大功率牵引变流器IGCT器件损耗模型

卫炜^{1,2},葛琼璇¹,李耀华^{1,2},赵鲁¹,张波¹

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室(中国科学院电工研究所),北京 100190;2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院,北京 100049)

摘要:集成门极换流晶闸管(IGCT)是保障大功率牵引变流器高效可靠运行的重要元件。IGCT器件开 关过程中电压及电流的动态特性极大地影响了大功率变流器系统的稳定运行。研究了不同测试工况对4.5 kV/4 kA的IGCT器件动态特性参数的影响,并提出了一种考虑器件电压、电流和温度的IGCT器件损耗数值 模型。该模型形式简单、易于实现、具有可推广性,为进一步分析大功率变流器系统损耗及效率特性打下理 论基础。

关键词:集成门极换流晶闸管;开关损耗;动态特性;温度特性 **中图分类号:**TM46 **文献标识码:**A **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd23509

The Loss Model of the IGCT Device in High Power Traction Converter

WEI Wei^{1,2}, GE Qiongxuan¹, LI Yaohua^{1,2}, ZHAO Lu¹, ZHANG Bo¹

 $(1.\ Key\ Laboratory\ of\ Power\ Electronics\ and\ Electric\ Drive(\ Chinese\ Academy\ of\ Sciences\ ,$

Institute of Electrical Engineering), Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The integrated gate commutated thyristor (IGCT) is an important element for efficient and reliable operation of high power traction converters. The stability of high power converter system is significantly affected by the voltage and current dynamic characteristics of the IGCT device during the turn-on and turn-off processes. The dynamic characteristics parameters of the 4.5 kV/4 kA IGCT device were studied, which were tested under different testing conditions. Furthermore, a numerical loss model of the IGCT device in terms of the voltage, current and temperature was presented. The model is apt to be implemented and extended because of its simple form, and a theoretical basis for the analysis of the loss and efficiency characteristics of the high power converter system is established.

Key words: integrated gate commutated thyristor(IGCT); switching loss; dynamic characteristics; temperature characteristics

在中高压变频调速领域,三电平中点钳位 (neutral point clamped, NPC)变流器因其输出功 率大、输出电压谐波含量小、电路结构简单、便于 背靠背运行等优点得到了广泛的应用^[1]。德国学 者 Bruckner^[2]进一步地提出了三电平有源中点钳 位(active neutral point clamped, ANPC)结构,将 功率开关器件和钳位二极管反并联,比NPC结构 具有更多开关状态和换流路径,提高了变流器的 输出容量和容错能力^[3]。由于控制难度相对较 大,具有更多电平数的ANPC结构^[4]还没有足够的 工程应用。

变流器系统的性能与功率器件动态特性紧密相关,功率器件的开关速度和损耗特性决定了 变流器系统的工作频率、效率和功率密度^[5]。近

基金项目:国家重点研发计划"高速磁浮交通系统关键技术研究"课题资助项目(2016YFB1200602-20)

作者简介:卫炜(1989—), 男, 博士, Email:weiwei@mail.iee.ac.cn

通讯作者:赵鲁(1984—), 男, 博士, 副研究员, Email: zhaolu@mail.iee.ac.cn

年来,研究者们多把目光放在应用广泛的晶体管 类器件,如绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)或金属氧化物半导体场效 应管(metal oxide semiconductor field-effect transistor, MOSFET)等^[6-7]。但在冶金传动、直流输电、轨 道交通等领域,集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)以其开关功率大、 通态损耗低及浪涌能力强的优势逐渐发挥重要 作用^[8-9]。

IGCT器件的动态特性和开关损耗与器件半导体特性、温度、缓冲吸收电路参数等因素相关^[10-12]。文献[10]研究了缓冲吸收电路参数对 IGCT关断特性的影响,但未涉及器件损耗计算, 且未考虑器件温度的影响。文献[11]对比了IGCT 和其他种类器件应用于模块化多电平变流器时 的损耗特性,详细分析了不同工作频率下吸收电 路损耗、通态损耗和开关损耗分布,指出IGCT器 件的性能优越性,但是其损耗计算公式只是基于 器件参数手册的比例折算,精确度较低。文献[12] 建立了一种基于查表法的IGCT器件电热耦合模 型,以器件门-阴极间电压作为温度敏感电参数, 以较高的精度实现对器件全工作状态下的温度 监测和损耗评估,但是该方法所需提取参数较 多、计算量较大。

本文以高速磁悬浮列车三电平牵引变流器 使用的IGCT器件为研究对象,研究温度、电压、 电流等因素对IGCT的动态特性和损耗特性的影 响。本文建立了一种IGCT器件的损耗数值拟合 模型,并引入逐步回归方法对线性多项式进行简 化。该模型基于实验数据,内含器件特性和温度 的耦合作用,形式简单、拟合度高,易于数字实 现。相比直接利用手册数据,本文提出的损耗模 型精度更高,适用范围更广,可进一步用于变流 器系统损耗特性和控制策略的仿真分析。

1 牵引变流器及器件测试平台

1.1 三电平 IGCT 变流器

本文研究的高速磁浮大功率牵引变流器采 用三电平结构,如图1所示,主要包括三绕组输入 变压器、整流器、直流滤波电容、缓冲吸收电路和 逆变器。其中,整流和逆变单元均为基于IGCT 器件的三电平 ANPC 结构,三相独立的 RLCD 电 路是为保证 IGCT 和二极管安全工作而设置的缓 冲吸收电路。



图1 三电平ANPC变流器拓扑结构

Fig.1 The topology of the three-level ANPC converter

大功率三电平变流器由水冷柜、整流柜、电 容柜、逆变柜和控制柜共五个柜体组成,实物图 如图2所示,模块化结构设计使整个变流器系统 的结构紧凑,具有功率密度高、体积小、维护方便 等优点。





大功率三电平变流器使用的 IGCT 器件的额 定电压为4.5 kV,额定可关断电流峰值4 kA,电流 最大上升率为1 000 A/µs,最大允许工作结温为 125 °C。配套二极管的额定电压4.5 kV,电流最 大上升率为 600 A/µs,最大允许工作结温为 140 ℃。变流器直流母线电压保持5 000 V,输出 电压频率范围 0~356 Hz。

1.2 IGCT器件特性测试平台

为研究不同的外部电路参数对 IGCT 器件的 电压及电流尖峰、器件损耗、导通及关断过程时 间等动态特性参数的影响,本文研究团队研制了 一套单功率器件动态特性测试平台,原理图及实 物图如图 3 所示,DUT 代表被测器件, D_{fwd} 为续流 二极管,测试电路的主要参数如下:直流侧电容 $C_{de}=6.4 \mu$ F,缓冲电路电容 $C_s=10 \mu$ F,缓冲电路电 阻 $R_s=0.45 \Omega$,缓冲电路电感 $L_s=5 \mu$ H,负载电阻 $R_{load}=0.15 \Omega$,负载电感 $L_{load}=0.5 m$ H。

单功率器件动态特性测试平台可用于测试 可承受直流电压最高达3kV、关断电流峰值最高 达4kA的压接式功率器件的动态特性。

测量实验时,放置台上放入被测器件,操作 区旋钮控制液压夹具固定压力,稳定后通过设置 在夹具阴阳两极的热电偶对器件进行加热和温



图 3 单功率器件测试平台 Fig.3 Single power semiconductor switch test platform

度控制。器件端电压和阳极电流分别由高压差 分探头和罗氏线圈测量。通过上位机LabView交 互界面调整测试参数,该平台可测量并记录开关 器件的开通及关断波形数据,用于后续分析不同 外部参数对器件动态特性的影响。

本文以双脉冲测试法研究在器件端电压、 导通电流、温度等不同因素影响下IGCT器件的 动态特性。典型的双脉冲测试实验波形如图4 所示。





图 4 中, 直流侧电压预充值为 2.5 kV, 在电 感负载的作用下, 器件导通时电流呈线性增长。 第二次导通时刻电流峰值达到 3.04 kA, 尖峰电 流增幅接近 20%; 第二次关断时刻电压峰值达 到 3.4 kV, 尖峰电压增幅达 36%。器件的动态 特性分析主要针对第二次开通和关断过程中的 波形。

2 IGCT器件动态特性分析

器件的动态特性决定了变流器的工作频率 和死区时间的选择范围,并且可帮助估算变流器 系统损耗和效率,为大功率变流器系统的散热系 统设计提供依据。

使用 IGCT 器件特性测试平台,在保证 IGCT 器件安全工作的条件下,本文设计并完成了器件 导通及关断特性的三因素多水平实验。因素一 是器件温度,依靠加装在夹具阴阳两极的高精度 热敏电阻测量,取25°C,50°C,75°C,100°C和 125°C五个温度点;因素二是直流侧电压,由电 压传感器测量,取2000 V,2500 V,2800 V 三个 电压点;因素三是关断电流峰值,由罗氏线圈测量,取 1000 A,1500 A,2000 A,2500 A和2900 A五个 电流点,每组实验条件下均重复多次。为保证测 试条件的一致性,被测器件为同一个 IGCT,测量 工具能正确工作时不进行更改操作。下面分别 分析电流、电压、温度各个因素对器件动态特性 的影响。

2.1 导通及关断过程特性

为了分析IGCT器件的导通及关断过程的波 形变化特点,以温度125°C为例来说明,其余四 组温度下器件具有类似的特性。根据直流侧电 压可划分三组数据,对比分析得到在相同器件温 度和直流侧电压下,不同电流值对IGCT器件导 通和关断波形以及开关损耗的影响。

温度125°C下,电压分别为2000V,2500V, 2800V时,不同电流下IGCT器件导通过程波形 如图5所示,其中,图5a、图5c、图5e为电压及电 流波形,图5b、图5d、图5f为瞬时功率波形。以图 5a为例说明,左半部分实线是器件电压波形,右 半部分虚线是器件电流波形,导通过程中不同电 流下器件电压变化较小,对差异相对较大部分放 大处理,按箭头方向对应关断电流峰值由1000~ 2900A下的电压波形。

从图5的导通过程波形中可以看出,不改变 测试电路内电感值,相同电压不同电流下器件电 流上升率 di/dt相同,相同电流不同电压下器件电 流上升率 di/dt 随电压增大而略有升高。另一方 面,导通过程中的尖峰电流峰值主要受电流影 响,存在正向线性关系,而不同电压影响下的差 距很小,如图6所示。



different currents(125 °C)

温度125℃,电压分别为2000V,2500V, 2800V时,不同电流下IGCT器件关断过程的电 压、电流及瞬时功率波形如图7a~图7f所示。以 图7a为例说明,左半部分虚线是器件电流波形, 右半部分实线是器件电压波形,对电压快速上升 部分进行放大处理,按箭头方向对应关断电流峰 值1000~2900A下的波形。

从图7的关断过程波形可以看出,不同电流 下,器件电压上升率 du/dt 随着电流增加而增大。 尖峰电压的峰值与电流呈近似线性关系,随电压 增加而增大,如图8a所示;尖峰电压的过冲值则



under different testing conditions

主要与电流之间存在近似线性关系,随着电压增加而略有减小,如图8b所示。



图8 不同电流下IGCT尖峰电压(125°C)

Fig.8 The voltage spikes of IGCT under different currents(125 °C)

2.2 导通及关断损耗特性

基于上面的实验测试数据,同样以温度 125℃为例来说明,在相同器件结温下,IGCT器 件的导通损耗随阳极电流及直流电压的增加而 增大,存在一定的近似线性关系,其变化曲线如 图9所示。



Fig.9 The waveforms of turn-on loss under different values of current and voltage($125\ ^{\circ}C$)

IGCT器件的关断损耗同样随阳极电流及直 流电压的增加而增大,存在近似线性关系,其变 化曲线如图10所示。





进一步分析在相同电压、电流下,不同的器件温度对器件的导通及关断损耗的影响。以直流电压为2500V为例,在相同的电流下,导通损耗随结温变化趋势如图11所示,随着结温的增加,IGCT器件的导通损耗几乎不变。



图 11 不同温度及电流下导通损耗波形(2 500 V) Fig.11 The waveforms of IGCT turn-on loss under different values of temperature and current(2 500 V)

不同温度及电流条件下,关断损耗随结温变 化趋势如图12所示,随着结温的增加,IGCT器件 的关断损耗与器件结温之间满足近似二次曲线 规律。



电气传动 2022年 第52 半 第19期

图 12 不同温度及电流下关断损耗波形(2 500 V) Fig.12 The waveforms of turn-off loss under different

values of temperature and $\operatorname{current}(2\ 500\ \mathrm{V})$

2.3 导通及关断时间特性

IGCT器件的导通和关断时间是在实际工程 应用时需要重点关注的另外一个指标,对IGCT 器件的死区时间设置具有重要的指导意义。综 合分析测试实验数据,IGCT导通和关断时间随器 件温度、直流侧电压和阳极电流的变化趋势分别 如图13、图14所示。





图 13、图 14 中的每一层曲面表示在相同温 度下的开关时间与电压电流的变化趋势,由下至 上分别对应器件温度 25~125 °C。可以看出,导 通及关断时间与器件温度均呈正相关;导通时间 与阳极电流呈正相关,与直流侧电压关系不明 显;关断时间与阳极电流关系不大,与直流侧电 压呈负相关。

3 IGCT器件损耗模型

功率器件IGCT的损耗由通态损耗、开关损 耗和断态损耗组成,开关损耗又分为导通损耗和 关断损耗。由于器件的断态漏电流极小,计算总 损耗时可忽略断态损耗。

3.1 通态损耗

器件数据手册给出IGCT器件完全导通后通态压降 V_T与流通电流 I_T之间的特性曲线,并给出如下式所示的拟合函数:

 $V_{T,T_{j}} = A_{T_{j}} + B_{T_{j}}I_{T} + C_{T_{j}}\ln(I_{T} + 1) + D_{T_{j}}\sqrt{I_{T}}$ (1) 式中: $V_{T,T_{j}}$ 为器件温度 T_{j} 下的通态压降; I_{T} 为器件 流通电流瞬时值; $A_{T_{j}}, B_{T_{j}}, C_{T_{j}}, D_{T_{j}}$ 分别为对应的拟 合系数。

式(1)可满足离线计算的需求,但运算较为 复杂,在线实时计算时有所不便。因此本文选择 以分段线性函数拟合通态压降特性曲线。

不同温度下的两条通态压降特性曲线在 [1.85 V, 1 318 A]处相交,以1 318 A为分界线,分 段线性拟合 IGCT 的通态压降与电流关系曲线, 分别如下二式所示:

$$V_{\text{T,25}} = \begin{cases} 1.37 + 0.368 \times 10^{-3} I_{\text{T}} & I_{\text{T}} \in [300, 1\,318\,)\text{A} \\ 1.56 + 0.222 \times 10^{-3} I_{\text{T}} & I_{\text{T}} \in [1\,318, 5\,000\,]\text{A} \end{cases}$$
(2)
$$(2)$$

 $V_{\rm T,125} = \begin{cases} 1.43 + 0.317 \times 10^{-3} I_{\rm T} & I_{\rm T} \in [1\,318,5\,000\,]\,{\rm A} \\ \end{cases}$ (3)

式中:*V*_{T,25},*V*_{T,125}分别为器件温度 25 ℃,125 ℃下的通态压降。

假设功率器件的通态压降特性与器件温度 之间存在如下所示的线性关系:

$$V_{\text{T0,T}_{j}} = V_{\text{T0,125}} + K_{\text{VT}} \cdot \frac{T_{j} - 125}{25 - 125}$$
(4)

$$r_{\text{T0,T}_{j}} = r_{\text{T0,125}} + K_{\text{rT}} \cdot \frac{T_{j} - 125}{25 - 125}$$
(5)

式中:V_{T0,125}, r_{T0,125}分别为器件温度125°C时的初始饱和压降和通态电阻; K_{VT}, K_{rT}分别为初始饱和 压降和通态电阻的温度修正系数。

结合式(2)、式(3)可得下式所示温度修正系数:

$$\begin{cases} K_{\rm vT} = \begin{cases} 0.115\ 6 & I_{\rm T} \in [\ 300, 1\ 318\)\,{\rm A} \\ 0.062\ 7 & I_{\rm T} \in [\ 1\ 318, 5\ 000\]\,{\rm A} \\ \end{cases} \\ K_{\rm rT} = \begin{cases} -8.77 \times 10^{-6} & I \in [\ 300, 1\ 318\)\,{\rm A} \\ -4.76 \times 10^{-6} & I_{\rm T} \in [\ 1\ 318, 5\ 000\]\,{\rm A} \end{cases}$$
(6)

线性拟合曲线与手册曲线对比如图15所示, 虚线为不同温度的手册最大值曲线,实线为不同 温度的线性拟合曲线。75°C特性曲线是根据线 性拟合模型预测得到,符合IGCT 通态压降特性 随温度的变化趋势。



IGCT器件的通态损耗计算公式如下式所示: $E_{conT} = [V_{T0,125} + r_{T0,125}I_T + (K_{VT} + K_{rT}I_T) \frac{T_j - 125}{25 - 125}]I_T$ (7)

3.2 开关损耗

本文研究IGCT器件的参数手册仅提供了在 直流侧电压2800V,器件温度125°C以及某组测 试电路参数条件下的开关损耗特性曲线。通过 手册进行推算通常按照下式进行:

$$E_{\rm sw} = E_{\rm swref} \cdot \frac{I_{\rm T}}{I_{\rm ref}} \cdot \frac{V_{\rm D}}{V_{\rm ref}}$$
(8)

式中:V_D为测试电路直流侧电压;E_{swref}为手册参考电压V_{ref}和参考电流I_{ref}下的器件单次开关损耗能量。

式(8)未考虑器件温度因素,也无法准确表示电 压影响,所得结果较实际工况下测量值偏大。

本文选择将IGCT器件的开关损耗表示为关 于电压、电流和温度的线性多项式形式,如下式:

$$E_{swT} = a_1 + a_2 \cdot V_x + a_3 \cdot I_x + a_4 \cdot T_x + a_5 \cdot V_x I_x + a_6 \cdot V_x T_x + a_7 \cdot I_x T_x + (9) a_8 \cdot V_x^2 + a_9 \cdot I_x^2 + a_{10} \cdot T_x^2$$

式中: $a_1 \sim a_{10}$ 为开关损耗二次多项式拟合系数; V_x , I_x , T_x 由器件电压、电流和温度的归一化处理所得,参考值分别为2800V,4000A,125°C。

由于式(9)所含系数较多,且包含所有子项 的模型并不能保证最后所得到的解释变量集是 最优解,故本文采用逐步回归方法求解最优解释 变量集。

逐步回归的基本思想是将变量逐个引入模型,通过显著性判定选择解释变量,包含两个基

本步骤:1)从回归模型中剔出经检验不显著的变量,或者引入新变量到回归模型中;2)重复步骤 直到所有显著的解释变量均被选入回归方程,也 没有不显著的解释变量被剔除,最后所得到的解 释变量集就是最优的。

本文引入逐步回归的方法对拟合多项式进 行优化,借助统计检验判据剔除解释效果不显著 的多项式子项。对于开关损耗拟合模型来说,本 文提出以下判定假设:1)零假设H₀:拟合模型无 效项;2)备选假设H₁:拟合模型有效项。

以 0.05 作为显著性水平(p_{Value})判定标准,如 果 p_{Value} >0.05,表示无显著性差异,承认零假设 H_0 ; 如果 p_{Value} <0.05,表示有显著性差异,拒绝零假 设 H_0 ,接受备选假设 H_1 。

由本文第2节内IGCT器件的双脉冲实验波 形计算可得不同测试工况下开关损耗,按温度可 分为25°C,50°C,75°C,100°C和125°C共5组。 在相同的直流侧2800V和器件温度125°C,以及 相似的测试电路参数条件下,本文所做的双脉冲 实验结果与IGCT参数手册内损耗特性曲线对比 如图16所示。





由图 16可知,本文所做的双脉冲实验结果与 手册内的最大值曲线较为接近,实验结果具有可 信性,可作为 IGCT 器件的开关损耗拟合模型的 数据源。本文从5组温度数据中抽取75°C实验 数据组作为模型效果验证组,其余4组数据用于 模型拟合计算,借助 Matlab 软件构造目标函数并 进行逐步线性回归分析。

采用逐步线性回归方法分析 IGCT 器件的 关断损耗,除 V_x^2 项外其余子项均满足显著性判 定。拟合模型参数如表1所示。表1中,第三列 数值对应 $a_1 \sim a_{10}$ 拟合系数,由于剔除了 V_x^2 项,因 此 $a_8=0$ 。

电气传动 2022年 第52卷 第19期

表1 IGCT器件关断损耗模型拟合系数

Tab.1	Fitting parameters	of IGCT	turn-off lo	ss model

子项	系数	模型系数估计值	$p_{ m Value}$
常数	a_1	3.337	1.468e-17
V_x	a_2	-2.781	$7.054e{-13}$
I_x	a_3	-7.001	6.071e-17
T_x	a_4	-2.243	8.670e-09
$V_x \times I_x$	a_5	19.064	2.315e-61
$V_x \times T_x$	a_6	1.202	7.649e-05
$I_x \times T_x$	a_7	2.418	2.937e-20
I_{x}^{2}	a_9	5.194	$1.464e{-}18$
T_{x}^{2}	a_{10}	2.207	2.711e-21

该组系数下拟合模型模型的均方根误差 (root mean squared error, RMSE)和决定系数(Rsquared, R²)分别为0.121和0.998。均方根误差 越接近0、决定系数越接近1代表模型的拟合度 越高。因此,表1系数得到的IGCT器件关断损耗 模型与本文双脉冲实验数据的拟合度较高。

根据拟合模型预测 IGCT 器件温度 75°C 时的关断损耗,与验证组数据进行对比,结果如图 17 所示。可以看出,拟合模型预测值误差在±3% 之内,准确度较高,可有效地根据实时工况计算 IGCT 器件的关断损耗。



图 17 IGCT关断损耗拟合模型预测值误差

Fig.17 Predicted value errors of IGCT turn-off loss fitting model 同样方法分析 IGCT 器件的开通损耗,模型

拟合系数如表2所示。

表2 IGCT器件开通损耗模型拟合系数

Tab.2 Fitting parameters of IGCT turn-on loss model

子项	系数	模型系数估计值	$p_{ m Value}$
常数	a'_1	0.829	0.027
V_x	a'_2	-2.478	7.757e-3
$V_x \times I_x$	a'_5	3.350	1.289e-105
V_{x}^{2}	a'_8	1.468	8.980e-3

由表2可以看出,仅部分与电压相关的子项 满足显著性判定,不包含温度参数相关项。该组 系数下拟合模型模型的均方根误差*RMSE*和决定 系数*R*²分别为0.062和0.985。

因此,本文以逐步回归方法拟合得到的IGCT