

高频方波脉冲下变频电机绞线对的局部放电特性分析

徐慧慧, 吴广宁, 朱光亚, 罗 杨, 曹开江, 张依强

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于脉冲电流传感器建立了一套方波脉冲下的局部放电测试系统, 并对模拟变频电机匝间绝缘的绞线对试样进行局部放电试验。测试并分析了脉冲电压的频率和上升时间对局部放电起始放电电压、平均放电量和放电次数的影响, 探讨了绞线对在方波脉冲电压下的局部放电机理, 为更深入地研究方波脉冲电压下绝缘老化机理打下了坚实的基础。

关键词: 脉冲方波; 局部放电; 变频电机; 绞线对

中图分类号: TM835; TM245

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2012)04-0048-04

1 引言

随着我国高速铁路的快速发展, 高速机车普遍采用变频调速交流传动系统, 而变频调速牵引电机是高速机车的核心技术之一, 其安全、可靠性直接影响高速机车的性能。由于半导体开关器件技术的发展, 使得 PWM 变频调速技术在交流传动领域得到广泛的应用^[1-2]。国内外研究发现变频电机定子绕组绝缘承受的不再是传统的正弦电压而是连续的高压方波脉冲; 一方面, 高压方波脉冲具有极快的上升和下降时间, 导致定子绕组中电压分布极不均匀; 另一方面, 高压方波脉冲的频率很高, 可达 20kHz^[3-4]。变频牵引电机长期工作在高频和陡峭的上升和下降沿的方波脉冲电压下, 导致其绝缘过早失效, 而且通常发生在匝间绝缘。研究表明, 局部放电是其早期失效的主要原因之一^[5-6]。因而, 对局部放电的检测和评估也就成为检测变频牵引电机绝缘状况的重要手段, 有助于分析变频牵引电机绝缘的破坏机理。

本文针对变频电机绞线对进行试验, 用以研究其匝间绝缘的破坏机理。在双极性高频方波脉冲电压下对试样进行了局部放电测试, 分析了频率和上升时间对局部放电起始电压(PDIV)、平均放电电量(Q_{mean})及放电次数(PD Number)的影响, 探讨了脉冲电压下绞线对的局部放电机理。

2 试验装置和试样

2.1 试样

试验中采用外观如图1所示的绞线对试样, 其绝缘材料和工艺与变频牵引电机采用的电磁线圈相同。绞线对由两根并行的电磁线和外绝缘层组成, 电磁线绝缘膜的厚度为 0.21mm, 其外绝缘层先用云母带半叠包2次, 然后再用玻璃丝带平包一次。匝间绝缘试验时, 绞线对试样的两根电磁线作电极。试验前, 将试样进行了烘干(100℃, 2h)、屏蔽、防晕等预处理。

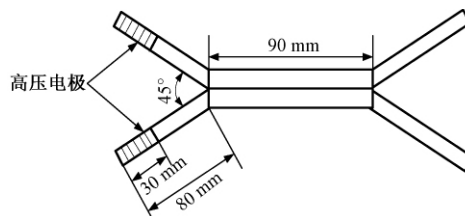


图1 绞线对外观

Fig. 1 Configuration of twisted pair

2.2 试验装置

图2为局部放电测试系统示意图, 方波脉冲试验电源 PITS7000 可产生峰峰值达 7000V 的双极性方波脉冲电压, 频率为 1~20kHz 可调, 当试样的电容小于 100pC 时, 脉冲电压的上升沿约为 120ns。脉冲电压的信号通过型号为 TektronixP6015A, 衰减

收稿日期: 2011-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177136)

作者简介: 徐慧慧(1989-), 女, 河南籍, 硕士研究生, 主要从事高速机车变频牵引电机绝缘性能评估的研究;

吴广宁(1969-), 男, 江苏籍, 教授/博导, 主要从事高压与绝缘技术方面的教学与研究工作。

系数为 1000:1 的高压差分探头进行采集并输入到双通道高速数字示波器的 CH1 通道;局部放电信号采用磁率率低的高频 NiZn 材料电流传感器进行耦合,并输入到示波器的 CH2 通道, R 为无感积分电阻; C_x 为待测绞线对试样,高速数字示波器经 PCI 接口和 GPIB 连接线将测试到的数据传输到计算机,并采用自编采集软件采集并保存,测试时间为 5min,得到多个周期的局部放电数据,之后对保存的数据经统计分析软件进行统计分析。设定示波器的采样频率为 500MHz。

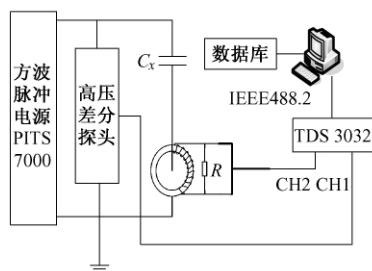


图2 局部放电测试系统电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of PD test

方波脉冲电压下提取的局放信号和工频正弦电压下的有所不同,其一,由于方波脉冲电源的上升沿 (dv/dt) 较陡,易引起电磁干扰;其二,方波脉冲电压中含有很大的谐波分量,局部放电传感器耦合的信号中包含大量的干扰成分;其三,PWM 脉冲的频率较高,产生的局部放电信号数量多且幅值大^[7-8]。因此传感器耦合的信号中含有大量干扰信号,为了得到局部放电信号,必须对其进行处理。本文采用小波包滤波的方法,如图3为某次测试数据及其小

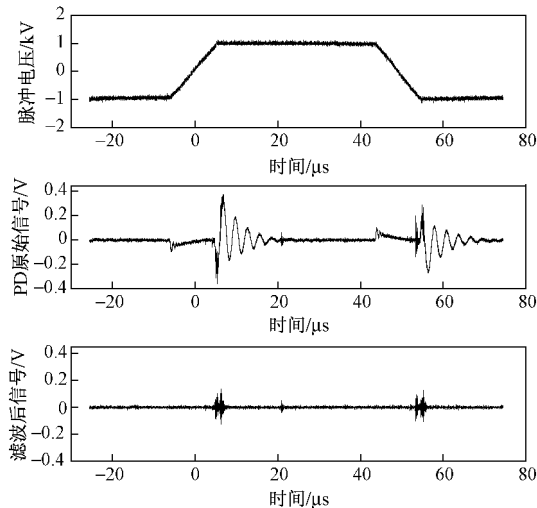


图3 滤波前后的局部放电信号

Fig.3 PD signals before and after filter

波包处理结果,由图可知采用该方法能够较好地提取局放信号,且局部放电大多发生在方波脉冲的上升沿和下降沿处,很少发生在平顶区域。

3 试验结果及分析

3.1 绞线对的起始放电电压

室温条件下,分别测试绞线对试样在不同频率和不同上升时间下的局部放电起始放电电压,结果如图4所示。结果表明随着脉冲电压频率的增大,绞线对的 PDIV 减小,而随着脉冲电压上升时间的增加,绞线对的 PDIV 明显增大。

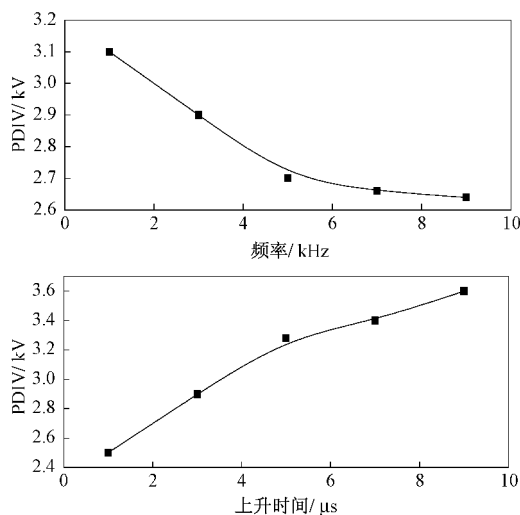


图4 PDIV 随频率和上升时间的变化

Fig.4 Behavior of PDIV with variation of frequency and rise-time

3.2 频率对局部放电的影响

图5为室温,方波电压上升时间为 $2\mu s$,幅值 $3.5kV$ 时,不同频率下绞线对的局部放电参数,由图可知无论是平均放电量还是放电次数都随着方波脉冲电压频率的增大而增大。在放电过程中,放电脉冲的大小和次数与空间电荷的存储效应有关,而气隙内的电荷并非静止,会沿着气隙的表面运动或扩散,导致气隙电荷电场随时间变化。文献[9]用单一的内部气隙模型给出了两次放电间隔期间气隙表面电荷 Q 的变化公式:

$$Q(t + \Delta t) = Q(t^+) \exp(-\Delta t/\tau) \quad (1)$$

其中, t 为第一次放电发生的时刻; Δt 为两次放电间隔时间; t^+ 为第一次放电结束的时刻; τ 为时间常数,在方波脉冲电压的上升和下降时间不变的情况下增大频率时,正负放电间隔气隙表面电荷的变化仅由脉冲电压的频率决定,频率增大时,周期缩短,

脉宽变窄,表面空间电荷的扩散时间 Δt 减小,电荷的衰减作用减弱,使电荷驻留效应增强,反向电场增加,放电幅值增大。而频率的变化只改变了方波脉冲的宽度,对其上升/下降沿并没有影响,因此局部放电在此处的发生几率也不会改变;但脉宽变窄,平顶区域部分出现放电的几率就会降低,从而一个脉冲周期内的放电次数减少;但在一定的单位时间内,脉冲频率增加,则脉冲周期缩短,单位时间内的放电脉冲就会增加,因此单位时间内的放电次数随着频率的增加而增长,且增长速率越来越平缓。

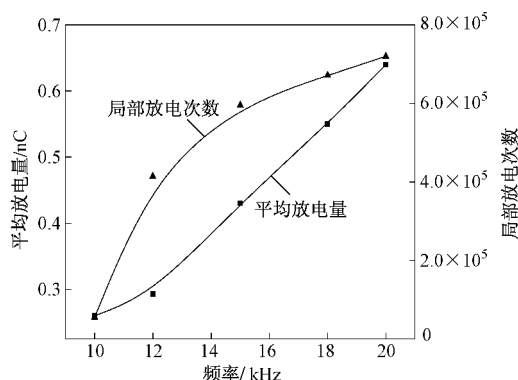


图 5 频率对局部放电和的影响

Fig. 5 Effect of frequency on PD

3.3 上升时间对局部放电影响

室温下,方波电压幅值为 3.7kV,频率 2kHz 时,上升时间对局部放电的影响如图 6 所示,平均放电量和放电次数均随着上升时间的缩短而迅速增加。由于脉冲电压上升时间的缩短,导致在相同电压幅值下的电压变化率 dv/dt 增大,因此在外加电压反向时,空间电荷驻留效应明显,增加了电场叠加作用,形成较强的反向电场叠加;上升时间越短,反

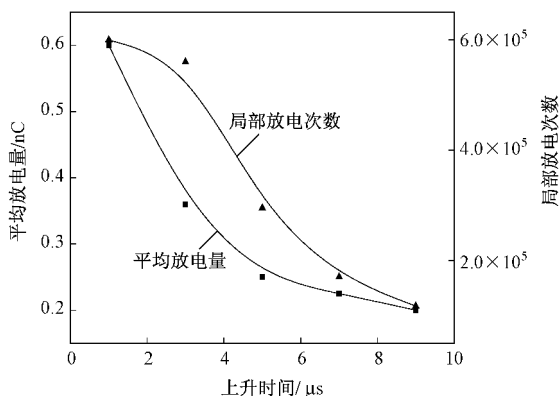


图 6 上升时间对局部放电的影响

Fig. 6 Effect of rise-time on PD

向电压越高,局部放电量就会越大。放电次数的增加是由于在一次放电结束后,气隙电场立即降为残余电场,电压变化率 dv/dt 较大时,使气隙电场迅速达到起始放电电场,而残余电场在这段时间内扩散很少,较容易获得初始电子,就会连续出现放电,致使放电次数增多。

4 绞线对的局部放电机理

绞线对试样在方波脉冲电压下的局部放电主要以内部放电为主,由于正弦电压通常使用 50Hz 频率,且电压的上升时间很长,电压变化率较小,极性反转较慢,在电压极性变换时气隙表面电荷有足够的时间改变极性。而方波脉冲电压的频率可达 20kHz,上升时间较短可达 μs 级,脉冲较陡,在电压极性反转时气隙表面空间电荷的分布特性及对气隙场强的影响不同于正弦电压下的,从而工频下的局部放电机理不在适用于脉冲电压下的。

为了便于分析一个脉冲电压周期内的局部放电过程,将绝缘内部气隙电场分布描述成图 7,其中 E_i 为气隙电场, E_q 为气隙内表面空间电荷形成的电场, E_0 为外施电场的幅值,如图 7(a) 所示,当有初始电子存在且气隙电场 $E_i = (E_0 - E_q)$ 大于局部放电的起始场强时,气隙内将有局部放电产生。放电发生后,如图 7(b) 所示,气隙电场立即下降到残余电场 E_{res} ,内部残余电荷增多,导致 E_q 增强,致使内外电场趋于平衡,放电熄灭。当方波脉冲电压极性反转时,气隙中的空间电荷来不及移动或扩散,则 E_q 不变, E_0 反向,气隙电场加强,如图 7(c) 所示,此时气隙电场为 $-(E_0 + E_q)$,当气隙电场达到局部放电起始场强后,发生局部放电,电场再次降至 E_{res} ,内部电荷在反向电场作用下运动完成,如图 7(d) 所

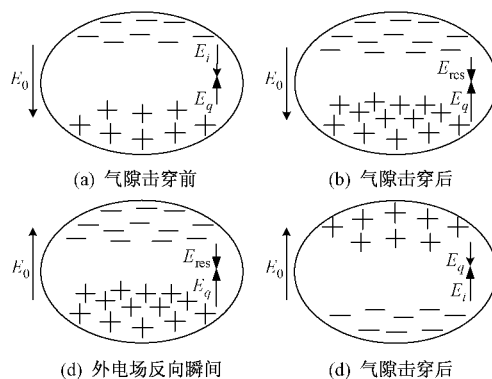


图 7 不同时刻气隙电场的分布

Fig. 7 Electric field distribution at different time

示,此后开始下一次局部放电过程。

脉冲电压下的气隙电场变化可以用图8表示^[10],在脉冲电压的上升和下降沿处出现了气隙电场的最大值,这是由于气隙表面的空间电荷在脉冲极性快速变化时来不及运动造成的;而气隙表面空间电荷形成的电场 E_q 在每次放电以后就会消减气隙的合场强,在每次脉冲电压极性变化时,始终与外施电场的方向保持一致,加强气隙电场,使其承受更大的脉冲电压冲击。

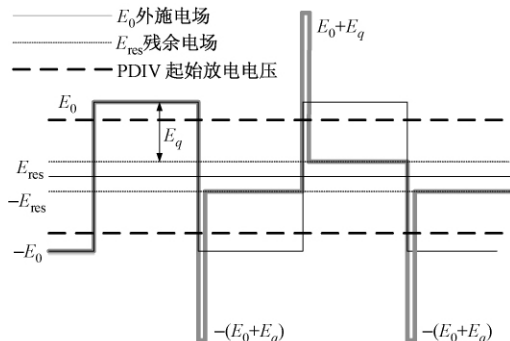


图8 脉冲电压下气隙电场变化

Fig. 8 Electric field changes of air-gap under pulse voltage

5 结论

本文根据高频方波脉冲电压的特性建立了一套局部放电测试系统,并通过小波滤波技术对提取的局部放电信号进行处理。对不同频率和上升时间下的局部放电特性进行了测试和分析,探讨了方波脉冲下绞线对的局部放电机理,结果表明起始放电电压随着频率的增加而减小,而随着上升时间的增加而增大;高频导致单个周期的放电次数减少,单位时间的放电次数及平均放电量的增加;陡上升沿增强了空间电荷的驻留效应及反向电场的叠加,使平均放电量和放电次数增大。

参考文献 (References):

- [1] Von Jouanne A, Enjeti P, Gray W. Application issues for PWM adjustable speed AC motor drives [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1996, (2): 10-18.
- [2] 何恩广,周升,刘学忠,等 (He Enguang, Zhou Sheng,

Liu Xuezhong, et al.). PWM 变频电机绝缘技术的研究进展 (Development of research on the insulation failure of PWM inverter-fed motor) [J]. 绝缘材料 (Insulation Materials), 2002, (4): 18-24.

- [3] Kaufhold M, Auinger H, Berth M, et al. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low voltage induction motors [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2000, 12(2): 396-402.
- [4] 于钦学,任文娥 (Yu Qinxue, Ren Wene), Cavallini A, et al. SPWM 变频调速电动机线圈局部放电的测量 (Measurement of partial discharge of winding in SPWM inverter-fed induction motors) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2006, 21(4): 111-114.
- [5] Guastavino F, Dardano A, Torello E. Measuring partial discharges under pulsed voltage conditions [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1640-1648.
- [6] Hayakawa N, Okubo H. Partial discharge characteristics of inverter-fed motor coil samples under AC and surge voltage conditions [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(1): 5-10.
- [7] 吴广宁,刘曦,佟来生,等 (Wu Guangning, Liu Xi, Tong Laisheng, et al.). 提取 PWM 脉冲下局部放电信号的 Sym4 小波滤波器的研究 (Partial discharge extraction under PWM pulse by Sym4 wavelet digital filter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2006, 21(2): 35-38.
- [8] Andrea Cavallini, Gian Carlo Montanari. Effect of supply voltage frequency on testing of insulation [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 111-121.
- [9] Cavallini A, Ciani R, Conti M, et al. Modeling memory phenomena for partial discharge processes in insulation cavities [A]. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. 2003. 723-727.
- [10] Fabiani D, Montanari G C, 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: 393-405.

(下转第 57 页, cont. on p. 57)

- pei, Liu Xiaoli, et al.). 复杂配电网故障定位的链表法 (Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2009, 24(5): 190-196.
- [8] 林霞, 陆于平, 王联合 (Lin Xia, Lu Yuping, Wang Li-anhe). 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法 (New fault region location scheme in distribution system with DGs) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008, 23(11): 1-8.
- [9] 唐斐, 陆于平 (Tang Fui, Lu Yuping). 分布式发电系统故障定位新算法 (A new fault location algorithm for distributed generation system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2010, 38(25): 62-68.

A practical fault locating adaptive algorithm for distribution network with distributed generation

WU Le-peng, HUANG Chun, ZEN Zhao-xin

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The premise of effective use of clean energy is to correctly determine the malfunction zone of distribution network with distributed generation. Based on the matrix algorithm in the location of feeder terminal unit (FTU) to the malfunction of distribution network, an adaptive algorithm for the fault location in distribution network is proposed. According to the overcurrent flowing through the FTU and its direction, firstly the algorithm judges whether distributed power is put into operation, and whether the fault happens at bus and network. Then it preliminarily locates the malfunction zone in the distribution network. Secondly, on the basis of malfunction zone structure and overcurrent information of FTU, the fault matrix is adaptively formed and the fault zone is confirmed. Lastly, according to the defected fault current difference at both ends of fault circuit to form the fault criteria, the proposed criteria are formed by comparing the difference between fault current. The numerical example verifies accuracy and efficiency of the algorithm, and good mechanism of fault tolerance.

Key words: distributed generation; distribution network; FTU; fault location; adaptive algorithm

(上接第51页, cont. from p.51)

Partial discharge characteristics of twisted pairs for inverter-fed motor under square impulse voltage

XU Hui-hui, WU Guang-ning, ZHU Guang-ya, LUO Yang, CAO Kai-jiang, ZHANG Yi-qiang

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

Abstract: Inverter-fed traction motor is one of the key components in electric locomotive for high-speed railway, of which insulation system reliability can guarantee the safety and stability of locomotive. Partial discharge (PD) is one of the most important factors causing previous failure of the insulation of inverter-fed motors. In this paper, a partial discharge testing system under square impulse voltage based on impulse current sensor was built. And PD tests were conducted on twisted pairs simulating inter-turn insulation of inverter-fed motor. The influence of voltage rise-time and frequency on PD inception voltage, average discharge quantity, and discharge numbers were analyzed. Meanwhile this paper discussed the PD mechanism of the twisted pairs under square impulse voltage. This can provide more strong foundation for further studies on insulation ageing mechanism of square impulse voltage.

Key words: square impulse voltage; partial discharge; inverter-fed motor; twisted pairs