

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.229

中图分类号: TN386

文献标志码: A

基于 PSO-BP 神经网络的 SiC MOSFET 模块寿命预测方法研究与实现

毛明波¹, 孟昭亮^{1,2,3}(中国电源学会会员), 高 勇¹(中国电源学会会员),
杨 媛²(中国电源学会高级会员)

(1.西安工程大学电子信息学院, 西安 710699; 2.西安理工大学国际工学院, 西安 710048;
3.中车永济电机有限公司电力电子事业部, 西安 710000)

摘要: 针对目前碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管 SiC MOSFET(silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)实际工况中在线寿命预测难度大的问题,提出1种基于粒子群优化-反向传播 PSO-BP(particle swarm optimization-back propagation)神经网络的 SiC MOSFET 模块寿命预测数字化实现方法。首先,利用导通压降平台提取 SiC MOSFET 的导通压降作为温敏电参数,建立基于实验数据的结温预测方案;其次,利用功率循环加速老化实验平台,提取老化特征数据,建立基于 PSO-BP 神经网络的寿命预测方案;然后,将结温预测方案与寿命预测方案移植到可编程阵列逻辑中,实现 SiC MOSFET 寿命预测数字化;最后,设计了验证电路。实验表明,数字化显示的结温与真实结温的误差为 4.73 °C,与真实寿命次数的误差百分比为 4.1%,证明所提寿命预测方法得到了数字化实现,并能够准确预测 SiC MOSFET 模块的寿命次数。

关键词: SiC MOSFET; 粒子群优化-反向传播; 寿命预测; 数字化

Research and Implementation of Life Prediction Method for SiC MOSFET Module Based on PSO-BP Neural Network

MAO Mingbo¹, MENG Zhaoliang^{1,2,3}, *Member, CPSS*, GAO Yong¹, *Member, CPSS*,
YANG Yuan², *Senior Member, CPSS*

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710699, China; 2. School of International Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Power Electronics Division of CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: To solve the difficulty in online life prediction of silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (SiC MOSFET) under practical working conditions, a digital implementation method for SiC MOSFET module life prediction based on particle swarm optimization-back propagation (PSO-BP) neural network was proposed. First, the saturation voltage drop of SiC MOSFET was extracted by a saturation voltage drop platform as the temperature-sensitive electric parameter, and a junction temperature prediction scheme based on experimental data was established. Second, a life prediction scheme based on PSO-BP neural network was established by using a power cycling accelerated aging experimental platform to extract the aging characteristic data. Third, the junction temperature prediction scheme and life prediction scheme were transplanted to field programmable gate array to realize the digitization of SiC MOSFET life prediction. Finally, a circuit was designed to verify the proposed method. Experimental results show that the error between the digital junction temperature and real junction temperature was 4.73 °C, and the percentage of error between the predicted life times and real life times was 4.1%, which proves that the proposed life prediction method is realized digitally and can accurately predict the life times of SiC MOSFET module.

收稿日期: 2022-06-09; 修回日期: 2022-07-16; 录用日期:
2022-09-27; 网络首发日期: 2022-11-17

Keywords: Silicon carbide metal-oxide-semiconductor
field-effect transistor (SiC MOSFET); particle swarm optimization-back propagation (PSO-BP); life prediction; digitization

功率半导体器件的广泛应用是促进电力电子技术高速发展的决定性力量。然而,随着航空航天、新能源、石油勘探、5G 通讯、高速轨道列车等领域的兴起,传统 Si 基半导体因受物理特性的限制,其性能已无法满足新兴产业的需求。以碳化硅 SiC(silicon carbide)为代表的新型宽禁带半导体器件,因具有耐高温、耐高压、开关速度快等特性,提升了电力电子器件的性能,为新兴产业的发展做出突出贡献,被认为是最有可能取代硅基 MOSFET 的器件^[1-2]。SiC MOSFET 作为影响系统可靠性的关键因素,引起广泛关注,因此需要良好的状态监控来保证其可靠性^[3-5]。同时,国内外学者在 SiC MOSFET 模块寿命预测方面进行了大量研究。

Celaya 等^[6]通过试验的方法,确定在多种失效机理共同作用时,功率 MOSFET 的沟道电阻也是失效过程中的敏感参数,因此通过研究加速退化试验中功率 MOSFET 的阈值电压和导通电阻的变化规律,预测其剩余寿命,评估其可靠性是 1 种重要可行的方法;Celaya 等^[7]研究了热循环对 MOSFET 可靠性的影响;Wysocki 等^[8]和 Saha 等^[9]则对功率 MOSFET 的静电放电和光注入条件下的可靠性进行分析;文献[10]通过仿真功率 MOSFET 老化过程中阈值电压随栅极表面缺陷的变化情况,将阈值电压作为寿命预测参数;文献[11]在加速老化实验中研究了 SiC MOSFET 模块导通电阻的变化规律,发现导通电阻会随着模块的老化逐渐增大,因此可用导通电阻来评估 SiC MOSFET 模块的寿命;文献[12]研究了功率 MOSFET 两端施加高电压后对栅极造成的损伤,观察各个电气参数的变化发现,随着模块老化阈值电压变大,开通延迟时间变长,而漏极电流和击穿电压几乎不变,因此利用回归分析算法建立基于阈值电压的数学模型,再基于粒子滤波算法建立寿命预测模型预测其寿命,并确定其寿命的分布区间。

虽然导通电阻和阈值电压均可作为 SiC MOSFET 模块的失效特征参数,用来对 SiC MOSFET 模块的健康状态进行评估,但在实际应用中 SiC MOSFET 模块的导通电阻无法直接提取,并

且阻值较小,对仪器的测量精度要求较高;阈值电压在工作过程中由于存在漂移现象,导致难以提取其准确值。而大电流下的导通压降非常易于在线提取,在器件老化失效时会发生明显变化,因此,本文将大电流下的导通压降作为失效特征参数进行 SiC MOSFET 的寿命预测。

1 基于实验数据拟合的 SiC MOSFET 模块结温预测方案

本文首先建立基于实验数据拟合的结温预测方案,并将其结温作为基于粒子群优化-反向传播 PSO-BP(particle swarm optimization-back propagation)神经网络的寿命预测方案的输入之一,从而实现模块寿命的预测。

目前采用的温敏电参数有导通压降 V_{DS} ^[13]、阈值电压 V_{th} ^[14-15]、米勒平台电压 V_{G_P} ^[16]和开通漏极电流 dI_{ds}/dt ^[17-19]等。文献[9]指出导通压降会随着温度的升高而变大,并且两者之间线性度很高。SiC MOSFET 模块因饱和导通压降易于获取、灵敏度高、在线性好得到了广泛应用。因此,本文选取导通压降作为温敏电参数,对罗姆公司型号为 BSM 300D12P2E001(1200 V/300 A)的半桥 SiC MOSFET 模块在不同结温及不同漏极电流下的导通压降进行了采集。

为了明确分析导通压降 V_{DS} 、结温 T_j 及漏极电流 I_D 三者之间的关系,根据实验提取的数据拟合了在不同漏极电流 I_D 下导通压降 V_{DS} 与结温 T_j 的关系曲线,如图 1 所示。可以看出, SiC MOSFET

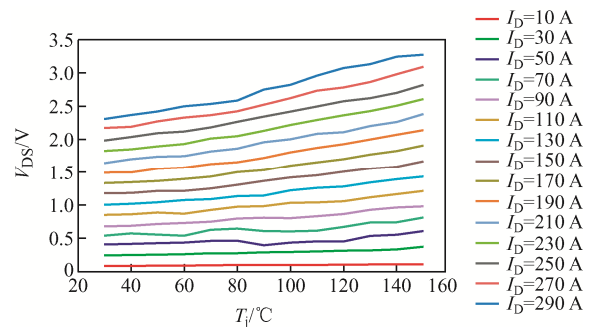


图 1 SiC MOSFET 模块温度特性

Fig. 1 Temperature characteristics of SiC MOSFET module

的结温 T_j 同时受到其导通压降 V_{DS} 和漏极电流 I_D 的影响,且导通压降与结温呈现出较好的线性关系;当漏极电流一定时,导通压降随着结温的增大而增大;在特定温度下,导通压降与漏极电流也存在正相关的关系。

将导通压降实验提取的数据代入数学模型 $T_j=f(V_{DS}, I_D)$ 中进行实验数据拟合,建立结温预测方案。利用 MATLAB 工具箱里的数学拟合工具进行拟合,综合考虑预测准确度与计算规模,获取合适的结温预测数学模型为

$$T_j = a_0 + a_1 V_{DS} + a_2 I_D + a_3 V_{DS} I_D + a_4 V_{DS}^2 + a_5 V_{DS} I_D^2 + a_6 V_{DS}^3 \quad (1)$$

式中: $a_0 \sim a_6$ 为结温拟合系数,各系数取值见表 1。

表 1 结温预测数学模型系数值

Tab. 1 Coefficients of mathematical model for junction temperature prediction

系数	取值	系数	取值
a_0	82.460 40	a_4	-440.356 00
a_1	713.095 00	a_5	-0.00361118
a_2	-6.269 90	a_6	44.353 10
a_3	3.903 78		

2 基于 PSO-BP 神经网络的 SiC MOSFET 模块寿命预测方案

2.1 方案提出

BP 网络因其原理简单、易于实现、自学习与适应能力较强,已经在诸多领域得到应用。但由于 BP 网络的输入权值和隐含层阈值在初始化过程中都是随机选择的,有可能出现为 0 的情况,并且在训练过程中,利用反向传播的方法对权值和阈值进行调节,很可能使其陷入局部极小值,无法求得全局最优解。而 PSO 算法能够对全局的粒子进行搜索,在全局中寻找最优解^[20]。该算法设计了 1 种无质量粒子模拟鸟群中的个体,每个粒子都代表 1 个潜在的最优解,粒子具有速度、位置和适应度 3 个属性。用适应度表示粒子的优劣,每个粒子搜寻出

的最优位置记为 P_{best} ,并将 P_{best} 与其他粒子共享,找到最优的个体极值作为当前全局最优解 G_{best} ,根据当前 P_{best} 和全局最优解 G_{best} 来调整自己的速度和位置。

随着工艺水平的不断提高,功率器件的可靠性和寿命不断增加。由于需要较长的实验时间和较大的实验样本,基于概率统计理论的传统可靠性实验已不再适用。在保证失效机理不变的前提下,通常采用加速寿命实验的方法研究电子元器件可靠性。

对罗姆公司 BSM300D12P2E001(1200 V/300 A) 型号的半桥 SiC MOSFET 模块进行老化实验。根据功率循环加速老化实验提取的电气参数,绘制在不同老化次数下 T_j - V_{DS} - I_D 三维曲面,如图 2 所示。可以看出,寿命次数同时受到导通压降、漏极电流的影响,并且随着结温的升高,这三者之间的关系也会发生变化。

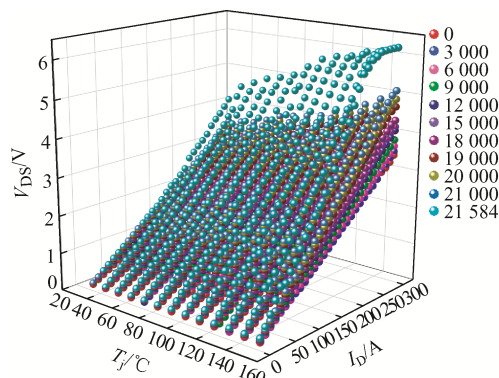


图 2 不同老化次数下的 T_j - V_{DS} - I_D 三维曲面

Fig. 2 Three-dimensional surface of T_j - V_{DS} - I_D under different aging times

本文采用 PSO-BP 神经网络算法对 SiC MOSFET 模块的寿命进行预测,并选择 BP 神经网络与其进行对比。SiC MOSFET 模块在功率循环加速老化实验平台上进行了 21 584 次功率循环,将实验过程中提取的 3 900 组与寿命预测有关的电气参数进行归一化处理,其中随机抽取 80% 的数据作为训练集,剩余 20% 的数据作为预测集。将数据反复训练,得到 BP 神经网络与 PSO-BP 神经网络的各个参数设置,分别见表 2 和表 3。

表 2 BP 神经网络寿命预测方案参数设置
Tab. 2 Parameter setting of BP neural network life prediction scheme

参数	数值或函数
隐含层神经元个数	7
迭代次数	100
学习精度	0.0001
学习率	0.01
隐含层激活函数	Log-Sigmoid
输出层激活函数	Purelin

表 3 PSO-BP 神经网络寿命预测方案参数设置
Tab. 3 Parameter setting of PSO-BP neural network life prediction scheme

参数	数值
隐含层神经元个数	7
迭代次数	50
种群规模	20
速度更新参数 c_1	1.49445
速度更新参数 c_2	1.49445
速度范围	$[-0.5, 0.5]$
位置范围	$[-1, 1]$

2.2 方案对比

本文采用 MATLAB 对 2 种算法的预测效果进行对比。2 种算法给定相同的输入参数, 对同一模块的寿命进行预测, 得到的寿命次数预测误差百分比结果分别如图 3 和图 4 所示。可以看出, BP 神经网络预测寿命次数的误差百分比集中分布在 $[-30\%, 30\%]$ 之间, 最大不超过 $\pm 60\%$, 其拟合优度

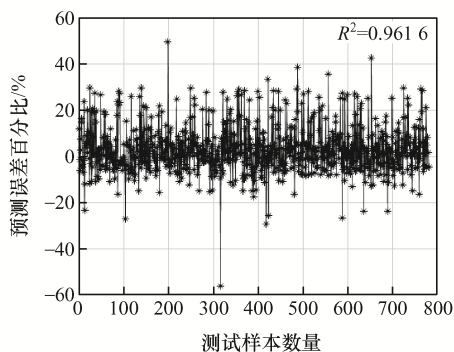


图 3 BP 神经网络预测误差百分比
Fig. 3 Percentage of prediction error for BP neural network

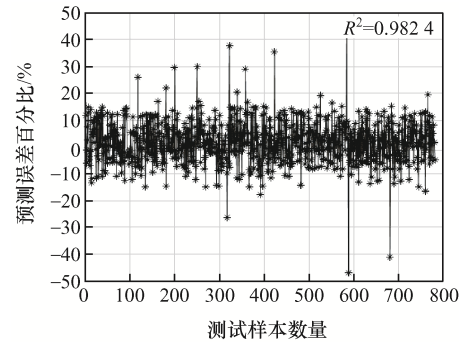


图 4 PSO-BP 神经网络预测误差百分比
Fig. 4 Percentage of prediction error for PSO-BP neural network

$R^2 = 0.9616$; 而 PSO-BP 神经网络预测寿命次数的误差百分比大部分集中在 $[-15\%, 15\%]$ 之间, 最大不超过 $\pm 50\%$, 其拟合优度 $R^2 = 0.9824$ 。因此, 本文选择 PSO-BP 神经网络作为 SiC MOSFET 模块的寿命预测方案。

3 数字化实现电路设计与验证

3.1 数字化实现电路设计

本文为了验证利用 PSO-BP 神经网络对 SiC MOSFET 模块进行寿命预测方法的可行性, 设计了硬件电路和移植程序。将控制电路、驱动电路及显示电路集成于 1 片 PCB 板, 并与模数转换器 ADC (analog-to-digital converter) 采集模块进行配合, 在驱动 SiC MOSFET 模块导通的同时采集导通压降和漏极电流, 经过现场可编程门阵列 FPGA (field programmable gate array) 中移植的结温预测模型和寿命预测模型运算后, 将得到的预测结温和寿命次数显示于 LCD1602 液晶显示屏上以便观察。

本文所研究的基于 PSO-BP 神经网络的寿命预测方法数字化实现总体设计结构如图 5 所示。其中: 控制单元的核心为可编程逻辑芯片 FPGA, 包含 Verilog 硬件描述语言编写的 ADC 采集程序、结温预测模型、寿命预测模型移植程序、数据转换程序及显示程序; 驱动单元包括驱动放大电路、欠压与退饱和保护电路, 保证 SiC MOSFET 模块可靠工作; 显示单元采用 LCD1602 液晶显示屏, 用来

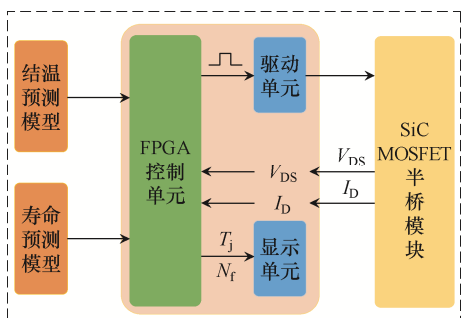


图 5 总体设计结构

Fig. 5 Overall design structure

显示 SiC MOSFET 模块预测的结温及寿命次数。其实际硬件电路 PCB 板如图 6 所示。

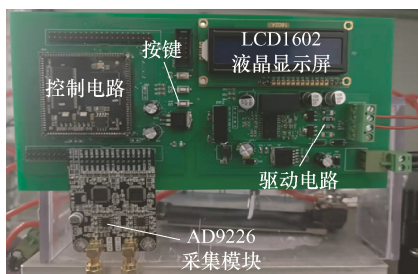


图 6 硬件电路 PCB 板

Fig. 6 Hardware circuit PCB board

3.2 结果分析

3.2.1 结温及寿命次数预测结果数字化显示

设置母线电压为 600 V, 负载电感为 200 μ H, 加热台温度为 50 $^{\circ}$ C, 对功率循环 3 000 次的 SiC MOSFET 模块进行 1 次寿命预测。实验过程中, 采用加热台对处于亚克力玻璃罩中的模块进行加热, 并用测温仪器持续测量模块温度。当模块温度与加热台设置温度一致时, 认为亚克力玻璃罩内达到热平衡, 此时结温即为加热台的温度。在加热平台达到热稳态后, 按下按键发送双脉冲, 等待 40 μ s 后 AD9226 模块开始采集, 此时漏极电流为 120 A, 将采集到的导通压降和漏极电流经过 FPGA 中移植的模型计算后, 显示的结温和寿命次数如图 7 所示。液晶显示屏第 1 行显示结温, 为 54.73 $^{\circ}$ C, 与真实结温的误差为 4.73 $^{\circ}$ C; 第 2 行显示寿命次数, 为 3 132.42 次, 与真实寿命次数的误差百分比为 4.1%, 证明利用神经网络来预测 SiC MOSFET 模块寿命的方法得到了数字化实现, 并能够较为准确地预测 SiC MOSFET 模块的结温和寿命次数。



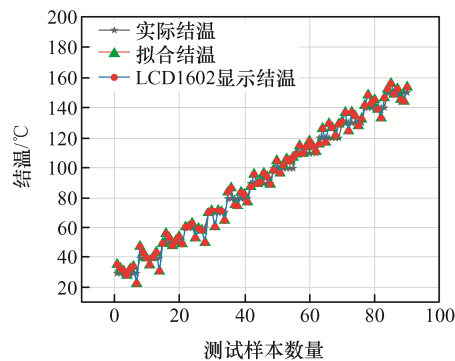
图 7 LCD1602 显示的结温和寿命次数

Fig. 7 Junction temperature and number of life times shown on LCD1602

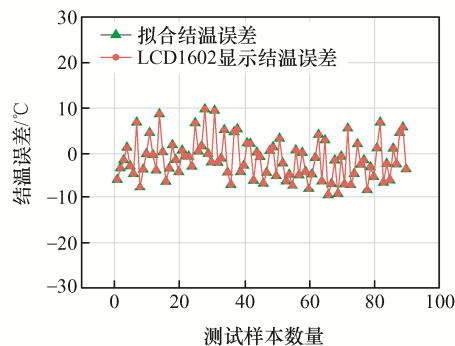
3.2.2 功率循环 3 000 次模块的实验结果与分析

1) 结温预测结果与分析

功率循环 3 000 次的 SiC MOSFET 模块在不同梯度结温和不同梯度漏极电流下的结温预测结果如图 8 所示。实际结温、拟合结温及 LCD1602 显示结温的对比结果如图 8(a)所示, 结温预测误差如图 8(b)所示。可以看出, LCD1602 显示的结温与拟合得到的结温吻合, 误差主要集中在 $[-7.5, 7.5]$ $^{\circ}$ C



(a) 结温对比结果



(b) 结温预测误差

图 8 功率循环 3 000 次 SiC MOSFET 模块的结温预测结果

Fig. 8 Junction temperature prediction results of SiC MOSFET module with 3 000 power cycles

之间,最大不超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,由此表明,结温预测模型得到了数字化实现,不但能够对老化初期的 SiC MOSFET 模块进行结温预测,而且预测结温的精度很高,为寿命预测的神经网络提供了可靠的输入参数。

2) 寿命次数预测结果与分析

功率循环 3 000 次的 SiC MOSFET 模块在不同梯度结温和不同梯度漏极电流下的寿命次数预测结果如图 9 所示。图 9(a)为实际寿命次数、实际结温经 PSO-BP 神经网络预测的寿命次数、预测结温经 PSO-BP 神经网络预测的寿命次数及 LCD1602 显示的寿命次数对比结果,寿命次数预测误差百分比如图 9(b)所示。可以看出, LCD1602 显示的寿命次数与预测结温经 PSO-BP 神经网络预测的寿命次数吻合,这 3 种寿命次数与实际寿命次数的误差百分比集中在 $[-10\%, 10\%]$ 之间,表明基于神经网络的寿命预测模型得到了数字化实现。但实际结温经 PSO-BP 神经网络预测的寿命次数相比

LCD1602 显示的寿命次数更为准确,这是因为寿命预测模型输入的是预测结温,当预测结温存在误差时,会对寿命次数的预测精度造成影响,但由于预测的结温误差很小,因此预测的寿命次数精度也较高。

4 结 论

SiC MOSFET 模块在实际工作过程中,可能会同时受到电应力和热应力的双重作用,致使模块发生疲劳损伤而老化失效,其运行状况严重影响模块本身甚至是系统的正常运行,因此对 SiC MOSFET 的寿命预测非常必要。预测的数据不仅可以展现器件本身的老化状况,还能为系统的维护要求提供可靠依据。实验结果表明,本文提出的基于 PSO-BP 神经网络的 SiC MOSFET 模块寿命预测方法,其拟合度为 0.982 4,优于未优化的 BP 神经网络。

本文设计了可数字化显示的硬件电路,并验证了基于 PSO-BP 神经网络寿命预测方法的实际效果。由硬件电路预测的结温和寿命与本文建立的结温预测方案和寿命预测方案的预测结果吻合,表明基于 PSO-BP 神经网络的寿命预测方法得到了数字化实现。

功率循环 3 000 次的 SiC MOSFET 模块预测结温误差主要集中在 $[-7.5, 7.5]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,最大不超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,寿命次数预测误差百分比在 $[-10\%, 10\%]$ 之间,表明利用 PSO-BP 神经网络能够准确地对老化前期的 SiC MOSFET 模块的结温和寿命次数进行预测。需要注意的是,本文提出的寿命预测方法对模块老化后期的预测误差会增大,这是因为选择的温敏电参数会受到模块老化的影响,导致结温预测出现偏差,进而导致寿命预测出现偏差。因此,如果能够选择 1 个不受模块老化影响的参数预测结温,就可以改善老化后期寿命预测误差较大的问题。

参 考 文 献:

[1] 钱照明,张军明,盛况. 电力电子器件及其应用的现状

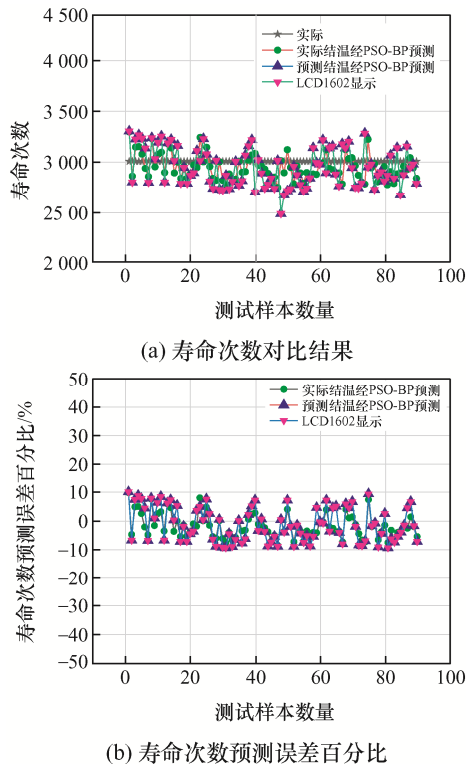


图 9 功率循环 3 000 次 SiC MOSFET 模块的寿命次数预测结果

Fig. 9 Prediction results of life times of SiC MOSFET module with 3 000 power cycles

- 和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161.
- Qian Zhaoming, Zhang Junming, Sheng Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161. (in Chinese)
- [2] Millan J, Godignon P, Perpina X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163.
- [3] Nguyen T T, Ahmed A, Thang T V, et al. Gate oxide reliability issues of SiC MOSFETs under short-circuit operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 30(5): 2445-2455.
- [4] 何湘宁, 石巍, 李武华, 等. 基于大数据的大容量电力电子系统可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 209-220.
- He Xiangning, Shi Wei, Li Wuhua, et al. Reliability enhancement of power electronics systems by big data science [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 209-220. (in Chinese)
- [5] 赵争鸣. 大容量电力电子混杂系统多时间尺度动力学表征与运行机制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 1-3.
- Zhao Zhengming. Multi-timescale dynamics characterization and operation mechanism of large-capacity power electronic hybrid systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 1-3. (in Chinese)
- [6] Celaya J, Saxena A, Wysocki P, et al. Towards prognostics of power MOSFETs: Accelerated aging and precursors of failure [C]// Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2010. Portland, OR, USA, 2010, 2.
- [7] Celaya J, Patil N, Saha S, et al. Towards accelerated aging methodologies and health management of power MOSFETs [C]// Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009. San Diego, CA, USA, 2009.
- [8] Wysocki P, Vashchenko V, Celaya J, et al. Effect of electrostatic discharge on electrical characteristics of discrete electronic components [C]// Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009. San Diego, CA, US, 2009.
- [9] Saha S, Celaya J, Saha P, et al. Towards modeling the effects of lightning injection on power MOSFETs [C]// Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009. San Diego, CA, US, 2009.
- [10] 陈世杰. 功率 MOSFET 退化建模及寿命预测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Chen Shijie. Research of degradation model and lifetime prognosis method for power MOSFET [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 张红玉. 碳化硅 MOSFET 键合线失效建模与状态监测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- Zhang Hongyu. Research on SiC MOSFET bond wire failure modeling and condition monitoring [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)
- [12] 康锡娥, 郜月兰. 功率 MOSFET 寿命预测技术研究[J]. 微处理机, 2017, 38(5): 4-7.
- Kang Xi'e, Gao Yuelan. Research on power MOSFET lifetime prediction technology [J]. Microprocessors, 2017, 38(5): 4-7. (in Chinese)
- [13] Salah T B, Khachroumi S, Morel H. Characterization, modeling and design parameters identification of silicon carbide junction field effect transistor for temperature sensor applications [J]. Sensors, 2010, 10(1): 388-399.
- [14] Ren Lei, Shen Qian, Gong Chunying. Real-time aging monitoring for power MOSFETs using threshold voltage [C]// IECON 2016 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy, 2016: 441-446.
- [15] 李凌云, 何芹芹, 黄德雷. SiC MOSFET 模块结温监测研究[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 169-174.
- Li Lingyun, He Qinqin, Huang Delei. Study on junction temperature monitoring of SiC MOSFET module [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 169-174. (in Chinese)
- [16] Griffo A, Wang Jiabin, Colombage K, et al. Real-time measurement of temperature sensitive electrical parameters in SiC power MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2663-2671.
- [17] 黄德雷, 杨帆, 张地. 基于开通 di_{ds}/dt 的 SiC MOSFET (下转第 258 页)

- [19] Rudsari F N, Razi-Kazemi A A, Shoorehdeli M A. Fault analysis of high-voltage circuit breakers based on coil current and contact travel waveforms through modified SVM classifier [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1608-1618.
- [20] Liang Hanqing, Liu Yadong, Sheng Gehao, et al. Fault-cause identification method based on adaptive deep belief network and time-frequency characteristics of travelling wave [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(5): 724-732.



黄道友

作者简介:

黄道友(1968—),男,硕士,高级工程师。研究方向:电网设备运检管理。E-mail: wyj0901@163.com。

任丽佳(1978—),女,通信作者,博士,讲师。研究方向:电网运行优化、电力系统分析、电网规划、输变电设备状态监测及状态维修。E-mail: ahgwrjl@163.com。

康健(1981—),男,本科,高级工程师。研究方向:电力系统及其自动化。E-mail: xjksdxhm@163.com。

(责任编辑:耿越)

(上接第 235 页)

- 模块结温提取研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(7): 73-75.
- Huang Delei, Yang Fan, Zhang Di. Junction temperature extraction of SiC MOSFET modules based on turn-on di_{ds}/dt [J]. Power Electronics, 2018, 52(7): 73-75. (in Chinese)
- [18] Li Hui, Liao Xinglin, Hu Yaogang, et al. Analysis of SiC MOSFET dI/dt and its temperature dependence [J]. IET Power Electronics, 2018, 11(3): 491-500.
- [19] Jose O G, Olayiwola A, Ji Hu, et al. An investigation of temperature sensitive electrical parameters for SiC power MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7954-7966.
- [20] Jiang Luxin, Wang Xiaohui. Optimization of online teaching quality evaluation model based on hierarchical PSO-BP neural network [J]. Complexity, 2020: 1-12.



毛明波

作者简介:

毛明波(1995—),男,硕士研究生。研究方向:功率半导体可靠性研究。E-mail: 1104595173@qq.com。

孟昭亮(1987—),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,副教授。研究方向:电力电子技术、电力电子器件与功率集成。E-mail: mengzhaoliang@xpu.edu.cn。

高勇(1956—),男,中国电源学会会员,博士,教授。研究方向:半导体分立器件制造。E-mail: gaoy@xaut.edu.cn。

杨媛(1974—),女,中国电源学会高级会员,博士,教授。研究方向:电路与系统设计、大功率 IGBT 模块及驱动保护电路研究。E-mail: yangyuan@xaut.edu.cn。

(责任编辑:郭凯凯)