

文章编号:1671-251X(2020)05-0082-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17523

基于 Park 变换的三电平逆变器开路故障诊断

任晓红, 万红, 俞啸, 丁恩杰

(中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008)



扫码移动阅读

摘要:针对现有二极管钳位式(NPC)三电平逆变器开路故障诊断方法存在计算量大、准确率受噪声和负载等影响的问题,提出了一种基于 Park 变换的三电平逆变器开路故障诊断方法。对三电平逆变器三相输出电流进行 Park 变换,计算平均电流 Park 矢量;利用滑动窗口取得单周期电流信号,根据逆变器电路结构分析 IGBT 故障时输出电流变化;采用迭代法确定平均电流 Park 矢量模值的阈值,结合相角和模值进行三电平逆变器功率管 13 种开路故障的识别和定位。仿真结果表明,该方法故障诊断准确率达到 98.31%。与传统的开路故障诊断方法相比,该方法不需要对 13 种开路故障数据进行学习和训练,大大减少了计算量,提高了故障诊断效率和准确率。

关键词: NPC 三电平逆变器; IGBT 功率管开路故障; Park 变换; 平均电流 Park 矢量

中图分类号:TD608 文献标志码:A

Open-circuit fault diagnosis of three-level inverter based on Park transformation

REN Xiaohong, WAN Hong, YU Xiao, DING Enjie

(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of problems that existing neutral point clamped (NPC) three-level inverter fault diagnosis method needs large amount of calculation and its accuracy is affected by noise and load, an open-circuit fault diagnosis method of three-level inverter based on Park transformation was proposed. Park transformation is carried out on three-phase output current of the three-level inverter to calculate average current Park vector; sliding window is used to obtain a single-cycle current signal, and output current change is analyzed in case of IGBT fault according to inverter circuit structure; iterative method is used to determine threshold value of average current Park vector modulus, and 13 kinds of open-circuit faults of three-level inverter power tube are identified and located combining phase angle and modulus. Simulation results show that the fault diagnosis accuracy of the method reaches 98.31%. Compared with traditional open-circuit fault diagnosis method, the proposed method does not need to learn and train the data of 13 kinds of open-circuit faults, which greatly reduces calculation amount and improves efficiency and accuracy of fault diagnosis.

Key words: NPC three-level inverter; IGBT power tube open-circuit fault; Park transformation; average current Park vector

收稿日期:2019-10-25;修回日期:2020-05-11;责任编辑:胡娟。
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804400,2017YFC0804401,2017YFC0804404)。
作者简介:任晓红(1994—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为变频器故障诊断,E-mail:18256150351@163.com。通信作者:俞啸(1989—),男,山东济宁人,讲师,博士,主要从事人工智能、信号处理和故障诊断方面的研究工作,E-mail:yxcumt2006@163.com。
引用格式:任晓红,万红,俞啸,等.基于 Park 变换的三电平逆变器开路故障诊断[J].工矿自动化,2020,46(5):82-86.
REN Xiaohong, WAN Hong, YU Xiao, et al. Open-circuit fault diagnosis of three-level inverter based on Park transformation[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 82-86.

0 引言

目前,矿井提升机、带式输送机等设备中的电动机控制系统都装配了多电平逆变器^[1-2]。大部分矿井提升机中使用的是二极管钳位式(Neutral Point Clamped, NPC)三电平逆变器^[3]。由于 NPC 三电平逆变器所需的绝缘栅极型双极晶体管(Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT)较多,结构复杂,任何一个 IGBT 发生故障都可能对整个系统造成影响^[4-7]。IGBT 故障包括开路故障和短路故障^[8-9]。短路故障可以通过硬件自身的保护电路进行实时监测,一旦功率开关器件发生短路,保护电路会断开 IGBT,将短路故障转换为开路故障。而开路故障不易发现,若逆变器长期在开路故障条件下运行,可能导致电动机发热、绝缘损坏等问题,引发更大事故^[10]。因此,对三电平逆变器功率管开路故障进行及时准确的诊断对矿山安全生产具有重要意义。

文献[11]针对多电平逆变器提出了一种基于小波包变换—主元分析—神经网络算法的故障诊断方法,该方法需要大量数据训练分类器,并且计算消耗相对较高。文献[12]通过逆变器—电动机的系统模型获取电流信号参考值,通过其与实测电流信号的差异判断功率管故障,但该方法对噪声比较敏感,故障诊断准确率低。文献[13]提出了一种基于输出线间电压模型的单开关开路故障诊断技术,然而该方法需要逆变器输出电压具有周期性的正负特性,且受负载变化影响。文献[14]提出了一种基于快速傅里叶变换、相对主成分分析和支持向量机的新型故障诊断方法,该方法采用傅里叶变换进行信号时频域变换,容易丢失时域中的信号特征,从而影响故障诊断准确率。

针对上述问题,本文提出了一种基于 Park 变换的三电平逆变器开路故障诊断方法。对三相电流进

行 Park 变换,计算平均电流 Park 矢量,通过判别 Park 矢量的相角区域和模值大小,确定发生开路故障的 IGBT 位置,从而实现 NPC 三电平逆变器 IGBT 开路故障的诊断与定位。

1 NPC 三电平逆变器工作原理

1.1 拓扑结构

NPC 三电平逆变器由 12 个 IGBT (S_{a1} — S_{a4} , S_{b1} — S_{b4} , S_{c1} — S_{c4})、12 个续流二极管 (D_{a1} — D_{a4} , D_{b1} — D_{b4} , D_{c1} — D_{c4})、6 个钳位二极管 (D_{a5} , D_{a6} , D_{b5} , D_{b6} , D_{c5} , D_{c6})、电容和直流电源组成,其拓扑结构如图 1 所示。NPC 三电平逆变器 A, B, C 三相结构对称,且每相都能输出高电平、零电平和低电平三种电平,即 $+U_d/2$, 0 和 $-U_d/2$, U_d 为电源电压。

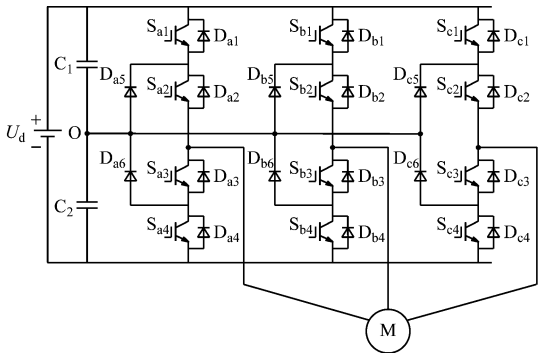


图 1 NPC 三电平逆变器拓扑结构
Fig. 1 Topology of NPC three-level inverter

1.2 工作状态

由于三相对称,以 A 相为例,通过桥臂的开关通断、电流走向来分析逆变器的工作情况。为便于分析,定义电流由逆变电路流入负载电动机的方向为正方向。NPC 三电平逆变器输出高电平、零电平和低电平时的工作状态如图 2 所示,其中,红色实线代表电流流向电动机的路径,红色虚线代表电流流入逆变器的路径。

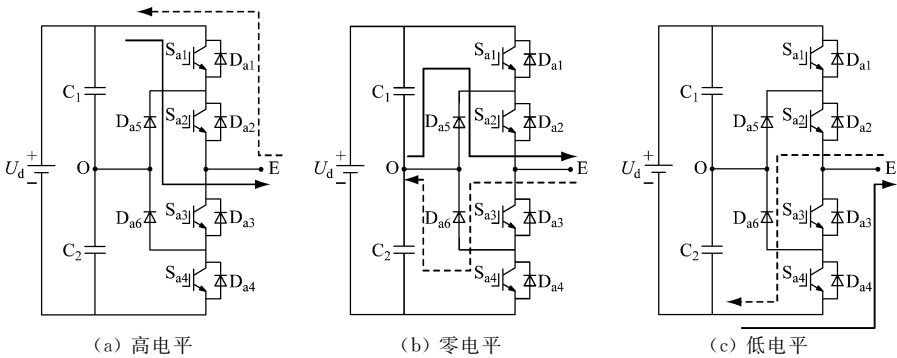


图 2 NPC 三电平逆变器工作状态
Fig. 2 Working states of NPC three-level inverter

(1) 高电平状态: S_{a1} , S_{a2} 导通, S_{a3} , S_{a4} 关断, A 相输出电压为正。正电流依次经过 S_{a1} , S_{a2} 流向

电动机;负电流依次经过 D_{a2} , D_{a1} 流入逆变器。不考虑功率管上的压降, E 点相对于 O 点的电势差为

+ $U_d/2$ 。

(2) 零电平状态： S_{a2} ， S_{a3} 导通， S_{a1} ， S_{a4} 关断，A 相输出电压为零。正电流依次经过 D_{a5} ， S_{a2} 流向电动机；负电流依次经过 S_{a3} 和钳位二极管 D_{a6} 流入逆变器。不考虑功率管上的压降，E 点相对于 O 点的电势差为 0。

(3) 低电平状态： S_{a3} ， S_{a4} 导通， S_{a1} ， S_{a2} 关断，A 相输出电压为负。正电流依次经过 D_{a3} ， D_{a4} 流向电动机；负电流依次经过 S_{a3} ， S_{a4} 流入逆变器。不考虑功率管上的压降，E 点相对于 O 点的电势差为 $-U_d/2$ 。

2 Park 变换及故障特征

2.1 Park 变换

三电平逆变器正常运行状态下，平衡的三相电流为

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega_s t + \psi) \\ i_B = I_m \sin(\omega_s t + \psi + \frac{3\pi}{3}) \\ i_C = I_m \sin(\omega_s t + \psi - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： I_m 为电流幅值； ω_s 为电流频率； t 为时间； ψ 为初始相位角。

通过 Park 变换将 abc 坐标系下的三相电流转换为 dq 坐标系下的相应分量^[15]。三相电流 i_A ， i_B ， i_C 的 Park 变换公式为

$$\begin{cases} I_d = i_A \\ I_q = (i_B - i_C) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_d ， I_q 分别为 Park 变换后的 d 轴和 q 轴电流分量。

I_d 和 I_q 在 1 个周期内的平均值为

$$\bar{i}_v = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_v(n) \quad (v = d, q) \quad (3)$$

式中 N 为 1 个周期内的数据点数。

平均电流 Park 矢量的模 $\bar{i}$ 和相角 φ 分别为

$$\begin{cases} \bar{i} = \sqrt{\bar{i}_d^2 + \bar{i}_q^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\bar{i}_q}{\bar{i}_d}\right) \end{cases} \quad (4)$$

2.2 故障状态下平均电流 Park 矢量特征

在正常运行状态下，1 个周期内的电流平均值为零，即平均电流 Park 矢量的模为零。当三电平逆变器 A 相发生单管开路故障时，三相输出电流如图 3 所示。

从图 3 可知，B、C 两相的输出电流波形变化很小，而 A 相输出电流变化较大。当 S_{a1} 故障时，A 相输出电流的正半周幅值下降了近 50%，负半周幅值

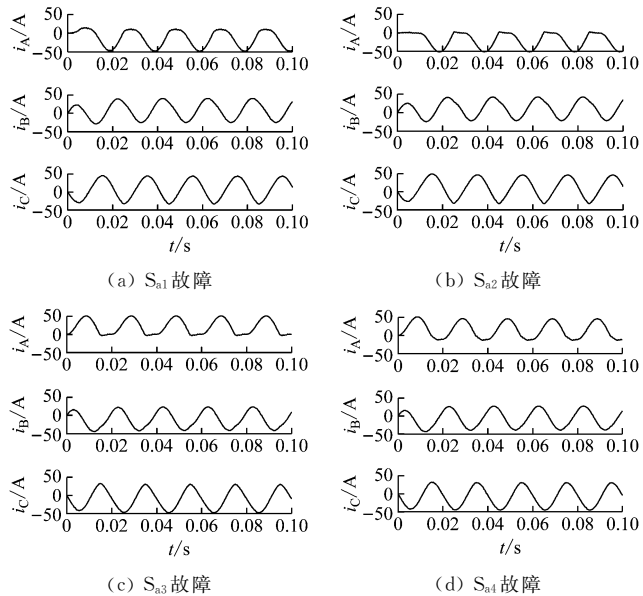


图 3 A 相发生单管开路故障时的三相输出电流
Fig. 3 Three-phase output current in case of A phase single tube open-circuit fault

保持不变；当 S_{a2} 故障时，A 相输出电流的正半周幅值几乎为 0，负半周幅值保持不变；当 S_{a3} 故障时，A 相输出电流的正半周幅值保持不变，负半周幅值几乎为 0；当 S_{a4} 故障时，A 相输出电流的正半周幅值保持不变，负半周幅值下降了近 50%。由此可以发现，当某一 IGBT 发生开路故障时，1 个周期内的输出电流平均值不再为零。

不同故障状态下的平均电流 Park 矢量相角分布情况如图 4 所示。

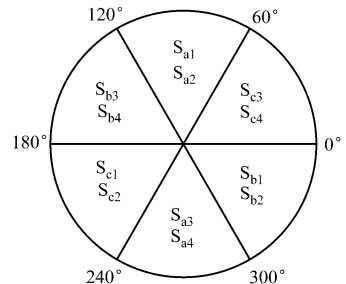


图 4 不同故障状态下的相角分布
Fig. 4 Phase angle distribution under different fault states

3 基于 Park 变换的故障诊断方法

3.1 故障分类

将正常状态列为一种特殊故障，用矢量索引表示故障类别，共有 13 种故障类别。输出矢量索引集记录为 {normal, F_{a1} , F_{a2} , F_{a3} , F_{a4} , F_{b1} , F_{b2} , F_{b3} , F_{b4} , F_{c1} , F_{c2} , F_{c3} , F_{c4} }。其中“normal”表示正常状态，其余表示对应的 IGBT 单管开路故障。

3.2 故障诊断步骤

NPC 三电平逆变器 IGBT 的 13 种故障通过平均电流 Park 矢量的模和相角进行区分。具体故障

诊断步骤:① 设定阈值 Y_1 ,当 Park 矢量模值大于 Y_1 时,判断功率管故障。② 根据图 4 确定 Park 矢量相角所属区域。③ 设定阈值 Y_2 ,判断 Park 矢量模值与 Y_2 的大小关系,进而定位故障功率管。

3.3 阈值设定

正常状态下,1 个周期内连续电流平均值 I 为

$$I = \frac{2}{\pi} I_m \tag{5}$$

由于 NPC 三电平逆变器的对称性,以正常状态、 S_{a1} 故障和 S_{a2} 故障为例进行分析,不同故障状态下的平均电流如图 5 所示。

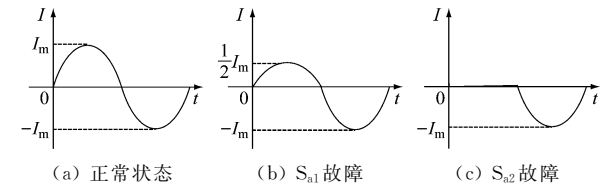


图 5 不同故障状态下的平均电流

当 S_{a1} 故障时,A 相输出电流的正半周幅值下降了近 50%,负半周幅值保持不变,1 个周期内的电流平均值 $I_{a1} = -\frac{1}{\pi} I_m$ 。当 S_{a2} 故障时,A 相输出电流的正半周幅值几乎为 0,负半周幅值保持不变,1 个周期内的电流平均值 $I_{a2} = -\frac{2}{\pi} I_m$ 。

阈值 Y_1 的确定:在理想情况下,功率管没有发生故障,Park 矢量模值等于 0。考虑噪声影响和电流不稳定因素,阈值 Y_1 确定为大于 0 的常数:

$$Y_1 = \left| \frac{1}{2} I_{a1} \right| = \frac{1}{2\pi} I_m \tag{6}$$

阈值 Y_2 的确定:阈值 Y_2 是每一相桥臂的 2,3 管与 1,4 管模值的区分值,其取值范围可以设定为 $\left| -\frac{1}{\pi} I_m \right| \sim \left| -\frac{2}{\pi} I_m \right|$ 。当 Park 矢量的模值大于阈值 Y_2 时,故障开关器件是功率管 S_{a2} 。 Y_2 设定为 I_{a1} 与 I_{a2} 的中间值,可以最大程度上区分 S_{a1} 和 S_{a2} 故障,因此,设 $Y_2 = \left| \frac{1}{2} (I_{a1} + I_{a2}) \right| = \frac{3}{2\pi} I_m$ 。

故障功率管与相角和模值的对应关系见表 1。

4 仿真分析

通过 Matlab/Simulink 平台进行 NPC 三电平逆变器电路仿真。采集健康状态和 12 种故障状态下的电流样本,采集时长为 0.1 s,采集频率为 50 Hz,电流幅值为 37 A,利用滑动窗口,以 0.001 s 为滑动距离,共选取 0.03~0.07 s 范围内的 41 个窗口,每个窗口时间为 0.02 s(1 个周期),13 种情况共获取样本 $41 \times 13 = 533$ 个。1 个周期内(0.04~

表 1 故障功率管与相角和模值的对应关系
Table 1 Corresponding relationship between the faulty power tube and the phase angles and modulus

故障器件	模值/A	相角/(°)	故障器件	模值/A	相角/(°)
S_{a1}	$<Y_2$	60~120	S_{b3}	$>Y_2$	120~180
S_{a2}	$>Y_2$	60~120	S_{b4}	$<Y_2$	120~180
S_{a3}	$>Y_2$	240~300	S_{c1}	$<Y_2$	180~240
S_{a4}	$<Y_2$	240~300	S_{c2}	$>Y_2$	180~240
S_{b1}	$<Y_2$	300~360	S_{c3}	$>Y_2$	0~60
S_{b2}	$>Y_2$	300~360	S_{c4}	$<Y_2$	0~60

0.06 s)的平均电流 Park 矢量的模和相角见表 2。

表 2 1 个周期内平均电流 Park 矢量的模和相角
Table 2 Modulus and phase angles of average current Park vector in one cycle

状态	模值/A	相角/(°)	状态	模值/A	相角/(°)
normal	0.000 003	357.48	F_{b3}	18.78	157.66
F_{a1}	14.92	88.48	F_{b4}	11.94	158.37
F_{a2}	18.82	92.42	F_{c1}	15.25	214.79
F_{a3}	20.96	272.92	F_{c2}	19.64	216.89
F_{a4}	14.40	276.49	F_{c3}	19.67	31.19
F_{b1}	15.50	331.42	F_{c4}	13.57	23.97
F_{b2}	21.49	328.10			

由表 2 可知,当 IGBT 处于正常状态下时,模趋于 0,相角趋于 360°。每一相桥臂的 2,3 管的模值在 17~21 A 之间,每一相桥臂的 1,4 管的模值在 10~17 A 之间。电流幅值 $I_m = 37$ A,则 $Y_1 = \frac{1}{2\pi} I_m = 5.89$ A, $Y_2 = \frac{3}{2\pi} I_m = 17.67$ A。

为了验证阈值 Y_2 取值的合理性,在 16.5~18.5 A 之间,以步长 0.1 A 取不同的阈值进行实验。利用迭代法对 533 个样本进行 21 次迭代,并计算故障诊断准确率,结果如图 6 所示。

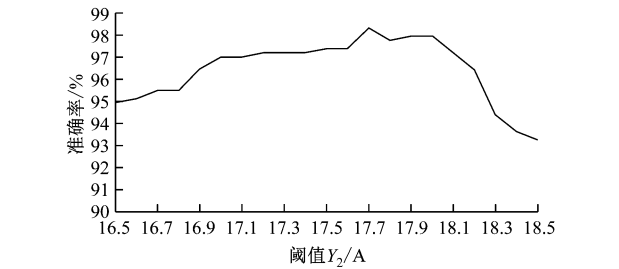


图 6 阈值 Y_2 取不同值时的故障诊断准确率
Fig. 6 Fault diagnosis accuracy of threshold Y_2 with different values

从图 6 可看出,当阈值 Y_2 为 17.7 A 时故障诊断准确率最高,达到了 98.31%,验证了阈值 Y_2 取值方法的合理性。

$Y_1 = 5.89$ A, $Y_2 = 17.67$ A 时的故障诊断结果

如图 7 所示。部分实际数据诊断结果见表 3。

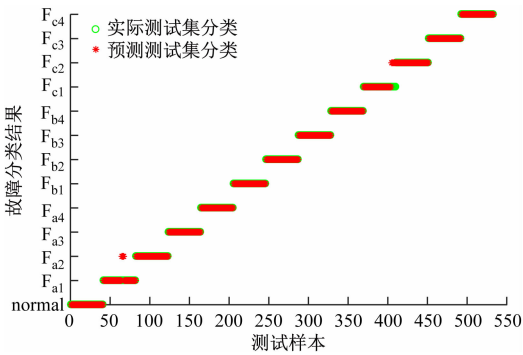


图 7 故障诊断结果

Fig. 7 Fault diagnosis result

表 3 部分实际数据诊断结果

Table 3 Partial actual data diagnosis results

模值/A	相角/(°)	诊断故障 类型	实际故障 类型	诊断是否 正确
20.04	206.27	F _{c2}	F _{c2}	是
20.44	41.41	F _{c3}	F _{c3}	是
13.62	39.25	F _{c4}	F _{c4}	是
2.45	123.18	normal	normal	是
17.89	95.70	F _{a2}	F _{a1}	否
22.23	97.16	F _{a2}	F _{a2}	是
18.24	266.71	F _{a3}	F _{a3}	是
11.17	268.20	F _{a4}	F _{a4}	是
12.63	341.49	F _{b1}	F _{b1}	是
18.28	337.74	F _{b2}	F _{b2}	是
21.57	148.79	F _{b3}	F _{b3}	是
15.47	145.40	F _{b4}	F _{b4}	是
16.25	198.25	F _{c1}	F _{c1}	是

从图 7 可看出,实际测试集分类与预测测试集分类具有很好的重叠度。

5 结语

提出了一种基于 Park 变换的三电平逆变器开路故障诊断方法,对三相电流进行 Park 变换,计算平均电流 Park 矢量,再通过判别 Park 矢量的相角和模值对发生开路故障的功率管进行定位。仿真结果表明,该方法故障诊断准确率达到 98.31%。与传统的开路故障诊断方法相比,该方法不需要对 13 种简单开路故障数据进行学习和训练,大大减少了计算量,提高了故障诊断效率和准确率。

参考文献 (References):

[1] 丁恩杰,施卫祖,张申,等. 矿山物联网顶层设计[J]. 工矿自动化,2017,43(9):1-11.

DING Enjie, SHI Weizu, ZHANG Shen, et al. Top-down design of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 1-11.

[2] 陶宣彤. 大功率电力机车牵引变流器故障诊断与寿命预测[D]. 成都:西南交通大学,2018.

TAO Xuanton. Fault diagnosis and remaining-life prediction of traction converter for high power electric locomotive [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[3] WANG Y, LI Z, MA H. Comparison of two diagnosis methods based on switching voltage pattern for IGBTs open-circuit faults in voltage-source inverters[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(3):1087-1096.

[4] 金林强. 高速列车牵引系统逆变器复合故障诊断[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

JIN Linqiang. Fault diagnosis of three-level inverter in high-speed train with compound faults[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[5] 胡冉冉. 基于混杂模型的牵引逆变器开路故障诊断研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.

HU Ranran. Research on open-switch faults diagnosis based on hybrid system model in traction inverter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[6] BANDYOPADHYAY I, PURKAIT P, KOLEY C. Performance of a classifier based on time-domain features for incipient fault detection in inverter drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 3-14.

[7] 林双双. 基于信号处理的牵引逆变器 IGBT 的故障诊断方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.

LIN Shuangshuang. Fault diagnosis of IGBT based on signal processing methods in traction inverter system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[8] 蒋生成. 变频器故障诊断及容错控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

JIANG Shengcheng. Inverter fault diagnosis and fault-tolerant control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[9] WU Feng, HAO Yang, JIN Zhao, et al. Current similarity based open-circuit fault diagnosis for induction motor drives with discrete wavelet transform[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 75: 309-316.

[10] 高兵. 基于温度梯度及统计特性的 IGBT 模块失效评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.

GAO Bing. Study on failure evaluation method of

- IGBT module based on temperature gradient and statistic characteristic [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [11] 宋保业, 徐继伟, 许琳. 基于小波包变换-主元分析-神经网络算法的多电平逆变器故障诊断[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 111-120.
SONG Baoye, XU Jiwei, XU Lin. Multi-level inverter fault diagnosis based on WPT-PCA-NN algorithm [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(1): 111-120.
- [12] 吴鑫, 焦京海, 李强. 三电平 SVPWM 逆变器矢量控制系统的故障仿真[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 78-84.
WU Xin, JIAO Jinghai, LI Qiang. Fault simulation on vector control system of three-level SVPWM inverter [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(1): 78-84.
- [13] CHENG Shu, CHEN Yating, YU Tianjian, et al. A novel diagnostic technique for open-circuited faults of inverters based on output line-to-line voltage model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4412-4421.
- [14] WANG T, QI J, XU H, et al. Fault diagnosis method based on FFT-RPCA-SVM for cascaded-multilevel inverter [J]. ISA Transactions, 2016, 60: 156-163.
- [15] 刘巍, 季振东, 何嵘, 等. 基于 Park 变换和神经网络的逆变器故障检测方法 [J]. 电器与能效管理技术, 2014(22): 61-66.
LIU Wei, JI Zhendong, HE Rong, et al. Fault detection of inverter based on Park transformation and neural network [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(22): 61-66.