DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.015

基于开关振荡电流的交流电机主绝缘在线监测

李政达[1]，张旭浩[1]，江周余[2]，王梦谦[1]，霍　柯[1]，林子棋[1]
（1.中车青岛四方车辆研究所有限公司，山东 青岛 266000；
2.西南交通大学 电气工程学院，四川 成都 610031）

摘　要：在变频驱动系统中，由于功率器件高速开关产生的高 d*v*/d*t* 和瞬态过电压，会使电机绝缘部件承受较高的电应力，加速电机绝缘材料的老化，进而增加绝缘故障发生概率并危害驱动系统的整体可靠性。相较于传统的离线监测方法，对电机绝缘状态进行在线监测可以提高监测的实时性并减小停机维修的损失。因此，文章提出一种基于逆变器开关振荡电流的交流电机主绝缘在线监测方法。首先，建立了交流电机绝缘等效电路，分析了绝缘老化对电机阻抗特性的影响，并通过外部并联电容的方法模拟了绝缘老化的过程。然后，采用脉冲宽度调制（PWM），研究了电机主绝缘参数对开关振荡电流的影响，提出了以开关振荡电流频域偏差作为老化特征指标的在线监测方法。试验证明，该方法在不影响电机正常运行的前提下，可以对电机主绝缘老化状态进行有效监测。

关键词：交流电机；绝缘老化；在线监测；电流响应；逆变器；高速列车

中图分类号：U292.91+4；TM34　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）02-0126-06

0　引言

交流电机在高速列车牵引领域已经得到了广泛的应用，作为高速列车的动力核心，其可靠性对列车的整体安全至关重要。绕组绝缘是电机系统中最容易发生故障的部件之一，绝缘故障约占电机总故障的30%~40%[1]。绝缘的电气强度会随着时间的推移而逐渐退化，并最终导致绝缘击穿。特别对于变频驱动控制的电机，脉冲宽度调制（PWM）产生的瞬态高 d*v*/d*t* 浪涌会加速绝缘老化过程并缩短绝缘的使用寿命[2]。

电机定子绝缘的退化是一个缓慢发展但逐渐加速的过程。文献[3]提到，约 80% 的绝缘相关故障源于匝间绝缘的薄弱点。从局部的匝间故障到灾难性故障的演变时间可能小于 2 s[4]。文献[5]提出了电机匝间故障诊断方法，该方法可以在故障发生后立即检测到故障，但是很难提供早期警告[6]。在工业生产中，有必要在退化的早期阶段监测定子绝缘的健康状况。对于已经开发的各类电机绝缘状态监测（condition monitoring, CM）技术，大致可分为离线监测和在线监测两大类。离线监测方法通过一系列测试来评估绕组绝缘的介电性能[7]。在离线绝缘测试期间，必须停机，并使用精密仪器[8]进行检修维护。绝缘在线监测可以对运行中的电机进行绝缘评估，避免停机和拆卸带来的损失，已成为当下的研究热点。

在绝缘的老化初期，故障特征微小而难以监测。为了提高绝缘在线监测的灵敏度，相关学者利用电机驱动系统的高频特性，并提出高频注入法[9]和逆变开关自激法[10]。然而，作为一种侵入性监测方法，高频注入法需要额外的激励源，这不仅会影响系统的正常运行，还会增加噪声，并降低系统的整体效率和可靠性。为了克服高频注入方法的缺点，文献[11]提出了一种新的无创匝绝缘准在线监测方法。当电机处于静止状态或启动前时，利用逆变器中功率器件的开关激发电机的高频瞬

通信作者：李政达，男，硕士，主要从事电机故障诊断方面的研究；E-mail: srsri_lzd@163.com
引用格式：李政达, 张旭浩, 江周余, 等. 基于开关振荡电流的交流电机主绝缘在线监测[J]. 机车电传动, 2024(2): 126-131.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.015.
Citation：LI Zhengda, ZHANG Xuhao, JIANG Zhouyu, et al. Online monitoring of AC motor grounding insulation based on switch oscillating current [J]. Electric drive for locomotives,2024(2): 126-131.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.015.

态响应，首次证明了由逆变器固有开关状态产生的电流响应对初始绝缘退化的敏感性[12]。然而，在线应用中功率器件的开关时间随工作点（如负载电流、结温、健康状态）而变化[13]。与静态阶跃激励相比，PWM开关瞬态激励变化，可能会影响高频电流响应。为了减少PWM瞬态激励的影响，文献[14]选择开关振荡电流的低频尾分量进行匝间绝缘状态监测，提高了鲁棒性。然而，该方法并未考虑对主绝缘的监测。

为了进一步提高交流电机绝缘的在线监测的性能，本文提出一种基于开关振荡电流的主绝缘老化在线监测方法。首先根据开关振荡电路中流经回路选择低频共模振荡电路作为主绝缘老化特征。通过模拟主绝缘老化，分析电机绝缘老化后的绕组共模阻抗频谱变化规律，确定故障特征频带。然后分析PWM电压激励对开关振荡电流的影响，提出以开关振荡电流频域偏差作为老化监测指示器。最后通过在线试验验证了该方法的有效性。

1　主绝缘老化机理与模拟

电机主绝缘是指绕组与地（机壳）之间的绝缘，它承受着额定电压和过电压，是绝缘系统中最重要的组件。目前常见的用于主绝缘的材料有聚酯树脂、环氧树脂、沥青、云母、玻璃纤维、复合薄膜等，这些材料在老化过程已经从本质上改变了绝缘特性[14]。热老化是定子绕组绝缘老化最常见的原因，绝缘材料中聚合物内的化学键在高温环境中会发生强烈的振动，以至于它们会断裂，断裂的聚合物遇见氧气会发生氧化反应形成一个新的化学键，氧化反应会使主绝缘逐渐脆化而分层，环氧、聚酯树脂或者沥青中的一部分可能被蒸发或者呈熔化状态流出了主绝缘，空气则会进入到主绝缘夹层中[15]。空气的介电常数低于所有的固体绝缘材料，且随主绝缘中气体所占百分比含量的增加，其平均介电常数就相应减小，进而导致绝缘电容量减小。在文献[16]中，将电机暴露在高温烤箱中，对电机进行周期性加速热老化，试验发现绝缘电容在低频范围逐渐减小，直至绝缘失效，电容减小了25%，因此绝缘电容的变化通常作为离线绝缘监测的指标。

在电机绕组上引出抽头，通过在抽头与地之间并入电容可以模拟主绝缘老化，如图1所示。根据文献[17]，早期老化过程中，绝缘电容变化幅度约为20%~50%，所以模拟主绝缘老化试验采用不同大小的电容模拟不同程度的老化，其模拟后绝缘电容测量值如图2(a)所示，电容在低频范围内增加9%~45%。本文使用阻抗分析仪测量电机绕组共模阻抗频谱，结果如图2(b)所示，可以看出随着插入电容的增加，在低频范围内共模阻抗明显增加，尤其在谐振频谱附近对主绝缘状态较为敏感，其次高频范围的共模阻抗对主绝缘老化不敏感。因此本文选择的低频振荡电流可以作为监测主绝缘状态的特征分量。

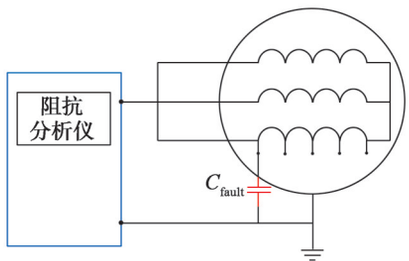
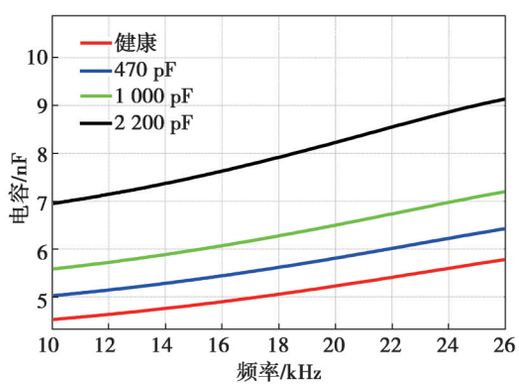
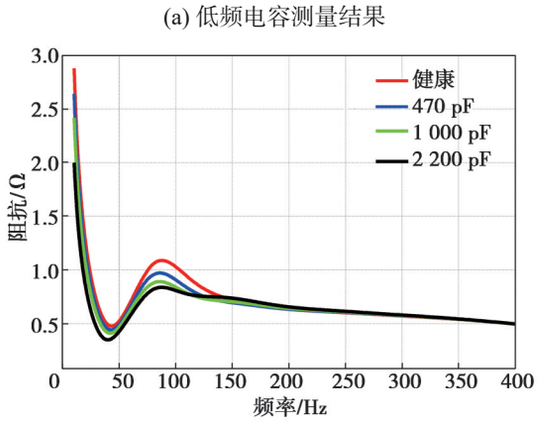


图1　模拟主绝缘老化

Fig. 1　Simulation of ageing of grounding insulation



(a) 低频电容测量结果



(b) 共模阻抗测试结果

图2　并联不同电容后的老化模拟测量值和共模阻抗测试结果

Fig. 2　Aging simulation measurements and test results of common mode impedance after parallel connection of different capacitors

2　基于开关振荡电流的主绝缘监测方法

2.1　低频共模开关振荡电流

变频驱动系统主要由逆变器、电缆和电机构成，其中的寄生参数也构成了电路的一部分，包括逆变器对地耦合电容、电缆接地电容、绕组对地电容、匝间电容。绕组对地电容受主绝缘状态影响，当主绝缘发生老化后，绝缘电容减小，系统的阻抗特性会随之发生变化，这种变化最终会反映在电流响应中。

在变频驱动系统内，开关动作后定子绕组内产生的振荡电流由不同频率的振荡电流叠加而成，根据所流经的回路可分3种模态，分别是低频共模振荡电流、高频共模振荡电流和高频差模振荡电流[18]。低频共模振荡电流流经绕组和主绝缘回路，电流频率在几十kHz到几百kHz范围内。高频共模振荡电流不流经绕组，只流经主绝缘回路，电流频率在数MHz范围内。高频差模振荡电流不流经主绝缘，电流频率在10 MHz附近。考虑到电流的采样成本，本文选择流经绕组和主绝缘的低频共模振荡电流作为监测主绝缘状态的特征分量。其所流经的低频共模电路如图3所示，C_{g1}和C_{g2}为主绝缘等效电容，L_s为绕组自身电感，R_s为绕组电阻，R_e为铁耗等效电阻，C_t为匝间等效电容。在数百kHz的频率范围内，流过主绝缘的容性电流远大于阻性电流，所以忽略了电阻效应。在低频共模电路，电流主要流经主绝缘电容，所以对主绝缘的状态更为敏感。

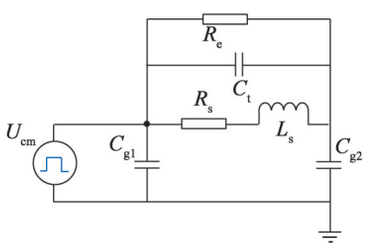


图3 低频共模电路

Fig. 3 Low frequency common-mode circuit

2.2 PWM电压开关特性

变频驱动系统中，逆变器开关器件对直流侧电压快速开通、关断产生的PWM电压可以近似为理想的梯形波[19]，如图4所示。假设上升时间t_r和下降时间t_f相等，其n次谐波振幅用傅里叶级数[20]表示为

$$sw(n)=2sV_{dc}\frac{\sin(n\pi s)}{n\pi s}\frac{\sin(n\pi t_r/T)}{n\pi t_r/T} \tag{1}$$

式中：V_{dc}为直流侧电压；T为开关周期；t_r为上升时间；t_p为高电平持续时间；占空比$s=t_p/T$。

频谱由谐波幅值定义，图5所示为谐波连续最高峰值的频谱渐近包络。首先，当频率小于$1/(T\pi)$时，$sw(n)$中不含参数，$sw(n)=2V_{dc}/\pi$。频率在$1/(T\pi)$处，脉冲电压包络线从$2V_{dc}/\pi$的初始幅度按照−20 dB/dec衰减，然后在$1/(t_r\pi)$处以−40 dB/dec的速度衰减。

影响PWM电压频谱的是直流测电压幅值、开关上升和下降时间、开关频率。IGBT的开关时间受电流幅值和温度影响，通常在几十纳秒，所以PWM电压的截止频率在MHz以上，只有高频范围的电压幅值受开关时间影响，低频范围的电压幅值在电机正常工作时几乎不变。本文用于检测主绝缘老化的低频电流i_{LF}是PWM电压U_{PWM}和共模阻抗Z_{cm}在低频范围共同作用的结果，见式(2)，PWM电压高频特性不会影响i_{LF}，主绝缘老化会使共模阻抗特性改变，因此i_{LF}可以很好地反映主绝缘状态。

$$i_{LF}=\frac{U_{PWM}(LF)}{Z_{cm}(LF)} \tag{2}$$

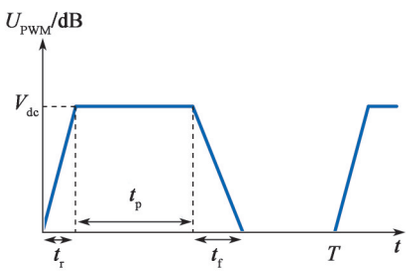


图4 PWM电压时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of PWM voltage

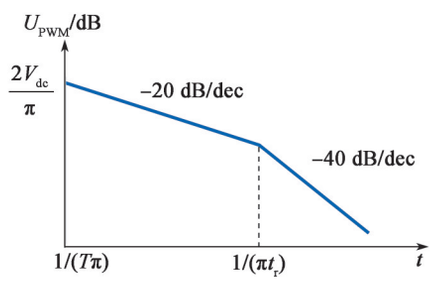


图5 PWM电压频谱包络

Fig. 5 Spectral envelope of PWM voltage

2.3 主绝缘老化特征指标

为了评估电机主绝缘的老化状态，本文首先利用快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）计算振荡电流的幅频特性，如下式：

$$I_{LF}(k)=\sum_{n=0}^{N_s-1}i_{LF}(n)e^{-j\frac{2\pi}{N_s}kn} \tag{3}$$

式中：n为0,1,⋯,N_s；$0\leqslant k\leqslant N_s-1$；$N_s$为采样点数。

在频域上比较不同主绝缘状态下电流幅值偏差作为老化指标，该指标基于均方根误差（root mean square error, RMSE）计算，A_{RMSE}是根据电机在主绝缘健康状态下的振荡电路频谱和老化状态下频谱之差计算得出。如下式：

$$A_{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(I_{Healthy}(i)-I_{aging}(i))^2}{N}} \tag{4}$$

式中：$I_{Healthy}$、I_{aging}分别为在主绝缘健康状态和老化状态下经过重复测量计算得到的平均频谱。

电机在正常运行可能会受到电磁干扰，为了保证数据的可靠性，减小奇异电流对监测的干扰，采用均值法预先处理振荡电流。

3 试验验证

3.1 试验设置

为验证所提方法的有效性，本文搭建了如图6所示试验台，采用一台1.5 kW、220 V的异步电机作为模拟电机，变频器用于控制模拟电机，模拟电机参数见

表1。首先对电机进行改装，在W相首段引出可改装抽头，以便在绕组与地之间插入电容；然后根据上一节中的模拟结果选择插入不同的电容 C_f（C_f 分别为1.0 nF，2.2 nF，3.2 nF），并使用ETA5002高频电压探头（1 300 V/25 MHz，精度为2%）和N2781A高频电流探头（150 A/10 MHz，精度为1%）用于信号采集，试验具体步骤如下：

① 分别使用电压探头和电流探头采集模拟相的端电压和相电流。

② 检测开关动作后的端电压阶跃瞬间并提取此时相电流中的振荡电流。

③ 利用快速傅里叶变换计算振荡电流幅频特性，对比不同主绝缘状态下的振荡电流频谱，提取对主绝缘老化的敏感特征。

④ 将 A_{RMSE} 作为主绝缘老化指标。

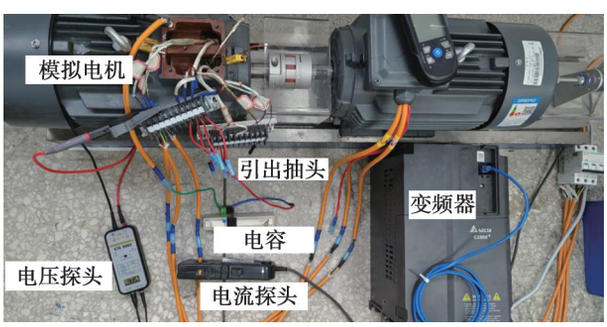


图6　试验台图

Fig. 6　Pictures of lab bench

表1　模拟电机的参数

Table 1　Parameters for simulation motors

参数项目	参数值
额定电压/V	220
额定电流/ A	1.5
额定转速/(r·min^{-1})	1 440
极数/槽数	4/36

3.2　不同主绝缘状态下监测结果

变频器在开关频率为8 kHz的条件下运行，图7为U、V、W三相端电压和W相电流。从图7可以看出，W相电流在端电压阶跃瞬间存在大量的高频振荡电流。

在电机的W相抽头处插入所选电容来模拟不同程度的主绝缘退化。图8、图9为不同主绝缘退化状态下振荡电流的时域波形和频谱。从电流时域波形可知，电流振荡幅值随 C_f 的增加而增大。从频谱可进一步看出，在40~100 kHz的频带内，不同主绝缘状态下的导通瞬态电流振荡幅值变化较大，该频带可作为主绝缘老化的敏感频带。这表明本文所述PWM电压激励产生的振荡电流在一定程度上可以在线反映电机绕组主绝缘的老化状态。

在40~100 kHz的敏感频带内，根据式(4)计算绝缘老化指标 A_{RMSE}，试验结果如图10所示，A_{RMSE} 随着并入电容的增加而增大，这表明 A_{RMSE} 指标对主绝缘具有良好的敏感性，可以用于监测主绝缘早期绝缘老化。

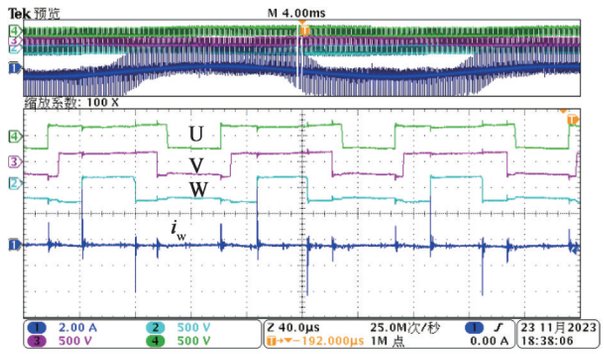


图7　三相端电压和W相电流

Fig. 7　Three-phase terminal voltage and W-phase phase current

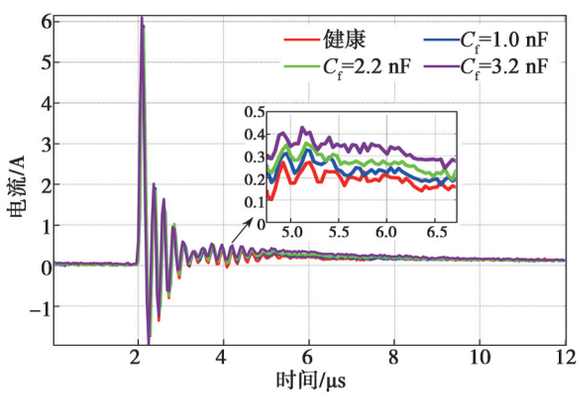


图8　振荡电流时域波形

Fig. 8　Time domain waveform of oscillating current

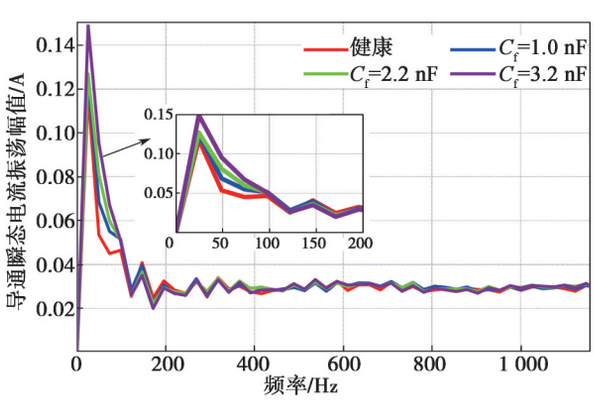


图9　振荡电流频域波形

Fig. 9　Frequency domain waveform of oscillating current

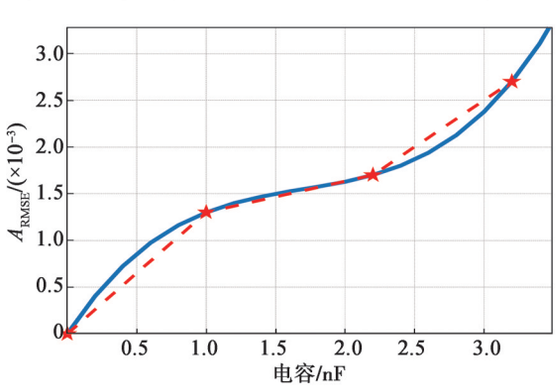


图10　不同主绝缘状态下的老化指标 A_{RMSE}

Fig. 10　Aging index A_{RMSE} under different grounding insulation states

4 结束语

本文提出了一种基于逆变器开关振荡电流的交流电机主绝缘在线监测方法。首先通过对电机并联电容模拟主绝缘老化得出共模阻抗的变化规律和敏感频带；然后分析了逆变器PWM开关电压的时频特性，证明了在低频范围内电压激励不影响主绝缘监测结果；最后通过在线试验，试验结果证明了开关振荡电流的频谱变化可以有效监测电机主绝缘的初期老化，采用A_{RMES}作为老化指标对主绝缘老化监测具有高可靠性和高敏感性。

参考文献：

[1] YOUNSI K, NETI P, SHAH M, et al. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2010, 17(5): 1441-1452.

[2] YANG J, CHO J, LEE S B, et al. An advanced stator winding insulation quality assessment technique for inverter-fed machines[J]. IEEE transactions on industry applications, 2008, 44(2): 555-564.

[3] GEIMAN J. DC step-voltage and surge testing of motors[R/OL]. (2007-03-01) [2024-01-21]. https://www.efficientplantmag. com/2007/03/dc-step-voltage-and-surge-testing-of-motors/.

[4] GANDHI A, CORRIGAN T, PARSA L. Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011, 58(5): 1564-1575.

[5] MIRZAEVA G, SAAD K I. Advanced diagnosis of stator turn-to-turn faults and static eccentricity in induction motors based on internal flux measurement[J]. IEEE transactions on industry applications, 2018, 54(4): 3961-3970.

[6] BARATER D, ARELLANO-PADILLA J, GERADA C. Incipient fault diagnosis in ultrareliable electrical machines[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(3): 2906-2914.

[7] STONE G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings - a review[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2013, 20(6): 2073-2080.

[8] GRUBIC S, ALLER J M, LU Bin, et al. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55(12): 4127-4136.

[9] 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 and electrical insulation, 2007, 14(5): 1308-1315.

[10] TSYOKHLA I, GRIFFO A, WANG Jiabin. Online condition monitoring for diagnosis and prognosis of insulation degradation of inverter-fed machines[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2019, 66(10): 8126-8135.

[11] 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.

[12] ZOELLER C, VOGELSBERGER M A, FASCHING R, et al. Evaluation and current-response-based identification of insulation degradation for high utilized electrical machines in railway application[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(3): 2679-2689.

[13] LI Hao, XIANG Dawei, YANG Xingwu, et al. Compressed sensing method for IGBT high-speed switching time on-line monitoring[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 66(4): 3185-3195.

[14] XIANG Dawei, LI Hao, YAN Hao, et al. Online monitoring of incipient turn insulation degradation for inverter-fed machine using sensitive tail component in PWM switching oscillations[J]. IEEE transactions on power electronics, 2021, 36(8): 8730-8742.

[15] STONE G C, CULBERT I, BOULTER E A, et al. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair[M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2014.

[16] ZHENG Dayong, ZHANG Pinjia. An online groundwall and phase-to-phase stator insulation monitoring method for inverter-fed machine[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2021, 68(6): 5303-5313.

[17] ZOELLER C, VOGELSBERGER M A, WOLBANK T M. Monitoring of thermal degraded AC machine winding insulation by inverter pulse excitation[C]//IEEE. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines. Lausanne: IEEE, 2016: 1119-1125.

[18] RAN L, GOKANI S, CLARE J, et al. Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems. I. time domain analysis and identification of dominant modes [J]. IEEE transactions on power electronics, 1998, 13(4): 757-767.

[19] 裴雪军, 康勇, 熊健, 等 . PWM 逆变器共模传导电磁干扰的预测[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 83-88.
PEI Xuejun, KANG Yong, XIONG Jian, et al. Prediction of common mode conducted EMI in PWM inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 83-88.

[20] COSTA F, MAGNON D. Graphical analysis of the spectra of EMI sources in power electronics[J]. IEEE transactions on power electronics, 2005, 20(6): 1491-1498.

Online monitoring of AC motor grounding insulation based on switch oscillating current

LI Zhengda[1], ZHANG Xuhao[1], JIANG Zhouyu[2], WANG Mengqian[1], HUO Ke[1], LIN Ziqi[1]

(1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China;
2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In the variable frequency drive system, the high dv/dt and transient overvoltage generated by the high-speed switch of the power device will make the motor insulation parts withstand high electrical stress, accelerate the aging of the motor insulation materials, and then increase the probability of insulation failure and harm the overall reliability of the drive system. Compared with the traditional offline monitoring method, online monitoring of motor insulation states can improve the real-time monitoring performance and reduce the loss of shutdown maintenance. Therefore, this paper presents a method of online monitoring of AC motor grounding insulation based on inverter switch oscillating current. First, the authors established an AC motor insulation equivalent circuit, analyzed the influence of insulation aging on the impedance of AC motor, and simulated the insulation aging process by connecting external capacitors in parallel. Then, the influence of the motor grounding insulation parameters on the switch oscillating current under pulse width modulation (PWM) was analyzed, and proposed an online monitoring method with the frequency domain deviation of switch oscillating current as the aging characteristic index. This test shows that this method can effectively monitor the aging state of the motor grounding insulation without affecting the normal operation of the motor.

Keywords: AC motor; insulation aging; online monitoring; current response; inverter; high-speed train

收稿日期：2023-12-19；修回日期：2024-02-02