

# 重复脉冲极性及其占空比对变频电机绝缘局部放电起始电压的影响研究

郭厚霖<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 罗英露<sup>2</sup>, 李伟业<sup>2</sup>, 李 想<sup>1</sup>

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

**摘要:** 研究重复脉冲电压参数对变频电机绝缘局部放电起始电压(PDIV)的影响规律, 有利于低压散绕电机的绝缘性能评估。本文搭建了重复脉冲及正弦电压下的局部放电测试系统, 通过对双绞线施加不同电压波形, 研究了重复脉冲极性及其占空比(0.01%~70%)对I型变频电机匝间绝缘PDIV的影响规律及机理, 分析了正弦与脉冲电压下PDIV测试等效条件。结果表明: 占空比为50%时, 脉冲电压双极性下试样PDIV约低于单极性下PDIV的12%; 随着脉冲占空比的增加, 单极性下PDIV值逐渐升高, 双极性下PDIV变化较小, 但呈现先增加后减小的趋势; 当单极性脉冲占空比为10%以下, 双极性脉冲占空比为30%~70%时, 与正弦电压下PDIV测试值最接近。对此, 采用脉冲电压测试电机绝缘PDIV时, 需考虑占空比的选取; 且在一定电压参数下, 正弦与脉冲电压PDIV测试基本等效。

**关键词:** 占空比; 极性; 局部放电起始电压; 脉冲电压; 双绞线; 变频电机

DOI: 10.12067/ATEEE2108007

文章编号: 1003-3076(2022)07-0038-11

中图分类号: TM85

## 1 引言

近年来, 随着以碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)为代表的第三代宽禁带半导体器件在变频技术领域的应用, 变频电机调速性能以及节能优势得到更大提高<sup>[1,2]</sup>。然而, 电力电子设备的开断频率和开断速度也将显著提升, 变频电机端部脉冲电压上升时间缩短至纳秒级<sup>[3]</sup>。因此, 由电缆特征阻抗<sup>[4]</sup>与电机特征阻抗不匹配引起的绕组端部过电压、电机的电容电感分布参数引起的绕组内部电压分布不均现象将更加严重<sup>[5]</sup>。当真空浸渍不能完全消除电机匝间气隙时, 绝缘中场强集中区域局部放电(Partial Discharge, PD)将以较高概率出现, 不断腐蚀电机有机绝缘材料, 最终导致电机绝缘失效<sup>[6]</sup>。

为避免变频电机在服役期间, 因局部放电而导致电机绝缘部位的快速失效, 国际电工技术委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)针对

I型和II型变频电机的绝缘测试, 发布了标准 IEC 60034-18-41<sup>[7]</sup>及 IEC 60034-18-42<sup>[8]</sup>。根据标准要求, I型变频电机额定电压一般在900 V以下, 部分绝缘结构无耐电晕能力, 必须进行正弦和重复脉冲下局部放电起始电压(Partial Discharge Inception Voltage, PDIV)测试; II型电机允许少量PD, 需开展耐电晕寿命测试。其中, 由于电机主绝缘和相间绝缘分别承受逆变器输出的相电压和相间电压, 可采用正弦电压测定其PDIV, 然而对于电机匝间绝缘, 为模拟脉宽调制电压下绕组内部电压分布不均现象, 应采用与电机端部电压具有相似上升时间的重复脉冲电压, 测定其PDIV<sup>[9,10]</sup>。此外, IEC标准规定双绞线模型可模拟电机匝间绝缘最严峻的情况, PDIV定义为试样首次发生放电时, 其所承受的电压峰值<sup>[7]</sup>。

目前, 正弦和直流电压下电机绝缘PD测试研究较为深入<sup>[11]</sup>, 重复脉冲下PD检测技术尚未成

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977134)

作者简介: 郭厚霖(1997-), 男, 湖北籍, 硕士研究生, 研究方向为变频电机绝缘状态评估及相关检测技术;

王 鹏(1981-), 男, 山东籍, 副教授, 博士生导师, 博士, 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。

熟。研究表明,重复脉冲参数的改变对电机绝缘 PD 统计特性会产生较大影响,进而影响材料寿命<sup>[12,13]</sup>。其中,脉冲上升时间过短时,电机绝缘 PDIV 可能偏大<sup>[14]</sup>;脉冲在无过电压与有过电压时,频率对 PDIV 影响不同<sup>[15,16]</sup>。然而,过电压存在时,脉冲极性和占空比对电机绝缘 PDIV 影响规律,以及正弦与脉冲电压下 PDIV 测试等效条件报告较少,为提高变频电机 PDIV 测试的准确性,确定电压波形对双绞线 PDIV 测试的影响,有必要展开研究。

本文固定脉冲电压的上升时间和频率分别为 40 ns 与 50 Hz, 搭建了具有 0.01% ~ 70% 占空比的高压脉冲电源, 基于特高频检测法构建了脉冲下 PDIV 测试平台, 基于直测法和 PD-Base 搭建了正弦下电机 PDIV 测试系统。同时, 以双绞线模型模拟变频电机匝间绝缘, 并在不同极性及占空比的脉冲电压下, 进行大量 PDIV 测试。首先分析了不同脉冲极性及占空比对 PDIV 变化规律的影响, 然后给出相应的机理解释, 最后确定了脉冲与正弦电压下双绞线 PDIV 测试的等效条件。此研究有望为 I 型变频电机绝缘测试提供实验依据及理论基础。

## 2 PDIV 测试系统

## 2.1 试样制作

为构建变频电机匝间绝缘的等效模型,依据标准 GB/T4074.5—2008<sup>[17]</sup>,测试试样由两根直径为 1.25 mm、绝缘厚度为 60  $\mu\text{m}$ 、绝缘等级为 B 级(耐热 130  $^{\circ}\text{C}$ )的聚酯亚胺漆包线绕制而成。具体测量及制作过程如下:

首先,利用金相显微镜测量漆包线直径和绝缘层厚度;然后,将漆包线一端的绝缘漆刮掉,绝缘层上涂抹导电材料,通过介电谱仪测量 50 Hz 条件下聚酯亚胺的电容  $C_p$ ,利用式(1)求得绝缘层相对介电常数  $\epsilon_r$  为 3.45<sup>[18]</sup>;最后,将两漆包线去除一端绝缘漆,夹角约成 60°,如图 1 所示,其中箭头 1 指向绝缘接触点。

$$\varepsilon_r = \frac{C_p \ln(D_{\text{out}}/D_{\text{in}})}{2\pi\varepsilon_0 l} \quad (1)$$

式中,  $D_{\text{out}}$  和  $D_{\text{in}}$  分别为漆包线直径和裸导线直径;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $l$  为导电涂层的长度。

## 2.2 局部放电测试平台

局部放电测试平台如图 2 所示。在双绞线高压端施加正弦及脉冲电压。其中, 正弦电压由功率放大器产生; 单极性脉冲电压由正负直流稳压电源及

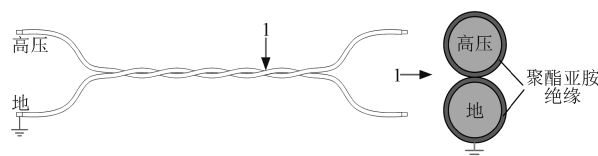


图 1 聚酯亚胺漆包线绞线对试样

Fig.1 Sample of polyester-imide enameled wires

逆变模块产生;为保证双极性脉冲电压的上下幅值一致,对交流电源输出的电压进行放大整流滤波及逆变处理。高压探头以 1 000 : 1 的分压比将试样高压端电压通入示波器通道 1 中,可避免接入电缆分布参数的影响。为保证环境因素一致,绕制的双绞线放入恒温控箱,温度和湿度分别设置为 25 ℃ 和 40%。同时,正弦电压下通过直测法采集放电,耦合电容与检测阻抗提取 PD 信号,PD-Base 用于处理 PD 信号并获得放电相位统计特性;脉冲电压下通过特高频 (Ultra-High Frequency, UHF) 天线采集 PD,为避免噪声干扰,信号经高通滤波器及检波器处理,再接入示波器通道 2 中,数字示波器采样率设置为 5 Gs/s。

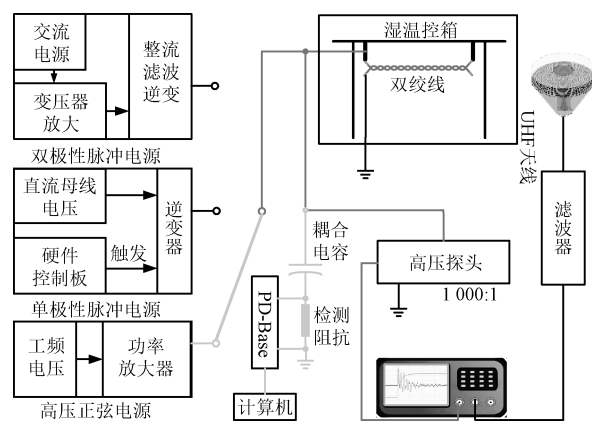


图2 局部放电测试平台

Fig.2 PD test platform

双绞线 PDIV 测试过程中,固定电压上升率和上升时间等关键参数,在示波器上设置 PD 触发阈值和单次触发模式,以精准得到首次 PD 发生时对应的电压波形。逐渐升高直流母线电压的幅值,直到第一次 PD 出现,停止升压,此时,电压峰峰值记为 PDIV。另外,为保证 PDIV 测试结果的准确性,在相同电压参数及环境下,对两根按标准绕制的双绞线分别测试五次,以确定 PDIV 波动范围。

### 2.3 局部放电信号采集

重复脉冲电压下进行双绞线 PDIV 测试时,电力电子器件开断会产生强烈的电磁干扰,放电信号

易被淹没。当脉冲电压上升时间为 200 ns,对天线采集的干扰和放电时域信号进行短时傅里叶变换以分析其时频特性,分布如图 3 所示。电磁干扰能量集中在 400 MHz 以下,而放电信号在频域上的能量分布可延伸至 1.5 GHz。为避免检测 PDIV 时,放电信号无法分辨及信噪比较差,有 3 步需进行:①在传统宽频带阿基米德螺旋天线的基础上,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,实现放电信号频段的高增益<sup>[19]</sup>。②在天线检测输出端加入 500 MHz 高通滤波器,以滤除低频干扰。③使天线距离待测试样约 12 cm,并保证天线高度与湿温控制箱内试样的高度一致,以实现电磁波的近场检测<sup>[20]</sup>。

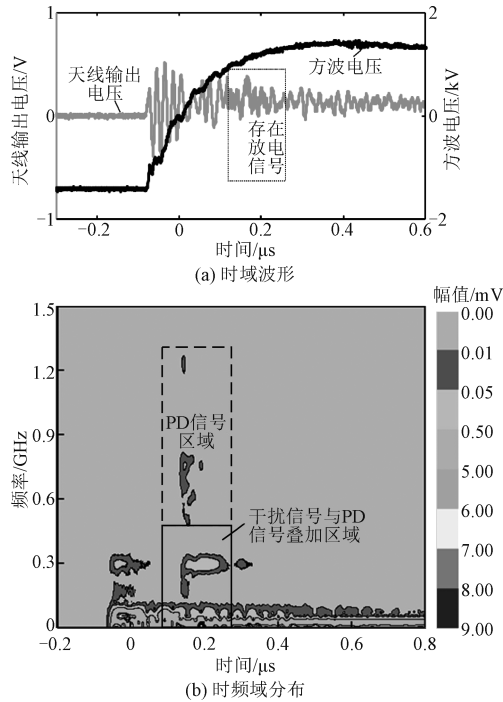


图 3 采集信号时频域分布

Fig.3 Time-frequency distribution of acquisition signal

在正弦电压下进行绞线对的 PDIV 测试时,放电能量集中在 400 MHz 以下,上述特高频天线不具优势,PD 信号易被空间白噪声干扰,因此采用直测法<sup>[21]</sup>。采用 PD-Base,在软件中设置触发信号,可得到局部放电相位谱图;根据沿面和内部放电的相位统计特性,联合时域和频域分析方法,能识别放电过程中可能存在的窄带和宽频带干扰。

2.4 实验电压参数

采用重复脉冲电压对双绞线进行 PDIV 测试时,需考虑绝缘 PD 激发的脉冲电压参数选择。本

文研究脉冲极性、占空比、对双绞线 PDIV 测试影响,需控制变量。因试样绝缘层的介电常数是在工频下测得,频率选取为 50 Hz。

上升时间确定为 40 ns,主要原因有两点:

- (1)较短的脉冲上升时间是发展趋势,导致电机端部过电压也容易存在。上升时间为 40 ns 时,双绞线高压端有过电压产生。
- (2)可保证在单极性不同占空比的脉冲电压下,有效电压持续时间累积相同,放电概率基本相同,以研究空间电荷和界面极化电荷对双绞线 PDIV 测试的影响。

通过搭建不同的电源平台,可产生单极性、双极性的脉冲电压和正弦电压。双绞线高压端脉冲波形的占空比,与控制固态开关的信号相同。因此,调整低压触发信号可实现脉冲电压占空比的变化,参数见表 1。

表 1 不同极性及占空比下的重复脉冲电压参数

Tab.1 Repetitive pulse voltage parameters under different polarities and duty cycles

单极性电压 持续时间/ $\mu\text{s}$	占空比 (%)	双极性正电压 持续时间/ $\mu\text{s}$	占空比 (%)
2	0.01	2	0.01
20	0.1	20	0.1
200	1	200	1
2 000	10	2 000	10
6 000	30	6 000	30
10 000	50	10 000	50
14 000	70	14 000	70

图 4 为试样高压端的双极性脉冲电压波形。其中,占空比为 50%、上升时间为 40 ns、过电压系数为 1.166,满足上述测试要求。

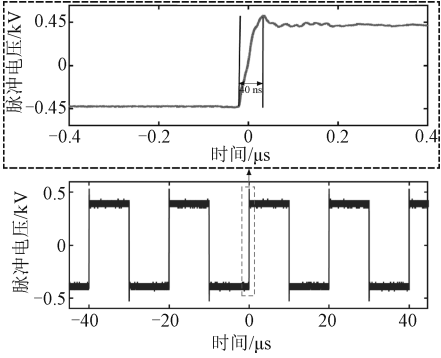


图 4 试样高压端脉冲电压波形

Fig.4 Pulse voltage waveform at high voltage end of sample

### 3 实验结果

#### 3.1 脉冲电压极性对 PDIV 测试的影响

根据表 1 的电压参数,在频率为 50 Hz、占空比为 50%、上升时间为 40 ns 下,对双绞线施加正单极性、负单极性和双极性的脉冲电压,测得的 PDIV 值如图 5 所示,图 6 为试样在各极性脉冲电压下,PD 首次发生时的电压波形图。全文中,占空比为 50% 的脉冲电压简称为方波电压。

从图 5 可看出,方波电压双极性下双绞线 PDIV 约低于单极性下 PDIV 的 12%,相差 180 V,正单极性与负单极性下 PDIV 测试值差别不大。表明正单极性和负单极性重复脉冲电压不会影响单极性下 PDIV 的测试,但是,双极性与单极性脉冲电压会对试样的 PDIV 值有一定影响,原因可能是空间电荷和界面极化电荷的积累畸变了气隙电场。

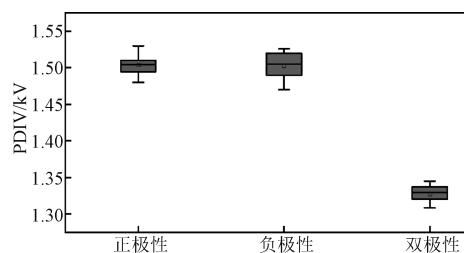


图 5 不同脉冲极性下 PDIV 值

Fig.5 PDIV value under different pulse polarities

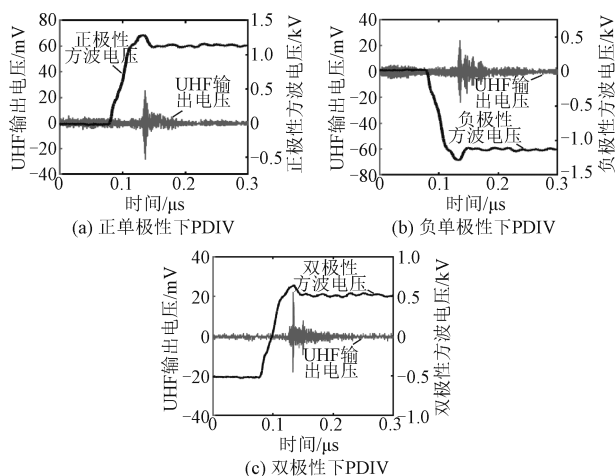


图 6 不同脉冲极性下首次 PD 发生时相位图

Fig.6 Phase diagram of first PD occurrence under different pulse polarities

#### 3.2 单极性脉冲电压占空比对 PDIV 测试的影响

根据表 1 电压参数,在频率为 50 Hz、极性为单极性、上升时间为 40 ns 下,改变脉冲电压持续时间,即占空比从 0.01%~70%变化。图 7 为双绞线

在不同占空比下 PDIV 的测试结果。图 8(a)和图 8(b)分别为试样在正单极性脉冲电压下,占空比为 10%和 70%时对应的首次 PD 图,发现 PD 相位位于上升沿。图 8(c)和图 8(d)分别为试样在负单极性脉冲电压下,占空比为 0.1%和 30%时对应的首次 PD 图,在下降沿处首先发生放电。

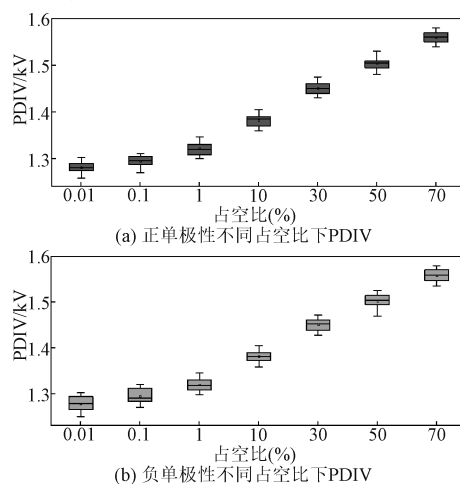


图 7 单极性不同占空比下的 PDIV 值

Fig.7 PDIV values under unipolar different duty cycles

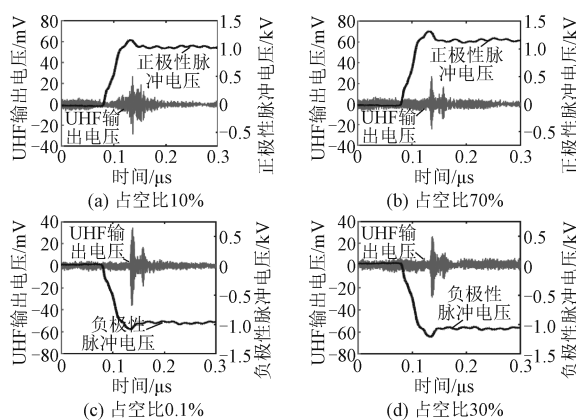


图 8 单极性不同占空比下首次 PD 发生时相位图

Fig.8 Phase diagram of first PD occurrence under unipolar different duty cycles

分析图 7 中的测试数据,认为不同占空比下 PDIV 变化趋势较慢,但呈现一定的趋势。电压持续时间越低,PDIV 越小。双绞线在 70% 的占空比下,PDIV 值明显高于占空比为 0.01% 时的 PDIV,约为 280 V,此 PDIV 测试的变化规律与文献[22]结论一致,但其并未有详细的机理分析。

另外,试样在占空比不同的正单极性与负单极性脉冲电压下,PDIV 值相等且表现相同变化规律,即随着占空比的变大,PDIV 越大。



### 3.3 双极性脉冲电压占空比对 PDIV 测试的影响

当脉冲电压的频率为 50 Hz、极性为双极性、上升时间为 40 ns、正电压的持续时间在 2~14 000  $\mu$ s 范围内发生变化时,图 9 的结果表明 PDIV 变化较小。但是,随着占空比的变大,PDIV 总体呈现先升高后下降的趋势,尤其在占空比为 50% 时,PDIV 最大,图 9 中最大值与最小值相差约 100 V。图 10 为占空比在 30% 及 70% 时,PD 首次出现对应的波形图,可看出在此两种占空比下,PDIV 值相差不大,但放电位置分别位于上升沿与下降沿。上述现象可从极性翻转时,电荷分布对气隙电场畸变的角度进行分析。

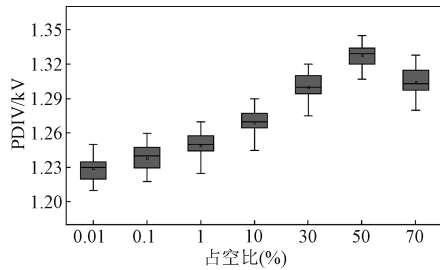


图 9 双极性不同占空比下的 PDIV 值

Fig.9 PDIV value under bipolar different duty cycles

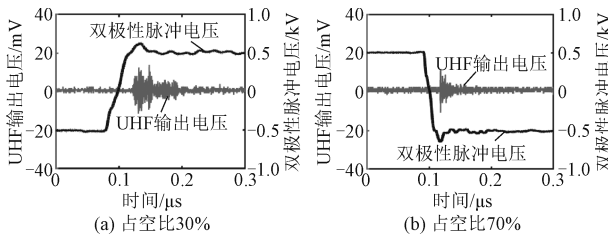


图 10 双极性不同占空比下首次 PD 发生时相位图

Fig.10 Phase diagram of first PD occurrence under bipolar different duty cycles

### 3.4 正弦与脉冲电压下 PDIV 测试等效条件

为得到脉冲与正弦电压测试的等效条件,需先在相同环境下采用频率为 50 Hz 的正弦电压测试双绞线 PDIV,共得到十组数据,区间值为 1.31~1.36 kV。再与脉冲在不同极性及占空比下测得的 PDIV 对比分析,如图 11 所示。根据图 11 中相交区域,确定当环境因素相同、脉冲频率为 50 Hz、过电压系数为 1.166 左右、单极性脉冲占空比为 10% 以下、双极性脉冲占空比为 30%~70% 时,正弦与脉冲电压下双绞线的 PDIV 测试基本能等效。

## 4 分析讨论

为分析脉冲极性及其占空比对双绞线 PDIV 测试

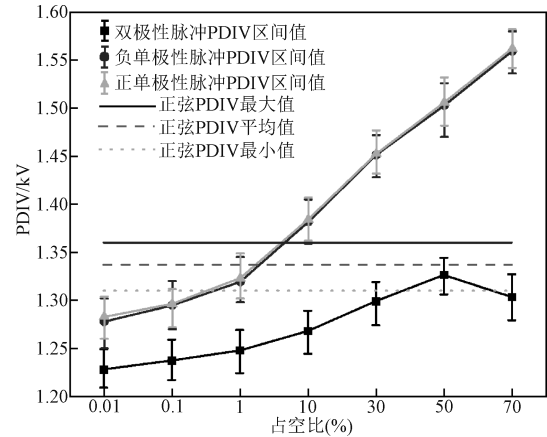


图 11 正弦与脉冲电压下平均 PDIV 值

Fig.11 Average PDIV value under sine and pulse voltages

影响,需清楚电荷分布对气隙电场的畸变作用。针对双绞线的结构:在 PDIV 测试过程中,未出现由 PD 导致的表面电荷;电子式极化可忽略;偶极子式极化存在于绝缘层中,极化时间短,对气隙电场影响小;因夹层极化存在界面自由电荷的转移,极化时间长,对气隙电场影响可能性最大。同时,文献[23]也认为在双绞线中,电极会注入载流子在绝缘层形成空间电荷[24];外加电场作用下,不连续界面的自由电荷沿电场方向发生定向移动,被气固界面陷阱所捕获会形成界面极化电荷[25,26]。因此,推测双绞线中空间电荷及界面极化电荷均对 PDIV 测试有影响。

首先,研究空间电荷与界面极化电荷的极性。研究表明:采用电声脉冲法、热刺激电流法、光电子学测量方法检测固体电介质空间电荷的积累特性时,绝缘层中的空间电荷极性将与其靠近的电极保持一致[27-29]。外加电场下,电极与介质间势垒的降低使载流子容易发射,导带中电子由电极通过场助热发射注入到介质导带中[30,31]。其中,注入载流子密度由 Schottky 效应确定[32],通过式(2)得到注入电流密度  $J$ [24]:

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-\psi}{kT}\right) \exp\left(\frac{e}{kT} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right) \quad (2)$$

式中,  $A$  为理查森常数;  $\psi$  为注入势垒;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $e$  为元电荷;  $T$  为绝对温度;  $E$  为电场强度。可看出,载流子发射电流密度随电场强度增大而增大。

根据不连续界面的麦克斯韦方程,界面极化电荷  $\sigma$  可由式(3)决定[33]:

$$\sigma = \frac{\gamma_2 \epsilon_1 - \gamma_1 \epsilon_2}{\gamma_2 l_0 + \gamma_1 d} V \quad (3)$$

式中,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别为气隙以及绝缘层的电导率;  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为双绞线气隙及绝缘层的介电常数;  $V$  为外加电压的一半;  $d$  和  $l_0$  分别为单漆包线绝缘层和一半气隙的厚度。结构如图 12(a) 所示。若电场线由固体穿入气体介质, 则此气固界面靠近的电极为正电极,  $V > 0$ 。由于  $\gamma_1 > \gamma_2$ , 式(3)的绝缘层  $\varepsilon_2$  约为 3.45,  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ , 则电荷  $\sigma$  为负,  $\sigma$  极性与靠近的电极极性相反, 即与图 12(a) 结构中电极注入的空间电荷极性相反。

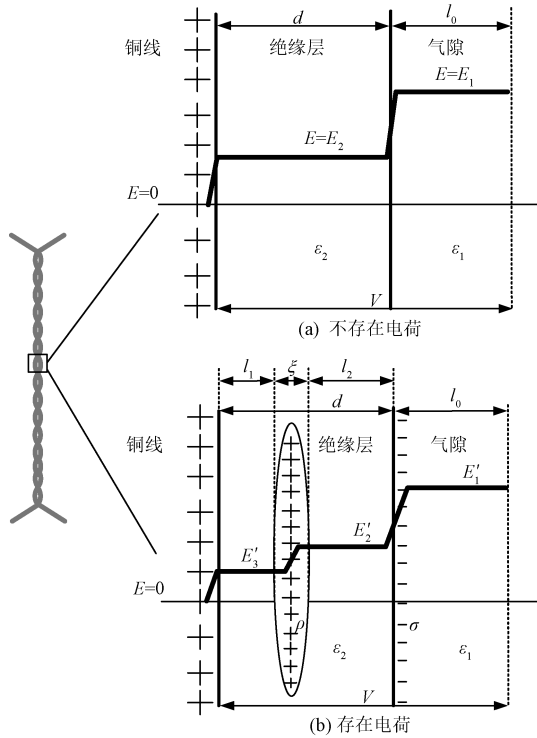


图 12 双绞线中的电场分布

Fig.12 Electric field distribution in twisted pair

其次,分析空间电荷和界面极化电荷对双绞线 PDIV 测试影响。为更好地直观分析,忽略脉冲电压下漆包线中电荷的分布。图 12(a) 所示为双绞线的半边结构,虚线为对称轴线。  $E_2$  为绝缘层内部电场强度。此时漆包线间气隙的场强  $E_1$  可由式(4)确定:

$$E_1 = \frac{V}{(\varepsilon_1/\varepsilon_2)d + l_0} \quad (4)$$

图 12(b) 为考虑空间电荷及气固界面电荷的分布对气隙间电场畸变的影响图,使  $V > 0$ 。其中,  $E'_2$  为未受空间电荷影响时的绝缘层内部电场强度,厚度为  $l_1$ ;  $E'_1$  为空间电荷作用时聚脂亚胺内部电场强度,厚度为  $l_2$ ;  $\xi$  为空间电荷厚度,与  $l_1$ 、 $l_2$  共同组成  $d$ ,但其值远小于  $d$ ,可忽略不计。根据麦克斯韦方程

组,两种电荷对气隙畸变后的电场  $E'_1$  可由式(5)计算<sup>[23,34]</sup>:

$$E'_1 = E_1 + \frac{\rho \xi l_1 + \sigma d}{\varepsilon_1 d + \varepsilon_2 l_0} \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为绝缘层中单位体积的电荷量。根据上述条件,  $\rho$  极性为正,  $\sigma$  极性为负。当  $\rho$  和  $\sigma$  等于 0 时,  $E'_1$  可由式(4)计算,说明式(5)具有准确性。

分析式(5),电极注入的载流子会稍微增强气隙的电场,降低 PDIV 值;然而,气固交界面的电荷会削弱气隙的电场,升高 PDIV 值。不同脉冲极性及其占空比下双绞线的 PDIV 测试结果将不受上述空间电荷和界面极化电荷的影响。

最后,分析空间电荷和界面极化电荷积累量。试样施加脉冲电压时,根据式(6)和式(7),电场强度及电压持续时间的不同将导致电极注入电荷数量的变化。

$$I = \int_s J dS \quad (6)$$

$$Q = \int_0^\infty I dt \quad (7)$$

式中,  $Q$  为电荷量;  $I$  为电流值;  $dS$  为与电流密度  $J$  相垂直的面积元。同理,当外加电压逐渐升高至试样空气间隙的起始电压时,气体间的场强将不断变大。由于界面极化维持时间可能为几小时,随单极性电压持续时间的变长,界面电荷量也会逐渐增加<sup>[35]</sup>。

#### 4.1 极性对 PDIV 测试影响分析

基于定性机理分析中的式(7),单极性下气固界面电荷会随着脉冲次数的变多逐渐增多,绝缘层也会一直被注入同极性载流子,电荷对气隙电场畸变的作用逐渐增大,两种电荷积累量的差距也会增加。双极性脉冲电压下,因极性一直处于反转,双绞线中的空间电荷及界面极化电荷无法积累,对气隙电场畸变的作用较小<sup>[36]</sup>。

图 5 中,在脉冲电压参数及外界条件相同时,单极性下双绞线 PDIV 测试值稍高于双极性下 PDIV 值,此现象可从电荷积累量的差距进行分析。根据式(5),推测气固界面极化电荷对气隙场强的作用大于绝缘层中空间电荷。原因是低电场下,载流子的注入需要温度加持<sup>[37]</sup>,单极性脉冲电压下,随着脉冲次数的变多,界面极化电荷积累量逐渐大于空间电荷积累量,更能抑制 PD 的发生。因此,相比双极性方波电压下 PDIV 的测试,单极性下 PDIV 结果会偏高;但由于外加电压较低,电荷的积累并不多,

仅会稍微影响 PDIV 的测试结果,50% 占空比双极性脉冲电压下试样 PDIV 约低于单极性下 PDIV 的 12%, 相差 180 V。

另外,根据图 5 和图 7,双绞线承受占空比相等的正单极性与负单极性脉冲电压时,PDIV 测试值基本相等。原因是双绞线为对称结构,电极材料及形状相同,绝缘层材料及厚度一致。因此,正负单极性

脉冲下注入空间电荷密度及深度的差异,对此试样中电荷积累总量影响不大,进而空间电荷与气固界面电荷对气隙电场畸变效果无较大差别。

可用图 13 表示占空比为 50% 单极性与双极性脉冲电压下,双绞线中空间电荷及界面极化电荷的积累过程。

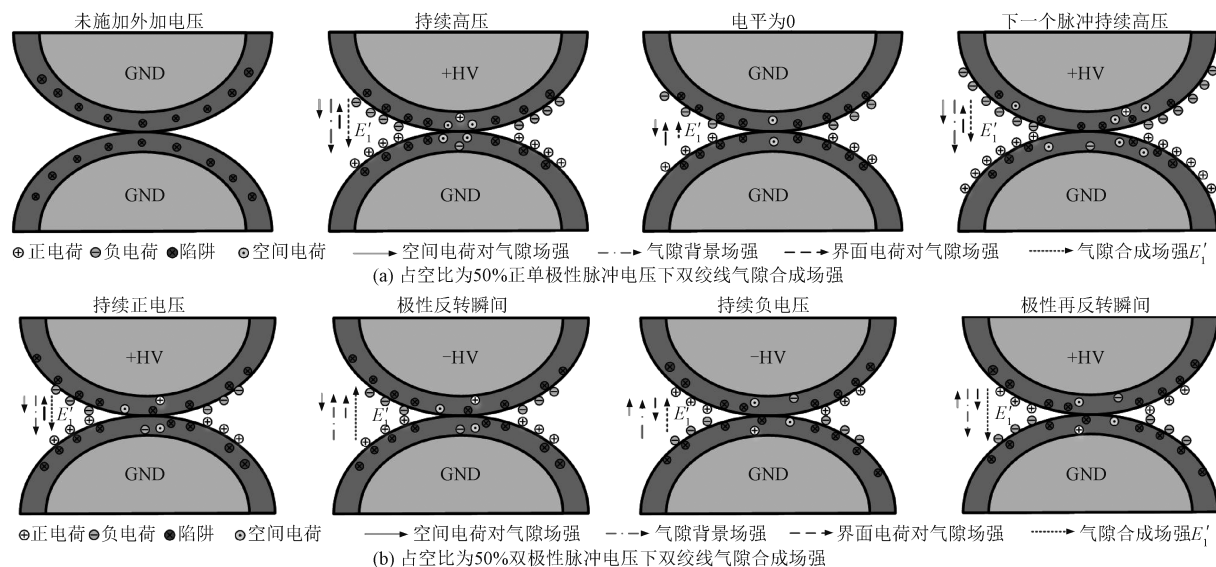


图 13 单极性与双极性脉冲电压下双绞线气隙合成场强

Fig.13 Synthesized field strength of twisted-pair air gap under unipolar and bipolar pulse voltages

#### 4.2 单极性下占空比对 PDIV 测试影响分析

每次测试双绞线的 PDIV 时,应保证脉冲电压上升速率一致。随着单极性脉冲电压占空比的增大,高压持续时间越长,金属电极将发射更多载流子进入绝缘层中,增加气隙场强,界面极化电荷也会增多,削弱气隙场强。

从图 7 可得,占空比的增大,试样 PDIV 值逐渐增高,具有单调性。基于式(5),认为单极性脉冲电压下 PDIV 测试时,随着高压持续时间的增加,界面极化电荷积累量与空间电荷积累量的差距也会逐渐变大。从而,相比电极注入载流子,夹层极化对气隙电场影响更大,导致 PDIV 的增大。但由于气隙放电发生前流注并未形成,未出现由 PD 导致的表面电荷积累,PDIV 测试值也相差并不大,图 7 中试样 PDIV 最大值约高于 PDIV 最小值的 21%, 相差 280 V。

因此,单极性下脉冲占空比对双绞线 PDIV 的影响,与上述极性对 PDIV 测试影响的机理分析一致。此推测也对文献[22]中出现同等现象的原因进行了较为合理的机理分析。

#### 4.3 双极性下占空比对 PDIV 测试影响分析

双极性脉冲电压在极性翻转时,瞬间场强最高,PD 发生概率较大。如图 13(b) 所示,当脉冲极性发生变化时,界面极化电荷和空间电荷来不及耗散。此时,气固界面的电荷将提升气隙的合成场强;空间电荷抑制气隙场强,与单极性脉冲电压下电荷对气隙场强的作用相反。

根据图 9 中 PDIV 测试结果,随着正电压持续时间的增加,PDIV 值变化很小,但呈现先增大后减小的趋势。原因在于电压极性的不断翻转,空间电荷与界面极化电荷无法在双绞线中积累,对气隙合成场强作用并不大。其中,最大值高于最小值的 8%,仅相差 100 V。

正电压与负电压持续时间成相反关系。当占空比为 50%,由于双绞线的对称性,正电压持续时间内界面极化电荷和空间电荷积累量将与负电压持续时间内相同;在占空比为 50%之前,负电压持续时间内电荷积累量占据主导作用;在占空比为 50%之后,正电压持续时间内电荷积累更多。

基于式(5)和式(7),随着占空比的增大,即正



电压持续时间逐渐增加,负电压持续时间相应减小。占空比在 50%之前,空间电荷和界面极化电荷积累的数量会减小,极性翻转时,气固界面电荷对气隙合成场强促进作用降低,导致 PDIV 测试结果稍微变大。然而,占空比在 50%之后,正电压持续时间起主导作用,电荷积累数量会相应增加,极性翻转时,界面极化电荷增强气隙的合成场强,导致 PD 更易发生,PDIV 值稍微下降。

另外,进行的十次实验中,在占空比为 30%和 70%下,首次 PD 基本分别位于上升沿与下降沿,原因与上述一致,相比空间电荷,界面极化电荷对气隙合成场强作用更强。30%占空比下,负电压持续时间较长,下一次极性翻转时,界面极化电荷促进气隙场强更大,使放电发生在上升沿。同理,70%占空比下,PD 发生在下降沿。而且,30%和 70%占空比下,PDIV 值基本相同。

综上,双极性下脉冲占空比对双绞线 PDIV 的测试影响,与上述研究得出的机理分析一致。即在双绞线的 PDIV 测试过程中,当测试时间及电压波形一致时,推测界面极化电荷积累量大于绝缘层中空间电荷积累量。

#### 4.4 正弦与脉冲电压下 PDIV 测试等效条件分析

正弦电压下双绞线的 PDIV 测试中,由于电压波形为双极性,界面极化电荷和空间电荷积累较少,且上升时间为 5 000  $\mu\text{s}$ ,极性翻转时,电荷量已衰减至极低。因此,每半周期内双绞线中电荷需重新积累,导致正弦电压下 PD 发生时,界面极化电荷数量较少,抑制气隙场强较弱。

当采用较低占空比的单极性脉冲电压测试双绞线 PDIV 时,电荷积累量也较低,与正弦电压下电荷积累量可能相似。再根据图 11,推测单极性脉冲电压占空比为 10%以下时,正弦与脉冲电压下 PDIV 测试可基本等效。

当采用双极性脉冲电压测试双绞线 PDIV 时,与正弦电压下试样中电荷相比,电荷积累量同样较少。但脉冲极性的快速翻转,使电荷对气隙场强作用与正弦下不同。若脉冲占空比为 50%,电荷积累量最少,对气隙电场增强作用最低,所以更贴近正弦电压下 PDIV 值,此现象与文献[23]具有一致性。再根据图 11,认为双极性脉冲占空比为 30%~70%时,与正弦电压下 PDIV 测试具有一定等效性。

## 5 结论

在具有占空比与极性可调的重复脉冲电压下,

通过大量实验研究了脉冲极性及其占空比对变频电机绝缘 PDIV 的影响,并根据空间电荷及界面极化电荷的积累给出较为详细的机理解释,然后对比分析了正弦与脉冲电压下 PDIV 测试的等效条件,得出如下结论:

(1)测试双绞线的 PDIV 过程中,当外界条件及电压波形一致时,若电压持续时间相同,根据实验现象,推测气固界面极化电荷对气隙合成场强的作用大于绝缘层中的空间电荷。

(2)过电压存在时,当脉冲占空比及频率一致,则正单极性与负单极性脉冲下 PDIV 相同,单极性下 PDIV 高于双极性下 PDIV。

(3)过电压存在时,脉冲占空比对 PDIV 测试有一定影响。不同极性下,占空比的改变会影响 PDIV 变化趋势:单极性下,随占空比的升高,PDIV 逐渐变大;双极性下,随正电压持续时间的变长,PDIV 呈现先增大后减小的趋势,且占空比为 50%时,双绞线 PDIV 测试值最大。

(4)当脉冲频率为 50 Hz、过电压系数为 1.166 左右、单极性脉冲电压占空比为 10%以下、双极性脉冲占空比为 30%~70%时,认为正弦与脉冲电压下聚酯亚胺双绞线 PDIV 测试基本等效。

#### 参考文献 (References):

- [1] Iwamuro N, Laska T. IGBT history, state-of-the-art, and future prospects [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64 (3): 741-752.
- [2] 钱照明, 张军明, 盛况 (Qian Zhaoming, Zhang Junming, Sheng Kuang). 电力电子器件及其应用的现状和发展 (Status and development of power semiconductor devices and its applications) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (29): 5149-5161.
- [3] 王鹏, 赵政嘉, 刘雪山, 等 (Wang Peng, Zhao Zhengjia, Liu Xueshan, et al.). 电力电子设备中的电气绝缘问题 (Electrical insulation problems in power electronics devices) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (7): 2309-2322.
- [4] 周淦, 王鑫源, 欧阳希, 等 (Zhou Qian, Wang Xinyuan, Ouyang Xi, et al.). 基于反射系数谱的 XLPE 电缆水树缺陷定位方法 (Location of water tree in XLPE cable based on reflection coefficient spectrum) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2021, 40 (7): 28-39.
- [5] Ferreira R S, Ferreira A C. Analysis of end-windings in-



- fluence on the transient voltage distribution in machine stator windings by a three-phase model [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36 (3): 2110-2119.
- [6] 周成 (Zhou Cheng). 高效电机用真空压力浸渍树脂及绝缘系统的研究 (Research on the vacuum pressure impregnation resins and performances of insulation system for high efficient motors) [D]. 苏州: 苏州大学 (Suzhou: Suzhou University), 2016.
- [7] International Electrotechnical Commission. 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 [S]. 2019.
- [8] International Electrotechnical Commission. Rotating electrical machines—Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters; IEC 60034-18-42 [S]. 2020.
- [9] Tozzi M, Cavallini A, Montanari G C. Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors—parts 1: Standard procedure [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26 (4): 16-26.
- [10] 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.
- [11] Kojima H, Ishida M, Hayakawa N, et al. Charge behavior and partial discharge characteristics on alumina dielectrics under AC voltage application in vacuum [A]. 2012 IEEE International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum [C]. Russia, 2012. 68-71.
- [12] 徐慧慧, 吴广宁, 朱光亚, 等 (Xu Huihui, Wu Guangning, Zhu Guangya, et al.). 高频方波脉冲下变频电机绞线对的局部放电特性分析 (Partial discharge characteristics of twisted pairs for inverter-fed motor under square impulse voltage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (4): 48-51, 57.
- [13] 徐洪英, 赵莉华, 王鹏, 等 (Xu Hongying, Zhao Lihua, Wang Peng, et al.). 重复脉冲占空比对变频电机绝缘局部放电统计特性的影响 (Influence of repetitive impulse wave voltage duty cycle on partial discharge statistics in inverter-fed motor insulation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (7): 2159-2167.
- [14] Rumi A, Cavallini A, Lusuardi L. Impact of WBG converter voltage rise-time and switching frequency on the PDIV of twisted pairs [A]. 2020 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD) [C]. Spain, 2020. 902-905.
- [15] 李颖, 王鹏, 郑昌江, 等 (Li Ying, Wang Peng, Zheng Changjiang, et al.). 重复脉冲频率对变频电机绝缘 PDIV 及 PDEV 影响研究 (Effect of repetitive impulsive frequency on PDIV and PDEV of inverter-fed motor insulation) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2020, 53 (6): 70-76.
- [16] Lusuardi L, Rumi A, Cavallini A, et al. Partial discharge phenomena in electrical machines for the more electrical aircraft. Part II: Impact of reduced pressures and wide bandgap devices [J]. IEEE Access, 2021, 9: 27485-27495.
- [17] 中国国家标准化管理委员会 (Standardization Administration of the People's Republic of China). 绕组线试验方法第 5 部分: 电性能 (Test methods for winding wires Part 5: Electrical properties): GB/T 4074.5—2008 [S]. 2008.
- [18] Lusuardi L, Cavallini A, Robles G, et al. Insulation design of low voltage electrical motors fed by PWM inverters [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2019, 35 (3): 7-15.
- [19] 马世金, 王鹏, 董涵, 等 (Ma Shijin, Wang Peng, Dong Han, et al.). 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 (Design of ultra-high frequency antenna for discharge detection under high frequency impulsive voltage conditions for inverter-fed motors insulation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (10): 3451-3459.
- [20] 彭超, 雷清泉 (Peng Chao, Lei Qingquan). 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系 (Relationship between characteristic in time and frequency domain of partial discharge ultra-high frequency signals and the radiation distance) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (2): 348-353.
- [21] International Electrotechnical Commission. Rotating electrical machines—Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation; IEC 60034-27-1 [S]. 2017.
- [22] Benmamas L, Teste P, Odic E, et al. Contribution to the analysis of PWM inverter parameters influence on the partial discharge inception voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26 (1): 146-152.
- [23] Fabiani D, Montanari G C, Cavallini A, et al. 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.
- [24] 钟小燕, 郑跃胜, 党斌, 等 (Zhong Xiaoyan, Zheng Yuesheng, Dang Bin, et al.). 直流电场下聚合物空间电荷分布的极性效应 (Polarity effect on space charge distributions in polymer under DC electric field) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (24): 6693-6701, 6922.
- [25] Takashima M, Soda K, Takada T. Measurement of electric charges at the interface between two dielectric layers using an electro-acoustic transducer technique [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, 23 (2): 287-295.
- [26] 高春嘉 (Gao Chunjia). 直流电场下油纸绝缘界面电荷产生机制及影响因素的研究 (Research on the mechanism and influencing factors of charge generation at the interface of oil-paper insulation under DC electric field) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2020.
- [27] 陈亚丁, 吴建东, 戴畅, 等 (Chen Yading, Wu Jiantong, Dai Chang, et al.). 方波电场下介质内部空间电荷的直接检测方法 (Direct detection method of space charge in dielectrics under square wave electrical field) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (6): 1767-1774.
- [28] 高宇, 王小芳, 杜伯学, 等 (Gao Yu, Wang Xiaofang, Du Boxue, et al.). 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展 (Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials: A review) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (7): 2219-2230.
- [29] 王健, 李庆民, 任瀚文, 等 (Wang Jian, Li Qingmin, Ren Hanwen, et al.). 固体电介质空间电荷的光电子学测量方法研究进展 (Advances in optoelectronics-based measurement of space charge in solid dielectrics) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (3): 55-66.
- [30] Emet V S, Adessi C, Capron T, et al. Low work-function cathodes from Schottky to field-induced ballistic electron emission: Self-consistent numerical approach [J]. Physical Review B, 2007, 75 (4): 045430.
- [31] 郑飞虎, 张冶文, 肖春 (Zheng Feihu, Zhang Yewen, Xiao Chun). 聚合物电介质的击穿与空间电荷的关系 (Relationship between breakdown in polymer dielectrics and space charge) [J]. 材料科学与工程学报 (Journal of Materials Science and Engineering), 2006, (2): 316-320, 285.
- [32] 李忠华, 尹毅, 朱军, 等 (Li Zhonghua, Yin Yi, Zhu Jun, et al.). 聚合物绝缘电热联合老化的陷阱理论和实验验证 (Trap theory of combined aging under electrical and thermal stress in polymers and its test verification) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 19 (2): 70-74.
- [33] 殷之文 (Yin Zhiwen). 电介质物理学 (Dielectric physics) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2013.
- [34] Fabiani D. Accelerated degradation of AC-motor winding insulation due to voltage waveforms generated by adjustable speed drives [D]. Italy: University of Bologna, 2002.
- [35] 赵智大 (Zhao Zhida). 高电压技术 (High voltage engineering) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2013.
- [36] 王霞, 舒子航, 段胜杰, 等 (Wang Xia, Shu Zihang, Duan Shengjie, et al.). 方波电压下交联聚乙烯中的空间电荷特性 (Space charge accumulation property in XLPE under applied voltage of square wave) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (2): 634-639.
- [37] Hare R W, Hill R M, Budd C, et al. Modelling charge injection and motion in solid dielectrics under high electric field [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1993, 26 (7): 1084-1093.

## Influence of repetitive impulse polarity and duty cycle on partial discharge inception voltage of inverter-fed motor insulation

GUO Hou-lin<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, LUO Ying-lu<sup>2</sup>, LI Wei-ye<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Knowing the influence of repetitive pulse voltage parameters on the partial discharge inception voltage (PDIV) of the inverter motor insulation is conducive to evaluate insulation performance of low-voltage random-wound motors. In this paper, partial discharge test systems were built under repetitive pulses and sinusoidal voltages, and the effects of repetitive pulse polarity and duty cycle (0.01%~70%) on the PDIV of I-type inverter-fed motors turn to turn insulation were studied on the basis of twisted-pair wires under different voltage waveforms, as well as the equivalent conditions of the PDIV test were researched under sine and pulse voltages. The results show that, when the duty cycle is 50%, the bipolar pulse voltage is 12 percent lower than the PDIV test value of the twisted pair under unipolar. With the increase of the pulse duty cycle, the PDIV value under unipolarity gradually increases, and the PDIV value under bipolarity changes little, but there is a trend of increasing first and then decreasing. When the unipolar pulse duty cycle is less than 10%, the bipolar pulse duty cycle is 30%~70%, and the PDIV test value under sinusoidal voltage is most close. Therefore, when using pulse voltage to test the PDIV of the motor insulation, the duty cycle should be considered, and the sine and pulse voltage can fundamentally be equivalent under certain voltage parameters.

**Key words:** duty cycle; polarity; partial discharge inception voltage; pulse voltage; twisted-pair wires; inverter-fed motor