

# 高压方波脉冲下局部放电的相位分布特征

郭小霞, 吴广宁, 周凯, 高波, 曹开江

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对局部放电可导致变频电机绝缘过早损坏这一问题, 笔者分别在方波脉冲下和工频下, 对匝间绝缘电磁线进行了老化试验和局部放电测量, 主要对脉冲电压下局部放电的相位分布特征进行分析, 并与工频下进行了对比。结果表明: 脉冲条件下, 随老化时间的增长, 放电相位呈展宽趋势且出现明显的离散特征; 高相位放电的出现是部分缺陷迅速发展的标志, 是绝缘失效的先兆。

**关键词:** 变频电机; 方波脉冲; 局部放电; 相位分析

中图分类号: TM21

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0505-04

## Phase Distribution Characteristic of Partial Discharge under Square Pulse Voltage

GUO Xiao-xia, WU Guang-ning, ZHOU Kai, GAO Bo, CAO Kai-jiang

(School of Electrical Engineering of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The pulse voltage engendered by pulse width modulated (PWM) power may lead to premature failure of inverter-fed motors. Partial discharge under a sequence of high-frequency impulse is one of the key factors which lead to premature failure of inverter-fed motors. In this paper, aging experiment on magnetic wires for turn to turn insulation was conducted and partial discharge was measured. Phase distribution of partial discharge under pulse voltage was analyzed. The results show that with the increasing of aging time, the discharge phase become broader and appears scattering property; The appearance of the discharge between high phases is the symbol of some faults expanding rapidly, which means an early failure of insulation.

**Key words:** inverter-fed motor; square-wave pulse; partial discharge(PD); phase analysis

## 0 引言

变频调速牵引电机是交流传动牵引机车的关键设备之一, 其安全、可靠性直接影响牵引机车的性能<sup>[1]</sup>。使用脉宽调制(PWM)变频电源, 原理见图1(a)。变频器输出的连续脉冲见图1(b), 其波形不再是工频正弦电压, 而是一系列脉冲形式的电压, 电压上升速率  $dv/dt$  达  $6\ 600\text{ V}/\mu\text{s}$ , 远远大于工频正弦电机的  $0.15\text{ V}/\mu\text{s}$ , 这有可能导致变频电机绝缘过早损坏, 严重制约了变频调速技术的推广应用。该问题已经引起了国内外学者的广泛关注<sup>[2,3]</sup>。国内外对高频脉冲条件下的局部放电研究工作主要都围绕着局部放电的测量方法和测量条件, 鲜有关于局部放电对聚合物绝缘老化破坏的具体分析和表征的研究报道。

笔者根据对电磁线分别在高频脉冲方波下与工频下的老化实验, 分析和研究了老化对局部放电的最大放电量、放电次数等特征参量的影响及其变化

规律, 并将两种条件下局部放电特征参量的相位分布进行对比分析, 得出相位分布与绝缘材料失效的关系, 为研究高频脉冲方波下局部放电对绝缘破坏作用打下了基础, 为变频电机绝缘机构设计提供了理论依据。

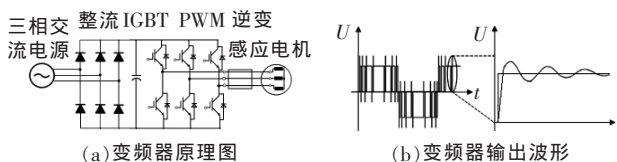


图1 变频器原理和输出波形

## 1 实验

### 1.1 样本

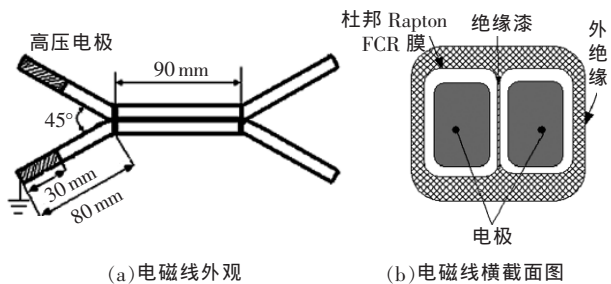
样本采用变频牵引电机用电磁线, 样本电容量为  $37.4\text{ pF}$ , 其外观见图2(a), 由株洲电力机车厂提供, 其绝缘材料和工艺与实际牵引电机相同。电磁线是以FCR薄膜2/3叠包绝缘, 厚度为  $0.21\text{ mm}$ , 2根电

收稿日期: 2007-11-16; 修回日期: 2008-06-12

基金项目: 教育部博士点基金(20050613008)。

作者简介: 郭小霞(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高速机车变频牵引电机绝缘性能评估的研究。

磁线外面首先用薄膜云母带半叠包 2 次,然后再用玻璃丝带平包一次。两根电磁线并行长度为 90 mm,两端夹角为 45°,折弯部分长度为 88 mm,其中裸铜线部分长 30 mm。其电极设置和绝缘结构见图 2(b)。试样进行老化之前,在温度 100 °C 中干燥 5 h。



(a)电磁线外观 (b)电磁线横截面图

图 2 电磁线绝缘结构

### 1.2 老化条件

考虑牵引电机正常运行温度,老化试验温度确定为 100 °C。试样起始放电电压为 1 200 V 左右,为了研究局部放电对绝缘材料的影响,选择方波脉冲峰值为 1 750 V,以 10 h 为周期,直到最后击穿。其中施加的脉冲电压频率为 10 kHz,占空比 0.5,脉冲上升时间为 100 ns。为了作对比分析,同时也进行了在相同电场强度条件的工频电压下老化,老化温度、间隔时间和脉冲电压下老化保持一致。根据老化试验结果,几个典型的老化的绞线对失效时间见表 1。

### 1.3 测量装置

工频下局部放电测量文中采用数字局放测试仪

表 1 不同试样的失效时间

老化试样号	失效时间/h	施加电压
1 号	320	工频
21 号	110	方波脉冲
35 号	130	方波脉冲

TE571, 脉冲电压下局部放电测量采用自行开发的脉冲电压局放测试系统,测量系统见图 3。该系统由高频高压方波脉冲电源、试样、脉冲电流传感器(ICS)、示波器和计算机组成<sup>[4]</sup>。脉冲电流传感器由同轴电缆与示波器相接,并联积分电阻 R。示波器通过 GPIB 接口与计算机相连。传感器输出信号由示波器显示,并传送到计算机存储,以便对采集信号做进一步的分析处理<sup>[5]</sup>。为了检测出局部放电相位,通过高压高频差分探头将高压脉冲信号衰减后接入示波器。

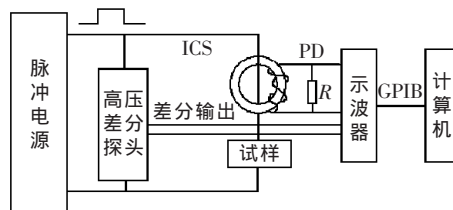


图 3 局部放电测量系统示意图

## 2 测试结果

### 2.1 工频下局部放电测试结果

局部放电的最大放电量见图 4, 随老化时间增长,最大放电量有上升趋势,但增长较为平缓。为了更清楚地了解局部放电随老化时间的变化规律,对其进行相位相关分析,最大放电量和放电次数的相位相关分析结果见图 5。

图 5 中工频下局部放电的相位分析说明,随着老化时间的增长,局部放电的相位分布也在逐步变

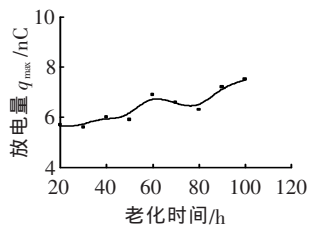


图 4 最大放电量随老化时间的变化

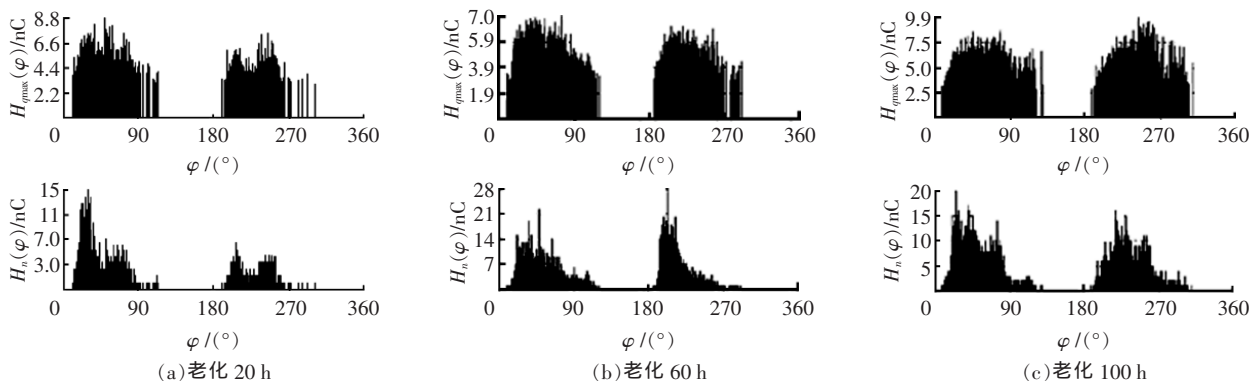


图 5 工频老化后最大放电量 and 放电次数相位分析

宽,在接近 90°和 270°附近相位的最大放电量和放电数量都有一定增长,但速度比较缓慢,局部放电相位分布总体上比较连续,没有出现离散的放电相位分布。

### 2.2 方波脉冲下局部放电测试结果

脉冲电压下最大放电量随老化时间的变化见图 6,尽管最大放电量也有增大的趋势,但发展过程并不相同,中间出现了波动。60 h 前的最大放

量变化不明显,在60 h后的最大放电量迅速增长。

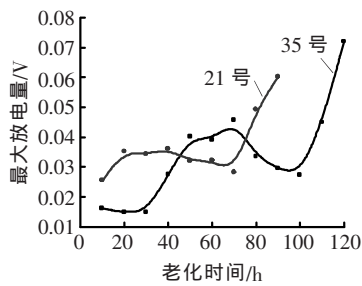


图6 最大放电量随老化时间的变化

为进行进一步了解局部放电特征,对脉冲下局部放电的相位特征进行分析。由于分析对象是双极性脉冲电压,按照正弦电压下的分析方法,将每个脉冲周期分为4个象限,每象限 $90^\circ$ ,根据实验脉冲电压的上升沿时间和实际的采样频率计算,电压从0 V上升到最大值对应的相位应为 $19.6^\circ$ 。某次局部放电测

量结果和相位分布见图7,大多数局部放电主要出现在上升沿和下降沿处,平顶区较少。

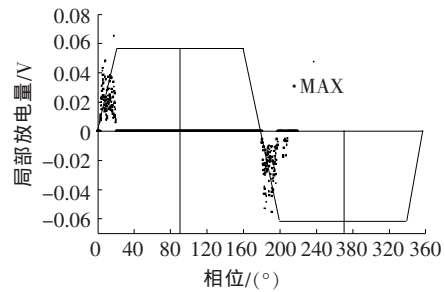


图7 脉冲电压下的局部放电散点图

由于脉冲相位分布很窄,为更清楚地观察局部放电的相位分布特点,笔者仅对局部放电上升沿附近的相位分布特点进行分析。分别测试老化20、60、100 h后的局部放电,放电次数 $q_N$ 和最大放电量 $q_{max}$ 的相位分布见图8。

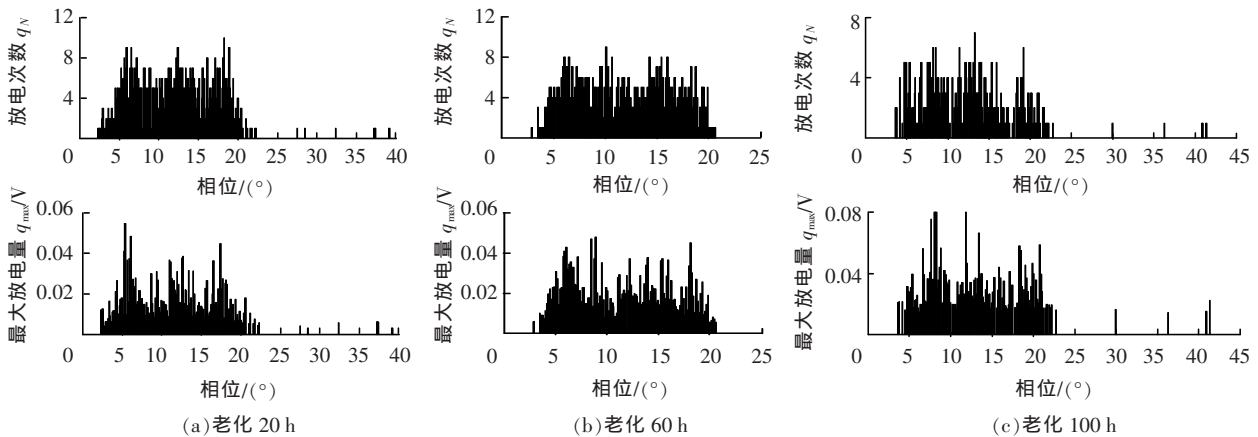


图8 工频老化后最大放电量 and 放电次数相位分析

由图8可知,在老化20 h后,放电次数和最大放电量相位分布基本比较“连续”,在 $20^\circ$ 相位附近(考虑到局部放电的随机性,文中定义为 $19^\circ\sim 21^\circ$ 相位区间)的最大放电量很小,放电次数也较少,大部分的放电几乎都集中在 $20^\circ$ 相位前。随着老化时间的增长,相位分布呈现展宽趋势,放电次数和最大放电量的相位分布呈现一种离散状态,在部分相位最大放电量 and 放电次数较多,而且在 $20^\circ$ 相位附近最大放电量随着老化时间增长而增大。老化100 h后,在 $20^\circ$ 附近的最大放电量迅速增长,放电次数增加不明显,但放电次数的相位分布离散程度更加明显,呈现较为明显的独立“放电丛”<sup>[6-8]</sup>。

### 3 讨论

从局部放电测试结果可以看出,随老化时间的增长,无论工频还是脉冲下,放电相位都呈现展宽趋势,但在脉冲电压下,其最大放电量 and 放电次数相位分布随着老化时间增长均出现明显的离散特征,对比工频下老化后的放电相位分布见图5,其局部放

电相位分布总体上比较“连续”,没有出现明显的离散放电相位分布。主要的原因在于50 Hz的频率较低,气隙发展相对较缓慢,不易导致局部缺陷的迅速发展,而脉冲电压频率很高,再加上快速的上升或下降沿作用,导致电荷存储效应更加明显,脉冲翻转后气隙内电荷来不及运动,导致气隙电场增加,放电量增大,放电出现的相位更高,导致高能放电增多,容易使局部缺陷快速发展,最后迅速击穿。

以上升沿为例分析脉冲下局部放电的特征。因为气隙电场是随着脉冲上升沿的变化过程而逐渐增大的,当大于局部放电的起始放电电场后,开始放电,所以放电相位和气隙的放电有关。事实上,在电场上升过程中,脉冲的上升需要一定时间,电场不可能瞬间达到最大值,当电场上升到最大值后,由于气隙表面空间电荷运动和局部放电,气隙合成电场迅速减小,因此,从各周期局部放电相位分析图7中可看出,在上升沿过程中出现很多放电,但在脉冲平顶区域放电比较少,主要是电场在达到最大值以前,很多气隙已经发生了局部放电,气隙内外电场达到平

衡状态。造成在平顶区域的局部放电主要取决于初始电子的产生和气隙电荷的扩散,具有直流下局部放电特征,放电次数较少。

因施加脉冲频率较高,导致单位时间放电次数较多,放电能量较高,局部气隙发展很快,而大气隙发展和高电场有关,因此在脉冲  $20^\circ$  相位附近的最大放电量和放电次数应和脉冲电压在该处产生的较高电场强度有关。根据图 8 中不同老化时间下局部放电最大放电量相位分析可知,随着老化时间增长,  $20^\circ$  相位附近最大放电量的幅值增加,老化 100 h 的最大放电量比老化 20 h 的最大放电量增长了近 4 倍,但其相对应的放电次数仅略有增长,并不明显,可能是大气隙数量并不多,因此对应的放电次数也较少。但该处放电次数相位分布随着老化时间增长呈现一种较为明显的离散分布,而且对应的最大放电量幅值在持续增加,说明脉冲电压下老化后,局部放电导致的部分气隙发展很快,尤其是在高电场下对应的气隙,导致部分放电出现在较高的相位和呈现不连续的分布状态。

由以上分析得知,高相位放电的幅值增长和放电相位分布的离散特征,尤其在  $20^\circ$  相位附近,是绝缘失效前的危险信号,是部分缺陷迅速发展的标志,该放电标志试样中局部气隙迅速增大,有可能导致样本击穿。为验证该结论,将两个相同条件下老化后的样本 21 号和 35 号在  $(19\sim 21)^\circ$  相位区间的最大放电量进行统计,结果见图 9,该区间内的最大放电

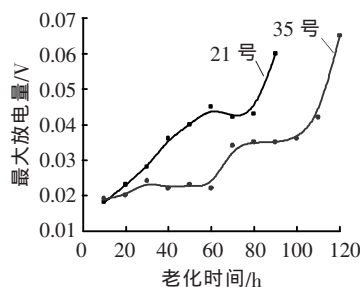


图 9 样本在  $19^\circ\sim 21^\circ$  相位区间最大放电量随时间变化

(上接第 504 页)

方法的正确性和有效性,为 APF 走向工程化和实用化奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] JAIN S K, AGARWAL P, GUPTA H O. A Control Algorithm for Compensation of Customer-generated Harmonics and Reactive Power [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(1): 357-366.
- [2] LIN H C. An Internet-based Graphical Programming Tool for Teaching Power System Harmonic Measurement [J]. IEEE

量都随老化时间增长,尤其在老化后期最大放电量增长迅速。

#### 4 结论

通过对比工频和脉冲下局部放电相位分析可得以下结论:

(1)随老化时间的增长,放电相位都呈现展宽趋势。工频下放电相位分布比较“连续”,脉冲电压下,放电相位分布随着老化时间增长出现明显的离散特征。

(2)脉冲下高相位放电幅值的增长和相位分布离散现象的出现,是绝缘失效前的危险信号,是部分缺陷迅速发展的标志。

#### 参考文献:

- [1] 刘 曦, 吴广宁, 佟来生, 等. 高频脉冲方波局部放电特征参量比较的研究[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 61-64.
- [2] YIN Wei-jun. Dielectric Properties of an Improved Magnet Wire for Inverter-fed Motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(4): 17-23.
- [3] 何恩广. 纳米  $\text{TiO}_2$  填料对变频电机耐电晕电磁线绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 72-76.
- [4] 佟来生, 吴广宁, 温凤香, 等. 变频牵引电机端子过电压产生原理及影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 673-676.
- [5] 张血琴, 吴广宁, 郭 俊, 等. 高频连续脉冲作用下电机绝缘局部放电信号的提取[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 103-107.
- [6] 周 凯, 吴广宁, 邓 桃, 等. 纳米复合绝缘材料的热刺激电流测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 76-82.
- [7] ZHOU Kai, WU Guan-ning, TAO Deng, et al. Aging Time Effect on PD and Space Charge Behavior in Magnet Wire under High PWM Voltages [C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, 2006: 159-162.
- [8] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between Space Charge Accumulation and Partial Discharge Activity in Enamelled Wires under PWM-like Voltage Waveforms [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393-405.

Trans. on Deucation, 2006, 49(3): 404-414.

- [3] GYUGYI L, STRYCUCLA E C. Active AC Power Filters [C]// Proc. of IEEE/IAS Annual Meeting, 1976: 529-535.
- [4] 刘开培, 陈艳慧, 张俊敏. 基于  $p-q-r$  法的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 25-29.
- [5] 李亚峰, 李含善, 任永峰. 用于串联型有源电力滤波器的  $dq0$  变换[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8): 59-73.
- [6] 赵怀军, 庞亚飞, 陈 明, 等. 改进型 UPF 谐波电流实时检测方法[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 38-42.