

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.021

充电桩充电模块功率器件故障诊断研究综述

刘秀兰¹, 陈熙¹, 张倩¹, 程林¹, 林志法¹, 陈慧敏¹,
刘占磊², 代建港²

(1. 国家电网公司北京电力科学研究院, 北京 100075; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 大功率直流充电桩是未来电动汽车充电设施的发展方向, 充电模块是直流充电桩最重要以及故障率最高的部件, 其中功率器件开路故障较为常见。为保证充电模块安全可靠运行, 需要对充电模块功率器件开路故障进行准确识别和定位。文中首先对充电模块拓扑结构和故障类型进行分析, 然后分别对基于解析模型、基于信号处理和基于知识的功率器件开路故障诊断方法进行总结, 分别介绍了各类方法的基本思想、研究进展和优缺点, 最后总结并展望充电模块功率器件开路故障诊断方法未来的研究和发展方向。

关键词: 充电模块; 开路故障; 解析模型; 信号处理; 知识

Review of Power Device Fault Diagnosis for Charging Module of Charging Pile

LIU Xiulan¹, CHEN Xi¹, ZHANG Qian¹, CHENG Lin¹, LIN Zhifa¹, CHEN Huimin¹,
LIU Zhanlei², DAI Jiangang²

(1. Beijing Electric Power Research Institute, State Grid Corporation of China, Beijing 100075, China; 2. State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High power DC charging pile is the development direction of electric vehicle charging facilities in the future. The charging module is the most important component of DC charging pile and has the highest failure rate, among which open circuit fault of power device is more common. For assuring safe and reliable operation of the charging module, it is necessary to accurately identify and locate the open circuit fault of the power device of the charging module. Firstly, the topology and fault types of the charging module are analyzed in this paper. Then, the open circuit fault diagnosis methods of the power device based on analytical model, signal processing and knowledge is summarized respectively. The basic ideas, research progress and the pros and cons of various methods are introduced respectively. Finally, the future research and development direction of open circuit fault diagnosis methods for power device of charging module are summarized and prospected.

Key words: charging module; open circuit fault; analytical model; signal processing; knowledge

0 引言

电动汽车以其清洁高效、节能环保等方面的优势成为未来汽车产业发展的趋势^[1]。电动汽车的发展离不开充电基础设施^[2-3], 目前充电基础设施主要包括直流充电桩、交流充电桩、车载充电机、充电站等, 交流充电桩为需要与车载充电机配套使用, 内部无充电模块, 充电功率低, 充电时间长, 而直流充

电桩内置充电模块, 充电功率可达几十到几百 kW, 充电速率快, 可以满足家用和乘用车大功率快充的要求, 因此, 大功率直流充电桩是电动汽车充电设施未来的发展方向^[4]。

《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》中指出, 到 2025 年, 新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的 20% 左右, 到 2035 年, 纯电动汽车成为新销售车辆的主流, 公共领域用车全面电动

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国网北京市市电力公司科技项目(52022324000M)。

Project Supported by State Grid Beijing Electric Power Company Technology Project(52022324000M).

化。然而,中国大功率充电基础设施建设尚处于起步阶段,相关技术还不是很成熟,产业生态尚不健全。由于充电桩运行环境复杂恶劣,硬件设备本身存在缺陷,相关标准尚不完善,导致充电桩故障多有发生。直流充电桩的故障主要包括通信故障、液冷系统故障、充电枪故障、风扇故障、绝缘检测故障、充电模块故障等^[5-7]。其中,充电模块工作电压高,包含大量电力电子器件和电解电容器,在高电压和反复的温度循环下容易发生老化失效和器件故障,因此充电模块是直流充电桩中故障率最高的部件,对充电桩充电模块可能发生的故障进行监测具有重要的意义。

在充电桩充电模块故障中,功率器件开路故障和短路故障比例较高^[8-9]。功率器件短路故障时间较短,危害较大,通常通过驱动模块硬件电路的设计加以检测和保护,或者通过快速熔断器将短路故障转化为开路故障^[10-11]。功率器件开路故障发生后系统还能继续运行,但电压电流发生畸变,加速非故障功率器件的老化失效,危及系统安全可靠运行,因此对充电模块功率器件开路故障的诊断辨识对提高模块运行可靠性具有重要意义。

功率器件开路故障诊断方法可分为基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法^[12-14]。文中首先介绍了充电桩充电模块的拓扑结构和故障类型,然后分别对基于解析模型、基于信号处理和基于知识的功率器件开路故障诊断方法进行总结和分析,最后总结并讨论了充电模块功率器件开路故障诊断方法未来的发展方向。

1 充电模块拓扑结构及故障特征

1.1 充电模块拓扑结构

目前充电模块拓扑结构多采用AC/DC+DC/DC两级变换结构见图1^[12]。其中,前级AC/DC整流电路为有源功率因数校正电路,一般采用VIENNA整流电路,提高系统功率因数,减少对电网的谐波污染,后级DC/DC电路为隔离型DC/DC变换器,采用移相全桥变换器或LLC谐振型变换器,为汽车电池组提供可调的宽范围电压和低纹波高品质电压。



图1 充电模块拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of charging module

三相VIENNA整流拓扑结构见图2。图2中: e_k 和 $i_k(k=a, b, c)$ 分别为网侧三相电压和电流; L_a 、 L_b 、 L_c 为网侧等效输入电感; R 为等效输入电阻; D_{kj} 、 M_{kj} 、

$DM_{kj}(k=a, b, c; j=1, 2)$ 分别为整流二极管、功率开关管和续流二极管; C_1 、 C_2 为滤波电容; R_L 为负载电阻。VIENNA整流器常用的调制方式有正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)和空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM),SVPWM因其直流侧电压利用率高、输出电流波形好等优点被广泛应用^[15]。为了降低开关管电流应力,减小电流纹波,提高整流器的效率,还可以采用交错并联VIENNA结构。

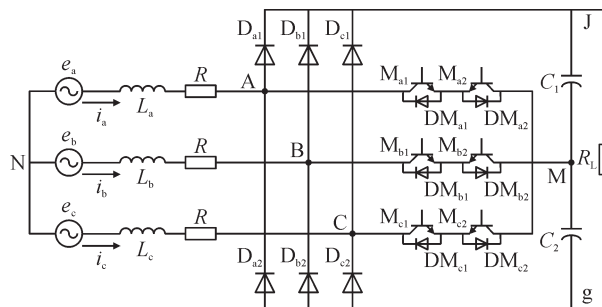


图2 三相维也纳整流器拓扑结构

Fig. 2 Topology of three-phase VIENNA rectifier

LLC谐振变换器原理图见图3^[16]。图3中: Q_k 、 VD_k 、 C_k 、 $VD_{Rk}(k=1, 2, 3, 4)$ 分别为原边功率开关管、反并联二极管、功率开关管寄生电容和副边整流二极管; T_r 为变压器; L_m 为变压器励磁电感, L_r 和 C_r 分别为谐振电感和谐振电容; C_f 为滤波电容; R_{Ld} 为负载电阻。LLC谐振变换器常用的控制方式包括变频控制和定频控制,将两种控制方式相结合能够充分发挥其性能^[16-18]。为了降低开关管开关应力,提高变换器的功率密度和效率,可以采用三电平结构或交错并联结构。

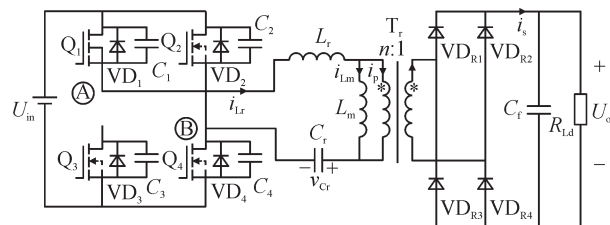


图3 LLC谐振变换器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of LLC resonant converter

1.2 充电模块功率器件开路故障特征

在实际应用中,充电模块中多个功率器件同时发生开路故障的概率较低,因此一般情况下只考虑单个功率器件发生开路故障的情况。由于充电模块由AC/DC和DC/DC两级变换结构构成,因此功率器件开路故障可分为以下两种类型。

1)前级AC/DC整流电路中的单个开关管开路故障。共包括6种状态,记为F₁-F₆。

2)后级DC/DC变换器开关管开路故障。共包

括4种状态,记为 F_7 ~ F_{10} 。

当充电模块前级 VIENNA 整流器功率器件开路故障时,电感电流失去开通回路,只剩下二极管

续流回路,导致对应相的输入电流发生畸变。VIENNA 整流器单管开路状态下的三相输入电流波形见图4。

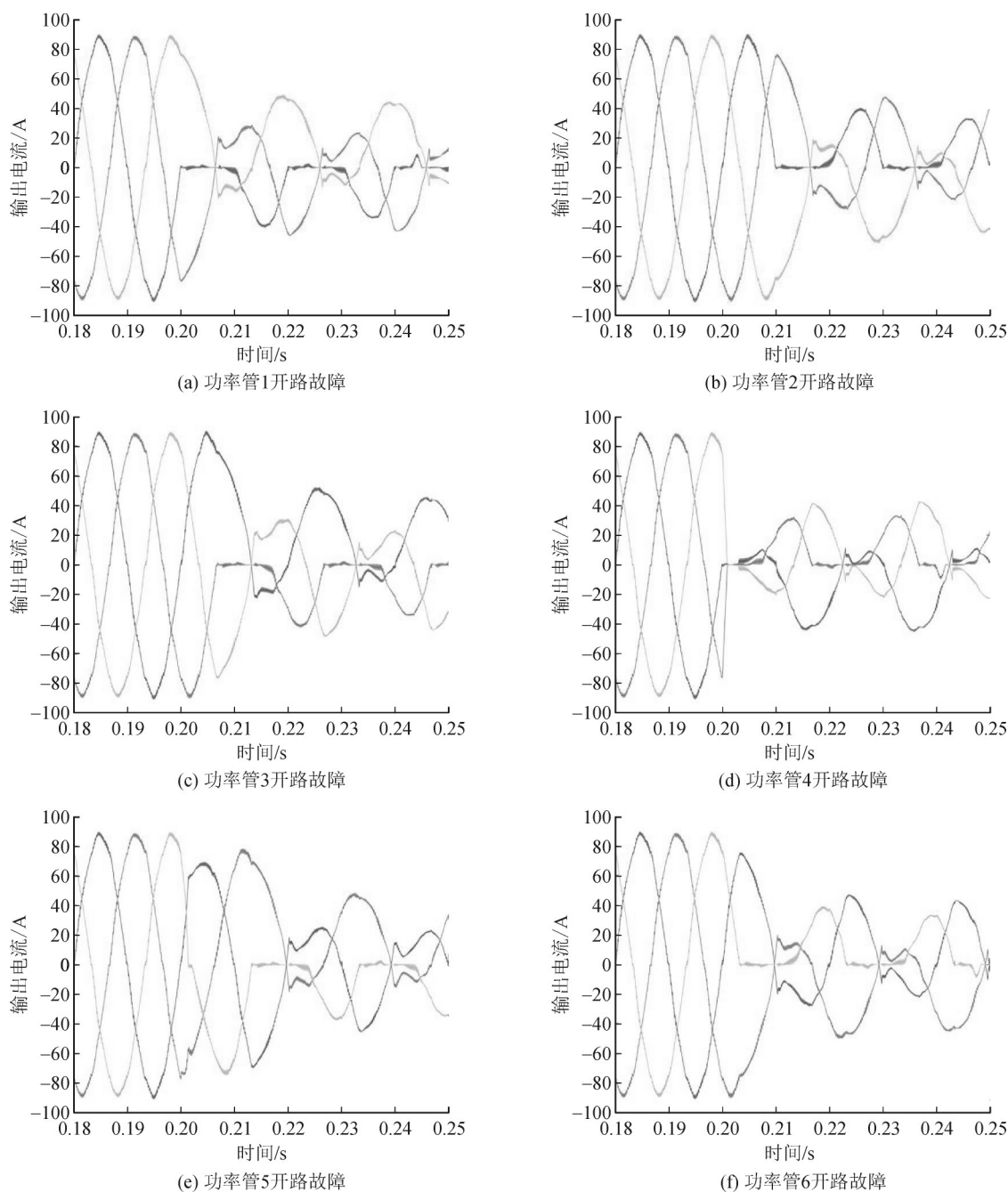


图4 VIENNA 整流器不同功率管开路故障时三相输入电流波形

Fig. 4 Three-phase input current waveforms of VIENNA rectifier with different power transistor open circuit fault

充电模块后级 DC/DC 变换器发生功率管开路故障时,后级变换器传输的功率降低,会导致三相输入电流发生畸变,主要表现为电流幅值的降低。后级变换器故障时充电模块三相输入电流波形见图5。

2 基于解析模型的故障诊断方法

基于解析模型的故障诊断方法是建立电路系

统的解析模型,通过比较系统的实际行为与模型的预期行为,实现故障诊断与定位。从建模的角度出发,该方法可细分为基于状态空间平均模型的方法和基于混杂系统建模的方法^[19]。基于解析模型的故障诊断方法原理见图6^[20]。

状态空间平均模型利用时间平均,得到一个周期内的平均状态量,将非线性电路转化为等效的线

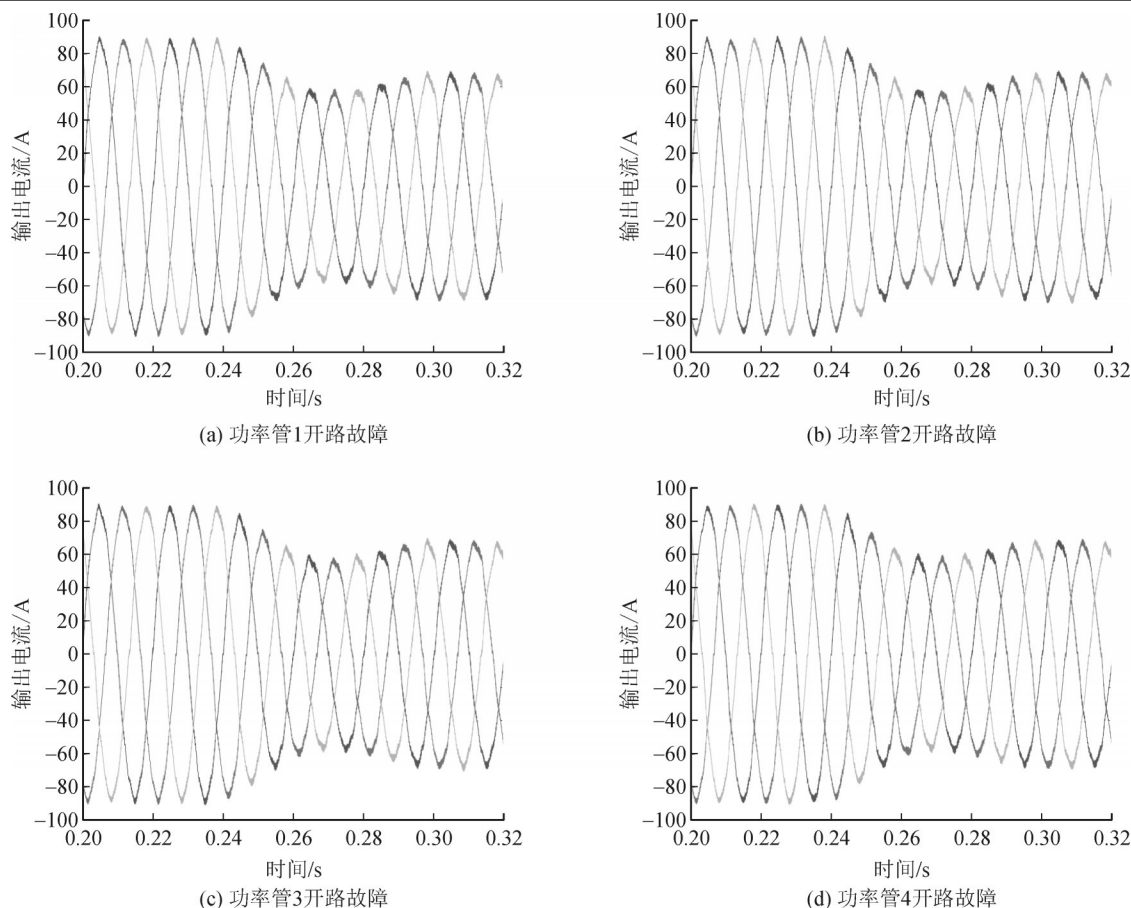


图5 后级变换器不同功率管开路故障时三相输入电流波形

Fig. 5 Three-phase input current waveforms of different power transistor open circuit faults in post stage converter

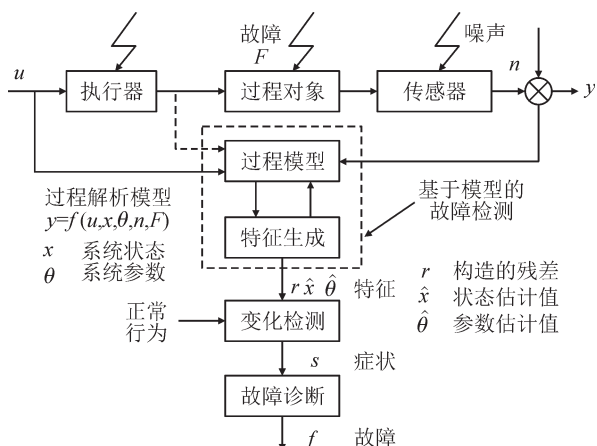


图6 基于解析模型的故障诊断方法

Fig. 6 Fault diagnosis method based on analytic model

性电路,通过比较模型与实际系统之间的残差实现故障诊断^[21]。文[22]提出了一种PWM电压源逆变器单开关和双开关开路故障诊断方法,该方法仅利用系统的三相输入电流,将开路故障引起的电流畸变和阈值比较,通过重新计算当前矢量旋转角度来确定故障级,实现开路故障诊断。文[23]对脉宽调制电压源逆变器开路故障诊断展开研究,提出等位点的概念,定义相关函数描述电压源逆变器在正常和

故障状态下的对称性,结合任意两个相函数之间的残差和拓扑结构作为开路故障定位的标准。该方法具有快速、实时、鲁棒性好等优点。文[24]针对三相电压源逆变器,提出基于计算的平均桥臂极间电压和误差自适应阈值的诊断方法,选择平均桥臂极间电压偏差作为故障诊断变量,可以快速准确的实现单管和多管开路故障诊断。该方法无需额外的硬件电路,在整流模式和逆变模式下均有效。

电力电子电路是包含离散事件驱动行为和连续变量动态行为的混杂动态系统^[19]。文[25]提出了一种基于混合逻辑动态模型和残差的单相脉宽调制整流器开路故障快速诊断方法,通过比较基于MLD的整流器模型与实际系统之间的残差实现开关管开路故障定位。该方法具有无需额外的硬件电路、诊断速度快、可靠性高等优点。文[26]建立了电力电子电路混合逻辑动态模型,基于电路的故障事件集和故障事件识别向量实现电路故障诊断,并以逆变电路为例验证了所提方法的有效性。文[27]对四象限脉冲整流器进行建模分析,根据数学模型构建状态观测器,将估计器与实际系统进行比较,得到系统状态残差,实现开关管故障定位。

基于解析模型的方法可以深入电路系统的物理本质,无需增加额外的物理设备,但是,在实际电路系统中,系统参数的不确定性、负载扰动、开关元件的非线性等因素都会导致无法对系统建立精确的数学模型,因此,该方法在面对复杂大型的非线性电路系统时具有一定的局限性和限制^[20, 28-29]。

3 基于信号处理的故障诊断方法

该方法无需建立电路系统的数学模型,对系统中测得的电压、电流、温度等故障信号进行处理,得到幅值、频率、谐波等故障特征量,通过对故障特征量的分析处理实现故障诊断。常用的信号处理方法包括主成分分析、频谱分析、小波分析等^[19, 27-28]。

3.1 频谱分析法

频谱分析是一种将信号从时域变换到频域的分析方法。电力电子电路的故障信号往往具有不同于正常信号的频谱分量,通过频谱分析提取故障特征量,可用于功率器件故障诊断^[20]。

文[30]针对逆变器开关管开路故障,通过开关函数的双傅里叶变换技术,分别分析了逆变器正常运行、单管开路和单相开路故障时直流侧电流频谱,通过直流侧电流频谱成分实现开路故障诊断。文[31]提出了一种基于傅里叶变换和神经网络的逆变器故障诊断方法,通过加窗傅里叶变换提取输出信号正负对称分量,计算故障后与无故障逆变器输出信号的各阶谱之差,即谱残差,选取谱残差和相对谱残差作为故障特征向量,实现了逆变器故障诊断和定位。

频谱分析较为简单,但在提取频域信号的同时舍弃了时域信号,不能提取信号的局部特征,只适用于平稳信号分析。对于复杂电路系统的非平稳信号分析,小波分析具有更显著的优势。

3.2 小波分析

小波分析是一种时频分析方法,通过伸缩和平移变换对信号进行多尺度细化,使得信号在高频处时间细分,低频处频率细分,适用于非平稳信号分析,在故障诊断和特征提取方面具有广阔的应用前景^[32]。

文[33]以风电变流器为例,分析了开关管不同开路故障下整流器输出侧直流电压,提出了基于小波包分析的故障诊断方法,计算小波包分解后的能量谱和功率谱,通过频谱特征识别开路故障。

文[34]针对直流充电桩中的PWM整流电路,提出基于母线电压信号和小波包分析的功率开关管开路故障诊断方法。故障诊断流程见图7,功率器

件开路故障时,直流母线电压发生变化,对直流母线电压采样并进行小波分解与重构,根据能量谱确定信号能量的集中频带和特征频率,并对重构后的信号进行功率谱分析,将特征频率和功率谱作为开关管故障诊断的依据。仿真得出的故障特征见表1,根据特征频率和功率谱可以定位故障位置。

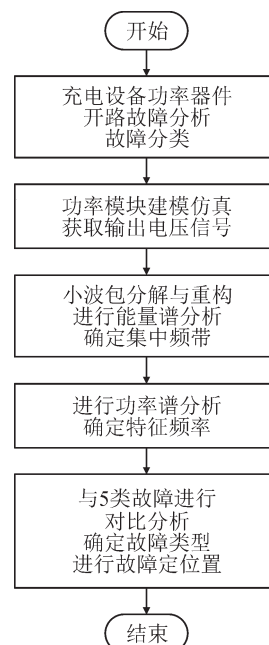


图7 直流充电桩功率器件故障诊断框图

Fig. 7 Block diagram of fault diagnosis of DC charging pile power device

表1 单个功率器件开路故障特征频率和功率谱数据

Table 1 Open circuit fault characteristic frequency and power spectrum data of single power device

故障情况	(特征频率/Hz, 功率/W)
VT ₁ 故障	(33, 47.10) (36, 119.00) (39, 58.92)
	(42, 346.36) (45, 239.98) (48, 151.42)
VT ₄ 故障	(33, 216.03) (36, 339.80) (39, 48.44)
	(42, 29.01) (45, 54.05) (48, 30.80)
VT ₃ 故障	(33, 36.28) (36, 217.87) (39, 35.23)
	(42, 271.88) (45, 16.43) (48, 30.28)
VT ₆ 故障	(33, 8.30) (36, 54.43) (39, 71.08)
	(42, 153.81) (45, 128.13) (48, 11.48)
VT ₅ 故障	(33, 34.69) (36, 56.84) (39, 136.44)
	(42, 194.39) (45, 87.25) (48, 7.22)
VT ₂ 故障	(33, 34.77) (36, 132.69) (39, 8.46)
	(42, 265.83) (45, 71.92) (48, 2.80)

小波分析方法可以有效的提取故障特征,还可以和其他智能算法相结合,提高故障诊断精度,如神经网络、支持向量机、随机森林等方法。小波分析和智能算法相结合的故障诊断方法将在后文进行总结分析。

3.3 其他方法

除了频谱分析和小波分析等传统的信号处理方法,还有一些其他有价值的方法。

文[35]针对T型逆变器提出了基于负载电流和母线电容电压变化规律的故障诊断方法。首先通过检测母线电容电压判断变换器是否发生故障,检测到故障后将调制比限制为0.25,通过判断参考矢量在不同扇区时负载电流和母线电容电压变化规律实现故障定位。

文[36]对VIENNA整流器各个开关管故障情况下的输入电流进行分析,提出基于相位电流变化率的开关管开路故障诊断方法。当开关管发生开路故障时,对应相的输入电流发生畸变,出现零电流平台。不同开关管故障时对应的零电流初始相位不同,见图8^[36],分别为 0 、 $\pi/3$ 、 $2\pi/3$ 、 π 、 $4\pi/3$ 、 $5\pi/3$ 、 2π 。

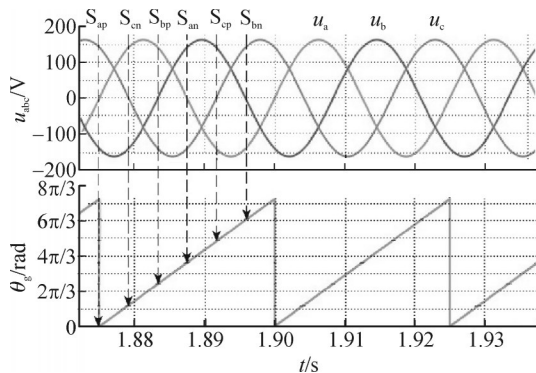


图8 故障开关对应的零电流初始相位

Fig. 8 Zero current initial phase corresponding to fault switch

通过检测零电流初始相位处的电流变化率可以判断开路故障位置。考虑到电流纹波和噪声,判断流程见图9^[36],判断标准见表2^[36],对输入电压电流进行采样,计算电网相位,在相应区间内对电流进行检测,当两个边界条件均满足时即可判断相应的开关管发生故障。

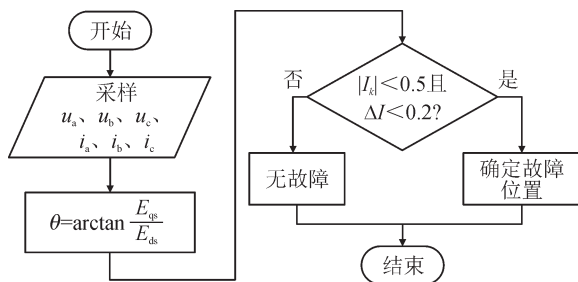


图9 故障诊断流程

Fig. 9 Fault diagnosis process

表2 区间判断标准

Table 2 Interval judgment standard

检测角/(rad·s ⁻¹)	判断标准	检测开关	故障标志位
$0 \sim \frac{\pi}{6}$	$ I_a < 0.5$ $\left \frac{dI_a}{dt} \right < 0.2$	S_{ap}	1
$\frac{\pi}{3} \sim \frac{\pi}{2}$	$ I_c < 0.5$ $\left \frac{dI_c}{dt} \right < 0.2$	S_{cn}	2
$\frac{2\pi}{3} \sim \frac{5\pi}{6}$	$ I_b < 0.5$ $\left \frac{dI_b}{dt} \right < 0.2$	S_{bp}	3
$\pi \sim \frac{7\pi}{6}$	$ I_a < 0.5$ $\left \frac{dI_a}{dt} \right < 0.2$	S_{aa}	4
$\frac{4\pi}{3} \sim \frac{3\pi}{2}$	$ I_c < 0.5$ $\left \frac{dI_c}{dt} \right < 0.2$	S_{cp}	5
$\frac{5\pi}{3} \sim \frac{11\pi}{6}$	$ I_b < 0.5$ $\left \frac{dI_b}{dt} \right < 0.2$	S_{ba}	6

文[37]提出了一种基于瞬态电流角度的VIENNA整流器单管开路故障辨识方法,且无需增加额外的硬件传感器。辨识方法原理框图见图10^[37],分为两个步骤。第一步对三相输入电流进行Clark变换提取角度信息,判断是否存在 0 、 $\pi/3$ 、 $-\pi/3$ 值平台,实现故障相的定位, X_k 为故障相定位标志位;第二步利用非故障相电流信息实现故障相故障开关管的定位, Y_a 、 Y_b 、 Y_c 分别为a、b、c相故障开关管定位标志位。

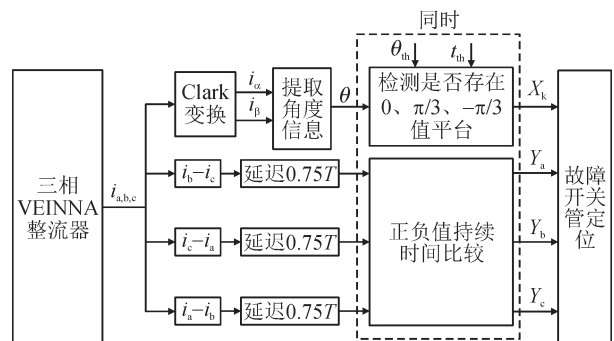


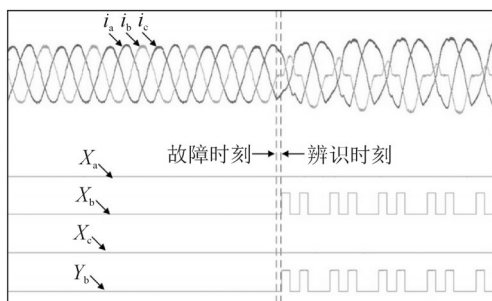
图10 开路故障辨识原理框图

Fig. 10 Principle block diagram of open circuit fault identification

通过试验模拟VIENNA整流器b相1管Mb₁开路故障,故障前后输入电流和标志位波形见图11^[37]。故障后2ms故障标志位(X_a 、 X_b 、 X_c 、 Y_b)被置为(0,1,0,1),定位Mb₁故障。改变负载大小,定位标志位不会改变。

4 基于知识的故障诊断方法

该方法无需建立精确的数学模型,常常与基于信号处理的故障诊断方法相结合,提取被测对象的相关知识,是一种智能化的诊断方法。常用的方法包

图 11 Mb₁故障前后,定位标志位波形Fig. 11 Positioning flag bit waveforms before and after Mb₁ fault

括专家系统法、支持向量机、神经网络、随机森林等^[19-20],基于知识的故障诊断方法诊断流程见图12^[38]。

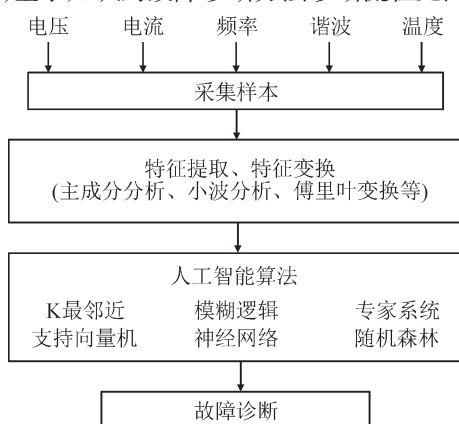


图 12 基于知识的故障诊断方法

Fig. 12 Knowledge based fault diagnosis method

支持向量机是一种有监督学习的对数据进行二元分类的线性分类器,适用于小样本、高维度和非线性的回归分析和模式识别^[39]。文[40]针对三相逆变器,通过小波分解和Concordia变换对逆变器三相输入电流进行降噪和获取电流轨迹,对电流轨迹进行特征提取,采用故障字典法和支持向量机对开关管故障进行定位,故障定位率可达93%以上。文[41]针对H桥逆变器,通过小波多分辨率分析对半个基波周期内的电容电压平均值进行多尺度分解,提取特征向量,利用核主成分分析进行数据降维,建立了基于最小二乘支持向量机的故障分类器,在诊断实时性和准确率上均有优势。然而,支持向量机算法在处理大规模训练样本时耗时较长,且难以解决多分类问题,具有一定的局限性。

人工神经网络是由大量处理单元互联组成的非线性、自适应信息处理系统,具有自适应、自组织、自学习能力,可用于专家系统、模式识别、智能控制、故障诊断等领域。文[42]对三电平逆变器桥臂电压信号进行采集,通过频谱分析提取桥臂电压信号的谐波幅值和相位,构建多神经网络模型实现功率器件开路故障诊断。文[43]基于VIENNA整流

器桥臂各个开关管出现开路故障时的故障波形,提出将三相输入电流直流分量和输出电压纹波作为特征向量,将三相输入电流直流分量和输出电压纹波作为输入,将故障类别代码作为输出,构建BP神经网络,并利用仿真数据对训练好的网络进行验证,结果表明,所构建的神经网络系统可以准确判断故障位置。文[28]对充电模块中开关管故障和电解电容故障进行仿真,得到不同故障情况下的输入电流波形,对三相输入电流进行三层小波包分解,提取故障特征向量。并将三相输入电流幅值和小波包能量谱作为故障特征向量,训练神经网络模型。通过BP神经网络实现故障识别与定位,测试样本识别正确率达到97.52%。神经网络算法往往需要较多的数据量,且容易陷入局部最优解,不适用于样本数量较少的情况。

随机森林是一个包含多个决策树的分类器,可以处理多分类问题,训练速度快,模型泛化能力强,且训练完成后可返回特征的重要程度^[44-45]。文[46]提出了一种基于随机森林的电力电子电路在线故障诊断方法,实现了带感性负载的三相晶闸管整流电路故障诊断,对其他形式的电路拓扑结构也适用。文[47]提出了一种基于随机森林和特征变换相结合的故障诊断方法,以三相PWM整流器的三相交流故障电流为例,首先采用基于电流轨迹斜率的特征变换方法对故障电流数据进行变换,然后采用基于随机森林的数据驱动方法,利用故障电流轨迹斜率数据训练故障诊断分类器,实现了开关管开路故障定位。

5 总结和展望

大功率直流充电桩是未来电动汽车充电基础设施的发展方向,充电模块是直流充电桩中故障率最高的部件,其中功率开关管开路故障较为常见,对系统危害较大,因此对充电模块功率器件开路故障进行诊断和定位具有重要意义。文中介绍了充电桩充电模块开路故障类型,分别从基于解析模型、基于信号处理和基于知识的方法对充电模块功率器件开路故障诊断方法进行综述,介绍了各种方法的基本思想和研究进展,对各种方法的优缺点进行了简单的对比和分析。然而,目前关于充电桩充电模块开路故障诊断的研究尚不充分,在总结分析的基础上,提出以下研究方向和趋势:

1)基于解析模型的方法难以用于充电模块复杂的非线性电路系统。近年来,信号处理技术和人工智能算法不断发展,可以考虑将基于信号处理的方

法和基于知识的方法相融合,研究基于数据驱动和知识驱动相结合的故障诊断方法;此外,为了降低系统干扰和不确定性,提高故障诊断的准确性,可以采用多传感器融合和多源信息融合技术,将多个传感器的数据进行综合利用,同时结合多种信号处理方法,提高故障诊断的准确率。

2)充电桩在运行过程中会产生大量运行数据,基于充电桩历史运行数据对充电桩充电模块进行健康状态评估和故障预测,有助于提前发现可能发生故障的部位,进行故障预警。

参考文献:

- [1] 颜乐平,成姿,周常飞,等.电动汽车的发展现状与未来趋势分析[J]. 电工技术,2019(22):148-149.
YAN Leping, CHENG Zi, ZHOU Changfei, et al. Current development and future trends' analysis of electric vehicle [J]. Electrical technology, 2019(22):148-149.
- [2] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等.城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(14):181-187.
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14):181-187.
- [3] 陶梦林,王致杰,付晓琳,等.基于区块链的电动汽车充电桩共享平台策略[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(4):143-151.
TAO Menglin, WANG Zhijie, FU Xiaolin, et al. Research on sharing platform of EV charging piles based on block chain[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):143-151.
- [4] 章江铭,沈建良,袁键,等.基于小波阈值去噪的直流充电桩电能计量数据去噪算法研究[J]. 电测与仪表,2022,59(6):150-157.
ZHANG Jiangming, SHEN Jianliang, YUAN Jian, et al. Research on the electric energy metering data denoising algorithm of DC charging pile based on wavelet threshold denosing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5):150-157.
- [5] 宋梦琼,康逸群.电动汽车充电桩检测技术应用及分析[J]. 电器与能效管理技术,2022(3):77-80.
SONG Mengqiong, KANG Yiqun. Application and analysis of EV charging spot testing technology[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(3):77-80.
- [6] 杨莎莎.基于故障树的直流充电桩故障诊断专家系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
YANG Shasha. Research on fault diagnosis expert system of DC charging pile based on fault tree[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [7] 吴丹,王俊,许燕.基于深度学习的公共充电桩故障预测模型[J]. 电子设计工程,2022,30(5):127-130.
WU Dan, WANG Jun, XU Yan. Fault prediction model of common charging point based on deep learning[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(5):127-130.
- [8] KASTHA D, BOSE B K. Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4):1028-1038.
- [9] DE ARAUJO RIBEIRO R L, JACOBINA C B, DA SILVA E R C, et al. Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(2):587-593.
- [10] 徐帅,张建忠.多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报,2015,30(21):39-50.
XU Shuai, ZHANG Jianzhong. Overview of fault-tolerant techniques for multilevel voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21):39-50.
- [11] LU B, SHARMA S K. A Literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5):1770-1777.
- [12] 赵翔,陈良亮,李明贞,等.一种基于深度神经网络的直流充电桩故障诊断方法[J]. 电测与仪表,2021,58(6):148-152.
ZHAO Xiang, CHEN Liangliang, LI Mingzhen, et al. Fault diagnosis method for DC charging pile based on deep neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6):148-152.
- [13] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault tolerant techniques—part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6):3757-3767.
- [14] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault tolerant techniques—part II: Fault diagnosis with knowledge-based and hybrid, active approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6):3768-3774.
- [15] 林壮. VIENNA 拓扑整流器的控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
LIN Zhuang. Research on control technology of VIENNA topology rectifier[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [16] 李菊,阮新波.全桥 LLC 谐振变换器的混合式控制策略[J]. 电工技术学报,2013,28(4):72-79.
LI Ju, RUAN Xinbo. Hybrid control strategy of full bridge LLC converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):72-79.
- [17] 钱娟. 数字控制全桥 LLC 谐振变换器的研究[D]. 南京:

- 南京航空航天大学, 2013.
- QIAN Juan. Research on digital controlled full bridge LLC resonant converter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [18] TIAN J, PETZOLDT J. Control system analysis and design of a resonant inverter with the variable frequency variable duty cycle scheme[C]//2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Korea: IEEE, 2006: 1-5.
- [19] 李 猛. 电力电子电路故障诊断技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- LI Meng. Research on fault diagnosis technology of power electronic circuit[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [20] 宋 威, 施伟锋, 卓金宝, 等. 多电平逆变器开关管故障诊断方法综述[J]. 微电机, 2019, 52(10): 110-117.
- SONG Wei, SHI Weifeng, ZHUO Jinbao, et al. Review of fault diagnosis methods for switching tubes of multilevel inverters[J]. Micromotors, 2019, 52(10): 110-117.
- [21] 王文斌, 苏宏升, 张耘川. 基于状态空间平均法的 Boost 直流变换器建模与仿真分析[J]. 电气传动自动化, 2013, 35(3): 29-32.
- WANG Wenbin, SU Hongsheng, ZHANG Yunchuan. Modeling and simulation analysis of Boost DC-DC converter based on state - space average method[J]. Electric Drive Automation, 2013, 35(3): 29-32.
- [22] ZHANG J H, ZHAO J, ZHOU D H, et al. High-performance fault diagnosis in PWM voltage-source inverters for vector-controlled induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6087-6099.
- [23] WU F, ZHAO J. A real-time multiple open-circuit fault diagnosis method in voltage - source - inverter fed vector controlled drivers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1425-1437.
- [24] LI Z, MA H, BAI Z, et al. Fast transistor open-circuit faults diagnosis in grid-tied three-phase VSIs based on average bridge arm pole - to - pole voltages and error - adaptive thresholds[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8040-8051.
- [25] GOU B, GE X, WANG S, et al. An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3816-3826.
- [26] 李 宁, 李颖晖, 朱喜华, 等. 混杂系统理论及其在三相逆变电路开路故障诊断中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 114-119.
- LI Ning, LI Yinghui, ZHU Xihua, et al. Fault diagnosis for power electronic circuits based on mixed logic dynamic model and incident identification vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 114-119.
- [27] 苟 斌. 电力牵引变流器故障诊断与容错控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- GOU Bin. Research on fault diagnosis and fault tolerant control technology of electric traction converter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [28] 康 宁. 直流充电桩充电模块故障特征提取研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- KANG Ning. Research on fault feature extraction of charging module of DC charging pile[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [29] 吴 娟, 沈艳霞. 电力电子功率变换器故障诊断方法综述[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(11): 48-54.
- WU Juan, SHEN Yanxia. Overview of fault diagnosis methods for power electronic power converters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(11): 48-54.
- [30] 杨忠林, 吴正国, 李 辉. 基于直流侧电流检测的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 18-22.
- YANG Zhonglin, WU Zhengguo, LI Hui. Inverter fault diagnosis based on detecting DC side current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 18-22.
- [31] 崔博文, 任 章. 基于傅里叶变换和神经网络的逆变器故障检测与诊断[J]. 电工技术学报, 2006(7): 37-43.
- CUI Bowen, REN Zhang. Fault detection and isolation of inverter based on FFT and neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006(7): 37-43.
- [32] CHARFI F, SELLAMI F, AL-HADDAD K. Fault diagnostic in power system using wavelet transforms and neural networks[C]//2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Canada: IEEE, 2006: 2957-2962.
- [33] 沈艳霞, 周文晶, 纪志成, 等. 基于小波包分析的风力发电系统中变流器的故障识别[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2011-2017.
- SHEN Yanxia, ZHOU Wenjing, JI Zhicheng, et al. Fault identification of converter used in wind power generation based on wavelet packet analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2011-2017.
- [34] 杨凤坤, 徐石明, 周 静, 等. 基于小波包分析的电动汽车直流充电桩功率器件开路故障诊断研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(23): 79-85.
- YANG Fengkun, XU Shiming, ZHOU Jing, et al. Research on fault diagnosis of DC charger power device based on wavelet packet analysis[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(23): 79-85.
- [35] 马晓军, 李敏裕, 魏曙光, 等. T型逆变器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2324-2333.
- MA Xiaojun, LI Minyu, WEI Shuguang, et al. Open circuit fault diagnosis of T-type inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2324-2333.
- [36] 郝振洋, 徐子梁, 陈 宇, 等. 航空 Vienna 整流器故障诊断

- 与容错控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(24): 5152-5163.
- HAO Zhenyang, XU Ziliang, CHEN Yu, et al. Fault diagnosis and fault tolerant control for aviation Vienna rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(24): 5152-5163.
- [37] 姚 芳, 王刘浏, 唐圣学, 等. 基于瞬态电流角度的维也纳整流器单管开路故障的在线辨识[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 111-117.
- YAO Fang, WANG Liuliu, TANG Shengxue, et al. Online identification method for VIENNA rectifier single switch open-fault based ontransient current angle information[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 111-117.
- [38] 刘 闯, 寇 磊, 蔡国伟, 等. 基于人工智能的电力电子变换器开路故障诊断研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2957-2970.
- LIU Chuang, KOU Lei, CAI Guowei, et al. Review for AI-based open - circuit faults diagnosis methods in power electronics converters[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2957-2970.
- [39] JI Y S, CHEN Y S, FU H H, et al. An EnKF-based scheme to optimize hyper - parameters and features for SVM classifier[J]. Pattern Recognition, 2017(62): 202-213.
- [40] 崔 江, 王 强, 龚春英. 结合小波与 Concordia 变换的逆变器功率管故障诊断技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3110-3116.
- CUI Jiang, WANG Qiang, GONG Chunying. Inverter power switch fault diagnosis technique research based on wavelet and Concordia transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3110-3116.
- [41] 杨晓冬, 王崇林, 史丽萍. H 桥逆变器 IGBT 开路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 112-118.
- YANG Xiaodong, WANG Chonglin, SHI Liping. Study of IGBT open - circuit fault diagnosis method for H - bridge inverter[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 112-118.
- [42] 陈丹江, 叶银忠. 基于多神经网络的三电平逆变器器件开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 120-126.
- CHEN Danjiang, YE Yinzong. Fault diagnosis of three level inverter based on multi neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 120-126.
- [43] 韦 微, 陈轶涵, 龚春英, 等. 三相六开关 VIENNA 整流器功率开关开路故障诊断[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 121-128.
- WEI Zheng, CHEN Yihan, GONG Chunying, et al. Fault diagnostic system for three - phase six - switch VIENNA rectifier open - circuit[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 121-128.
- [44] SHAH A M, BHALJA B R. Fault discrimination scheme for power transformer using random forest technique[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(6): 1431-1439.
- [45] HANNAN M A, ALI J A, MOHAMED A, et al. A random forest regression based space vector PWM inverter controller for the induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2689-2699.
- [46] CAI J D, YAN R W. Fault diagnosis of power electronic circuit based on random forests algorithm[C]//2009 Fifth International Conference on Natural Computation. China: IEEE, 2009: 390.
- [47] KOU L, LIU C, CAI G W, et al. Fault diagnosis for power converters based on random forests and feature transformation[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020 - ECCE Asia). China: IEEE, 2020: 9367970.
- 刘秀兰(1983—), 女, 硕士研究生, 教授级高工, 主要研究方向为电动汽车充电(E-mail: xiulan83@163.com)。
- 陈 熙(1990—), 女, 硕士研究生, 高工, 主要研究方向为电动汽车充电(E-mail: xchenaz@163.com)。
- 张 倩(1990—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电动汽车充电(E-mail: zq15120075877@163.com)。
- 程 林(1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电动汽车充电。
- 林志法(1992—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电气工程(E-mail: 525260102@qq.com)。
- 陈慧敏(1995—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电动汽车充电(E-mail: 13521002412@sina.com)。