

正弦及双极性脉冲电压下 变频电机匝间绝缘PDIV对比分析

师 洋, 王 鹏, 刘新霆, 程驰宙, 郭厚霖, Shakeel AKRAM
(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在频率为50 Hz的正弦、双极性方波和双极性短脉冲电压下,采用新能源汽车3种典型的具有耐电晕特性的匝间绝缘绞线对,研究了3种电压对其局部放电起始电压(PDIV)特性的影响规律。结果表明:频域滤波后的有效带宽内,双极性重复短脉冲及方波电压下的放电频域能量主要分布在0.5~0.9 GHz;保持其他测试环境不变,正弦及双极性重复方波电压下的PDIV几乎相等,而正弦和方波电压下的PDIV比双极性重复短脉冲下的PDIV低约20%,并且随着脉宽的增加,双极性重复短脉冲电压下的PDIV呈下降趋势。根据研究结果,在对匝间绝缘进行PDIV测试时,正弦和方波电压是较为保守评估变频电机匝间绝缘PDIV的测试电压;在对绞线对等容性试样进行PDIV测试时,可考虑采用正弦电压替代脉冲电压。

关键词:变频电机;绝缘系统;新能源汽车;局部放电;PDIV

中图分类号:TM835 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)01-0101-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.01.016

Comparative Analysis on PDIV of Turn-to-turn Insulation for Inverter-fed Motors Under Sinusoidal and Bipolar Impulsive Voltage

SHI Yang, WANG Peng, LIU Xinting, CHENG Chizhou, GUO Houlin, Shakeel AKRAM
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Under the sinusoidal, bipolar square wave, and bipolar short impulsive voltage with 50 Hz of frequency, three typical corona-resistant turn-to-turn insulated twisted pairs for new energy vehicles were used to experiment, and the influences of three voltages on their partial discharge inception voltage (PDIV) characteristics were studied. The results show that within the effective bandwidth after frequency domain filtering, the discharge frequency domain energies under bipolar repetitive short pulse and square wave voltage distribute in 0.5–0.9 GHz mainly. Keeping other test environments unchanged, the PDIVs under sinusoidal and bipolar repetitive square wave voltage are almost equal. The PDIVs under sinusoidal and square wave are about 20% lower than under bipolar repetitive short pulse voltage, and with the increase of pulse width, the PDIV decreases under bipolar repetitive short pulse voltage. According to the research results, when conducting PDIV test on turn-to-turn insulation, the sinusoidal and square wave voltage are more conservative test voltages for evaluating the PDIV of inverter-fed motor turn-to-turn insulation. When conducting PDIV test on capacitive sample of twisted pairs, the sinusoidal voltage can be considered to replace pulse voltage.

Key words: inverter-fed motor; insulation system; new energy vehicles; partial discharge; PDIV

收稿日期:2021-03-21 修回日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977134)

作者简介:师洋(2000-),男(汉族),新疆塔城人,本科生,主要从事变频电机绝缘技术的研究;通信作者:王鹏(1982-),男(汉族),山东菏泽人,副教授,主要从事新能源及电力电子系统中电气绝缘可靠性评估及测试技术的研究。

0 引言

电机是驱动新能源汽车的心脏,也是新能源汽车三大关键技术之一。新能源汽车驱动电机直接连接至变频器,称为变频电机。变频电机一般采用脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)技术控制,

运行在高频重复方波电压下,绝缘系统承受较为严酷的电、热应力^[1]。当出现端部过电压、电压分布不均、工艺浸渍不良等原因造成绝缘局部场强集中时,局部放电(partial discharge, PD)发生的概率较大^[2-3]。特别是对于广泛采用低压散绕结构的新能源汽车驱动电机,放电现象会破坏有机物大分子链结构,造成变频电机绝缘快速失效。

根据IEC相关标准^[4-5],在设计、制造变频电机前,应在正弦和重复脉冲电压下进行测试,以判断绝缘系统的局部放电起始电压(PDIV)是否高于其正常运行电压,以保证在全寿命周期内不出现局部放电。此外,在新能源汽车的运行过程中,存在机械、电、热等众多老化因素^[6],PDIV可能有所下降,因此实验所得PDIV相对于实际运行电压应留有较大裕度。

新能源汽车主绝缘和相间绝缘一般不存在电压分布不均匀的现象,虽然其工作在PWM电压下,但可以采用正弦电压进行PDIV测试,测试所得的峰峰值作为评价主绝缘和相间绝缘的参数。然而,在端部过电压、电压绕组不均匀分布、绕组感性及容性分布参数的影响下,变频电机匝间绝缘实际承受的是持续时间为纳秒至微秒级的高频双极性短脉冲电压^[7]。因此,为模拟变频电机绝缘实际承受的电力,需采用双极性重复方波或脉冲电压模拟脉宽调制电压进行匝间PDIV测试^[8-9]。

不同于传统直流及正弦电压,重复脉冲不同电压参数(如上升时间、占空比、基波频率等)对变频电机绝缘PDIV的影响不可忽视^[4-5]。不同波形参数对变频电机匝间绝缘的PDIV影响虽有报道,但研究多采用重复方波和正弦电压进行对比,少部分研究采用单极性重复短脉冲电压^[7-8],而双极性重复短脉冲电压(匝间绝缘实际承受的电力)对变频电机匝间绝缘的PDIV影响尚未见报道。

本研究在频率为50 Hz的正弦、双极性重复方波和双极性重复短脉冲电压下,对比分析不同波形电压对3种典型新能源汽车匝间绝缘PDIV统计特征及放电时频域分布特性的影响规律,并结合放电物理过程提出机理解释,以期3种应力下新能源汽车变频电机匝间绝缘PDIV的评估提供实验依据和理论参考。

1 试验

1.1 测试平台搭建

1.1.1 正弦电压测试平台

正弦电压下变频电机匝间绝缘的PDIV测试系统如图1所示。信号发生器输入50 Hz的正弦信号,

功率放大器将该输入信号放大2 000倍,得到连续可调的正弦电压,该电压再经限流水电阻向试样输出。去除端部绝缘的绞线对一端接正弦输出,另一端接地。使用耦合阻抗传感器和TechImp PD-Check采集放电,并通过网络接口将放电统计特性显示在计算机上。正弦输出电压经高压探头,按1 000:1的比例显示在最大采样率为20 GS/s、带宽为2.5 GHz的数字示波器上,以读取正弦输出电压的峰峰值。

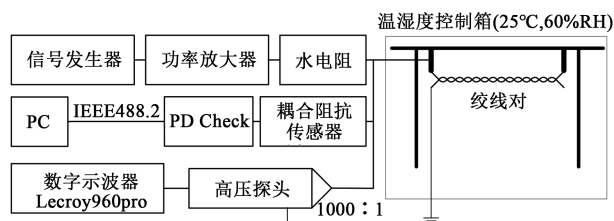


图1 正弦电压PDIV测试系统

Fig.1 Sinusoidal voltage PDIV test system

1.1.2 双极性脉冲电压测试平台

双极性重复脉冲电压下变频电机匝间绝缘PDIV测试系统如图2所示,双极性脉冲电源输出参数如表1所示。

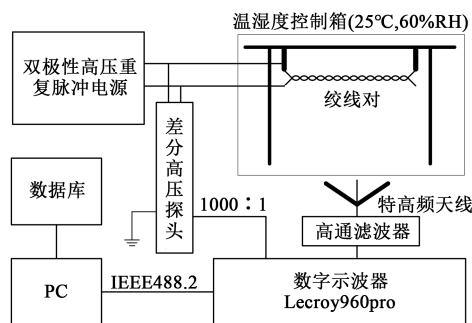


图2 双极性重复脉冲电压PDIV测试系统

Fig.2 Bipolar repetitive impulsive voltage PDIV test system

表1 双极性脉冲电源输出参数

Tab.1 Output parameter of bipolar pulse power

参数	数值
频率/Hz	50
占空比/%	0.005~50
峰峰值/kV	0~10
上升时间/ns	150
下降时间/ns	10

双极性高压重复脉冲电源输出电压峰峰值可达10 kV,频率为50 Hz。产生的双极性重复方波和

双极性重复短脉冲电压的上升时间为 150 ns, 其中双极性重复短脉冲电压的脉宽时间持续可调。本研究采用脉宽为 1、2、5 μs 的短脉冲电压和重复方波电压作为电源输出进行 PDIV 测试。

特高频天线用于采集放电信号。为减小高频电力电子开关器件引起的干扰(干扰信号的频谱能量主要分布在 300~400 MHz), 将特高频天线固定于距离试样 10 cm 处, 并且在特高频天线和数字示波器间加装 400 MHz 的高通滤波器。输出电压的正负两极经差分高压探头差分后, 以 1 000:1 的比例显示在数字示波器上。数字示波器与计算机相连, 并执行 IEEE 488.2 协议进行数据传输, 将放电结果和输出电压存入数据库以便后期处理分析。

1.2 测试试样

研究采用的 3 种典型新能源汽车绞线对试样由聚酰胺-酰亚胺树脂浸渍而成, 漆包线在显微镜下观测得到的直径分别为 0.65、0.66、0.69 mm, 分别记为 a 试样、b 试样、c 试样。为保证实验结果的可靠性, 每种绞线对绕制 5 个试样。每个试样统一绕制 10 匝, 使漆包线两端的夹角为 60° (如图 3 所示), 用于模拟变频电机运行过程中出现的多点放电现象^[4,10]。绕制时应避免损伤漆包线的绝缘漆, 以免造成短路影响实验结果。



图3 漆包绞线对试样

Fig.3 Enameled twisted pair sample

实验前, 将所有漆包线试样进行统一处理: 使用无水酒精清洗, 并放入 100°C 温度控制箱内处理 12 h, 以保证实验结果不受试样表面可能存在的水分和污渍的影响。实验时, 将试样固定在绝缘支架上, 并放入温湿度控制箱内, 控制温度恒定为 25°C、湿度恒定为 60%RH, 以排除环境因素的影响。

1.3 测试波形

图 2 中的双极性高压重复脉冲电源的拓扑图如图 4 所示, 该全桥电路由稳压电容 C_1 , 正极性高压直流电源 +HV, 限流电阻 R_1 、 R_2 , 高压电力电子开关 SW_1 、 SW_2 和负载 C_L 组成。控制高压电力电子开关中 A 和 B 开关的开断状态, 即可改变输出在负载 C_L 上脉冲的脉宽。本实验采用现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 控制 A、B 开关的开断, 以控制输出电压。

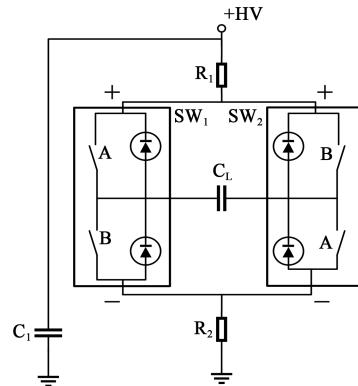


图4 双极性高压重复脉冲电源拓扑图

Fig.4 Topology diagram of bipolar high voltage repetitive pulse power supply

采用频率均为 50 Hz 的正弦、双极性重复方波和双极性重复短脉冲电压进行实验, 其中双极性重复方波和双极性重复短脉冲电压由图 4 的电源拓扑图产生, 产生的双极性重复短脉冲电压波形如图 5 所示。并且电压的上升时间为 150 ns, 双极性重复短脉冲电压脉宽设置 1、2、5 μs , 如图 6 所示。

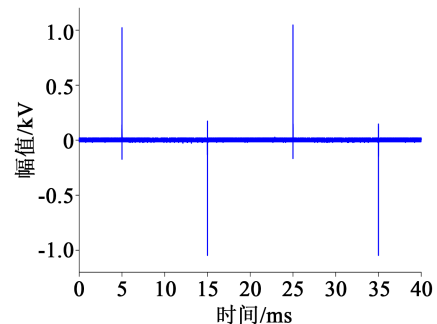


图5 双极性重复短脉冲电压波形

Fig.5 Bipolar repetitive short impulsive voltage waveform

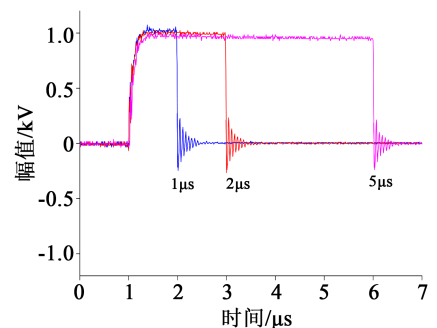


图6 不同脉宽的测试电压波形

Fig.6 Test voltage waveforms with different pulse widths

2 试验结果

2.1 放电分布特性

在正弦电压和双极性脉冲电压下对绞线对进

行PDIV测试,分别统计不同波形下的局部放电相位谱图(phase resolved partial discharge pattern, PRP-DP)。图7为正弦电压下的局放放电谱图。从图7可以看出,在正弦电压下的局部放电主要分布在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 和 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 相位,在其余相位出现放电的概率较小。

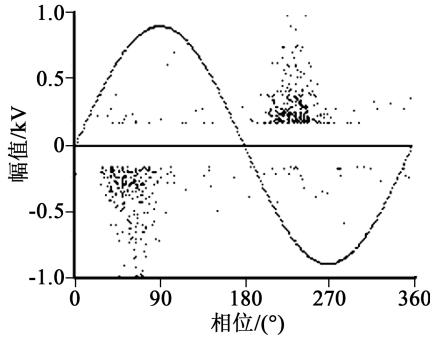


图7 正弦电压下的局部放电谱图
Fig.7 PD spectra under sinusoidal voltage

图8为不同脉宽的双极性短脉冲及方波电压下的局部放电谱图。从图8可以看出,在双极性方波及短脉冲电压下的放电在上升沿和下降沿附近出现概率较大,并且放电幅值集中在 $400 \sim 600$ mV。

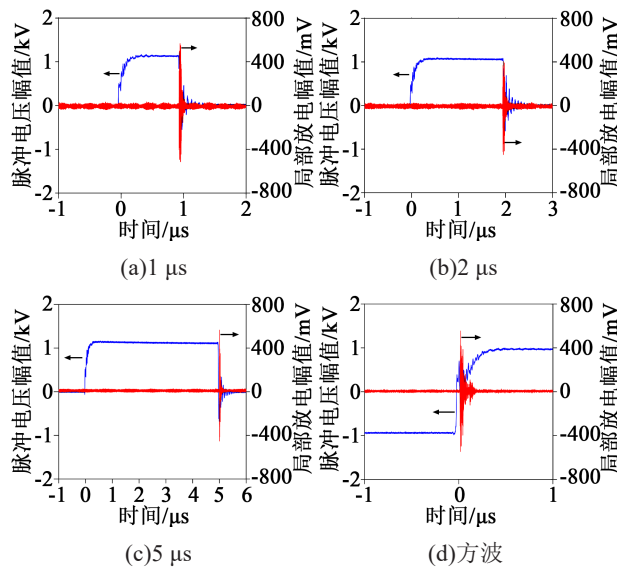


图8 不同脉宽的双极性短脉冲及方波电压下局部放电谱图

Fig.8 PD spectra under different pulse width bipolar short pulse and square wave voltage

对双极性短脉冲及方波电压下的局部放电波形进行傅里叶变换,得到局部放电能量的时域和频域分布^[11-12],如图9所示。

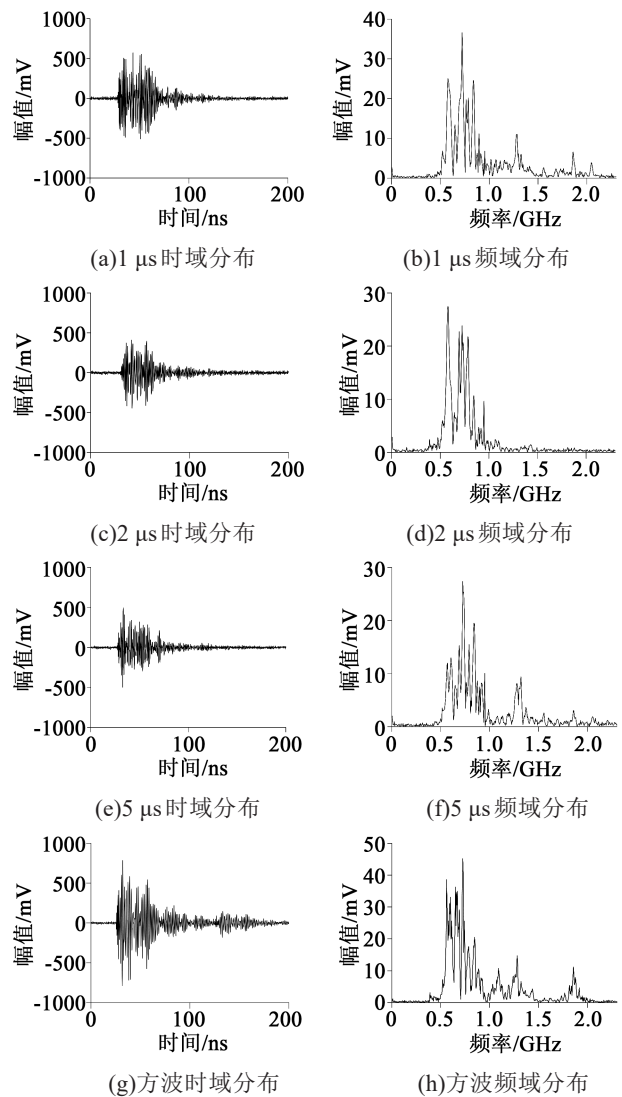


图9 局部放电的时域分布及频域分布

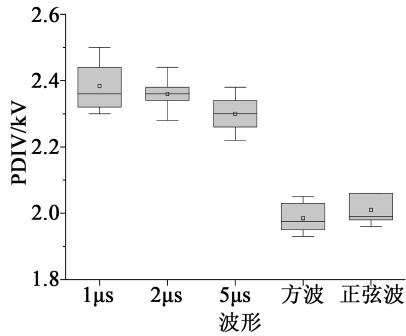
Fig.9 Time-domain and frequency-domain distribution of partial discharge

从图9可以看出,双极性短脉冲及方波电压的频域能量主要分布在 $0.5 \sim 0.9$ GHz,部分放电在 $1.1、1.3、1.9$ GHz也存在能量分布,少部分放电在 2.1 GHz存在能量分布(如图9(b)所示),其余频段的能量分布较少。因此在上升时间为 150 ns、频率为 50 Hz的双极性短脉冲及方波电压下进行PDIV测试时,采用的特高频天线应在 $0.5 \sim 2.0$ GHz内有较高的增益,并且为消除电源产生的低频段干扰,应在天线输出端使用高通滤波器,以提高信噪比。

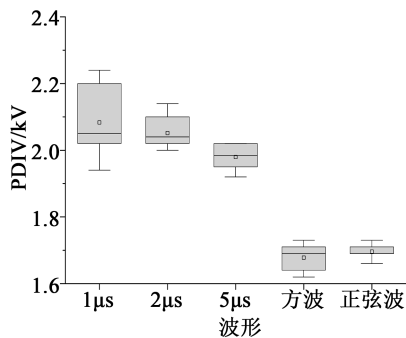
2.2 PDIV统计特性

采用正弦电压及不同脉宽的双极性脉冲电压对3种典型绞线对进行PDIV测试,不同电压下的PDIV测试结果统计特性如图10所示。从图10可

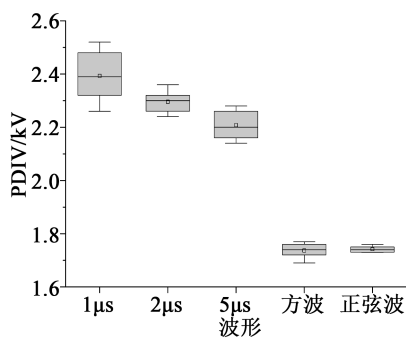
可以看出,每种绞线对在方波电压下和正弦波电压下测得的PDIV大致相同,在双极性短脉冲电压下测得的PDIV随着脉宽的增加呈现下降的趋势,并且双极性短脉冲下的PDIV略高于方波下的PDIV。



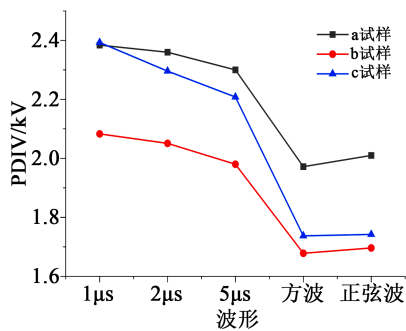
(a) a 试样 PDIV



(b) b 试样 PDIV



(c) c 试样 PDIV



(d) 三种试样平均 PDIV

图 10 不同电压下局部放电统计特性

Fig.10 Statistical characteristics of PD under different voltages

具体地,脉宽为 $1\ \mu\text{s}$ 的双极性短脉冲下的 PDIV 与方波下的 PDIV 相比, a 试样从 $2.38\ \text{kV}$ 下降至 $1.97\ \text{kV}$, 下降了约 17%; b 试样从 $2.08\ \text{kV}$ 下降至 $1.68\ \text{kV}$, 下降了约 19%; c 试样从 $2.39\ \text{kV}$ 下降至 $1.74\ \text{kV}$, 下降了约 27%。图 10(d)展示了 3 种典型绞线对的 PDIV 随电压波形的变化趋势,可以看出在使用方波和正弦波电压评估变频电机匝间绝缘时,所得到的绝缘性能较为保守,而双极性短脉冲电压能更真实地评估变频电机匝间绝缘。

一般来讲,绝缘的 PDIV 随绝缘尺寸改变而改变。由于 a、b、c 试样添加有不同的无机和有机成分,使 3 种材料的介电常数发生改变,导致图 10 中 PDIV 并未随漆包线直径增大形成统一规律。因此,本研究并未考虑 $0.65\sim 0.69\ \text{mm}$ 直径范围内绝缘尺寸改变对 PDIV 的影响。

3 讨论分析

采用具有一定带宽的特高频传感器提取放电高频能量是重复脉冲电压下抑制电力电子强烈开断干扰、提升 PDIV 测试灵敏度的重要方法^[13]。然而,由于放电能量分布可能随高频脉冲参数变化而变化,分析脉冲参数对放电频域能量分布的影响对传感器设计和选择尤为重要。图 9 表明,当重复脉冲持续时间在 $1\sim 5\ \mu\text{s}$ 发生变化时,脉冲激发的放电频域能量主要分布在 $0.5\sim 0.9\ \text{GHz}$, 并且脉冲持续时间的变化并未明显改变放电的频域能量分布特性。说明依据 IEC TS 61934、IEC 60034-18-41 等国际标准,采用特高频法对绝缘系统进行 PDIV 测试时,具有合适带宽的传感器应适合于所有占空比(即不同脉宽)的测试。

在绞线对模型中,放电主要发生在漆包线之间的气隙。由气体放电的流注理论可知,形成流注需满足两个条件:①气隙内实际电场强度超过起始放电电场强度 E_{inc} ;②出现激发电子崩的初始电子^[14-16]。根据图 10,随着脉冲宽度的增加,PDIV 逐渐降低,并且方波和正弦电压下 PDIV 最低。实际上,流注发展至完成放电需要一定时间,即当气隙内实际电场强度大于起始放电的电场强度,且持续超过一定时间后,才能完成放电过程。以图 10(a)中 a 试样为例,在双极性短脉冲电压下,绞线对两端施加峰峰值为 $2\ \text{kV}$ 的电压,并未出现放电,而在方波和正弦波条件下施加相同幅值的电压则出现放电。可能是因为短脉冲的持续时间过短,在测试过程中

未能形成流注,因此需要更高的电压(约 2.4 kV)以满足流注放电条件,其余试样呈现相似结果。图 10 中随着短脉冲脉宽增加,PDIV 呈现下降趋势,也从侧面验证了以上解释。

而在正弦和方波电压下,电压持续时间较长,相对较低电压即可满足流注放电的条件,所得 PDIV 均低于短脉冲下的 PDIV。对于变频电机绝缘系统评估,在全生命周期内,满足理论要求产生放电的 PDIV 最小值应是绝缘设计最应关注的保守值。因此,如采用正弦或方波电压对绝缘进行 PDIV 测试,得到的 PDIV 结果可保守评估变频电机匝间绝缘性能。然而,当通入重复短脉冲电压时,很难在匝间绝缘形成持续时间较长的脉冲电应力,得到的 PDIV 很可能大于正弦和方波电压下测得的保守值。

4 结论

(1)在频率相同的情况下,正弦和方波电压下变频电机匝间绝缘的 PDIV 几乎相等。因此,在对绞线对等容性试样进行 PDIV 测试时,可用正弦电压替代方波电压进行测试。

(2)在双极性短脉冲电压下,随着脉宽的增加,匝间绝缘 PDIV 呈现下降趋势,说明较短脉冲不能完全激发绝缘中的流注放电,从而不能发现绝缘中的潜在缺陷。

(3)正弦和方波电压下 PDIV 比双极性重复短脉冲下低约 20%,说明在对容性匝间绝缘进行 PDIV 测试时,正弦和方波电压是较为保守评估绝缘性能的测试电压。

参考文献:

- [1] 朱勇穗,宋桂霞,张敬龙,等.PWM 脉冲电压下变频电机匝间绝缘研究[J].绝缘材料,2015,48(5):40-43.
- [2] KAUFHOLD M, ANINGER H. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM- inverter-fed low-voltage induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2000,47(2):396-402.
- [3] RAGNA M D, ANDREA C, LUCA 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.
- [4] 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 60034-18-41:2014[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2014.
- [5] 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 60034-18-42:2008[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2008.
- [6] 张晓虹,张亮,乐波,等.基于局部放电的矩特征分析大电机主绝缘的老化[J].中国电机工程学报,2002,22(5):95-99.
- [7] HAYAKAWA N, INANO H, NAKAMURA Y, et al. Time variation of partial discharge activity leading to breakdown of magnet wire under repetitive surge voltage application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008, 15(6): 1701-1706.
- [8] KIKUCHI H, HANAWA H. Inverter surge resistant enameled wire with nanocomposite insulating material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):99-106.
- [9] KAUFHOLD M, BORNER G, EBERHARDT M, et al. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,1996,12(5):9-16.
- [10] 刘俊,何明鹏,陈昊,等.二氧化硅/聚酰亚胺纳米复合薄膜的制备与性能研究[J].绝缘材料,2009,42(6):1-3,8.
- [11] WANG W B, SUN L, WANG B, et al. Partial discharge feature extraction based on synchrosqueezed windowed Fourier transform and multi-scale dispersion entropy[J]. Measurement and Control,2020,53(3):1-10.
- [12] RANGA C, CHANDEL A K. FFT analysis on partial discharge modeling of transformer solid insulation[J]. Digital Signal Processing,2016,8(6):211-216.
- [13] FABIANI D, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. A UHF technique for advanced PD measurements on inverter-fed motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008, 23(5):2546-2556.
- [14] CAVALLINI A, MONTANARI G C. Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2006,13(1):111-121.
- [15] HAYAKAWA N. Estimation of partial discharge inception voltage of magnet wires under inverter surge voltage by volume-time theory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(2):550-557.
- [16] OKUBO H, NAKAMURA Y, INANO H, et al. Lifetime characteristics of nanocomposite enameled wire under surge voltage application[C]//2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver,Canada:IEEE, 2007.