

基于风电场运营工况的风电变流器IGBT寿命预测研究

张蕴馨¹, 徐玉龙¹, 吴 德², 运 鸿², 刘宝成³, 黄先进³

(1. 中节能风力发电股份有限公司, 北京 100084;

2. 中节能(甘肃)风力发电股份有限公司, 甘肃 玉门 735211; 3. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 风电机组的运行工况、器件的老化程度对 IGBT 的使用寿命具有较大的影响, 目前对 IGBT 进行寿命评估时, 大多未考虑风电机组的运行工况与 IGBT 当前寿命等因素。以风电变流器中的 IGBT 作为研究对象, 对其寿命及可靠性进行评估。根据西北某风电场 SCADA 系统实测数据, 利用 Simulink 仿真软件搭建风力发电机组模型与瞬态双界面法, 获取运行一定年限后的 IGBT 热阻抗, 建立 Foster 热网络模型; 利用 Simulink 和 PLECS 软件进行电热联合仿真, 计算风电 IGBT 器件的热损耗, 以获得结温信息; 利用雨流计数法、寿命预测模型和线性累计损伤模型, 得到在当前工况下西北某风电场风电 IGBT 的损伤度。该方案给出了基于完整运行工况的 IGBT 寿命评估流程, 相较其他 IGBT 寿命评估方法, 考虑因素更全面, 预测结果更准确。

关键词: IGBT; 风电变流器; 可靠性; 热损耗模型

Wind power IGBT life prediction based on gansu changma wind farm

ZHANG Yunxin¹, XU Yulong¹, WU De², YUN Hong², LIU Baocheng³, HUANG Xianjin³

(1. CECEP Wind-Power Corporation Co., Ltd., Beijing 100084, China; 2. CECEP (Gansu) Wind-Power Corporation Co., Ltd., Yumen 735211, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The operating conditions of the wind turbine and the aging degree of the device have a great influence on the service life of the IGBT. At present, when evaluating the life of the IGBT, most of the factors such as the operating conditions of the wind turbine and the current life of the IGBT are not considered. This paper took IGBT in wind power converter as the research object, and evaluated its life and reliability. According to the measured data of SCADA system of a wind farm in Northwest China, the wind turbine model and transient double interface method were built by Simulink simulation software, and the IGBT thermal impedance after a certain number of years of operation was obtained, and the Foster thermal network model was established. Simulink and PLECS software were used for electrothermal joint simulation to calculate the heat loss of wind power IGBT devices to obtain junction temperature information. Using the rain flow counting method, the life prediction model and the linear cumulative damage model, the damage degree of the wind power IGBT in a wind farm in Northwest China under the current working conditions was obtained. The scheme gave the IGBT life assessment process based on the complete operating conditions. Compared with other IGBT life assessment methods, the factors considered were more comprehensive and the prediction results were more accurate.

Key words: IGBT; wind power converters; reliability; heat loss model

0 引言

据国家能源局统计,近8年来我国风电装机容量逐年提升,已经占世界总装机容量的37%,排名世界第一^[1]。在2022年底,国家能源局召开的全国能源工作会议指出,2023年风电、太阳能新增装机容量合计目标将达到1.6亿kW(160 GW)左右,同比增长超33%。风力发电机组主要安装在风速大、风能蕴藏量大等风能资源较为丰富的地区,实现了风能的高效利用,但由于其地处偏远地区、草地、沿海岛屿或环境非常恶劣的近海,极端条件(例如湿度、极端温度、雪、盐雾、闪电)和高负荷使风力发电机组更容易发生故障,因此其可靠性和维护成本已经成为大型风力发电系统发展的两个关键问题。

其中,高可靠性的风力发电系统设计可以促进其良好运行,提高风能的利用率,增加风力发电的市场渗透率和竞争力;而维护成本却严重限制了风力发电系统的大规模部署,陆上系统的维护成本可能高达生命周期成本的15%。因此迫切需要研究提高风力发电系统运行的可靠性、降低维护成本的有效方法。风电机组中较容易损坏的设备包含风机叶片、变速箱、发电机、机侧和网侧变换器、俯仰偏航控制器以及传感器等。据瑞典某风电场统计,风力发电机组中功率变流器的年故障率高于其他部件,约占17.5%。此外,风力发电机组中的功率变流器的停机时间百分比也很高,约占14.3%^[2],当变流器发生故障时,会直接损坏发电机等昂贵设备,不仅阻碍风力发电机的正常运行,还会对整个电网构成很大的威胁。

IGBT作为功率变流器中关键的部件,对整个电力电子系统的稳定性和可靠性起着至关重要的作用。据相关学者统计,风电变流器主要部件中,IGBT的故障率所占比例最高,且明显高于其他部件,约占33%^[3]。因此一旦IGBT模块发生损坏,就会导致风电变流器的异常运行或者停止,最后直接影响风力发电系统运行的可靠性。

因此,研究风电变流器IGBT的特性,对于提高风力发电系统运行的安全性和可靠性,降低企业后期运行维护成本,提高风力发电带来的经济效益和社会效益具有重要意义。

本文以西北某风电场的双馈风力发电机组(Double-Fed Induction Generator, DFIG)为例,基于风电场SCADA系统记录的风电机组运行数据,利用风电机组数学模型和电热联合仿真模型,仿真计算出IGBT的结温载荷,然后利用雨流计数法进行载荷统计,最后结合寿命评估模型对该风电场风电变流器IGBT模块进行寿命预测。

1 双馈风力发电机组仿真设计

1.1 双馈风力发电机组运行原理

DFIG被称为双馈风力发电机的原因是感应发电机的定子以及转子均能同时发出电能,其转子与定子都参与励磁,且都可以实现与电网之间的能量交换。双馈风力发电机组结构如图1所示^[4],包括风力机、传动系统、绕线式感应发电机、一组背靠背变流器及其控制系统。

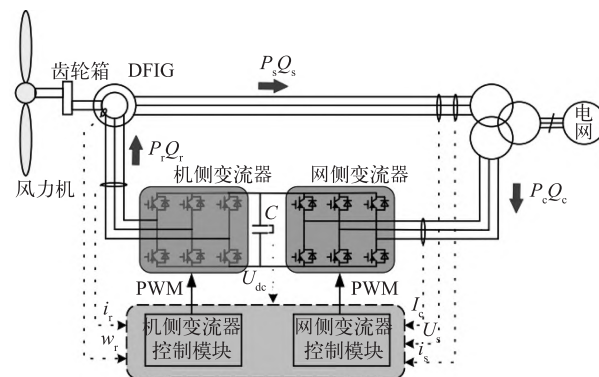


图1 双馈风力发电机组结构图

Fig. 1 Double-fed wind turbine structure diagram

发电机的定子通过三相电力变压器与电网母线连接;转子电路连接到背靠背变流器的一侧,背靠背变流器是两个独立控制的功率变流器,连接到一个公共直流总线。正常运行和扰动条件下,发电机的运行状态主要由变流器及其控制器的动作决定。

1.2 风力机模型

从能量转换过程的角度来讲，风机是将自然界中风的动能转变成风机主轴中稳定的机械能，最后在发电机中再转变成电能。因此，根据风机的空气动力学理论^[5]，风机输入功率为

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v_0^2 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 \quad (1)$$

式中， $\dot{m}$ 为质量流量； v_0 为风速； ρ 为空气密度； A 为风机的叶片扫掠过的面积， $A = \pi R^2$ ， R 为风机叶片的半径。

在现实情况下，风机叶片从自然界中捕获的能量不会完全转化为风机的输出机械能。因此，需要引入功率系数 C_p 、风机捕获的机械功率 P_m 以及机械转矩 T_m ，表达式分别为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v_0^3 \quad (2)$$

$$T_m = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^2 C_p v_0 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{v_0} \quad (4)$$

式中， ω_t 为风机叶片旋转的角速度； λ 为叶尖速比； C_p 为实际可获得的功率与最大可获得的功率之比，表征风机从自然界中捕获风能的能力，根据贝兹极限理论可知，功率系数 C_p 的理论最大值 C_{pmax} 约为0.593，但是在实际应用中，对于水平轴风力机的功率系数 C_p 的可达范围为0.2~0.5^[6]。

同时，功率系数 C_p 值的大小由桨距角 β 和叶尖速比 λ 决定，其关系可近似表示为

$$\begin{cases} C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5 \right)^{\frac{12.5}{\lambda}} \\ \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (5)$$

在不同桨距角 β 变化时，功率系数 C_p 与叶尖速比 λ 的特性曲线如图2所示。

由图2可知，功率系数 C_p 与桨距角 β 成反比；在桨距角 β 固定时， C_p 的值随着 λ 先增大后减小，而且在固定桨距角的情况下，始终存在一个叶尖速比 λ 的值，使得功率系数 C_p 取得最大值 C_{pmax} 。因此在实际工程应用中，可以通过调整桨距角 β

的大小调节风机所捕获风能的大小。

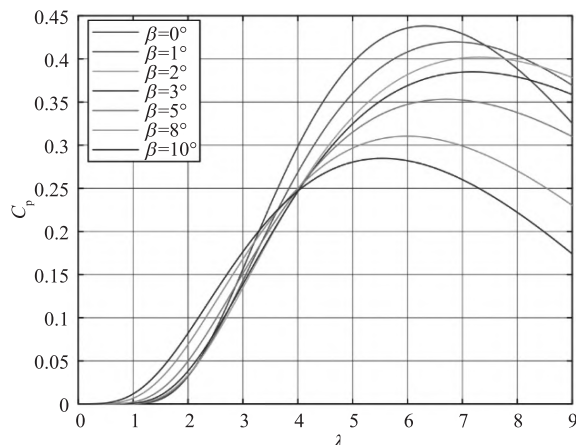


图2 功率系数与叶尖速比关系曲线

Fig. 2 Power factor versus leaf tip speed ratio curve

1.3 调速机构模型

当风速位于启动风速与额定风速之间时，风机需要尽可能多地捕获风能，从而实现最大功率输出，该区域可以通过调整桨距角的大小来完成，且一般设置为0；当风速位于额定风速与切出风速之间时，风机所捕获的机械功率将大于感应电动机的额定功率，为了避免风力发电机组不能够正常运行以及风机的传动机构被损坏，需要限制其功率并从额定功率输出，该区域既可以通过减小叶片的有效面积来实现，又可以通过增大调整桨距角来实现，且桨距角设置的大小范围为 $0^\circ \sim 25^\circ$ 。

桨距角控制模型如图3所示，主要包括PI控制器和叶片伺服系统。伺服机构模型由三个子模型组成，分别为时间常数、桨距角的边界值以及斜率控制器。

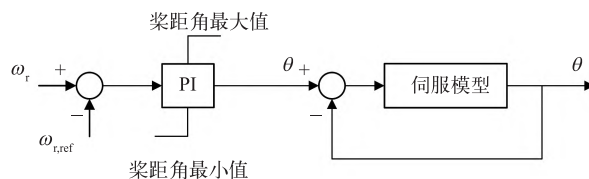


图3 桨距角控制模型

Fig. 3 Pitch angle control model

PI控制器的反馈为发电机的转速，参考值通常设置为可设置值的最大值，约为标称值的20%。在转子额定转速下，桨叶的角度通常设置

为控制器的最小限值，这个最小限值称为最佳叶片角度。

1.4 功率变流器模型

由于交-直-交电压型变换器可以方便简单地实现控制策略以及双向变流，尤其针对风力发电机组更加适用，而且其技术目前也较为成熟^[7]。交-直-交电压型功率变换器可视为一个交流、直流均可控且可以四象限运行的变流设备，同时它还可以在变速风力发电系统中进行能量的双向流动，其主电路结构图如图4所示。

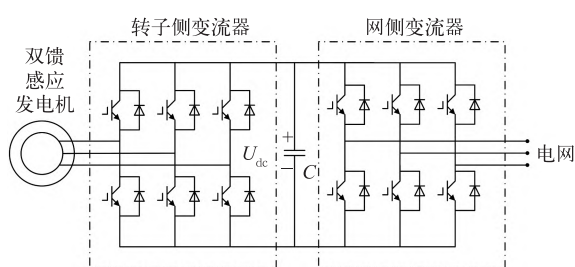


图4 背靠背功率变流器主电路结构图

Fig. 4 Back-to-back power converter main circuit structure diagram

转子侧变流器和网侧变流器在结构上是完全相同的，在此主要对网侧变流器进行分析，转子侧变流器利用同样的研究方法即可类推。

在实际分析中，为了方便，一般将实际的电力电子器件（IGBT）利用理想开关代替，可以不考虑理想开关的实际特性，例如忽略开通与关断时间和其自身压降等。简化后的网侧理想功率开关电路拓扑如图5所示，其中， u_{dc} 为直流侧母线电压。

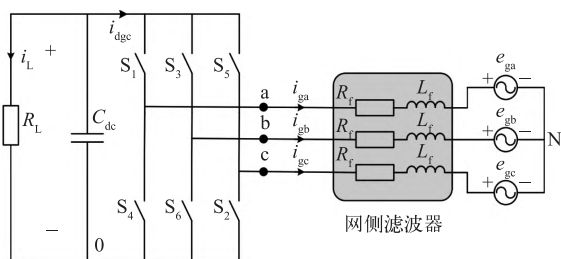


图5 网侧理想功率开关电路拓扑

Fig. 5 Network-side ideal power switching circuit topology

由图5可知，在变流器正常运行时，每一组桥臂上共有两种开关状态，即上桥臂导通时，下

桥臂关断；上桥臂关断时，下桥臂导通。因此可以定义开关函数 S_{gk} 为

$$S_{gk} = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ & \text{下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断} \\ & \text{下桥臂导通} \end{cases} \quad (k = a, b, c) \quad (6)$$

需要注意的是，处于同一桥臂上的两个功率开关不允许同时导通，否则会发生短路故障，造成设备的损坏。由式（6）可知，三相电压型变流器共有8种开关模式，如图6所示。

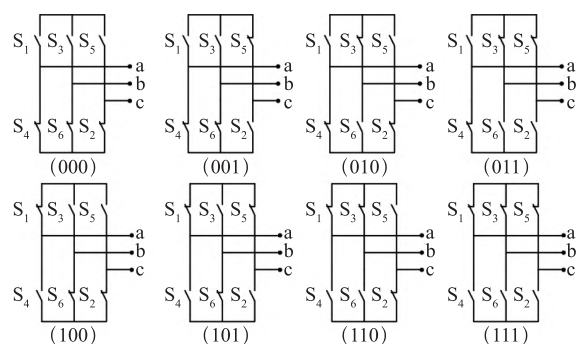


图6 网侧电压型变流器理想的8种工作状态

Fig. 6 Ideal 8 operating states of a network-side voltage converter

依据图6中每相桥臂上的开关状态，以电网中性点N处的电压为参考，以开关函数法进行建模，可以得到在三相静止坐标系下网侧变换器的高频数学模型表达式为

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{ga}}{dt} = -R_f i_{ga} - (S_{ga} - \frac{S_{ga} + S_{gb} + S_{gc}}{3}) u_{dc} + e_{ga} \\ L_f \frac{di_{gb}}{dt} = -R_f i_{gb} - (S_{gb} - \frac{S_{ga} + S_{gb} + S_{gc}}{3}) u_{dc} + e_{gb} \\ L_f \frac{di_{gc}}{dt} = -R_f i_{gc} - (S_{gc} - \frac{S_{ga} + S_{gb} + S_{gc}}{3}) u_{dc} + e_{gc} \\ C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = S_{ga} i_{ga} + S_{gb} i_{gb} + S_{gc} i_{gc} - i_L \end{cases} \quad (7)$$

对上述模型进行坐标变换，可以得到同步旋转坐标系下网侧变流器数学模型，即

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{gd}}{dt} = -R_f i_{gd} + \omega L_f i_{gq} - u_{gd} + e_{gd} \\ L_g \frac{di_{gq}}{dt} = -R_f i_{gq} + \omega L_f i_{gd} - u_{gq} + e_{gq} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_d i_{gd} + S_q i_{gq} - i_L \end{cases} \quad (8)$$

式中, e 为电网电压; i 为电网电流, u 为网侧变换器输入控制电压; S 为开关函数, d 和 q 分别为各自量的直轴和交轴的分量; ω 为 d - q 同步旋转坐标系的旋转角频率。

2 电热联合仿真设计

IGBT 芯片产生的热量会因温度梯度通过散热器耗散至环境中, 因此还需要对 IGBT 模块、散热器和外界环境三者之间建立一定的关系, 从而模拟上述三者之间的传热过程, 采用的方法为热网络法。由于 Foster 热网络模型内部的电阻和电容组合单元与 IGBT 模块内部物理材料层没有关系, 其各节点的温度与每层材料的温度不对应, 即无任何的物理意义, 而且电阻和电容单元的组合数量只与测量点的数量有关, 因此应用也较为广泛, 本文采用四阶 Foster 热网络模型^[8], 其结构示意图如图 7 所示。

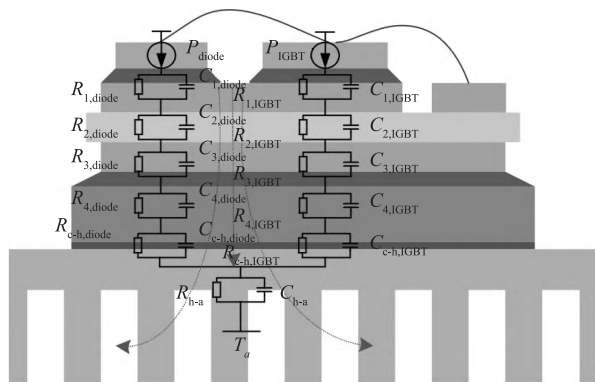


图 7 Foster 热网络模型结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the Foster thermal network model structure

图 7 中, $R_1 \sim R_4$ 与 $C_1 \sim C_4$ 为模块内部四阶 RC 热网络模型; R_{c-h} 与 C_{c-h} 为壳散热器热阻; R_{h-a} 与 C_{h-a} 为散热器环境热阻。

在实际应用的场景中, 随着 IGBT 模块服役时限的增加, 模块会因其老化或者外界散热条件的改变造成热阻和热容的参数值发生改变, 如果继续使用原始理想的参数值, 势必会影响寿命预测结果。因此对于已经服役一定时间的 IGBT 模块, 需要对其实际的热阻的热容参数进行测量。

瞬态双界面测试实验平台如图 8 所示。

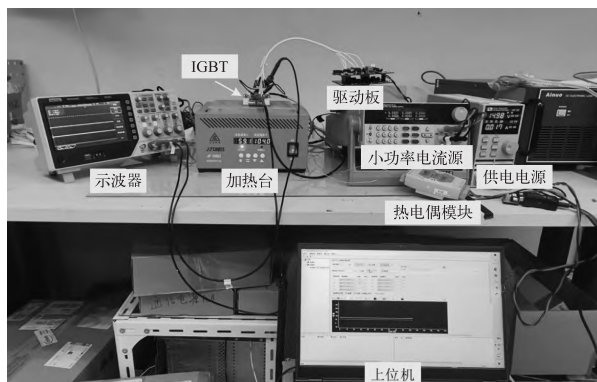


图 8 瞬态双界面测试实验平台

Fig. 8 Transient dual interface test platform

假设在瞬态双界面测试实验中, IGBT 模块内部芯片到基板之间的散热传输路径不随外部基板与散热器之间的接触条件变化而变化。测试得到在两种散热条件下, 降温过程中热阻抗随时间的变化曲线如图 9 所示。

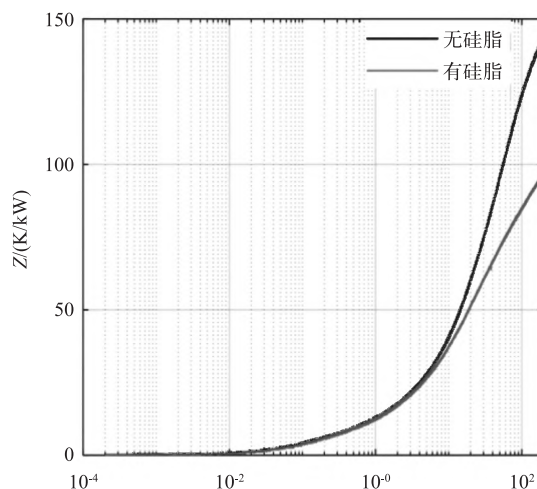


图 9 热阻抗随时间的变化曲线

Fig. 9 Thermal impedance curve with time

图 9 中, 两条曲线在测试前期基本是吻合的, 即 IGBT 模块内部热阻抗相同, 而在图 9 中峰值位置之后, 两条曲线逐渐分离, 即外部阻抗不同。因此选取两条曲线重合的数据点, 利用 MATLAB 中的拟合工具, 选择拟合曲线类型为指数类型, 输入四阶指数函数表达式并绘图, 利用拟合曲线得到的四阶指数的未知变量即为热阻与热容参数, 见下表。

表 热参数值
Tab. Thermal parameters values

i	1	2	3	4
R_{θ} (K/kW)	0.003 5	0.015 5	0.042	0.031
C_{θ} (kJ/K)	0.01	0.04	0.06	0.03
τ /s	0.007	0.033	0.054	0.23

利用内嵌在Simulink中的PLECS模块建立热网络模型，并将英飞凌公司提供的IGBT热损耗模型和实测的热网络参数值导入PLECS中，IGBT热损耗模型如图10~图12所示。

将风电机组变流器中仿真计算得到的功率变流器输入电流、负载电压以及推算出的单管IGBT的驱动信号导入电热联合仿真模型。当给予IGBT驱动信号时，IGBT模块导通，产生导通损耗和关断损耗，使得结温升高；当撤销驱动信号时，IGBT模块关断，结温下降，基于此可获得IGBT的结温波动值。

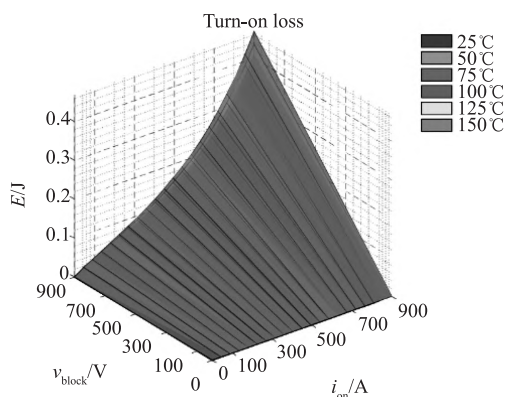


图 10 IGBT 的导通损耗模型

Fig. 10 Turn-on loss model for IGBT

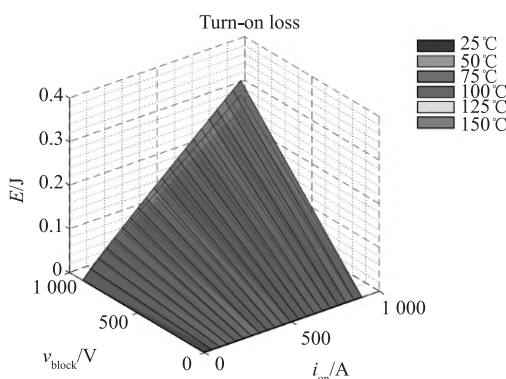


图 11 IGBT 的关断损耗模型

Fig. 11 IGBT turn-off loss model

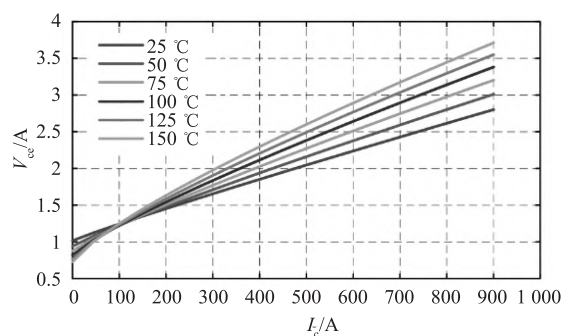


图 12 集电极电流 - 集电极压降曲线

Fig. 12 Collector current - collector voltage drop curve

3 基于西北某风电场的风电IGBT损耗计算和寿命预测

3.1 寿命预测模型

目前，IGBT的寿命评估模型大体上可分为两大类，分别为物理模型和解析模型。在实际工程应用中，物理模型是依据材料断裂机理进行建模的，且模型参数必须依靠内部材料的属性获得，因此参数复杂且不易获取；而解析模型主要是依据加速老化实验的数据建立解析表达式。对于不同厂家、不同型号的IGBT模块，其取值会有所不同；同一厂家、同一型号的IGBT模块由于处于不同的测试环境，其测试得到的参数也会不同。因此为了降低以上因素所带来的误差，本文采用英飞凌官网提供的IGBT模块应用文档给出的结温波动和失效周期次的关系曲线，如图13所示。相比于利用上述采用经验值的解析模型，该曲线有更高的参考性。

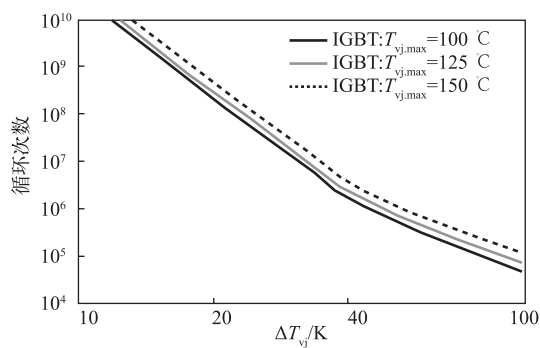


图 13 结温波动和失效周期次数的关系曲线

Fig. 13 Relationship curve between junction temperature fluctuations and number of failure cycles

选择图13中的 $T_{vj,max}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所对应的曲线进行曲线拟合,得到的拟合函数表达式为

$$\lg(N_f)=5.961\times\lg(\Delta T_j)+37.1 \quad (9)$$

3.2 基于西北某风电场的风电IGBT损耗计算与寿命预测

以西北某风电场风电机组为例,双馈异步发电机额定功率为1.5 MW,功率因数为0.95 (C) -1.0-0.95 (L),定子额定电压为690 V;风电变流器直流侧母线电压为1 050 V,采用的IGBT的型号为FF450R17ME3,散热方式采用强迫风冷;风机的切入风速为3 m/s,额定风速为11 m/s,切出风速为20 m/s,当地风速及环境温度信息如图14所示。

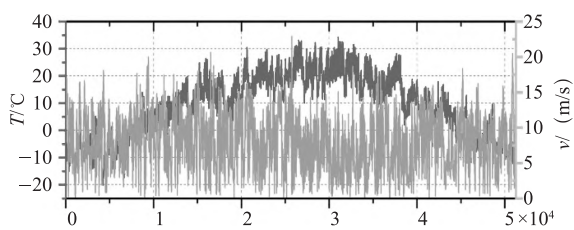


图14 西北某风电场风速及环境温度数据

Fig. 14 Wind speed and ambient temperature data of Changma wind farm

通过Simulink与PLECS联合仿真,计算IGBT的功率损耗及结温波动如图15~图17所示。

由图15与图16可知,风电IGBT在正常工况下,功率损耗主要来自导通损耗,而关断损耗相对较小。

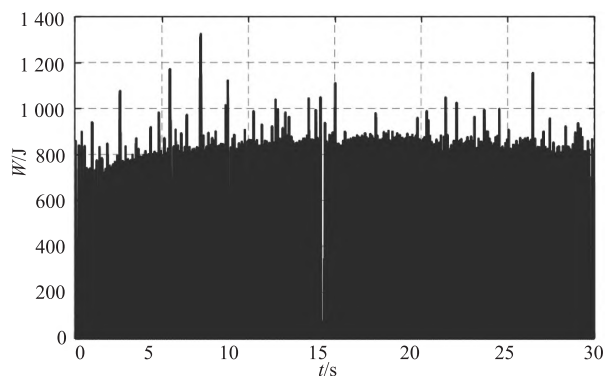


图15 IGBT 导通损耗仿真结果

Fig. 15 IGBT conduction loss simulation results

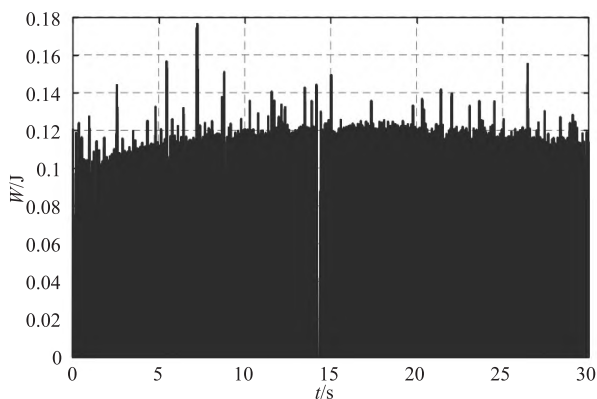


图16 IGBT 开关损耗仿真结果

Fig. 16 IGBT switching loss simulation results

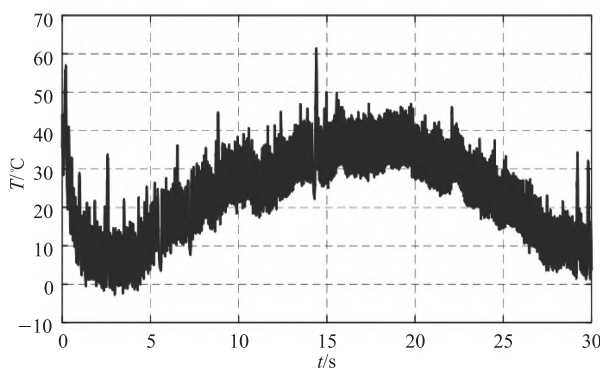


图17 风电变流器 IGBT 结温波动

Fig. 17 Wind turbine converter IGBT junction temperature fluctuations

由图17可以看出,风电变流器IGBT的结温波动情况与双馈风电机组运行工况以及外界环境相对应。从某一短阶段内看,可以将外界环境温度视为恒定,散热条件相同的情况下,IGBT的结温随着风速的变化而变化。这是由于当风速增大时,风电变流器的输出功率增大,损耗增大,从而结温上升;当风速减小时,风电变流器的输出功率减小,损耗减小,从而结温下降。从全阶段来看,IGBT的结温随外界环境温度的变化而变化,这是由于当外界环境温度偏高时,散热器周围温度梯度降低,散热效率变低,导致结温偏高;当外界环境温度偏低时,散热器周围温度梯度升高,散热效率升高,结温相对偏低。

利用雨流计数法对其结温波动信息进行统计,得到了结温的变化周期数、结温波动变化范围和结温平均值,如图18所示。

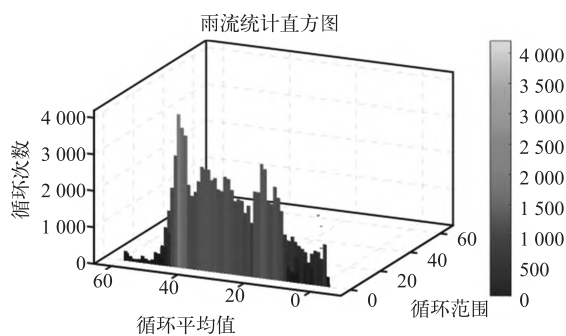


图 18 雨流统计结果

Fig. 18 Results of rainfall statistics

在完成上述失效循环次数的计算后, 还需要通过线性损伤累计模型对IGBT的损伤度进行计算, 计算式为

$$C_{L_IGBT} = \sum_{n=1}^N \frac{N_n}{N_{f,n}} = 1.5786 \times 10^{-5} \quad (10)$$

式中, N_n 为对应实际的热循环次数; $N_{f,n}$ 为第 n 次循环时所对应的失效循环次数; C_{L_IGBT} 为IGBT的损伤度, 当损伤度达到1时, 即 $C_{L_IGBT}=1$, 表征IGBT模块已失效。

4 结束语

本文基于西北某风电场某年实测现场数据, 设计了一套完整的风电IGBT累计损耗计算与寿命预测方案, 通过对风电机组进行仿真, 得到风电变流器IGBT的电信号并推测出驱动信号, 实测了运行一定年限后的风电IGBT的热阻抗参数, 并应用于电热联合仿真中, 得到了在此工况下风电IGBT的热载荷, 最后利用线性损伤累计模型预测得到IGBT的损伤度, 所得到的仿真计算结果符合实际, 可以应用到IGBT实际运行寿命评估中。

参考文献

- [1] ZHAO L, WANG W, et al. Data-driven correction approach to refine power curve of wind farm under wind curtailment[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 95-105.
- [2] WU Y K, SU P E, SU Y S, et al. Economics- and

reliability-based design for an offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5139-5149.

- [3] HUANG Y, YUO Y, XIAO F, et al. Failure mechanism of die-attach solder joints in IGBT modules under pulse high-current power cycling[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 99-107.
- [4] RYNDZIOONEK R, BLECHARZ K, KUTT F, et al. Fault tolerant performance of the novel five phase doubly-fed induction generator[J]. IEEE Access, 2022(10): 59350-59358.
- [5] SONG D, CHANG Q, ZHENG S, et al. Adaptive model predictive control for yaw system of variable-speed wind turbines[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(1): 219-224.
- [6] JIN Y, WU D, JU P, et al. Modeling of wind speeds inside a wind farm with application to wind farm aggregate modeling considering LVRT characteristic[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 508-519.
- [7] XUE Z Y, XIAHOU K S, LI M S, et al. Diagnosis of multiple open-circuit switch faults based on long short-term memory network for DFIG-based wind turbine systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2600-2610.
- [8] ZHU Y, XIAO M, SU X, et al. IGBT Junction temperature measurement under active-short-circuit and locked-rotor modes in new energy vehicles[J]. IEEE Access, 2020(8): 114401-114412.

作者简介

张蕴馨(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事软硬件开发和测试工作。

(收稿日期: 2023-07-18)