

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108017

低压散绕变频电机绝缘薄弱点定位方法研究^{*}

郭厚霖¹, 王 鹏¹, 林 海², 罗英露², 马世金¹

(1. 四川大学电气工程学院 成都 610065; 2. 襄阳中车电机技术有限公司 襄阳 441047)

摘 要:根据 IEC 相关标准,采用重复脉冲和正弦电压测定变频电机绝缘系统 PDIV,是评估低压散绕变频电机绝缘性能的关键手段。然而,现行 IEC 标准难以识别定子绕组绝缘薄弱点。对此,联合重复脉冲和正弦 PDIV 离线测试技术,提出定位变频电机绝缘薄弱点的“三步法”:首先采用重复脉冲电压测定电机匝间绝缘 PDIV;然后利用正弦电压测定相间及主绝缘 PDIV,并与匝间 PDIV 对比,确定电机绝缘薄弱点;最后通过测试电机在不同接地方式下的 PDIV,可定位绝缘薄弱点是否位于定子绕组首端。另外,通过定子绕组电压分布仿真、3 个商用电机薄弱点识别及电机寿命实验,综合验证了上述方法的可行性。此研究可实现变频电机绝缘薄弱点的有效定位,提升电机绝缘潜在风险诊断效率。

关键词:变频电机;局部放电起始电压;绝缘薄弱点;主绝缘;匝间绝缘;相间绝缘

中图分类号: TH17 TM85 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Study on the location method of insulation weak point for low-voltage random-wound inverter-fed motor

Guo Houlin¹, Wang Peng¹, Lin Hai², Luo Yinglu², Ma Shijin¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Xiangyang CRRC Motor Technology Co., Ltd., Xiangyang 441047, China)

Abstract: According to the relevant standards of the international electrotechnical commission (IEC), the utilization of pulse and sinusoidal voltages to determine the partial discharge inception voltage (PDIV) of the inverter motor insulation system is a key method to evaluate the insulation performance of low-voltage random-wound inverter-fed motors. However, the current IEC standard is difficult to identify the stator insulation weakness. To solve this problem, combines the PDIV off-line test technology under the repetitive pulse and the sinusoidal voltage, a three-step method is proposed to locate the weak point of the inverter-fed motor insulation. Firstly, the repeated pulse voltage is used to measure the PDIV of turn-to-turn insulation in the motor. Secondly, the PDIVs of phase-to-phase insulation and main wall insulation are measured by the sinusoidal voltage, which are compared with the turn-to-turn insulation PDIV. In this way, the weak point of the motor insulation can be determined. Finally, through the PDIV test in different grounding modes of the motor, it is possible to locate whether the weak point of insulation is located at the stator winding head. In addition, by simulation of stator voltage distribution, weak point identification of three commercial motors and corona life test of motors, the feasibility of the above method is comprehensively verified. The research can effectively locate the insulation weakness of the inverter-fed motor. And the efficiency of diagnosing potential risks in the motor insulation is improved.

Keywords: inverter-fed motor; partial discharge inception voltage; insulation weak point; main wall insulation; turn-to-turn insulation; phase-to-phase insulation

0 引 言

变频电机具有高能效、易调速、易启动等优点,被广

泛用于交通运输和工业生产等领域^[1]。与直接连接至配网、工作在工频电压下的传统三相交流电机不同,变频电机绝缘系统承受电力电子装置产生的高频、快速变化的脉宽调制电压^[2],绝缘失效问题时有发生。特别地,当变

收稿日期:2021-05-30 Received Date: 2021-05-30

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51977134)项目资助

频电机端部承受上升时间较短的重复脉冲电压时, 电缆与电机特征阻抗不匹配会引起电机端部明显过电压^[3-4]。由于绕组分布感性和容性参数的影响, 脉冲电压在电机绕组内部分布不均匀, 部分匝间绝缘(股间绝缘)易形成局部高场强^[5]。当真空浸渍不能完全消除气隙时^[6], 在场强集中的绝缘区域, 局部放电(partial discharge, PD)将以较高概率出现, 加速绝缘老化, 最终导致电机绝缘失效^[7-8]。

在未来 5~10 年, 以碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)为代表的第 3 代宽禁带功率半导体器件将逐渐取代传统硅(Si)基器件, 大大提升电力电子装置功率密度和能量转换效率^[9]。同时, 电力电子设备开断频率和开断速度也将显著提升, 变频电机端部电压上升时间缩短至纳秒级, 绕组端部过电压和绕组内部电压分布不均现象更加严重, 不可避免加重了变频电机绝缘问题。

低压散绕电机额定电压一般在 900 V 以下, 总数量超过现有变频电机总数的 80%。此类电机绝缘系统由无机和有机材料混合组成, 部分绝缘结构无耐电晕能力。PD 存在时, 绝缘将快速失效^[10]。因此, 国际电工技术委员会(international electrotechnical commission, IEC)发布标准 IEC 60034-18-41^[11]、IEC 60034-27-5^[12] 和 IEC 60034-27-1^[13], 规定对电机主绝缘(对地绝缘)、相间绝缘以及匝间绝缘进行局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)测试时, 需联合重复脉冲和正弦电压, 以保证各绝缘部位在电机全寿命周期内不出现 PD^[14]。按照标准, 因主绝缘和相间绝缘分别承受逆变器输出的相地电压和线电压, 可采用正弦测定相间和主绝缘的 PDIV, 以得到的峰峰值判定绝缘特性。然而, 对于匝间绝缘, 为模拟脉宽调制电压下, 绕组匝间内部电压分布不均的现象, 必须采用与电机端部电压具有相似 dv/dt (上升速率)的重复脉冲电压^[15], 测定定子绕组内匝间绝缘的 PDIV。

目前已有学者依据标准流程, 进行变频电机不同绝缘部位的 PDIV 测试, 并指出标准存在的局限性^[16]。文献[16]提出了 I 型变频电机绝缘设计是否合格的流程; 文献[17]研究了电机中性点打开与连接时, 脉冲电压下电机各线圈的相地电压分布; 文献[18]通过改变离线测试下脉冲的上升时间, 分析了电机 PD 首次发生时, 放电所在的绝缘部位。但以上文献及 IEC 标准中, 并未在电机绝缘结构设计和绝缘性能评估时考虑“木桶效应”, 即绝缘系统中的最薄弱点, 限制了标准可执行性。且电机转子断条故障已有一定研究^[19], 而定子故障定位研究较少。因此, 电机在线运行前, 提前定位定子绕组绝缘薄弱点位置, 需展开研究。

为保证电机可靠运行, 在评估电机整体绝缘性能时, 主要存在以下两个问题有待解决:

1) 重复脉冲电压下 PDIV 测试灵敏度问题。重复脉冲电压通过电力电子器件斩波产生, 器件纳秒级开断会产生强烈的电磁干扰并耦合在 PD 信号上。

2) 电机绝缘最薄弱点的定位问题。受制于低压变频电机制造工艺, 电机在线运行时 PD 可能存在: 匝间放电、相间放电和对地放电。离线下定位绝缘薄弱点位置并加强其绝缘性能, 对电机制造商至关重要。

功率器件开断产生的干扰主要分布在 0~500 MHz, 若采用高频宽带传感器, 并在 0.5~2.0 GHz 范围内提升特高频(ultra-high frequency, UHF)传感器的性能, 有利于提高脉冲电压下 PD 测试灵敏度。因此, 在传统宽频带阿基米德平面螺旋天线基础上, 添加微带巴伦实现阻抗匹配, 并在天线辐射层上覆盖高介电常数介质层, 实现了天线在工作频带 0.9~2.0 GHz 增益大于 6.0 dB, 有效带宽内驻波比小于 2.0^[20]。此特高频天线可专用于脉冲电压下 PDIV 测试, 解决了问题 1)。

为解决问题 2), 本文利用中性点已打开的低压电机, 联合正弦和重复脉冲下 PDIV 测试技术, 提出定位变频电机绝缘薄弱点的“三步法”: 首先采用重复脉冲电压, 测定电机外壳悬浮状态下绕组匝间绝缘 PDIV; 然后利用正弦电压, 测定外壳悬浮状态下相间绝缘及外壳接地时主绝缘 PDIV, 并与匝间绝缘 PDIV 比较, 确定电机绝缘薄弱点; 最后再联合脉冲电压, 测定定子外壳及悬浮相接地状态下 PDIV, 以判定绝缘薄弱点是否位于绕组首端。此外, 本文也探索了不同脉冲上升时间下电机匝间绝缘 PDIV 的变化规律, 并确定上升时间对绝缘薄弱点定位的影响。上述研究有望补充现行 IEC 相关标准, 为变频电机绝缘缺陷定位提供借鉴。

1 测试系统

1.1 重复脉冲下 PDIV 离线测试平台

重复脉冲 PDIV 测试平台由高压脉冲发生器、高速数字示波器和特高频天线组成, 如图 1 所示^[15]。

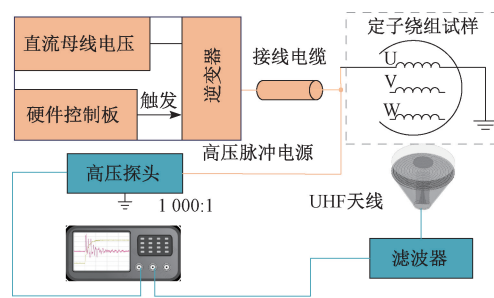


图 1 脉冲电压下局部放电测试平台

Fig. 1 PD test platform under repetitive impulse voltage

通过改变硬件驱动弱电部分和高压充放电电路参数,脉冲电源可产生频率、占空比和上升时间可调的重复脉冲电压。测试试样为定子绕组,高压探头以 1 000:1 的分压比获取定子端的电压并输入到示波器通道 1。天线距离待测定子约为 10 cm,可实现电磁波的近场检测。同时,采用滤波器滤除低频干扰,将 PD 时域信号通入示波器通道 2。数字示波器带宽为 2.5 GHz,采样频率最高 20 Gs/s,进行 PDIV 测试时,固定电压上升率和上升时间等关键参数,逐渐升高直流母线电压,直到首次 PD 出现,此时电压峰峰值记为 PDIV。

1.2 正弦电压下 PDIV 离线测试平台

正弦电压下变频电机 PDIV 测试平台主要由功率放大器(TREK 30/20)、高速数字示波器、意大利 Techimp PD-Base 耦合电容及检测阻抗组成,如图 2 所示。耦合电容与检测阻抗提取 PD 信号,功率放大器输出正弦电压,PD-Base 用于处理 PD 信号并获得放电相位统计特性,可有效滤除测试中的干扰,提升测试准确度。

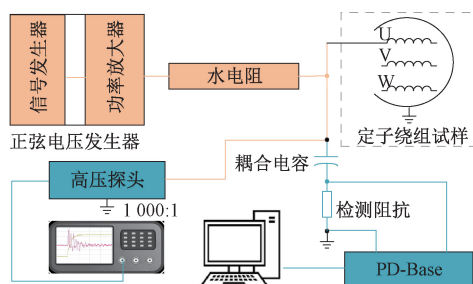


图2 正弦电压下局部放电测试平台

Fig. 2 PD test platform under sinusoidal voltage

1.3 PD 检测方法

为检测脉冲下试样放电时,各信号的频段分布图,在上升时间为 20 ns、频率为 50 Hz 的脉冲电压下进行电机绝缘系统的 PD 测试。利用如图 3 中已覆盖高介电常数介质层的特高频天线,采集 PD 信号,从图 4(a)可看出,时域放电脉冲易被淹没在电力电子器件开断产生的强烈电磁干扰中。为分析此电磁干扰及 PD 信号频域特性,对未进行滤波处理的信号进行频谱分析。从图 4(b)可看出,电力电子器件开断干扰主要集中在 0~400 MHz 范围,PD 频域信号延伸至 1.5 GHz,可通过 500 MHz 高通滤波器消除干扰,以提高天线接收 PD 信号的信噪比。因此,覆盖高介电常数介质层的特高频天线在变频电机绝缘系统测试中具有较好的适用性。

对电机施加重复脉冲电压,研究表明随着上升时间的增加,PD 信号频域能量在 1.0~2.0 GHz 频域范围内逐渐减少^[21]。而正弦电压上升时间为 5 000 μ s,PD 能量集中在 400 MHz,此时特高频天线不具优势,PD 信号易

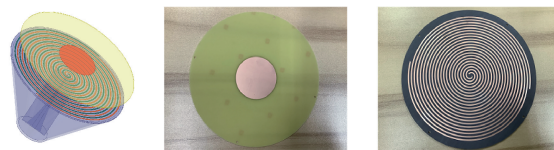
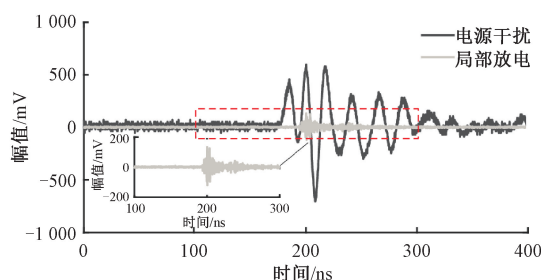


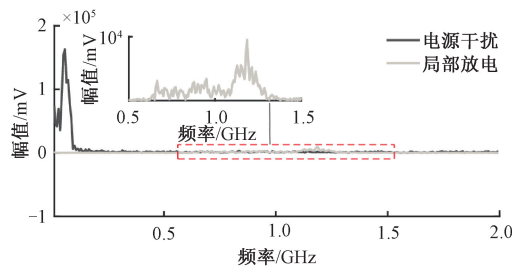
图3 特高频传感器模型

Fig. 3 Model of the ultrahigh frequency sensor



(a) 时域下信号检测

(a) Signal detection in time domain



(b) 频域下信号检测

(b) Signal detection in frequency domain

图4 典型放电信号时频域波形

Fig. 4 Time-frequency waveforms of typical discharge signal

被空间白噪声干扰,因此,正弦电压下测试电机 PDIV 时采用直测法^[13]。PD-Base 系统有 3 大功能:一是在软件中设置触发信号,可得到局部放电相位谱图(phase resolved partial discharge, PRPD);二是根据沿面和内部放电的相位统计特性,能识别放电过程中可能存在的窄带干扰;三是联合时域和频域(TF)分析方法,通过对信号进行聚类分析,可抑制宽频带干扰。

1.4 测试电压参数选取及平台灵敏度测试

当采用重复脉冲电压对定子绕组进行 PDIV 离线测试时,需考虑绝缘 PD 激发的脉冲电压参数。已有研究认为,电压频率对 PDIV 测试有影响,占空比对 PDIV 影响较小^[17]。为保证可比性,本文固定正弦与方波电压频率均为 50 Hz。由于电路负载呈感性,定子绕组匝间绝缘测试时相当于短路运行。为防止仪器损坏,选用电压持续时间为 2.5 μ s 的单极性重复脉冲电压。

目前,使用宽禁带半导体器件驱动电机的脉冲上升时间较短。根据 PD 发生条件^[6],上升沿和下降沿出现过电压,但有效电压持续时间过短时,初始电子在此段时

间内无法被激发,与正弦电压相比,脉冲下以峰峰电压值得到的 PDIV 可能稍微偏高,从而两平台测试的 PDIV 值,对比结果不准确。

基于上述原因,为联合采用正弦和重复脉冲电压下 PDIV 测试技术,对变频电机绝缘系统薄弱点进行定位,有必要确定上升时间的取值,以及在该电压参数下对比两平台的测试灵敏度。

为确定脉冲的上升时间,对按照 GB/T 4074.5-2008 标准制成的双绞线进行模拟检测,固定占空比和频率。发现随着上升时间的增长,脉冲与正弦电压下 PDIV 测试结果基本一致,如图 5 所示,说明 PDIV 测试主要与波形峰峰值有关,文献[22]也得出此结论。

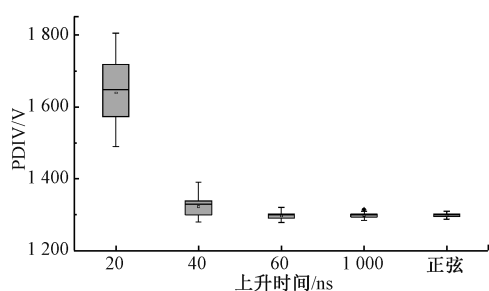


图 5 不同上升时间下双绞线 PDIV

Fig. 5 Twisted pair PDIV under different rise times

但上升时间为 20 ns 时,由于有效电压持续时间较短,脉冲下 PDIV 测试值显著增加。为保证两平台 PDIV 测试可比性,当上升时间为 60 ns 以上时,认定判定方法有效。因此,本文脉冲电压的上升时间确定为 80 ns。

脉冲电压离线测试电机相间或主绝缘 PDIV 时,可能存在匝间绝缘放电,而正弦电压测试时不存在此情况。仍需按照 GB/T 4074.5-2008 标准,制成 5 个有厚度差异的双绞线试样,以验证两平台灵敏度。试样其中一端接高压端,另一端接地,在温度为 25℃ 和 155℃ 下,施加已确定电压参数的正弦与脉冲电压。从图 6 可看出,两种电压波形下双绞线 PDIV 测试值相差较小,说明两平台灵敏度基本相同,测试具有等效性,根据校准仪校准结果,测试灵敏度小于 5 pC。

2 绝缘薄弱点识别方法

2.1 电机 PDIV 测试及薄弱点判定

电机在线运行时,三相端部电压峰峰值相同,但匝间、相间与主绝缘实际承受的电压波形不相同。尽管绝缘设计中相间绝缘厚度最大,首先出现 PD 也有一定概率。因此测试各绝缘部位 PDIV,提前判定薄弱点较为重要。定子绕组中绝缘薄弱点识别过程如下:

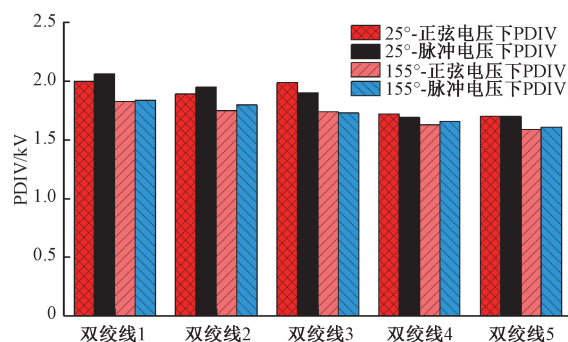


图 6 两平台双绞线 PDIV 测试结果

Fig. 6 Test results of two-platform twisted pair PDIV

首先,根据标准 IEC 60034-18-41,在所选重复脉冲电压参数下测试电机匝间绝缘 PDIV。为避免相间绝缘及主绝缘产生放电,打开定子三相中性点,高压端接入电机绕组一侧,电机同相绕组另一侧作为接地端,电机外壳及其余相处于悬浮状态,如图 7(a) 所示。比较三相测得的匝间绝缘 PDIV 值,以 PDIV1 代表最小值,其所对应的相表示匝间绝缘薄弱相。

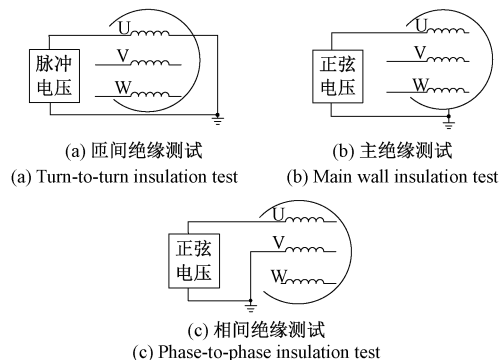


图 7 定子绝缘部位 PDIV 测试图

Fig. 7 PDIV test diagram of stator insulation part

然后,根据标准 IEC 60034-27-1,采用正弦电压测试电机主绝缘 PDIV。因正弦电压下定子绕组匝间电压分布均匀,不会发生匝间绝缘放电。将输出线分别接至电机各三相引出线,机壳接地,其他相处于悬浮状态,如图 7(b) 所示。比较各三相所测的主绝缘 PDIV,最小值以 PDIV2 代表,其所对应相为主绝缘薄弱相。

之后,正弦下进行相间绝缘 PDIV 测试,电机连接如图 7(c) 所示。选出三相相间 PDIV 的最小值,以 PDIV3 表示,其所对应连接相确定为相间绝缘最薄弱相。由于星形连接的三相异步电机在线运行时相间电压存在 120° 相位差,定子相间将承受最高电压。为保证离线测试结果的可比性,通过式(1)处理线电压 PDIV3,结果以 PDIV4 表示,其中 k 为常数,取值与电压波形有关。

$$\text{PDIV4} = \text{PDIV3}/k \quad (1)$$

最后,比较 PDIV1、PDIV2 与 PDIV4,得出最小值,以确定定子绕组绝缘薄弱点。上述流程如图 8 所示。

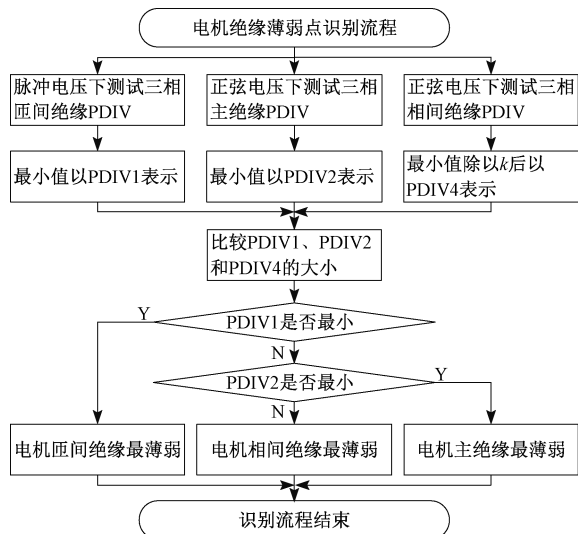


图 8 绝缘薄弱点识别流程图

Fig. 8 Flowchart of insulation weak point identification

2.2 k 值的确定

为使电机的离线 PDIV 测试有对比意义,需了解变频电机通入三相 PWM 电压后,在线运行时 k 值大小。用图 9 所示的电路模型,在 Simulink 中仿真计算无过电压时的 k 值。其中,调制波频率为 50 Hz,开关器件 T_1 、 T_3 与 T_5 的触发信号存在 120° 相位差。从图 10 可看出,无过电压存在时,线电压是相地电压的 2 倍, k 等于 2。

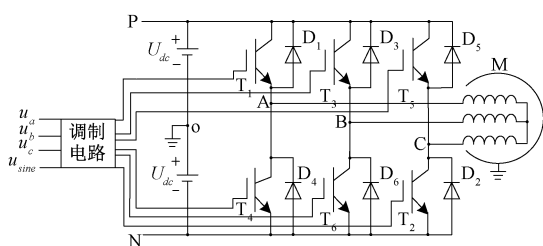


图 9 三相桥式 PWM 逆变电路

Fig. 9 Three-phase bridge PWM inverter circuit

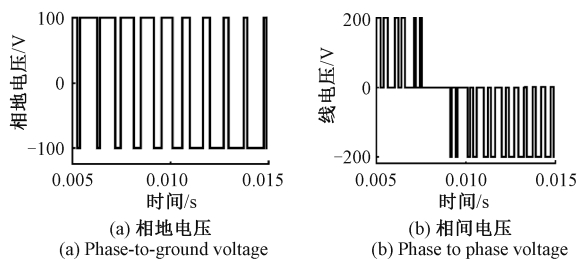


图 10 无过电压时线电压与相地电压波形

Fig. 10 Waveforms of line voltage and phase-to-ground voltage in the absence of overvoltage

存在过电压时,相地电压与线电压的波形将发生变化,先分析影响过电压变化的因素。研究表明,过电压的形成主要与脉冲上升时间、接线电缆长度以及阻抗不匹配程度有关,当三者都保持不变时,过电压无变化,从式(2)可看出。

$$U_{\max} = \frac{2t_c}{t_r} U(1+R) = \frac{2l}{t_r c} U(1+R) \quad (2)$$

式中: U 为方波幅值, l 为电缆长度, c 为波在电缆中传播速度, t_r 为上升时间, R 为反射系数。图 11 为脉冲存在过电压,IEC 60034-18-41 标准中列出的相间与主绝缘电压波形。

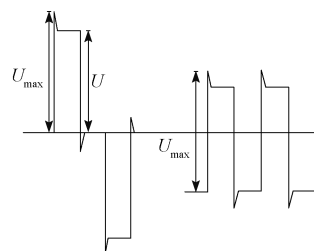


图 11 过电压存在时线电压(左)与相地电压(右)波形

Fig. 11 Waveforms of line voltage (left) and phase-to-ground voltage (right) in the presence of overvoltage

根据式(2),认为影响因素相同时,线电压与相地电压的过电压值相同。此时 k 值计算可按式(3)进行,当 $U_{\max}$ 等于 U 时,即无过电压, k 等于 2,与图 10 中仿真结果一致,式(3)中 $U_{\max}$ 除以 U 是 IEC 标准规定的过电压系数。

$$k = \frac{2U_{\max}}{2U_{\max} - U} = \frac{2U_{\max}/U}{(2U_{\max}/U) - 1} \quad (3)$$

3 绝缘薄弱点识别进一步研究

3.1 相间或主绝缘薄弱点进一步定位

经图 8 流程后,若测得电机主或相间绝缘为最薄弱点,可进行“三步法”中的最后一步。根据图 6,在两平台灵敏度都较高的情况下,可联合脉冲电压,测定定子绕组外壳及悬浮相接地状态下的 PDIV,并与正弦电压下已测的 PDIV 对比,利用差值,以进一步判定绝缘薄弱点是否位于绕组的首端。

图 8 流程判定电机相间绝缘最薄弱:首先,将电机一相引接线接高压输出,同相另一端与另一相并联接地,如图 12(a)所示。然后,在所选脉冲电压参数下测试此时 PDIV,若与 PDIV3 相差较小,认为电机相间绝缘薄弱点位于绕组首端。因图 8 流程中,PDIV4 是通过式(1)处理得到的,此分析方法仅适用离线测试下 PDIV3 小于同一相间绝缘 PDIV 的情况。

图 7 流程判定电机主绝缘最薄弱: 首先, 按图 12(b) 连接电机, 即一相引接线接高压输出, 同一相的另一端与机壳并联接地。然后, 测试此时 PDIV 值, 若与 PDIV2 相差较小, 认为主绝缘薄弱点位于绕组首端。

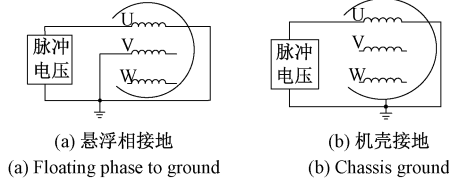


图 12 绝缘薄弱点进一步定位电机连接图

Fig. 12 Diagram of weak point of insulation further locates the motor connection

3.2 薄弱点进一步定位验证

采用正弦进行 PDIV 测试时, 定子如图 7(b) 或图 7(c) 连接, 抽出电机转子, 单相电路模型如开关 S 断开的图 13。此时定子漏阻抗较小, 末端有对地电容。由于相邻两线圈在不同的槽内以及涡流的屏蔽作用, 可忽略线圈之间的电磁耦合, 认为只是简单的串联关系。

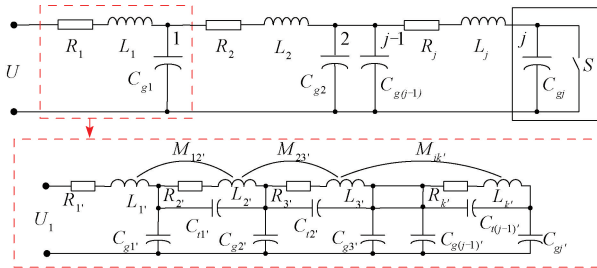


图 13 电机单相电路模型

Fig. 13 Motor single-phase circuit model

脉冲电压离线测试下, 电机如图 12(a) 或(b) 连接, 与上述模型参数一致。但单相绕组末端接地, 电势为 0, 电路模型如开关 S 闭合的图 13。图中箭头指向的框图代表定子绕组中一个线圈的匝间电压分布模型, 其中 C_{g1} 与 $C_{g1'}$ 为对地电容, $C_{t1'}$ 为匝间电容。在 Simulink 中用所选脉冲电压参数, 仿真单相电路模型的线圈电压分布, 以验证相间或主绝缘薄弱点进一步定位的有效性。此时, 忽略虚线框中的匝间电压分布模型。

电容与电感参数由 TH2828S 数字电桥, 测量低压散绕电机所得。总电感量为 60.12 mH, 电阻值为 21 Ω , 绕组对地电容为 566.77 pF。虽然散绕电机匝与匝之间的电容无法控制, 但各线圈对地电容可认为是相同的, 各线圈的电感量也基本相等。此电机有 24 槽, 一相绕组有 8 个线圈, 每个线圈电感量为 7.515 mH。

开关 S 打开, U 为 3.8 kV 的正弦电压。在实验及仿

真平台上, 用高压探头检测定子绕组首末端的电压波形, 如图 14 所示, 发现末端电压基本未降落。说明正弦测试下, PD 首次出现位置可能位于绕组首端或末端。

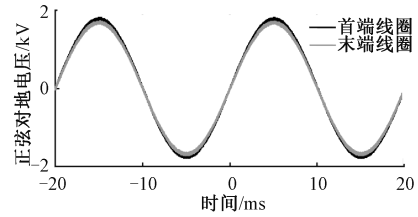


图 14 首端与末端电压试验及仿真图

Fig. 14 Diagram of head and end voltage test and simulation

为研究开关 S 闭合时, 脉冲电压下各线圈对地电压分布规律, 使引接线接入上升时间为 80 ns, 电压幅值为 1.2 kV 的短脉冲电压, 波形如图 15(a) 所示。图 15(b) 为仿真图 13 中节点 1 到 4 的电势, 节点 1 电势最高, 各线圈对地电压幅值逐渐降低, 仿真规律与文献[17]中 Lindell 得到的实验结论一致。说明脉冲与正弦电压离线测试定子 PDIV 时, 线圈电压分布特性并不相同。

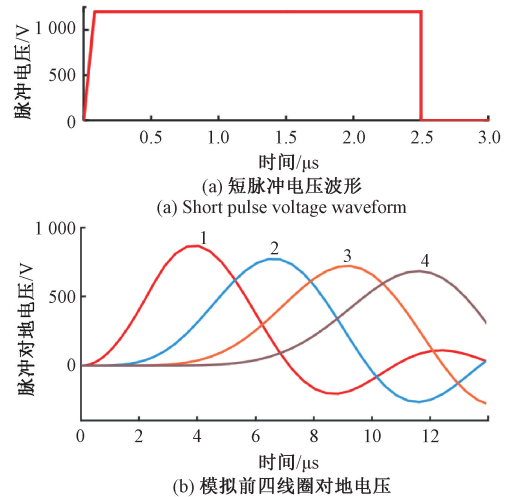


图 15 模拟脉冲电压与线圈对地电压仿真波形

Fig. 15 Simulation waveform of simulated pulse voltage and coil-to-ground voltage

根据仿真及实验结果, 脉冲与正弦平台输出电压峰值相等时, 仅电机绕组首端电压值一致。又因 PDIV 主要与电压峰峰值有关, 所以, 进一步判定相间或主绝缘薄弱点是否位于绕组首端的方法是有效的。

3.3 上升时间变化对电机绝缘薄弱点定位影响

研究不同上升时间下, 电机绝缘薄弱点判定结果是否会改变有一定价值, 可使电机绝缘测试流程更具有完整性。依照标准 IEC 60034-18-41, 电机相间及主绝缘 PDIV 受脉冲上升时间影响小, 但电机匝间电压分布受其

影响较大。因此,不同上升时间下整机匝间绝缘 PDIV 将发生变化,电机绝缘最薄弱点也可能迁移。

使用型号为 YS7112 的电机,如图 7(a)连接。其 U 相匝间分别在上升时间为 250、460、600 及 800 ns 下运行,图 16 表明 PDIV 测试值逐渐升高,定子绕组匝间电压分布越均匀。需注意,此处测试结果与图 5 趋势不同,关键在于试样的不同。图 5 主要分析上升时间对过电压的影响,因绞线对不存在电压分布不均现象,图 16 分析上升时间对整机匝间电压分布影响,是在图 5 测试结果的基础上进一步研究。

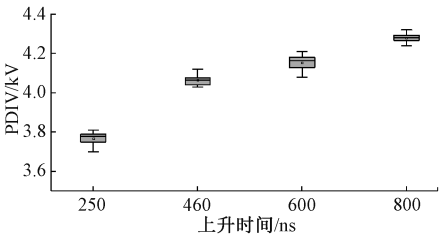


图 16 不同上升时间下电机匝间绝缘 PDIV
Fig. 16 Turn-to-turn insulation PDIV of the motor under different rise times

变频电机输入脉冲电压的上升时间经傅里叶变换后,对应的等效上限频率满足式(4)。匝间绝缘 PDIV 测试值随上升时间改变的原因也可用此公式解释。

$$f_u = \frac{1}{\pi t_{rise}} \tag{4}$$

其中, f_u 为等效频率, t_{rise} 表示上升时间。当 t_{rise} 变短时, f_u 变大,根据电感电容阻抗计算公式,感抗变大,容抗减小,将有更多电压降落在图 13 虚线框中 L_1 上。则第一匝与其余匝之间的暂态电压差也变大,改变了电机匝间暂态电压分布,使匝间放电更容易发生。

因此,随上升时间变长,匝间绝缘 PDIV 变大,根据标准相间与主绝缘 PDIV 保持不变,在判定变频电机绝缘薄弱点时,离线测试中脉冲的上升时间必须与变频电机在线运行时上升时间相同。

4 低压散绕电机缺陷定位过程

用上述方法对 3 台低压商用电机进行绝缘薄弱点定位测试,铭牌信号如表 1 所示。

表 1 3 台商业电机铭牌表
Table 1 Nameplate list of three commercial motors

电机	型号	相数	额定功率/W	额定电压/V	绝缘等级
A	YS7112	3	370	380	E
B	YS6324	3	180	380	B
C	Y801-4	3	550	380	B

测试电机 PDIV 时,因负载呈感性,当外加直流母线电压幅值为 0 时,电感会保持电流连续而反向放电。因此通入单极性脉冲电压时,会存在反向过电压,然而电机在线运行时不会出现此情况。为模拟电机在线运行时相地电压与线电压关系,只考虑上升沿处的过电压系数,可计算出 k 值。

4.1 A 电机绝缘薄弱点定位

首先,通过薄弱点识别流程图,电机各相绝缘部位 PDIV 平均值如表 2 所示,正弦电压下,相间绝缘 PDIV 测试结果中第 3 列为相地电压值。

表 2 A 电机各绝缘部位 PDIV 测试
Table 2 PDIV test for each insulation part of motor A

正弦电压下主绝缘 PDIV/kV	正弦电压下相间绝缘 PDIV/kV	脉冲电压下匝间绝缘 PDIV/kV
U-地 2.54	U-V 1.86 1.09	U 3.60
V-地 2.64	V-W 1.74 1.02	V 2.19
W-地 2.65	W-U 1.98 1.16	W 3.38

然后,使电机端部电压在达到 PDIV 时维持一段时间,采集 PD 信号以描绘 PRPD 谱图。图 17(a) 为 W 相未接地时的 PRPD 谱图。图中上升沿处峰值电压为 1.93 kV,直流母线电压为 1.6 kV, U_{max} 除以 U 等于 1.206,根据式(3), k 等于 1.708。比较表 2 数据,得出 A 电机 VW 相间绝缘最薄弱。因电机 V 相匝间绝缘 PDIV 大于正弦下 VW 相间绝缘 PDIV,满足判定电机相间绝缘薄弱点是否位于绕组首端的条件。

最后,使 V 相引接线接高压输出, V 相另一端与 W 相并联接地。当脉冲电压峰峰值到达 1.74 kV 时,停顿 5 min,以累积有效电压持续时间,若仍未出现放电,则再缓慢升压,PRPD 谱图如图 17(b) 所示。PDIV 测试结果是 2.19 kV,与脉冲电压下 V 相匝间绝缘 PDIV 相等,说明仍可能是匝间放电。因此, W 相接地后测得 PDIV 与正弦下 VW 相间绝缘 PDIV 差别较大, A 电机 VW 相间绝缘薄弱点不位于绕组首端。

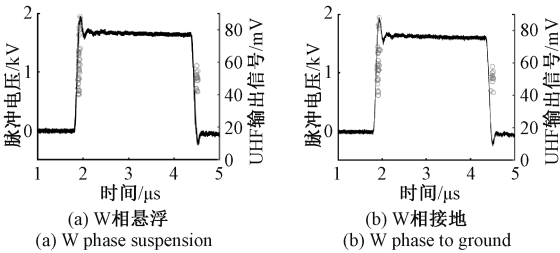


图 17 W 相在两种情况下 PRPD 谱图
Fig. 17 PRPD spectrum in two cases of W phase

4.2 B 电机绝缘薄弱点定位

与上述流程相同,表 3 显示各绝缘部位 PDIV 平均值。图 18(a)为 B 电机 U 相匝间绝缘 PDIV 测试图,值为 2.99 kV,其中上升沿处峰值电压为 2.68 kV,直流母线电压为 2.2 kV, $U_{\max}$ 除以 U 为 1.218, k 等于 1.69。

表 3 B 电机各绝缘部位 PDIV 测试

Table 3 PDIV test for each insulation part of motor B

正弦电压下主绝缘 PDIV/kV	正弦电压下相间 绝缘 PDIV/kV	脉冲电压下匝间 绝缘 PDIV/kV
U-地 2.38	U-V 1.90 1.12	U 2.99
V-地 2.29	V-W 2.06 1.22	V 3.15
W-地 2.45	W-U 2.12 1.25	W 3.53

比较表 3 数据,得 UV 相间绝缘最薄弱。且 U 相匝间 PDIV 大于正弦下 UV 相间绝缘 PDIV,满足进一步绝缘缺陷点判定条件。将 U 相引接线接高压,U 相另一端与 V 相并联接地。图 18(b)为 V 相接地后 PDIV 测试图,结果为 2.31 kV,与正弦下测试相差 0.41 kV,B 电机 UV 相间绝缘薄弱点也不位于绕组首端。

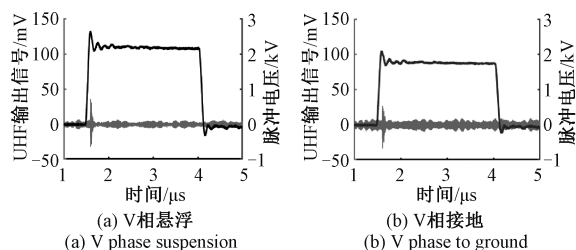


图 18 V 相在两种情况下 PDIV 测试图

Fig. 18 PDIV test diagram in two cases of V phase

4.3 C 电机绝缘薄弱点定位

通过绝缘薄弱点识别流程后,各相绝缘部位 PDIV 值如表 4 所示,其中 $U_{\max}$ 除以 U 等于 1.18,则 k 为 1.735。

表 4 C 电机各绝缘部位 PDIV 测试

Table 4 PDIV test for each insulation part of motor C

正弦电压下主绝缘 PDIV/kV	正弦电压下相间 绝缘 PDIV/kV	脉冲电压下匝间 绝缘 PDIV/kV
U-地 2.64	U-V 4.35 2.51	U 4.81
V-地 2.34	V-W 4.26 2.46	V 5.02
W-地 2.52	W-U 4.48 2.58	W 5.30

判定 V 相主绝缘最薄弱,且满足进一步绝缘缺陷判定条件。再将 V 相引接线接高压,V 相另一端与机壳并联接地。根据图 19,C 电机在此连接下测得 PDIV 为

2.36 kV,与正弦下 V 相主绝缘 PDIV 测试值基本相等。因此,判定主绝缘薄弱点位于 V 相绕组首端。

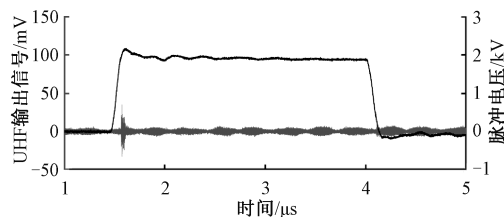


图 19 机壳接地时 PDIV 测试图

Fig. 19 PDIV test diagram of chassis grounding

4.4 耐电晕寿命测试

为验证方法实用性,对 3 台已检测绝缘薄弱点的电机进行寿命实验,击穿部位与上述方法检测的薄弱部位均具有一致性。其中 B 电机寿命实验流程如下:

使 B 电机 U 相引接线接高压,U 相另一端、V 相及机壳接地,并加压击穿,外加电压峰峰值为 3 kV。B 电机击穿后,用型号为 HIOKI IR4057 兆欧表在 500 V 量程下测试各绝缘部位的绝缘电阻值。发现红色测试线接 U 相,黑色测试线接 V 相时,蜂鸣器响起,测试值为 0.001 MΩ,其余各相相间绝缘及对地绝缘的绝缘电阻测试值都大于 2 000 MΩ,说明电机 B 的 UV 相间绝缘已经击穿。仅使用兆欧表无法判定匝间是否已击穿,选择倍频交流电源验证。若某一相匝间已击穿,则线圈电感量必然降低^[23]。根据式(5),若频率增大,感抗量逐渐减少,击穿相电流必然大于其他两相电流。

$$\Delta X = 2\pi f \Delta L \quad (5)$$

选择 TH2828S 数字电桥,设置电源输出为有效值 20 V 的正弦电压,在页面中打开电流监视值,测试频率分别选取 50、500、1、2 kHz。使插头插入电机 B 同相两端,表 5 为不同频率下记录的电流值。

表 5 不同频率下三相绕组内电流值

Table 5 The current value of three-phase windings under different frequency values

频率/Hz	I_U/mA	I_V/mA	I_W/mA
50	139.8	139.8	139.7
500	54.38	54.50	54.48
1 000	29.09	29.39	29.07
2 000	15.09	15.41	14.98

频率为 2 kHz 时,三相电流平均值为 15.16 mA,最大值与最小值的差值和平均值百分比仅约 2.8%。证明高频下三相电流仍平衡,匝间绝缘并未击穿。

因此,通过三步法,可在变频电机在线运行前得知其

绝缘薄弱点位置,以针对性提高薄弱相的电气绝缘性能,保证电机长久运行。

5 结 论

根据现行 IEC 标准,难以识别定子绕组中绝缘薄弱点,本文联合重复脉冲和正弦 PDIV 离线测试技术,提出定位变频电机绝缘薄弱点的“三步法”。结合仿真与实验综合验证了三步法准确性高,并探究了脉冲上升时间对绝缘薄弱点定位的影响,得到以下结论:

1) 选择覆盖高介电常数介质层的特高频天线,可提升 PD 信号高频段增益;通过测试,重复脉冲电压特高频天线测试灵敏度接近正弦电压直测法。

2) 判定绝缘薄弱点,需首先在脉冲电压下测试匝间绝缘 PDIV;然后在正弦电压下进行主与相间绝缘 PDIV 测试;最后根据三相变频电机特性,对两平台下 PDIV 值进行处理和对比,确定电机绝缘薄弱点。

3) 相间或主绝缘为薄弱点时,可使悬浮相或机壳接地,并在脉冲电压下测试此时 PDIV,通过与正弦电压下测试的相间或主绝缘 PDIV 对比,能进一步定位绝缘薄弱点是否位于绕组首端。

4) 脉冲上升时间增加会使电机匝间绝缘 PDIV 变大,因此,不同上升时间下电机绝缘最薄弱点位置也可能改变。离线定位电机绝缘薄弱点时,脉冲上升时间应与变频电机在线运行时的上升时间一致。

参考文献

- [1] PASTURA M, NUZZO S, IMMOVILLI F, et al. Partial discharges in electrical machines for the more electric aircraft—part I: A comprehensive modeling tool for the characterization of electric drives based on fast switching semiconductors [J]. IEEE Access, 2021, 9: 27109-27121.
- [2] ABADIE C, BILLARD T, LEBEY T. Partial discharges in motor fed by inverter: From detection to winding configuration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 55(2): 1332-1341.
- [3] 王鹏, 赵政嘉, 刘雪山, 等. 电力电子设备中的电气绝缘问题 [J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2309-2322.
WANG P, ZHAO ZH J, LIU X SH, et al. Electrical insulation problems in power electronics devices [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2309-2322.
- [4] WANG P, LI P, CAVALLINI A, et al. Influence of ambient humidity on PDIV and endurance of inverter-fed motor insulation [C]. 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Canada, 2019: 201-204.
- [5] FERREIRA R S, FERREIRA A C. Transient voltage distribution in induction motor stator windings using finite elements method [C]. 2018 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), USA, 2018: 737-742.
- [6] MEYER D R, CAVALLINI A, LUSUARDI L, et al. Influence of impulse voltage repetition frequency on RPDIV in partial vacuum [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3): 873-882.
- [7] 刘涛, 董国静, 李庆民, 等. 高频脉冲下电-热应力对聚酰亚胺绝缘寿命的耦合作用分析 [J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2504-2510.
LIU T, DONG G J, LI Q M, et al. Coupling effect of electrical and thermal stresses on insulation life of polyimide under high frequency impulses [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2504-2510.
- [8] RUMI A, LUSUARDI L, CAVALLINI A, et al. Partial discharges in electrical machines for the more electrical aircraft, part III: Preventing partial discharges [J]. IEEE Access, 2021, 9: 30113-30123.
- [9] 钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161.
QIAN ZH M, ZHANG J M, SHENG K. Status and development of power semiconductor devices and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161.
- [10] HOPNER V N, WILHELM V E. Insulation life span of low-voltage electric motors—a survey [J]. Energies, 2021, 14(6): 1738.
- [11] Rotating electrical machines-Part 18- 41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters—qualification and quality control tests: IEC 60034-18-41: 2014 + AMD1: 2019 CSV [S/OL]. [2021-10-14]. <https://webstore.iec.ch/publication/65356>.
- [12] Rotating electrical machines-Part 27-5: Off-line measurement of partial discharge inception voltage on winding insulation under repetitive impulse voltage: IEC TS 60034-27-5: 2021 [S/OL]. [2021-10-14]. <https://webstore.iec.ch/publication/31870>.
- [13] Rotating electrical machines-part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation: IEC 60034- 27-1: 2017 [S/OL]. [2021-10-14]. <https://webstore.iec.ch/publication/29254>.
- [14] 李佩宜, 王鹏, 张羲海, 等. 基于深度信念网络的变频电机局部放电起始电压预测 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 121-130.
LI P Y, WANG P, ZHANG X H, et al. Prediction of

- partial discharge inception voltage for inverter-fed motor based on deep belief network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 121-130.
- [15] 陈君强, 王鹏, 黄寅, 等. 变频电机绝缘局放电压自动测试系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 114-121.
- CHEN J Q, WANG P, HUANG Y, et al. Design of an automatic test system for partial discharge voltage of inverter-fed motor insulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (7): 114-121.
- [16] TOZZI M, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors-part 1: Standard procedure[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(4): 16-26.
- [17] LINDELL E, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Off-line PD testing of converter-fed wire-wound motors: Why IEC 60034-18- 41 may fail? [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17: 1385-1395.
- [18] LEE S B, NAEINI A, JAYARAM S, et al. Surge test-based identification of stator insulation component with partial discharge activity for low voltage AC motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2541-2549.
- [19] 贾朱植, 杨理践, 祝洪宇, 等. 基于高分辨率谱估计的早期转子断条故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 279-287.
- JIA ZH ZH, YANG L J, ZHU H Y, et al. High-resolution spectral analysis for incipient broken rotor bar diagnosis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 279-287.
- [20] 马世金, 王鹏, 董涵, 等. 用于高频脉冲电压下变频电机绝缘放电检测的特高频天线设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3451-3459.
- MA SH J, WANG P, DONG H, et al. Design of ultra-high frequency antenna for discharge detection under high frequency impulsive voltage conditions for inverter-fed motors insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3451-3459.
- [21] 李佩宜, 王鹏, 马世金, 等. 重复脉冲参数对变频电机绝缘 PDIV 测试信噪比影响研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2981-2990.
- LI P Y, WANG P, MA SH J, et al. Influence of repetitive impulse voltage parameter on the signal-to-noise ratio of PDIV test for inverter-fed motor [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2981-2990.
- [22] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393-405.
- [23] 魏书荣, 李正茂, 符杨, 等. 计及电流估计差的海上双馈电机定子绕组匝间短路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3969-3977, 4038.
- WEI SH R, LI ZH M, FU Y, et al. Inter-turn faults diagnosis on stator windings of offshore wind DFIGs considering current esti-mated difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3969-3977, 4038.

作者简介



郭厚霖, 2019 年于长江大学获学士学位, 现为四川大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源设备绝缘检测技术研究。

E-mail: 1963148567@qq.com

Guo Houlin received his B. Sc. degree from Yangtze University in 2019. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Sichuan University. His main research interests include insulation testing technology research of new energy equipment.



王鹏(通信作者), 分别于 2004 年、2007 年和 2013 年获得西南交通大学学士、硕士和博士学位, 现为四川大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源及电力电子装备中的绝缘系统性能评估。

E-mail: pwang@scu.edu.cn

Wang Peng (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Southwest Jiaotong University in 2004, 2007, and 2013, respectively. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Sichuan University. His main research interests include performance assessment of insulation systems in new energy and power electronic equipment.