

基于开关振荡的驱动电机匝绝缘故障诊断

严浩¹, 巴桑², 顾奕¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090;

2. 国网西藏电力公司 拉孜县供电公司, 西藏 日喀则 850000)

摘要: 绝缘失效会引起电机匝间、相地和对地故障, 轻则造成设备停机, 重则危害人身安全, 产生灾难性的后果。为了在匝绝缘劣化的早期能够对劣化状态进行在线灵敏监测, 提出一种基于开关振荡的多频率特征逆变器驱动电机匝绝缘故障诊断的新方法。首先, 利用高频电压传感器和高频电流传感器对信号进行提取; 然后, 判断是否为开关暂态过程, 如果是, 则提取开关瞬态下的电流幅值峰值, 利用带通滤波器对信号进行多频带处理, 并计算一个周期下的电流幅值峰值点的平均值, 根据结果选出绝缘故障敏感频率; 最后, 做出不同工况下的开关瞬态下电流峰值点均值图及开关事件下电流幅值的散点图。根据实验结果可知, 当绝缘发生劣化, 可通过多频率特征下的开关振荡电流信号对匝绝缘进行故障诊断。

关键词: 绝缘劣化; 开关振荡; 多频率; 故障诊断

中图分类号: TM7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22873

Diagnosis of Turn Insulation Fault of Drive Motor Based on Switching Oscillation

YAN Hao¹, BA Sang², GU Yi¹

(1. College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Lazi County Power Supply Company, State Grid Xizang Electric Power Company, Xigaze 850000, Tibet, China)

Abstract: Insulation failure can cause motor turn-to-turn, phase-to-ground and ground-to-ground faults, ranging from equipment downtime, or endangering personal safety, resulting in catastrophic consequences. In order to be able to carry out online sensitive monitoring of the deterioration state in the early stage of turn insulation deterioration, a new method for fault diagnosis of the turn insulation of the inverter drive motor with multi-frequency characteristics based on switching oscillation was proposed. First, the signal was extracted by the high-frequency voltage and current sensor. Then, it judged whether it is a switching transient process, if so, the peak current amplitude under the switching transient and bandpass filters were used to process signals in multiple bands, and it calculated the average value of the peak point of current amplitude in a cycle, and selected insulation fault sensitive frequency by the result. Finally, the average value of the current peak point under the switching transient under different operating conditions and the scatter plot of the current amplitude under the switching event were drawn. According to the experimental results, when the insulation is degraded, the fault diagnosis of the turn insulation can be performed through the switching oscillating current signal in the multi-frequency.

Key words: insulation deterioration; switching oscillation; multi-frequency; fault diagnosis

变频电机具有响应速度快、控制精度精确和效率高等优点, 被广泛应用于智能制造、工业机器人、先进医疗等领域。意外的电机故障将导致大量的停机时间和经济损失^[1]。定子绝缘故障是交流电机中最常见的故障。根据调查结果, 交流

电机故障中有 30%~40% 与定子有关^[2]。而 60%~70% 的高压电机故障是由定子绕组绝缘故障引起的^[3]。在逆变器供电的机器中, 由于开关状态的快速且反复的变化, 加速了绝缘老化。与机械故障不同, 电气故障(例如绝缘故障)通常是会导

致灾难性的重大故障,有时甚至会损坏机器,可能导致意外的过程中断。这不仅仅需要修理或更换单个机器,还会因为停机造成损失。争取在短路故障发生之前及时发现绝缘老化,有效地监测绝缘状态对变频调速系统的安全可靠运行至关重要。

离线绝缘测试已在工业中广泛使用了数十年,以定期检查定子绕组绝缘的健康状况。其中,极化指数测试、浪涌测试和离线局部放电测试是最广泛接受和使用的测试方法,它们各自用于检测特定的绝缘问题。这些技术的主要局限性是侵入性,即必须先停止使用电机才能进行此类测试。因此,这些测试通常每3~6 a进行一次,具体取决于应用程序允许的过程中断间隔。定期测试不能保证在下一个过程中断之前机器系统的可靠运行。

理想的在线绝缘监测技术应该能够评估交流电机正常运行期间定子绕组绝缘的质量,从而可以进一步预测电机系统的健康状况并警告用户可能的电机故障,以便进行维护或修理。其中,在线局部放电监测是在线绝缘监测最广泛接受和使用的技术。局部放电监控器可以检测定子绕组绝缘中的电晕活动,并可靠地监视和防止主要由电晕活动引起的绝缘故障^[4]。但是,电晕活性只是定子绕组绝缘故障的根本原因之一。交流电机的绝缘故障也可能由热应力、振动、电应力和污染引起的绝缘磨损引起。代表性的匝间短路故障诊断方法有负序电流法^[5]、谐波特征法^[6-7]、矢量轨迹法^[8]、零序电压法^[9]、反电动势法^[10]和瞬时功率法^[11]等。利用这些方法可以及时检测出电机匝间短路故障,如通过小波变换提取电流二倍频谐波分量特征,能够在不同负载状态下检测1.2%的电机匝间短路故障^[6]。利用电流3次谐波分量特征可识别不同程度的匝间短路故障^[7]。文献[8]中的矢量轨迹法对电压不平衡具有一定的抑制能力,对初期故障敏感度较高,但受逆变器闭环电流控制器自动调节能力影响。文献[11]中的瞬时功率法对电压不平衡、定子不对称和电机参数变化不敏感,但转速变化会改变特征谐波分量,且受负载波动影响。

本文提出一种基于开关振荡的多频率特征逆变器驱动电机匝绝缘故障诊断方法,能够在线对电机匝绝缘故障进行诊断。通过获取高频

瞬态振荡电流信号与多频率特征提取方法,得出电机绝缘状态变化对振荡电流响应特征的影响,通过实验结果分析,实现早期绝缘劣化状态监测。

1 开关振荡法的基本原理

电机绕组作为开关激励下的负载时,功率器件开关过程的高 dv/dt 电压激励下,电机电流会产生幅值较大的瞬态振荡,其中包含了丰富的高频分量,其自身状态(阻抗)直接决定了电流的暂态响应特性。Perisse等人^[12]通过实验证明,电容变化可以用作绕组匝间绝缘老化的可靠指标,从而显著影响高频谐振特性。在前期电机离线状态下,实验通过在绕组间外接电容来模拟电机绝缘劣化。由初步的相地阻抗特性可知,匝绝缘发生劣化下,在频域下,阻抗发生明显变化主要在几百kHz频段。而对于逆变器驱动的电机,开关模式是变频调速系统实现电能变换的基本工作模式^[13-14]。变频电机由功率器件的开关组合(PWM脉冲)所驱动,电机绕组作为开关模式下的负载,其状态决定了系统的开关响应特性。电机在线运行时,电力电子功率器件高速开关激励下的电机电流瞬态响应(振荡)中包含丰富的高频分量(频率在几十kHz到几MHz),其中就包含匝绝缘敏感频带(几百kHz频带),而对于逆变器所驱动的电机,每一次的开关过程都包括丰富的开关激励(几百kHz),在功率器件开关过程的高 dv/dt 电压激励下,电机电流会产生幅值较大的瞬态振荡,而每一次的开关激励都会有电流响应,因此电机在线运行时,通过提取高频电流特征,对高频特征进行监测,即可以对电机的匝绝缘劣化故障进行诊断。图1为逆变器功率器件的开关瞬态过程。

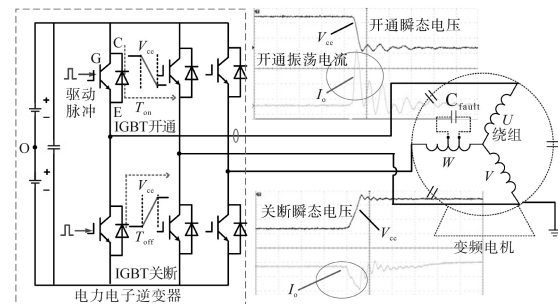


图1 逆变器功率器件的开关瞬态过程

Fig.1 Switching transient process of inverter power devices

掌握IGBT的开通关断过程有利于明确开关状态对高频振荡电流的作用规律。功率器件

(IGBT或MOSFET)通常在数百ns内快速切换,这会在机器的端子处产生陡峭的电压上升/下降沿。因此,PWM逆变器本身可以被视为良好的高频激励源,它会在开关频率(例如10kHz)下施加大量的高 dv/dt 瞬态电压。作为响应,机器电流的高频振荡范围从几十kHz到几MHz。IGBT等效电路如图2所示。IGBT的栅极-集电极和栅极-发射极间存在着分布电容 C_{gc} 和 C_{ge} ,且分布电感 L_c, L_e 分别在发射极驱动电路和集电极电路中。

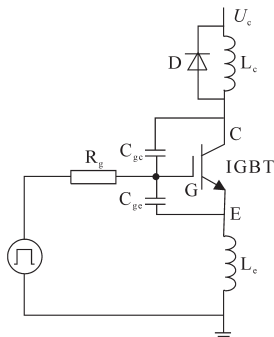


图2 IGBT等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of IGBT

实际系统中IGBT开通时电压先上升、电流再下降,关断时电流先上升、电压再下降。而理想的IGBT电压和电流几乎都是突变的。电机实际运行的开关瞬间电流电压波形如图3所示,在每一次的开关振荡中包含丰富的高频分量(频率在几十kHz到几MHz)。开关振荡法则是基于逆变器驱动电机在运行自身的高频特征作为激励,对多频率下的特征进行提取的。

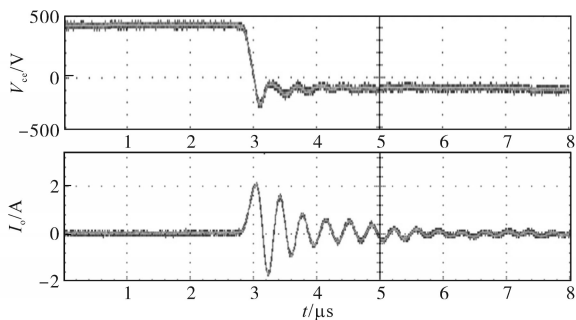


图3 电机实际运行时电压电流开关振荡波形图

Fig.3 The voltage and current switching oscillation waveforms diagram when the motor is actually running

2 基于开关振荡的多频率特征匝绝缘故障诊断方法实现

首先分析匝绝缘劣化机理及其对电机绕组阻抗特性的影响,设计实验去模拟匝绝缘劣化(并联电容),利用阻抗测试仪对电机的阻抗特性进行测量,初步了解匝绝缘劣化对电机敏感频

带;然后进行电机在线运行,提取电机在不同绝缘劣化状态下的电压电流特征,利用Matlab中的带通滤波器模块提取多频带频率特征,对电流在特定频域的变化进行监测;最后给出多频率法实现流程。

2.1 匝绝缘劣化机理及等效模型

匝绝缘失效会造成绕组局部温升,使电机绝缘性能变差,会引起新的故障,严重会导致电机停机。

一方面,逆变器产生的高 dv/dt 重复电压冲击会增加绝缘材料的电应力,加速绝缘劣化进程。另一方面,高频电压谐波会增加绝缘介电损耗,电流谐波会增加绕组线圈和铁心损耗^[15],增加绝缘的热应力,使得匝绝缘成为电机中最薄弱的环节之一。

图4为电机绕组单线圈匝绝缘的等效电路, A_n, B_n 表示第 n 匝线圈。采用多单元 π 型等效电路级联来模拟线圈绕组的高频特性, R_s 为导体的等效电阻, L_s 为漏感, C_i 为匝绝缘电容, R_i 为匝绝缘介电损耗电阻。 C_i 可由下式求得^[16]:

$$C_i \approx \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{l_1 l}{2e_i} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为自由空间的介电常数; ϵ_1 为匝间绝缘的介电常数; l_1 为导体宽度; l 为基本截面长度; e_i 为导体匝绝缘厚度。

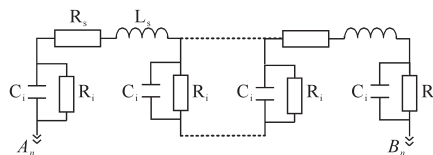


图4 电机绕组单线圈匝绝缘等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of one-turn insulation

2.2 多频率法实现流程

基于开关振荡的多频率法匝绝缘故障诊断步骤如下:

1)利用高频电压传感器和高频电流传感器分别采集逆变器输出端电压 V_{cc} 、电机电流 I_s 、传感器线圈电流 I_c 等数据,并将采集的数据导入Matlab模型中;

2)对端电压 V_{cc} 进行边沿检测,判断是否为功率器件开关瞬态过程;

3)若否,则重复步骤2);

4)当检测到开关瞬态,记录开关瞬态过程中固定时间长度的 $V_{cc}(n)$ 、开关瞬态响应下电流 $I_{sw}(n)$ 和带通滤波器下的传感器线圈电流 $I_{c-h}(n)$

数据,利用 Matlab 中的带通滤波器模块,对不同频段的高频电流特征数据进行采集,采集数据为一个周期下所有开关事件下的传感器线圈电流峰值点;

5)对不同频带的带通滤波器对开关振荡下的高频电流特征进行处理,作出电流幅值均值图,观察随着匝绝缘发生劣化时,哪一个频段特征变化较为明显,选取出敏感特征频段;

6)在选取完特征频段后,为了验证实验具有的普遍规律,作出不同工况下的开关瞬态下电流峰值点均值图及开关事件下电流幅值的散点图,对实验结果进行分析,最后根据分析结果得出规律的一致性。

3 实验验证

3.1 实验系统及如何匝绝缘劣化的模拟

实验系统搭建了如图 5 所示的实验台,包括 3 kW 永磁同步伺服电机、3 kW 感应电机,2 台变频器(分别控制伺服电机和感应电机)、pico 信号采集单元、DP6150A 高频电压探头(1 500 V/100 MHz,精度为 2%)、CP8030B 高频电流探头(30 A/50 MHz,精度为 1%)。用于匝绝缘劣化模拟和状态监测实验的永磁同步伺服电机主要参数如下:额定电压 380 V,额定电流 7.5 A,额定转速 1 500 r/min,额定频率 100 Hz,额定转矩 19 N·m,极数/槽数为 8/36。

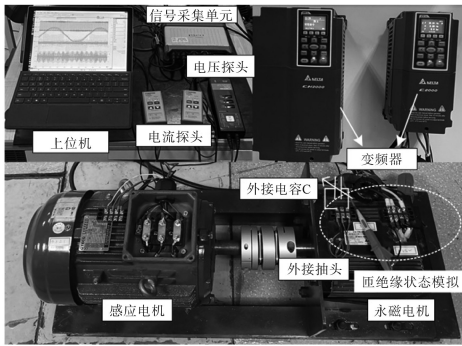


图5 实验台实物图

Fig.5 Picture of the test rig

匝绝缘状态发生早期劣化时其容值会增加 20%~50%^[17]。与文献[18]中的匝绝缘状态模拟方法相一致,为模拟电机绕组局部匝间绝缘薄弱导致的绝缘早期状态劣化,实验中在绕组线圈间并联电容。如图 5 所示,从伺服电机定子 W 相绕组线圈中引出 2 根外接抽头用于并联电容 C。

3.2 共模阻抗特性结果

电机绝缘劣化时,匝绝缘电容会产生相应的变化。电容的范围从几百 pF 到几 nF 之间,基于

此,分别并上 0 nF, 330 pF, 680 pF, 1 nF, 2.2 nF 和 3.3 nF 的电容模拟不同程度绝缘劣化时的情况。本次实验通过在抽头 1 和抽头 3 之间并联不同大小的电容模拟匝绝缘状态劣化。不同匝绝缘劣化下的相地阻抗特性如图 6 所示,由相地阻抗特性可知,匝绝缘劣化主要对几百 kHz 频段比较敏感,随着绝缘劣化程度的加深,在 400 kHz 及其之前频段,阻抗逐渐减小;在 400 kHz 之后频段,随着劣化程度加深,阻抗逐渐增大。

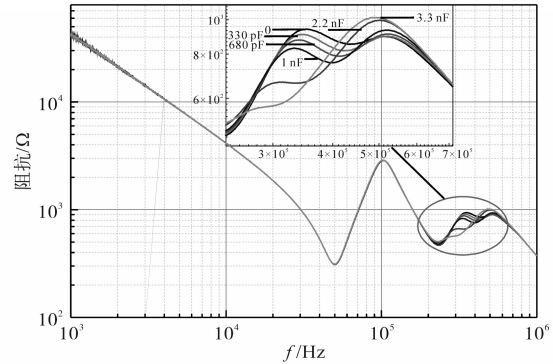


图6 不同匝绝缘劣化下的相地阻抗特性

Fig.6 Phase-to-ground impedance characteristics under different turns of insulation deterioration

3.3 多频率特征的选取及不同带通滤波器处理下的结果

当电机处于离线时,由阻抗特性初步可知,当绝缘发生劣化时,主要敏感频段为几百 kHz 频段。为了进一步研究电机在线运行时的规律,论文采用多频带法对电机在线运行特征进行提取。实验通过传感器获取电流数据,采用多频率特征法处理的电流特征如图 7 所示。

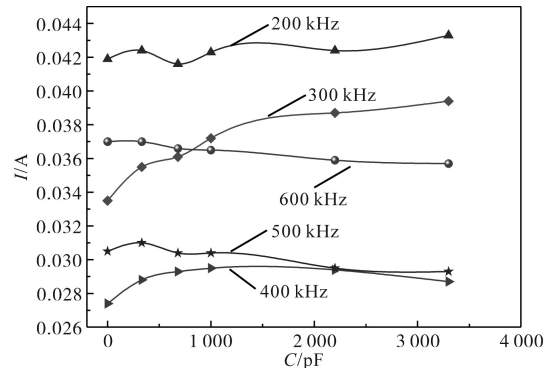


图7 不同带通滤波器下的电流幅值均值

Fig.7 Average current amplitude under different band-pass filters

图 7 中,在 200~400 kHz 频段,电流特征随着劣化程度的加深,幅值逐渐增大,这与阻抗特征逐渐减小相对应;同样,在 500~600 kHz 频段,电流特征随着劣化程度加深,幅值逐渐减小,阻抗特征也是逐渐增大的。由此可知,采用多频率法

的在线特征可以对匝绝缘劣化进行故障诊断。同时,由图7还可知,在300 kHz幅值特征变化较为明显,因此接下来对300 kHz频段进行更深入的研究,以得出规律的普遍性和一致性。

3.4 选取300 kHz频带做不同工况实验结果处理

为了研究不同工况下是否对实验结果产生影响,本文进行了不同工况的实验,如表1所示。对电机的转矩(基波电流改变)和基波频率进行了改变,实验结果如图8所示。

表1 6种不同工况
Tab.1 Six different working conditions

| 工况 | 负载转矩 | 基波频率/Hz |
|----|-------|---------|
| 1 | 10% | 100 |
| 2 | 20.6% | 30 |
| 3 | 20.6% | 60 |
| 4 | 21.5% | 100 |
| 5 | 29.7% | 30 |
| 6 | 30.1% | 60 |

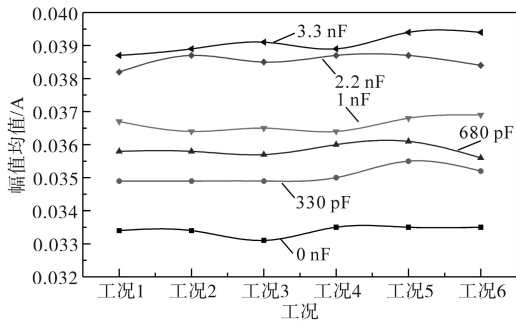


图8 300 kHz带通滤波器下不同工况的幅值均值

Fig.8 Amplitude mean value of different working conditions under 300 kHz band-pass filter

由图8可知,当工况发生改变时(6种工况),同等程度绝缘劣化下的电流特征保持相对的稳定,也符合在300 kHz下随着劣化程度加深,电流幅值特征逐渐增大的规律。通过改变工况可知,实验结果不受工况所影响,也就是对电机故障进行诊断时,无需对工况提出要求,也证明了方法的实用性。

逆变器功率器件每次开关动作均会激励产生宽频电流振荡。在不同程度绝缘状态劣化下,分别对600次开关事件中的开关振荡电流的幅值和频率特征进行提取结果如图9所示,图9中的结果表明,随着匝绝缘电容参数的增加,由散点图分布可知,开关振荡电流(300 kHz)幅值逐渐增加。

对不同工况实验以及多次开关事件下的电流幅值特征进行提取,所得提取结果可知,当匝绝缘发生劣化时,能够通过多频带法对绝缘劣化

进行诊断,且可以在电机运行时进行状态监测,无需改变工况且多次结果均具有一致性,实验规律具有普遍性。

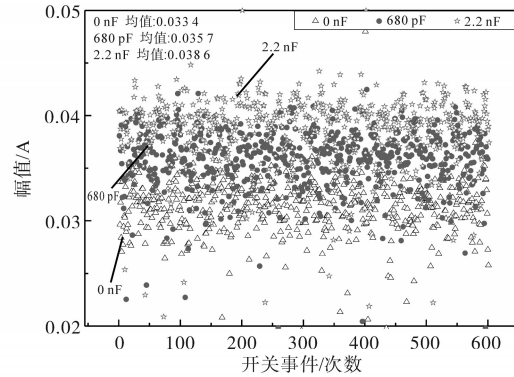


图9 开关事件下的电流幅值提取结果

Fig.9 Current amplitude extraction result under switching events

4 结论

本文提出一种基于开关振荡的多频率特征逆变器驱动电机匝绝缘故障诊断方法,详细分析和整理了其工作原理、实验设计、检测方法以及实验结果,进而验证了所提故障诊断方法的有效性。结果表明,通过多频率下的开关振荡信号对匝绝缘进行故障诊断,可以在早期能够对匝绝缘劣化状态进行在线灵敏监测,具有良好的实用价值。

参考文献

- [1] 李雨琪,杨明,柴娜,等.基于转速信号的电机轴承故障诊断方法[J].电气传动,2019,49(9):92-96.
Li Yuqi, Yang Ming, Chai Na, et al. Fault diagnosis method of motor bearing using speed signal[J]. Electric Drive, 2019, 49 (9):92-96.
- [2] 郑大勇,张品佳.交流电机定子绝缘故障诊断与在线监测技术综述[J].中国电机工程学报,2019,39(2):395-406,637.
Zheng Dayong, Zhang Pinjia. A review of fault diagnosis and on-line condition monitoring of stator insulation in AC electrical machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (2): 395-406, 637.
- [3] Albrecht P F, Appiarius J C, Cornell E P, et al. Assessment of the reliability of motors in utility applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, PER-7(3):396-406.
- [4] Stone G, Kapler J. Stator winding monitoring[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, 4(5):15-20.
- [5] Cheng S, Zhang P, Habetler T G. An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5):1545-1554.
- [6] Malekpour M, Phung B T, Ambikairajah E. Online technique

- for insulation assessment of induction motor stator windings under different load conditions[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2017, 24(1): 349-358.
- [7] Boileau T, Leboeuf N, Nahidmobarakeh B, *et al.* Synchronous demodulation of control voltages for stator interturn fault detection in PMSM[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(12): 5647-5654.
- [8] Cruz S M A, Cardoso A J M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 37(5): 1227-1233.
- [9] Urresty J, Riba J R, Romeral L. Application of the zero-sequence voltage component to detect stator winding inter-turn faults in PMSMs[J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 89(4): 38-44.
- [10] Sarikhani A, Mohammed O A. Inter-turn fault detection in PM synchronous machines by physics-based back electromotive force estimation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 3472-3484.
- [11] Drif M, Cardoso A J M. Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analyses[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2): 1348-1360.
- [12] Nussbaumer P, Vogelsberger M A, Wolbank T M. Induction machine insulation health state monitoring based on online switching transient exploitation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1835-1845.
- [13] 赵争鸣, 施博辰, 朱义诚. 对电力电子学的再认识——历史、现状及发展[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(12): 10-20.
- Zhao Zhengming, Shi Bochen, Zhu Yicheng. Reconsideration on power electronics: the past, present and future[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(12): 10-20.
- [14] 周京华, 张新雷, 曹永雷, 等. 基于FPGA的电力电子变换器控制系统设计[J]. *电气传动*, 2018, 48(1): 36-41.
- Zhou Jinghua, Zhang Xinlei, Cao Yonglei, *et al.* Design of power electronic converter control system based on FPGA[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(1): 36-41.
- [15] Yang J, Lee S B, Yoo J, *et al.* A stator winding insulation condition monitoring technique for inverter-fed machines[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(5): 2026-2033.
- [16] Perisse F, Werynski P, Roger D. A new method for AC machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2007, 14(5): 1308-1315.
- [17] Savin S, Aitamar S, Roger D. Turn-to-turn capacitance variations correlated to PDIV for AC motors monitoring[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2013, 20(1): 34-41.
- [18] Neti P, Grubic S. Online broadband insulation spectroscopy of induction machines using signal injection[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(3): 2679-2689.

收稿日期:2020-12-24

修改稿日期:2020-12-30