

基于数字孪生的风电变流器IGBT衰退热特性 评估方法研究

李飞¹, 虞孔立¹, 谢友林¹, 尹小平¹, 刘伟²

(1. 江西龙源新能源有限公司, 江西 南昌 330038;

2. 龙源(北京)新能源工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为风电变流器的重要组成部分,通过高频开关实现电能的高效转换,其长时间的复杂运行会导致IGBT性能衰退,增加故障风险并影响系统稳定性。研究了IGBT衰退过程中结温变化趋势,测试了实际运行不同年份的风电变流器IGBT衰退特性,利用PLECS模块搭建双馈风力发电机应用场景的IGBT热仿真模型,分析不同工况下IGBT结温特性,并根据实测衰退数据修正IGBT热模型。结合IGBT衰退前后结温特性差异建立数字孪生模型框架,设计模型建立到实时监测IGBT衰退程度的整体流程,最终实现IGBT衰退程度的实时监测。

关键词: 风电变流器;绝缘栅双极型晶体管;衰退监测;数字孪生

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26312

Research on IGBT Degradation Degree Acquisition Method of Wind Power Converter Based on Digital Twin

LI Fei¹, YU Kongli¹, XIE Youlin¹, YIN Xiaoping¹, LIU Wei²

(1. Jiangxi Longyuan New Energy Co., Ltd., Nanchang 330038, Jiangxi, China;

2. Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Design and Research Institute Co., Ltd.,
Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Insulated gate bipolar transistor (IGBT) as an important part of wind power converter, through the high frequency switch to achieve efficient conversion of electrical energy, its long-term complex operation will lead to IGBT performance decline, increase the risk of failure and affect the stability of the system. By analyzing the change trend of junction temperature of IGBT after decay, the decay degree of IGBT in wind power converters in different years of actual operation was tested. PLECS module was used to build IGBT thermal simulation model for doubly-fed wind turbine application scenarios to study the junction temperature characteristics of IGBT under different working conditions. The IGBT thermal model was modified according to the measured decay data. In addition, according to the difference of junction temperature characteristics before and after IGBT recession, the digital twin model framework was established, and the whole process from model establishment to real-time monitoring of IGBT recession degree was designed, and the real-time monitoring of IGBT recession degree was finally realized.

Key words: wind power converter; insulated gate bipolar transistor (IGBT); decline monitoring; digital twin

功率半导体器件作为风电变流器的核心部分,一旦发生故障,会对整个风力机组产生较大影响。对变流器中IGBT的衰退情况进行实时获取并进行判断,可以有效提高风电机组运行稳定

性。IGBT的衰退过程直接受到变流器运行工况影响,运行环境和工作时长都会导致衰退现象发生,针对IGBT的衰退特性,国内外学者做了很多研究。

基金项目: 江西龙源科技项目(LYX-2024-23)

作者简介: 李飞(1985—),男,本科,工程师,主要研究方向为风电场数字化管理,Email: 12102845@ceic.com

通讯作者: 尹小平(1983—),男,本科,助理工程师,主要研究方向为新能源发电与智能微电网等,Email: 12090765@ceic.com

文献[1]主要针对MOS型功率半导体器件栅氧层衰退开展深入研究,通过分析阈值电压与绝缘层退化的相关性,建立不同外部因素下的阈值电压衰退模型。文献[2-4]集中讨论了IGBT的封装老化问题,明确了致使IGBT发生退化的一个主要因素是键合线老化,并建立以键合线断裂根数为基础的老化模型。文献[5]研究IGBT长时间运行的栅氧层产生的损伤。文献[6]研究表明温度循环不仅会对IGBT模块的封装造成损伤,还会使芯片的Si材料产生晶格缺陷,进而对其载流子的特性造成影响。文献[7-12]中提到,反映IGBT衰退程度的参数有短路电流 I_{sc} 、阈值电压 $V_{ge,th}$ 、跨导 K_{lin} 和饱和压降 $V_{ce,sat}$ 等静态参数,以及开通延迟时间 t_{don} 和开通电压下降率等动态参数。通常,实际应用中直接获取表征衰退程度的参数较为困难,一方面衰退参数受到环境温度和运行情况的影响^[13],准确性难以保证;另一方面,特征参数获取不能影响变流器的正常工作,应用受到限制。而基于运行工况的方法可以最大程度地排除不确定因素,为在线状态监测提供条件保障。文献[13]提出了基于数字孪生技术的新型风速传感方法,通过虚拟传感器阵列来检测和补偿物理风速传感器的故障。文献[14]通过分析传统变电站巡检系统的不足,采用数字孪生技术作为解决方案,构建了变电站数字孪生模型,并设计了一个包含路径规划和数据库管理的巡检系统体系架构。文献[15]提出了能源互联网数字孪生系统框架设计,通过数字技术实现能源互联网的实时监测、优化运行和自主进化。文献[16]提出了风力发电机的数字孪生架构,其目的是提高风力发电机的性能,减少停机时间,并提高整体的安全性。

目前风力发电机的数字孪生系统主要涵盖了叶片、齿轮箱、塔架、机舱和发电机等部分,还未在数字孪生系统上对变流器IGBT开展有效的衰退程度监测。另外,由于变流器的运行状态受风速、海拔、温度和电网调度等因素影响,存在过多的不确定性,系统过于复杂,传统模型难以满足实时性要求,因此研究采用深度学习模型来替代传统模型,从而实现数字孪生的要求。

1 IGBT衰退特性分析

老化后的IGBT模块其电参数与热参数都会发生衰退,为获取IGBT发生衰退后的结温特性

差异,需对IGBT的衰退进行原理分析。

目前市面上的焊接式IGBT模块的键合线主要采用铝作为材料,铝的热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,而IGBT芯片主要由硅构成,热膨胀系数为 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,两种材料在不同的温度变化下,会发生程度不同的形变,公式为

$$\varepsilon_{tot} = L(\alpha_{Al} - \alpha_{Si})\Delta T \quad (1)$$

式中: L 为键合线与硅芯片接触面长度; α_{Al}, α_{Si} 分别为铝和硅的热膨胀系数; ΔT 为芯片和键合线接触面发生的温度变化。

随着运行年限的不断增长,IGBT持续发生结温波动,键合线发生断裂与脱落,导致键合线等效电阻阻值变大,IGBT模块饱和导通压降 $V_{ce,sat}$ 增加,表达式如下:

$$V_{ce,sat} = V_{ce,chip} + I_c R_w \quad (2)$$

式中: $V_{ce,chip}$ 为IGBT芯片饱和压降; I_c 为模块集电极电流; R_w 为键合线等效电阻。

IGBT模块在长时间连续工作中封装与芯片发生衰退,使得IGBT物理特性发生改变,直接反映在损耗上便会引起发热量增加,并进一步加剧IGBT模块的衰退进程。IGBT的损耗分为开通损耗、关断损耗和导通损耗三个部分。图1为IGBT模块在一个完整开关周期内的工作情况,利用IGBT模块集-射极电压 V_{ce} 与集-射极电流 I_c 乘积的积分可计算出损耗数据。

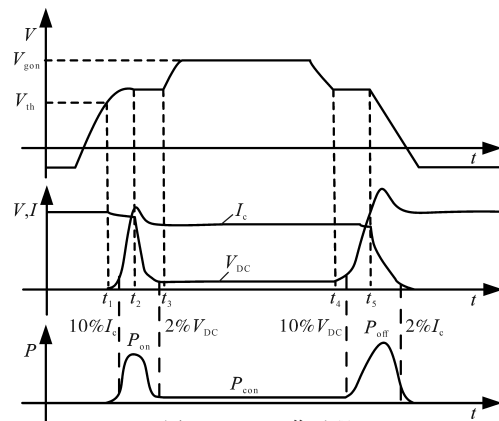


图1 IGBT工作过程

Fig.1 The working process of IGBT

IGBT模块的开通损耗从集-射极电流 I_c 上升至导通值的10%时开始积分,到集-射极电压 V_{ce} 下降至母线电压的2%时截止。

上述过程可划分为电流上升和电压下降两个阶段。电流上升阶段,把电流上升作为近似线性过程,在给定的导通电流 I_c 下,该阶段时间长度 t_{on1} 表达式如下所示:

$$t_{on1} = I_c \left| \frac{dt}{di_{c(on)}} \right| = \frac{I_c (R_{\Sigma} C_{ies} + g_m L_w)}{g_m (V_{gon} - V_{th}) - I_c} \quad (3)$$

式中: V_{gon} 为 IGBT 导通状态门极电压; V_{th} 为阈值电压; g_m 为模块跨导。

电压下降阶段,将电压下降近似看作线性过程,在给定母线电压 V_{DC} 下,该阶段时间长度 t_{on2} 的表达式如下所示:

$$t_{on2} = V_{DC} \left| \frac{dt}{dv_{ce(on)}} \right| = \frac{g_m V_{DC} R_{\Sigma} C_{gc}}{g_m (V_{gon} - V_{th}) - I_c} \quad (4)$$

基于上述分析过程,对开通阶段的电压与电流乘积进行积分,可得出开通过程损耗值的计算公式:

$$E_{on} = \frac{1}{2} V_{DC} I_c \frac{I_c (R_{\Sigma} C_{ies} + g_m L_w) + g_m V_{DC} R_{\Sigma} C_{gc}}{g_m (V_{gon} - V_{th}) - I_c} \quad (5)$$

当 IGBT 模块衰退后,绝缘层陷阱电荷 Q_{ox} 增大,阈值电压 V_{th} 增加,键合线等效电阻 R_w 增大,模块跨导 g_m 减小,因此 IGBT 模块的开通损耗 E_{on} 会随之呈现增大的趋势。

关断过程分为电压上升和电流下降两个阶段。从 IGBT 集-射极电压 V_{ce} 上升至母线电压 10%,到集-射极电流 I_c 下降至导通值的 2%,结合开通阶段的分析过程,可得关断过程损耗值的计算公式:

$$E_{off} = \frac{1}{2} V_{DC} I_L \frac{g_m V_{DC} R_{\Sigma} C_{gc} + I_c (R_{\Sigma} C_{ies} + g_m L_w)}{I_c + g_m (V_{th} - V_{goff})} \quad (6)$$

基于上述的理论分析,IGBT 模块发生衰退后,开通损耗 E_{on} 和导通损耗 E_{con} 会随着衰退加剧逐渐增大,关断损耗 E_{off} 的变化趋势不确定。然而在相同条件下,损耗的增加会导致 IGBT 结温上升,此时通过实时的结温观测可以监测 IGBT 的衰退程度。

2 双馈风机变流器 IGBT 热特性

为了探讨风力发电机的工作特性对风电变流器和 IGBT 模块的影响,研究通过 Matlab/Simulink 建立仿真模型,结合 PLECS 模块对 IGBT 运行参数的提取,进行了电热联合仿真,以获取 IGBT 在不同工况下的结温特性。

2.1 风电变流器仿真模型

重点研究双馈风机,双馈风力发电机是变速恒频风力发电机,如图 2 所示,其转子通过交-直-交变流器与电网连接。在转子转速变化时,通过调节流入转子线圈的电流频率和幅值,可确保发电机输出电压稳定,满足电网质量要求。

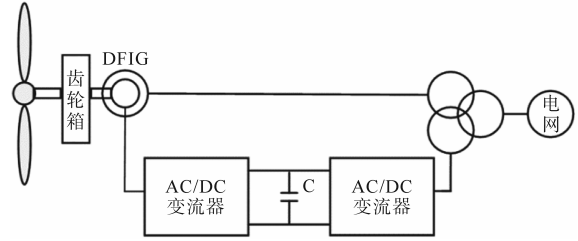


图2 双馈风力发电机结构图

Fig.2 Double-fed wind turbine structure diagram

双馈风电变流器拓扑如图 3 所示,分为转子侧和网侧,共存在 8 种工作状态。转子侧变流器采用以定子磁链矢量控制为基础的转子电流闭环控制策略,网侧变流器采用电网电压控制策略。

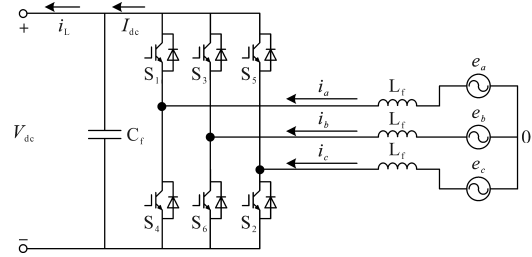


图3 三相 AC-DC 变流器拓扑

Fig.3 Three-phase AC-DC converter topology

根据上述内容,在 Matlab/Simulink 中建立双馈风力发电机模型,并进行了功能验证。通过设置风速从 5 m/s 逐渐增加到 18 m/s,测试模型对风速变化的响应能力。在风力发电系统中,风机的输出功率对风速变化具有一定的滞后性,这种滞后性会对输出功率产生惯性影响。图 4 为风机模型对渐变风速的响应曲线,该曲线能够在风速变化时对输出功率进行跟踪。

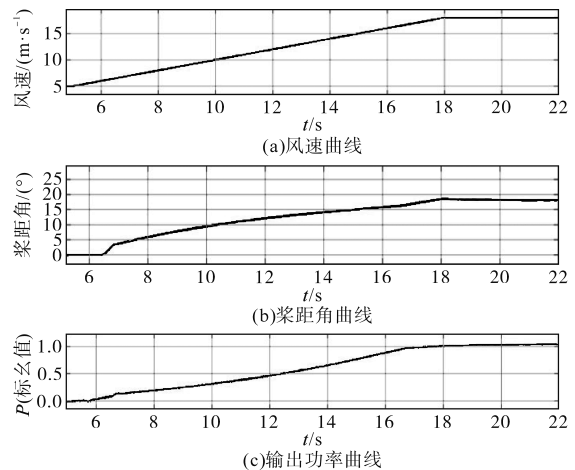


图4 渐变风下的风机模型响应

Fig.4 Wind turbine model response under gradual wind

2.2 风电变流器 IGBT 电热联合仿真

为进行风电变流器 IGBT 的热仿真,需从前述部分构建的风电变流器仿真模型中提取相关

参数,包括IGBT驱动信号、电压和电流。将IGBT的电流和电压信息输入到损耗计算模型中,以获得IGBT的损耗数据。而后利用仿真软件,结合IGBT厂家提供的损耗模型进行损耗计算。

IGBT模块热仿真,通常采用厂家提供的四阶Foster模型进行散热计算。IGBT和二极管的四阶Foster热网络构成了IGBT模块部分,经过散热硅脂的一阶Foster热网络,由散热器的一阶Foster热网络完成散热过程,最终将热量传导至自然环境中。

本文以英飞凌FF450R17ME3模块为研究对象,该模块电压等级1 700 V,电流等级450 A,表1为该模块的热网络参数。

表1 IGBT热网络参数

Tab.1 IGBT thermal network parameters

	i	1	2	3	4
IGBT	$R_i / (K \cdot W^{-1})$	0.005 5	0.016 5	0.022	0.011
	τ_i / s	0.01	0.04	0.06	0.3
二极管	$R_i / (K \cdot W^{-1})$	0.01	0.03	0.04	0.02
	τ_i / s	0.01	0.04	0.06	0.3

将转子侧变流器IGBT作为研究对象,进行热仿真分析。在仿真中,IGBT模块采用了双模块并联均流配置,图5展示了转子侧变流器中单个IGBT的结温波形。结合转子电流波形可以看出,IGBT结温随转子电流发生周期性变化。结温周期性波动的幅度受转子电流频率和幅度的共同影响,与转子电流频率成反比,与转子电流幅度成正比。

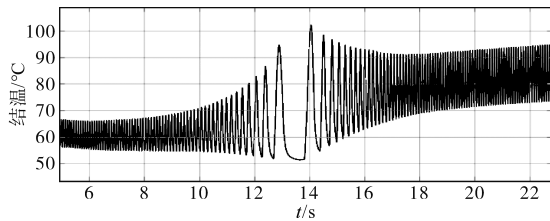


图5 IGBT结温波形

Fig.5 IGBT junction temperature waveform

在13 s—15 s期间,发电机接近同步状态,转子电流频率接近0,转子电流将长时间保持较大幅值,导致IGBT在此期间处于高损耗状态,从而导致结温升高。虽然转子电流尚未达到最大幅值,但IGBT的最高结温已经出现。在6 s—8 s和20 s—22 s两个时间段内,转子电流频率接近,幅值分别为400 A和600 A。此时,IGBT的结温波动分别在10 °C和22 °C上下,结温波动幅值变化量约为转子电流幅值变化量的平方。

图6中的两条曲线为两种不同环境温度下的IGBT结温曲线,设定风速为16 m/s。IGBT的工作温度随环境温度的升高而升高,因此损耗也会同步上升。当室外温度为20 °C时,IGBT最高结温为84 °C;当室外温度升至30 °C时,IGBT最高结温结温升至97 °C。风力发电机运行时,变流器IGBT的最高结温将随环境温度的升高而升高,且超出环境温度的变化幅度。

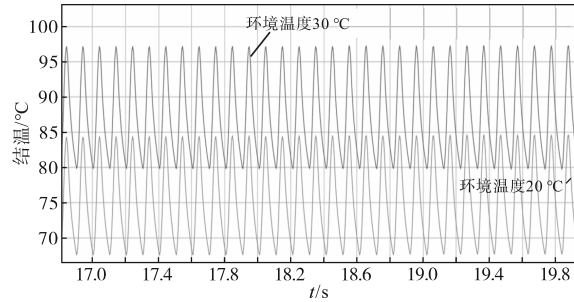


图6 不同环境温度下的IGBT结温曲线

Fig.6 IGBT junction temperature curves at different ambient temperatures

3 基于样本IGBT测试数据的数字孪生模型框架

基于测试得到数据,校正IGBT衰退后的热模型,以获取IGBT在衰退后的热特征,将之与新模块热特征进行差异对比,在此基础上构建数字孪生模型框架。

3.1 基于样本的IGBT衰退程度测试

选取样本为国内某风电场不同运行年份的型号为英飞凌FF450R17ME3的IGBT模块,为研究IGBT使用初期的衰退情况,将使用年限为1 a, 2 a, 5 a, 8 a, 11 a和12 a的IGBT模块作为观察对象,测试IGBT特性参数随老化程度的变化趋势。图7为被测的实际使用不同年份的IGBT模块。

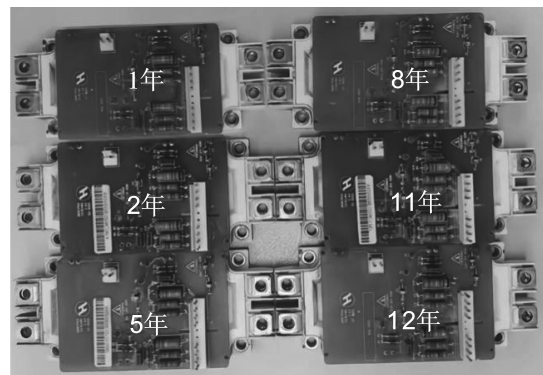


图7 不同使用时间的IGBT模块

Fig.7 IGBT modules with different use times

测试方法选用双脉冲测试,参数如下:IGBT

型号为FF450R17ME3,直流母线电压 $V_{DC}=1\ 050\text{ V}$,第1脉冲电流 $I_{c1}=200\text{ A}$,第2脉冲电流 $I_{c2}=260\text{ A}$,驱动开通电阻 $4.7\ \Omega$,驱动关断电阻 $4.7\ \Omega$,开通驱动电压 $V_{ge,on}=+15\text{ V}$,关断驱动电压 $V_{ge,off}=-7.5\text{ V}$ 。

经过上述测试,可得图8所示的3个波形。其中,图8a为完整测试波形,对该波形放大分析,可得出IGBT模块的关键特征参数。图8b为IGBT模块开通阶段细节波形,这部分波形位于第2脉冲开始阶段,读取此部分波形数据,可获取IGBT模块的开通过程特征参数。图8c为IGBT模块关断阶段细节波形,这部分波形位于第1脉冲结束阶段,读取此部分波形数据,可获取IGBT模块关断过程特征参数。通道1、通道2、通道3分别对应门极信号 V_{ge} 、直流电压 V_{ce} 和集电极电流 I_c 。

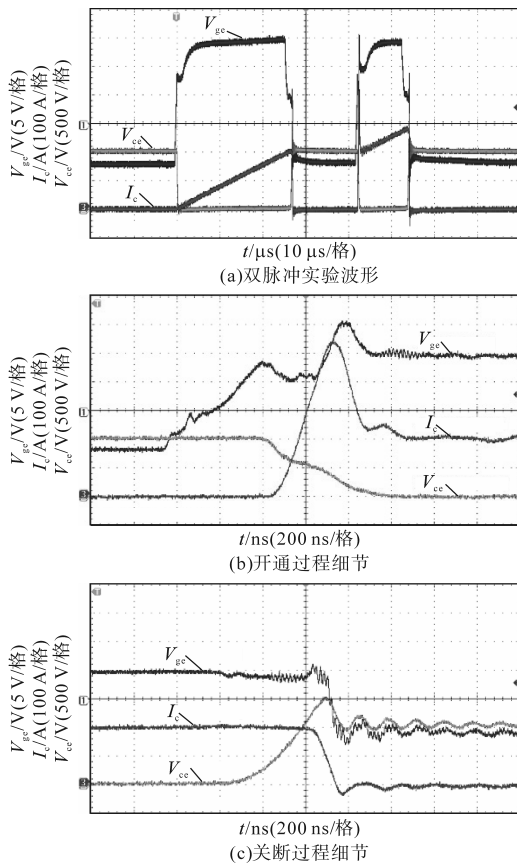


图8 IGBT开关过程波形

Fig.8 Waveforms of IGBT switching process

如图9所示,IGBT模块开通损耗和饱和导通压降会随着使用年限延长出现增加,在超过10 a使用期后增长明显。其中,使用11 a的IGBT模块相比新模块的开通损耗增加超21%,饱和导通压降增加超10%。需要特别说明的是,本文所测12 a的IGBT模块开通损耗和饱和导通压降比11 a的略低,但是也明显高于10 a前的模块。经过确

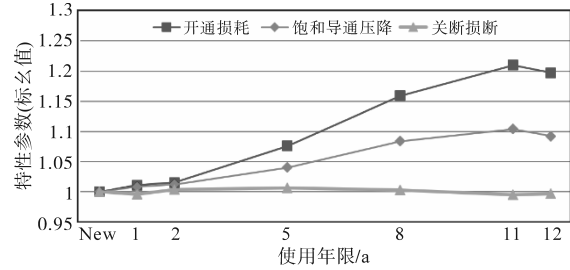


图9 损耗相关特征参数退化结果

Fig.9 Degradation results of loss-related characteristic parameters
认发现使用12 a的IGBT模块出厂日期比使用11 a的IGBT要晚32周,使用11 a的IGBT模块实际出厂时间更长。这也证实了数据的有效性和正确性。关断损耗并未随IGBT模块使用年限增加而呈现出明显的变化趋势。

3.2 基于测试数据的热特性分析

根据样本IGBT的测试结果,使用年份为11 a的IGBT模块开通损耗为新模块的1.21倍,保留一定裕度,设定衰退后的IGBT开通损耗模型为初始值的1.2倍;饱和导通压降相较于新模块衰退至1.104倍,为简化分析并维持一定裕度,将衰退后的IGBT电流-电压关系设定为初始值的1.1倍;IGBT衰退后关断损耗未发生明显变化,因此无需对关断损耗模型进行修改。基于当前IGBT模块的热阻衰退研究,可知当IGBT临近失效状态时热阻会增加约20%,因此将热阻参数设置为初始值的1.2倍。

将风速和环境温度均作为变量,对IGBT模块衰退前后热特性进行仿真分析,可得图10所示的曲线,其中图10a为IGBT结温曲线,图10b为散热器温度曲线。

由上述曲线容易得出,第1个IGBT结温的局部最大值到来之前,衰退前后的IGBT模块结温曲线就已有明显差异,周期峰值相差近 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,第1个局部最大值相差甚至高达 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外散热器也已经出现了 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的温度差异,且差异仍在不断增大。

双馈电机进入超同步状态后,IGBT衰退前后的结温差异变得更大,在IGBT结温的第2个局部最大值到来之前,IGBT衰退前后的结温周期峰值相差约 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,散热器的温度差值超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时可以清晰地捕获到衰退前后的IGBT结温差异。

未发生衰退的IGBT模块的第2个局部结温最大值为 $102\text{ }^{\circ}\text{C}$,而发生老化后的IGBT模块的第2个局部结温最大值高达 $128\text{ }^{\circ}\text{C}$,衰退前后的最

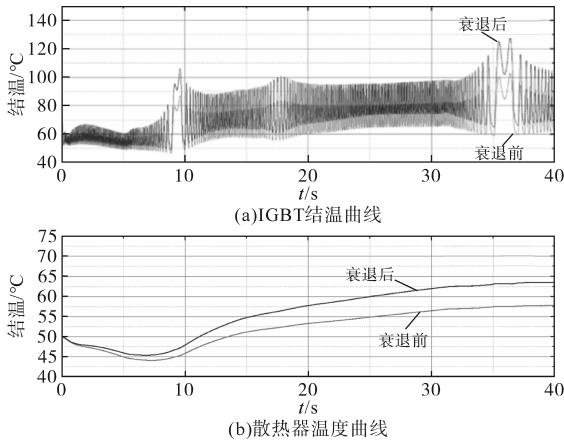


图10 IGBT衰退前后结温对比

Fig.10 Comparison of junction temperature before and after IGBT recession

大结温相差高达26℃,此时极易因为过热而造成安全风险。

3.3 风电变流器IGBT数字孪生模型框架

风电变流器IGBT与其散热器的结温会随IGBT衰退的发生而升高,且在同样的条件下会呈现出明显的结温差异。IGBT模块内部有测温电阻可以用作结温监测。如图11所示为econo封装的IGBT模块内部结构,标记处为模块内部测温电阻,可以用于IGBT结温监测。

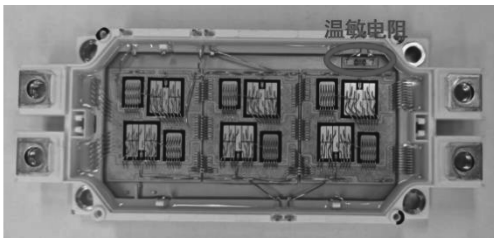


图11 IGBT模块的测温电阻

Fig.11 Resistance for measuring temperature in IGBT module

如图12所示,实现可实时反映衰退程度的数字孪生模型需要3步:第1步建立模型进行结温倍率约束;第2步利用达到温度约束的风机数据训练模型实现阈值约束;第3步利用测试设备将温度阈值修正为对应的衰退程度约束,建立功能完备的数字孪生模型。

根据样本测试结果,风力发电机使用初期,IGBT衰退程度轻微,结温特征改变轻微。可将此阶段的数据作为数据库训练初期模型,以实现根据实时数据,预测新IGBT在当前工况下的结温,在此基础上,实时监测结温差异,并对跟随转子电流变化的IGBT结温最大值进行阈值限制,阈值的设定公式可参考下式:

$$T_{pr} = \lambda_{pr}(T_p - T_{env}) + T_{env} \quad (7)$$

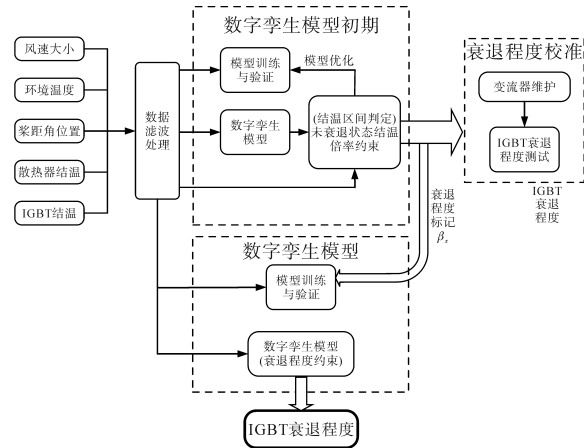


图12 数字孪生系统构建框架

Fig.12 Digital twin system construction framework

式中: T_{pr} 为约束阈值; λ_{pr} 为阈值约束系数; T_p 为模型预测结温; T_{env} 为变流器所处环境温度。

根据仿真结果,IGBT衰退前后结温最大值差异在10%至25%之间, λ_{pr} 可参考此数值设置,并保留一定裕量,用于第2阶段模型训练,此时可以根据衰退程度约束的需求调整温度约束的疏密程度。受监测的风机IGBT结温达到温度约束后,对此状态的衰退程度标记为 β_x ,下标 x 为阈值计数值,然后训练具有衰退程度约束能力的数字孪生模型。利用温度约束上保留的裕度,在此区间内利用当前风机的运行数据对模型进行约束能力的优化训练,使数字孪生模型在 β_x 标记下,具备对此衰退程度的结温实时预测能力。最后,测试达到温度约束的IGBT衰退程度,获取当前IGBT衰退程度,将其与 β_x 关联。

完成上述过程后,即可将当前的结温倍率限制转化为IGBT衰退程度约束,实现对IGBT衰退程度的实时监测。此时增加温度约束系数密度,并重复上述过程即可获得更加精密的IGBT衰退程度约束。

4 方案设计与验证

4.1 方案设计

4.1.1 数据预处理

IGBT结温会随转子电流变化呈现周期波动,衰退程度不同的IGBT结温波动峰值存在差异,因此对IGBT的结温波动进行峰值提取,可在不影响精度的条件下实现结温特征提取。

由于IGBT结温波动周期受转子电流周期影响,峰值滤波会使波形变成阶梯状,阶梯宽度仍然受转子电流周期影响,不利于特征提取,因此

还需平滑处理。使用Savitzky-Golay滤波进行二次滤波,如下式所示:

$$X_{k,s} = \bar{X}_k = \frac{1}{H} \sum_{l=-W}^{+W} X_{k+l} h_l \quad (8)$$

式中: $X_{k,s}$ 为第 k 个位置经平滑后的输出值; k 为当前数据点的索引; H 为权重和; W 为窗口半宽; l 为窗口内相对索引; X_{k+l} 为窗口内第 l 个原始数据点; h_l 为窗口内第 l 个点的权重系数。

运用最小二乘法,把数据通过固定长度的窗口回归到多项式上,通过设定平滑系数 h_l 和窗口长度即可改变滤波效果。

4.1.2 基于LSTM的数字孪生模型

训练模型所用到的风力发电数据为时间序列,此处使用的数字孪生模型为LSTM模型。LSTM网络单元结构图如图13所示,LSTM模型由输入门、遗忘门和输出门组成,输入门控制信息的流入,遗忘门控制对之前状态信息的保留,输出门控制记忆单元的输出信息比例,三个门均使用Sigmoid函数完成激活。

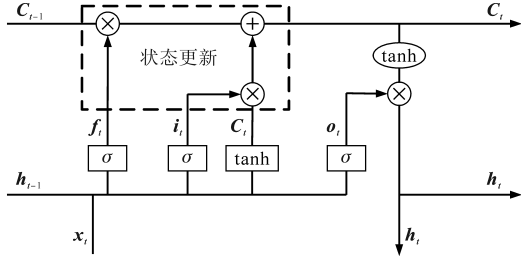


图13 LSTM网络单元结构图

Fig.13 LSTM network structure diagram

一个LSTM网络单元运行需要4步完成。

第1步,由遗忘门决定需要去除的信息,前一个网络单元的输出 h_{t-1} 和当前的外部输入 x_t 共同作为当前输入值,决定前一个网络单元输出 C_{t-1} 信息保留度,保留程度被记作 f_t ,用下式表示:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (9)$$

第2步,由输入门决定细胞状态要更新信息,这一步中由输入门决定更新值 i_t ,同时tanh层创建候选值向量 \tilde{C}_t ,公式如下:

$$\begin{cases} i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \end{cases} \quad (10)$$

第3步,单元的状态更新,将前两步的信息更新到新的单元状态,更新值 i_t 决定了选值向量更新的比例,公式如下:

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \tilde{C}_t \quad (11)$$

第4步,通过输出门决定输出信息,将单元状

态通过tanh层的值乘以输出层值 o_t 获得该单元的输出 h_t ,公式如下:

$$\begin{cases} o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ h_t = o_t \tanh(C_t) \end{cases} \quad (12)$$

综合上述分析,此处选定IGBT结温的预测模型采用单隐藏层,其维度设置为32,隐藏层后接dropout层防止过拟合,合并特征后传输至全连接层,将其转化为具体的预测值。其中数据集70%划分为训练集,30%划分为测试集,丢失率设置为0.1,损失函数采用均方误差,优化算法采用自适应矩估计(adaptive moment estimation, Adam)优化算法,学习率设置为0.001。

4.2 结果验证

图14展示了IGBT结温波形滤波的处理效果,滤波后曲线保留了原曲线的结温最大值特征。

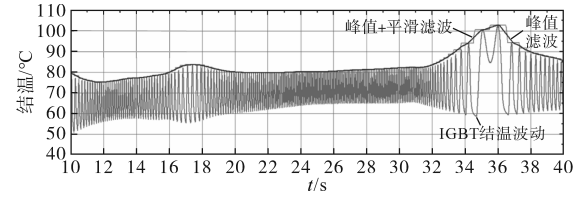


图14 IGBT结温峰值滤波后波形

Fig.14 Waveform of IGBT junction temperature peak filtered

图15为模型预测的IGBT结温曲线和滤波后的模拟实际运行工况仿真结温曲线对比,LSTM模型预测值与仿真值一致性较好,可以作为约束IGBT衰退程度的数字孪生模型。

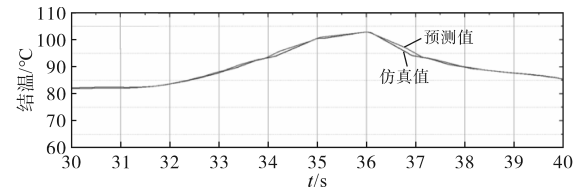


图15 IGBT结温预测波形对比

Fig.15 Waveforms comparison of IGBT junction temperature prediction

为验证模型对IGBT衰退程度的监测效果,将数字孪生模型训练出4条约束曲线,衰退后的热模型参数为老化标准,衰退程度约束New对应未衰退状态,衰退程度中期约束对应33%老化标准,衰退程度后期约束对应66%老化标准,老化判定约束对应100%老化标准。

图16为IGBT衰退程度监测验证,数字孪生模型输出4条衰退程度约束曲线,通过约束IGBT结温最大值完成IGBT衰退程度监测。

图中对应老化标准为50%的IGBT结温曲线,结温周期波动最大值超过衰退程度中期约束,尚未达到衰退程度后期约束,可判定当前IGBT衰退程度在33%至66%区间,与预期一致。

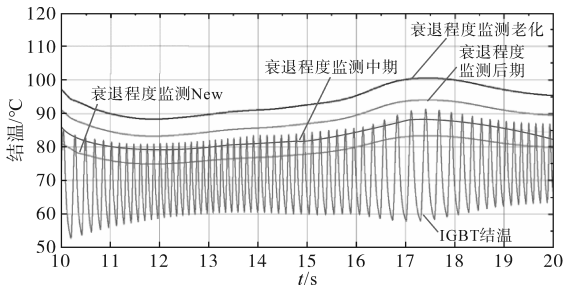


图16 IGBT衰退程度实时监测

Fig.16 Real-time monitoring of IGBT degradation level

5 结论

通过理论分析与模型搭建,获取了风电变流器IGBT的结温特性,结合所获得的运行不同年份的风电变流器IGBT的衰退情况,对热模型进行修正,对结温特性差异进行比较,最终提出了通过数字孪生模型实时监测IGBT衰退程度的方法,并进行了验证,本文完成内容如下:

1)以双馈风力发电机为基础,在Simulink模型中嵌入PLECS模块实现对变流器IGBT模块的热仿真,获取IGBT在不同工况下的结温特性。

2)由IGBT衰退的理论研究,分析了IGBT衰退后的结温特征变化趋势;通过对运行不同年份的风电变流器进行IGBT衰退程度测试,验证了理论分析并校正了衰退后的热模型,对比衰退前后的IGBT结温差异,确定了使用数字孪生模型实时监测IGBT衰退程度的可行性。

3)结合IGBT衰退前后的结温特性差异与风机运行特性建立了数字孪生模型框架;使用峰值滤波和Savitzky-Golay滤波处理数据;训练LSTM模型使其具备数字孪生模型的功能,并进行了验证。

参考文献

[1] CHOI U M, BLAABJERG F, LEE K B. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2517-2531.
 [2] KARKI U, PENG F Z. Effect of gate-oxide degradation on electrical parameters of power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(12): 10764-10773.
 [3] 姚芳,马静,唐圣学,等. IGBT模块键合损伤机理、演化规律及状态监测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 88-99.

YAO Fang, MA Jing, TANG Shengxue, et al. Bonding damage mechanism, evolution rule and condition monitoring of IGBT module[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 88-99.
 [4] HU R, GRANDERSON J, AUSLANDER D M, et al. Design of machine learning models with domain experts for automated sensor selection for energy fault detection[J]. Apply Energy, 2019, 235(1): 117-128.
 [5] 李亚萍,周维维,孙鹏菊,等. 基于模块跨导的IGBT键合线健康状态准在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7035-7044.
 LI Yaping, ZHOU Luwei, SUN Pengju, et al. A quasi-online monitoring healthy state of IGBTs based on module transconductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7035-7044.
 [6] ZHOU Shengqi, ZHOU Luwei, SUN Pengju. Monitoring potential defects in an IGBT module based on dynamic changes of the gate current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1479-1487.
 [7] CELNIKIER Y, BENABOU L, DUPONT L. Investigation of the heel crack mechanism in Al connections for power electronics modules[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(5): 965-974.
 [8] 魏伟伟,张杨,徐国卿. IGBT模块栅氧老化机理分析与表征方法研究[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 171-178.
 WEI Weiwei, ZHANG Yang, XU Guoqing. Research on mechanism analysis and characterization method for gate oxygen degradation of IGBT module[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 171-178.
 [9] GHIMIRE P, BĘCZKOWSKI S, MUNK-NIELSEN S, et al. A review on real time physical measurement techniques and their attempt to predict wear-out status of IGBT[C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, 2013: 1-10.
 [10] 肖飞. IGBT疲劳失效机理及其健康状态监测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
 XIAO Fei. Fatigue failure mechanism of IGBT and its health status monitoring[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
 [11] WANG Ze, QIAO Wei. A physics-based improved cauer-type thermal equivalent circuit for IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6781-6786.
 [12] SUN Pengju. Online condition monitoring for both IGBT module and DC-link capacitor of power converter based on short-circuit current simultaneously[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3662-3671.
 [13] LI Y, SHEN X. A novel wind speed-sensing methodology for wind turbines based on digital twin technology[J]. Electronics Newsweekly, 2022(4): 484.
 [14] 高赛. 数字孪生的变电站巡检系统数字化模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
 GAO Sai. Digital twin substation inspection system digital model (下转第60页)

