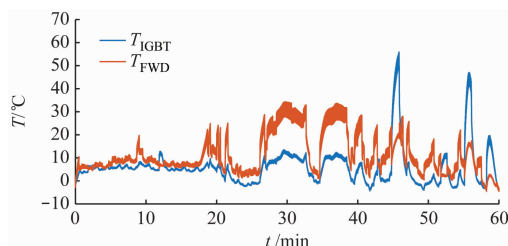


图9 功率器件结温仿真结果

Fig. 9 Simulation results of power device junction temperature

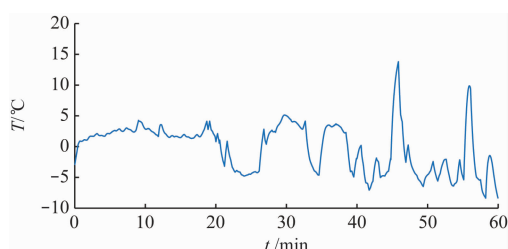


图10 功率器件散热器温度仿真结果

Fig. 10 Simulation results of power device heat dissipation device temperature

根据图9和图10的仿真结果,动车组在线路运行过程中,功率器件中IGBT的结温呈现出最高值,达到60℃,而其表面温度的最大值为18℃。

## 4 结语

本文首先阐述了高速铁路动车组网侧变流器功率模块温升模型的搭建原理;其次,在MATLAB仿真平台上构建了相应的器件仿真模型,并通过验证确认了模型的准确性;最后,结合动车组网侧变流器的应用背景与环境条件,对其功率器件的温升特性进行了仿真分析,得出了仿真结果。这些仿真结果能够反映列车运行过程中的功率器件温升变化,为列车实际运行中的温度变化研究及其他后续研究方向提供了数据参考。

## 参考文献

[1] 乔俊飞,王洪雨,王通,等.京张高铁总体设计与技术创新[M].北京:人民交通出版社,2021.  
QIAO Junfei, WANG Hongyu, WANG Tong, et al. Overall design and technological innovation of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[M]. Beijing: China Communications Press, 2021.

[2] 钱茜,张臻,黄国昆,等.基于环境温度、负载率的光伏逆变器温升研究[J].太阳能学报,2019,40(12):3519.  
QIAN Xi, ZHANG Zhen, HUANG Guokun, et al. Research on temperature rise of inverter based on ambient temperature and load power point[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(12): 3519.  
[3] 孟凡迪.京张高铁动车组牵引电机运行能力评估研究[D].北京:北京交通大学,2022.  
MENG Fandi. Research on evaluation of traction motor operation capability of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.  
[4] 朱庆祥,罗毅飞,刘宾礼,等.适用于交流装置电路仿真的IGBT分段瞬态模型[J].高电压技术,2020,46(8):2806.  
ZHU Qingxiang, LUO Yifei, LIU Binli, et al. Piecewise transient model of IGBT suitable for complex circuit simulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2806.  
[5] 林城美,王公宝,汪光森,等.IGBT开关瞬态实时仿真模型[J].海军工程大学学报,2017,29(1):18.  
LIN Chengmei, WANG Gongbao, WANG Guangsen, et al. Real-time simulation model of IGBT switching transient[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(1): 18.  
[6] 袁晓冬,葛雪峰,史明明,等.基于电热耦合模型的功率器件结温预测[J].半导体技术,2022,47(1):25.  
YUAN Xiaodong, GE Xuefeng, SHI Mingming, et al. Junction temperature prediction of power devices based on the electrothermal coupling model[J]. Semiconductor Technology, 2022, 47(1): 25.  
[7] 郝钰,石华林,范瑞祥,等.基于动态热路模型的配电变压器过载工况下温升研究[J].变压器,2020,57(12):22.  
HAO Yu, SHI Hualin, FAN Ruixiang, et al. Study on temperature rise of distribution transformer under overload condition based on dynamic thermal circuit model[J]. Transformer, 2020, 57(12): 22.  
[8] 黄先进,杜田倩,李鑫,等.考虑线路运行环境的牵引变流器IGBT寿命评估[J].电源学报,2021,19(4):153.  
HUANG Xianjin, DU Tianqian, LI Xin, et al. Life evaluation of IGBT in traction converter considering line operating environment[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 153.  
[9] 韦敬.京张高铁列车网压与温升特性的运行评估[D].北京:北京交通大学,2022.  
WEI Jing. Operation evaluation of network voltage and temperature rise characteristics of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10  
· 通信作者:王成涛,正高级工程师,wct\_2005@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license