

重复方波频率对聚酰亚胺耐电晕寿命影响研究

敖兵, 雷勇, 王鹏, 赵政嘉
(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:为研究重复方波电压频率对聚酰亚胺耐电晕寿命的影响规律,搭建了双极性方波测试平台,测试不同频率下聚酰亚胺的耐电晕寿命和局部放电统计特性。结果表明:聚酰亚胺的耐电晕寿命随频率的增加而减小,趋势逐渐变缓,这是因为随着重复方波频率的增加,发生在上升沿和下降沿处的放电幅值和相位都逐渐减小,致使单个周期内放电产生的电老化作用减弱。据此,对绝缘采用提高方波电压频率来加速老化时,需考虑上述特性。

关键词:变频电机;绝缘系统;耐电晕寿命;聚酰亚胺;局部放电

中图分类号:TM215;TM835 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)01-0055-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.01.010

Effect of Repetitive Square Wave Frequency on Corona-resistant Lifetime of Polyimide

AO Bing, LEI Yong, WANG Peng, ZHAO Zhengjia
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to study the influence rules of repetitive square wave frequency on the corona-resistant lifetime of polyimide, a test platform with bipolar square wave was constructed to test the corona-resistant lifetime and partial discharge statistical characteristics of polyimide at different frequencies. The results show that with the increase of frequency, the corona-resistant lifetime of polyimide decreases, and the trend becomes less steep gradually. This is because with the increase of repetitive square wave frequency, the discharge amplitude and phase at the rising edge and the falling edge reduce gradually, which leads to the weakening of electrical ageing effect by discharge in a single cycle. Therefore, when the insulation was accelerated aged by increasing the square wave voltage frequency, the above characteristics need to be considered.

Key words: inverter-fed motor; insulation system; corona-resistant lifetime; polyimide; partial discharge

0 引言

由于在节能、调速等方面的显著优点,变频电机已广泛应用于电力牵引、舰船驱动和工业生产等领域^[1]。不同于传统工作在正弦电压下的交流电机,变频器输出的快速变化的方波易导致变频电机绝缘性能过早失效^[2-4]。为提高变频电机的绝缘可靠性,国际电工技术委员会提出 IEC 60034-18-42^[5],

指出对高压变频电机进行型式试验时,推荐采用重复方波(脉冲)电压对电机绝缘进行耐电晕寿命测试,并将耐电晕寿命作为评价电机性能的重要指标。

变频电机绝缘损伤最早易出现在匝间,然后延伸至主绝缘^[6]。这是由于高频脉宽调制电压易在电机定子端部形成过电压,且具有较大 dv/dt 的过电压在绕组内分布不均,从而加强了绝缘系统中的局部电场,出现匝间局部放电(partial discharge, PD)。聚酰亚胺具有耐高温、耐辐射、耐化学腐蚀等特性,已被广泛应用于高压变频电机的匝间绝缘^[7]。聚酰亚胺测试也成为依据国际电工技术委员会标准对电机绝缘进行耐电晕寿命测试的重要组成部分。

收稿日期:2020-03-22 修回日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977134)

作者简介:敖兵(1996-),男(汉族),四川宜宾人,硕士生,主要从事变频电机绝缘测试技术的研究;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。

为缩短测试时间,耐电晕测试一般采用提高电压和频率的方法。在传统正弦电压下,提高电压频率,绝缘寿命基本以线性规律减少^[8]。这是因为在大于局部放电起始放电电压的条件下,电压频率与绝缘寿命具有反比关系^[9]。在正弦电压下, dv/dt 相对于放电时间基本可以忽略,频率变化对放电特性的影响不大。因此,提高正弦电压频率,基本可以达到线性加速老化的作用。然而,在重复方波电压下,局部放电发生在脉冲上升沿和下降沿附近^[2-3],此处具有较大的 dv/dt 。脉冲频率的变化更易改变局部放电过程中表面电荷的积累、极性反转时的合成场强和局部温升等特性,从而改变局部放电的延迟时间、激发电压等,显著影响绝缘的电老化作用^[3,9]。可以推断,相对于正弦电压,重复方波频率对耐电晕寿命的影响可能更加复杂。

重复脉冲电压下变频电机耐电晕测试中频率的影响已有部分报道^[3,9-11]。研究发现,随着频率的增加,匝间绝缘模型放电统计特性发生变化,放电统计时延和放电幅值都有所减小,且放电造成的温升变化等都会对匝间绝缘电老化造成重要影响。然而,以上研究对象都采用低压散绕电机漆包线(交叉线或绞线对)制成。实际上,如果控制局部放电起始电压低于电机运行电压且留有一定裕度时,此类电机绝缘系统在全寿命周期内不应出现放电。因此,研究者们更应关注具有成型绕组结构的变频电机绝缘系统的电老化作用以及其对局部放电起始电压的影响。

对于一般应用于高压成型变频电机匝间绝缘的聚酰亚胺,随着运行电压的升高无法完全避免在匝间绝缘出现局部放电。因此,在重复方波脉冲电压下聚酰亚胺材料的耐电晕寿命测试更应受到重视。然而,现有报道较少涉及不同频率重复脉冲电压下聚酰亚胺绝缘的耐电晕寿命变化规律。

本研究旨在探究重复方波频率对聚酰亚胺绝缘耐电晕寿命的影响规律。首先,搭建用于聚酰亚胺耐电晕寿命测试的双极性方波测试平台,可利用短路保护电路和特高频天线实时记录寿命数据和老化过程的放电数据。然后,在峰峰值为3.0 kV、上升时间为300 ns、频率为100~8 000 Hz的重复方波电压下,研究频率对聚酰亚胺耐电晕寿命和局部放电统计特性的影响规律。借助电老化过程中记录的放电相位和幅值变化特性,基于电老化和放电物理过程对不同频率下聚酰亚胺的电老化作用进行

机理解释。

1 试验

1.1 试样及电极结构

为避免纳米材料的添加对测试结果的分散性产生影响,试样选用纯聚酰亚胺薄膜,其厚度为0.025 mm,尺寸为50 mm×50 mm。每次试验前,采用无水酒精擦拭试样表面以清除杂质。然后,将试样放置在100℃真空干燥箱内30 min,去除试样表面水分并预热。

耐电晕寿命测试采用球-板电极,模拟切向和法向电场作用。将直径为15 mm的球形电极接至高压方波,直径为40 mm的平板电极接至地电位。为避免电极表面不平整影响电场均匀度,每次试验前先将电极表面进行磨平抛光处理。

1.2 耐电晕寿命测试平台

搭建了基于霍尔击穿保护的高压脉冲电源寿命测试系统^[12],如图1所示。高压方波电源可产生不同频率的测试电压,高压探头采集高压方波电源输出的分压信号连接到示波器。短路保护电路采用现场可编程逻辑门阵列进行控制,用霍尔元件进行过流检测。过流保护在试样被击穿时的瞬间启动,断开高压输出的同时记录试样的耐电晕寿命。采集局部放电信号的特高频天线安装在距离试样20 cm处。为抑制电力电子开关器件产生的开断干扰^[13],在天线输出端装设截止频率为395 MHz的高通滤波器,特制并优化特高频传感器,提升传感器在0.5~2.0 GHz的增益和阻抗匹配性能,从而提升测试灵敏度^[14]。局部放电信号和方波电压信号连接

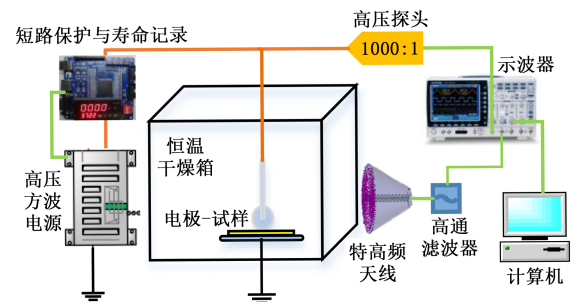


图1 耐电晕寿命测试系统

Fig.1 Endurance test system

至高速数字示波器的两个通道,示波器同时记录大量电压和放电数据,传至计算机进行处理。

1.3 试验条件

耐电晕试验选用占空比为50%、峰峰值电压为

3.0 kV、上升时间为 300 ns 的双极性重复方波电压并保持参数不变,选择 100 Hz、500 Hz 以及 1、5、8 kHz 的电压频率。将试样及电极置于恒温控制箱内,每个频率测试 5 个试样,取测试平均值为最终寿命数据进行统计。

2 试验结果

2.1 耐电晕寿命与频率的关系

不同频率下聚酰亚胺的耐电晕寿命如图 2 所示。从图 2 可以看出,频率的增加导致聚酰亚胺的耐电晕寿命逐渐减少,但变化趋势逐渐减缓,频率高于 1 kHz 后趋于不变。

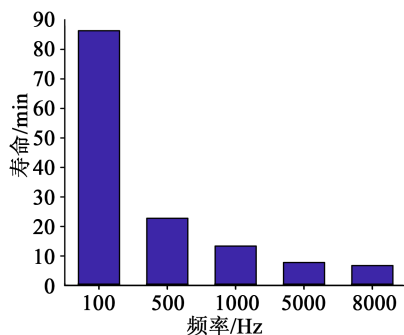


图2 不同频率下聚酰亚胺的耐电晕寿命

Fig.2 Endurance of PI under different frequency

耐电晕寿命测试在大于局部放电起始放电电压下进行,单个周期内上升沿和下降沿处的放电是加速绝缘电老化的主要因素。统计试样从加压开始至击穿所经受的脉冲电压总周期数 N , N 与方波频率 f 及寿命 L 的关系如式(1)所示。

$$N = fL \quad (1)$$

以百万为单位计算不同频率下的脉冲电压总周期数 N 如图 3 所示。因为方波频率对单周期内放电次数没有明显影响^[15],所以脉冲电压总周期数在一定程度上代表了放电次数。若每个脉冲周期内放电对试样的电老化作用相同,那么对同样的试样在不同频率下的总周期数应大致相同。即若 N 保持不变,则频率 f 和寿命 L 成反比关系。从图 3 可以看出,总周期数随频率增加呈增加趋势,并且 1 kHz 后快速增加。由此推断,随着频率的增加,相同的试样需要更多的脉冲周期数量才能达到绝缘击穿,这表明单个周期内放电活动对绝缘老化作用逐渐减弱。因此,应对单个周期上升沿和下降沿处的局部放电统计特性进行分析,以解释在不同频率下放电活动对绝缘电老化作用的影响。

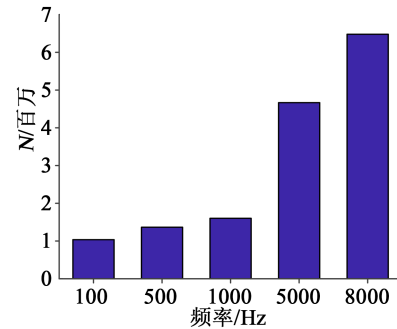


图3 不同频率下脉冲电压总周期数

Fig.3 Total cycle numbers under different frequency

2.2 放电分布特性

在耐电晕试验过程中,采用上述特高频天线采集每个方波周期内的放电脉冲,从加压开始连续采集至试样击穿。随后,将电压和放电数据导入至计算机处理。局部放电随老化时间的变化趋势大致分为放电初始、稳定放电、放电结束 3 个阶段^[16]。为提高统计准确度,每个频率下按照一定的时间间隔提取 1 000 组处于稳定放电阶段的放电信号,每组信号采用阈值去噪方法,提取相应放电的时间和幅值信息,绘制放电分布图。

当控制方波电压峰峰值为 3 000 V,频率为 1 kHz 时,同一周期内放电在上升沿和下降沿的统计分布如图 4 所示。

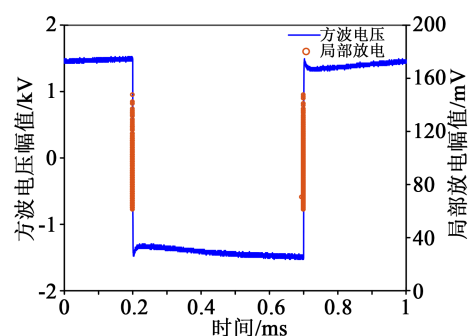


图4 单周期放电分布图

Fig.4 PD patterns per cycle

从图 4 可以看出,放电谱图在对称方波电压的上升沿和下降沿基本对称,这与文献[16]的结论一致。因此,此处仅用方波电压上升沿的局部放电分布进行分析和说明。分别选取 100 Hz 以及 1、5、8 kHz 的放电统计数据,在同一坐标系中绘制放电统计图,如图 5 所示。

2.3 放电统计特性

对图 5 中重复方波电压下的放电幅值进行统

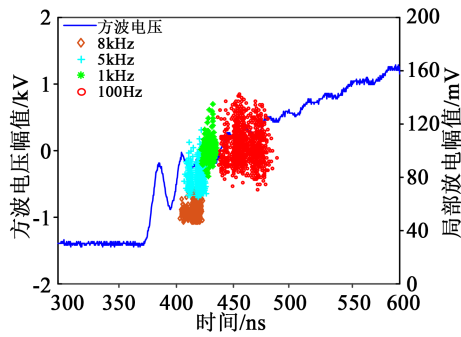


图5 不同频率放电分布图

Fig.5 PD patterns under different frequency

计,得到不同频率下聚酰亚胺的局部放电统计特性如图6所示。从图5~6可以看出,在不同频率下放电幅值分布在50~140 mV,且放电幅值随重复方波频率的升高而减小。从图5可知,随着频率的增加,在电压上升过程中放电发生的位置越靠前,这意味着放电相位在减小,即频率的增加减小了方波电压上升沿处的放电时延。

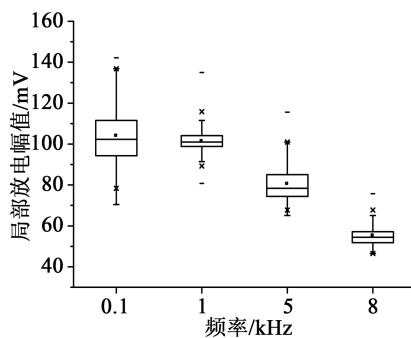


图6 不同频率下放电幅值统计

Fig.6 PD amplitude under different frequency

3 讨论分析

3.1 频率对绝缘寿命的影响

耐电晕寿命主要和放电过程相关。具有较高幅值的放电,更容易促使聚酰亚胺分子链断裂;同时放电活动产生的热量,使绝缘放电表面的局部温度升高,造成材料在热、化学作用下发生降解^[10]。

当频率增加后,虽然单周期内的放电次数变化并不明显,但单位时间内放电次数增加,总的放电电量增加,对绝缘的破坏作用加强,绝缘寿命随之缩短。

以上结果说明聚酰亚胺在不同频率下耐电晕寿命的变化特性与漆包线模型具有相似规律^[10-11]。

3.2 频率对放电幅值的影响

在球-板电极结构中,放电主要发生在高压电

极表面与聚酰亚胺之间的间隙。由气体放电的流注理论可知,在脉冲电压下产生放电需要满足两个条件^[9]:①间隙内的场强超过起始放电场强;②出现激发电子崩的初始电子。

放电具有记忆效应,即上一次放电产生的表面电荷会在绝缘表面形成电荷积累,从而对后续放电过程产生影响。初始电子主要由表面电荷产生,产生率 λ 可由Schottky-Richardson模型^[17]估算,可知 λ 与放电时积累的表面电荷数量成正比。

表面电荷对放电的影响表现为:在方波正半周或负半周,表面电荷场强和外加电压场强方向相反,使间隙实际合成场强减小,抑制放电;在极性反转时,两者方向相同,使合成场强更大,易达到局部放电起始放电场强,引起放电。因此局部放电集中在方波上升沿和下降沿。间隙合成场强达到起始放电场强后,并非立即发生放电,而是需要等待初始电子激发电子崩,等待的过程中外加电压继续上升,因此等待初始电子时间越长,间隙合成场强越高。

对于理想球形间隙,放电时产生的视在放电量 q 取决于间隙合成电场强度 $E^{[11]}$,如式(2)所示。

$$\pm q = K \cdot E(t) \quad (2)$$

式(2)中, K 为常数。局部放电幅值与视在放电量成正比,因此局部放电幅值和放电时刻间隙合成电场强度成正比。

残留表面电荷与重复方波频率成指数关系^[9]。频率升高后,电荷的衰减作用减弱,残留更多的表面电荷。较多的表面电荷更易产生初始电子,缩短等待局部放电产生的延迟时间,放电相位因此减小。同时间隙合成电场强度也将随放电相位减小而减小,由式(2)知放电幅值随之减小。

3.3 提升频率对耐电晕寿命的影响

局部放电是导致变频电机匝间绝缘劣化的主要原因^[9]。具有较大幅值的放电具有更高能量,更易导致聚酰亚胺分子链断裂,加剧重复方波下的电老化作用。由此可知,使相同绝缘试样达到最终击穿,若放电幅值较高,则需要相对较少的脉冲电压周期;反之则需要更多的脉冲电压周期。

从图4和图5可知,随着频率增加,放电相位和幅值减小,单个周期内脉冲对绝缘的电老化作用减弱。同时文献[8]的研究结论表明,由频率引起的温升随着电压频率的升高而逐渐增加,但趋势也会逐渐趋于平缓。这两个原因导致测试试样的耐电晕

寿命与电压频率不具有严格的反比关系,随着频率的增大,绝缘寿命先减少而后逐渐趋于不变。

4 结 论

(1)重复方波频率对高压成型电机匝间绝缘耐电晕寿命的影响规律和低压散绕电机相似,聚酰亚胺的耐电晕寿命随频率增加而减少,随着频率进一步增加,这种影响趋于减弱;

(2)随着重复方波频率的增加,发生在上升沿和下降沿处的放电幅值和相位逐渐减小,单个周期内放电产生的电老化作用逐渐减弱,导致频率增加到一定程度后对耐电晕寿命的影响趋于减弱。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG Peng, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Effect of rise time on PD pulse features under repetitive square wave voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(1):245-254.
- [3] WANG Peng, WU Guangning, LUO Yang, et al. Effect of repetitive square voltage frequency on partial discharge features[J]. Science China Technological Sciences,2013,56(6):1313-1321.
- [4] 徐洪英,赵莉华,王鹏,等. 重复方波上升时间对变频电机耐电晕寿命影响研究[J]. 绝缘材料,2016,49(4):40-44.
- [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/TS 60034-18-42:2008[S]. Geneva:IEC,2008.
- [6] STONE G C, SEDDING H G, CHAN C. Experience with online partial-discharge measurement in high-voltage inverter-fed motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 866-872.
- [7] 徐跃,邓小军. 不同频率和温度的电晕放电对聚酰亚胺薄膜的损伤特性研究[J]. 绝缘材料,2014,47(1):85-88.
- [8] LIU Tao, LI Qingmin, HUANG Xuwei, et al. Partial discharge behavior and ground insulation life expectancy under different voltage frequencies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(2):603-613.
- [9] 王鹏. 方波脉冲电压对局部放电特性及电机绝缘寿命影响机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [10] 李金泉,王鹏,徐洪英,等. 脉冲频率及环境温度对变频电机绝缘耐电晕寿命影响研究[J]. 绝缘材料,2018,51(11):64-68.
- [11] 杨能,王鹏,赵政嘉,等. 重复短脉冲及方波电压频率对变频电机绝缘局部放电统计特性影响[J]. 绝缘材料,2018,51(11):62-69.
- [12] WANG Jian, WANG Peng, WANG Wei, et al. Novel repetitive square wave voltage generator used for the insulation evaluation of rotating machines driven by power electronics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(4):2041-2049.
- [13] 李蓉,王鹏,雷勇,等. 变频电机绝缘破坏机理及连续方波电压下局部放电检测技术[J]. 绝缘材料,2015,48(3):12-17,23.
- [14] 王鹏,周凯,吴广宁. 变频电机绝缘的局部放电检测技术[J]. 高压技术,2014,40(2):519-525.
- [15] 周凯,吴广宁,雷克刚,等. 脉冲电压下局部放电对聚酰亚胺膜寿命的影响[J]. 材料科学与工程学报,2008,26(3):361-364,384.
- [16] 王鹏,陈波,徐洪英,等. 重复脉冲占空比对变频电机匝间绝缘耐电晕寿命影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(1):71-76.
- [17] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1995,2(4):510-528.