

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.014

10 kV 异步电动机定子绕组相间放电指纹分布规律

康爱亮, 吝伶艳, 宋建成, 雷志鹏

(太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 10 kV 异步电动机在运行过程中,机械振动会对绕组端部主绝缘造成横向撕裂,产生相间放电,大大降低其绝缘性能。针对这一问题,笔者对高压电动机真机定子绕组端部进行分析,设计制作了绕组相间放电模型,研究了 10 kV 异步电动机真机定子绕组在不同电压等级下放电指纹的分布规律。在屏蔽室环境下对其施加电压诱发相间放电,提取表征放电特性的特征量,观察并记录相间放电热点分布。该研究为 10 kV 异步电动机主绝缘在线监测及故障诊断提供理论依据。

关键词: 10 kV 异步电动机;机械振动;机相间放电;放电指纹

Bar-to-bar Discharge Patterns of Stator Windings for 10 kV Asynchronous Motors

KANG Ailiang, LIN Lingyan, SONG Jiancheng, LEI Zhipeng

(Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: During the operation of 10 kV asynchronous motor, bar-to-bar discharge will be generated because of transverse tear of end-winding, which can generally reduce the insulating properties. In order to solve this problem, a real bar-to-bar discharge model is designed by abrading the junction region between the low resistance layer and the high resistance layer of a real stator winding. The experiment is performed in the electromagnetic shielding room and the distribution patterns of bar-to-bar discharge under different voltages are analyzed. Hot spot distribution in the discharge region is observed and recorded through infrared camera. The research will provide a judging basis for the on-line monitoring and fault diagnosis of the 10 kV three phase asynchronous motors.

Key words: 10 kV asynchronous motors; mechanical vibration; bar-to-bar discharge; discharge fingerprint

0 引言

高压电机在运行过程中会受到各种应力作用,一般来说有热、电、环境和机械应力,称为 TEAM 应力^[1-2]。这些应力会加速高压电机绝缘系统的老化,降低绝缘系统的强度,大幅降低电机的运行寿命^[3-4]。目前,10 kV 三相异步电动机采用的是 F 级环氧云母绝缘,能够耐受电应力和热应力,因此振动就成为造成定子绕组绝缘性能劣化的主要原因,特别是在高压定子绕组中^[5]。大量发电机、电动机的运行经验表明,这种振动会导致定子绕组高阻带和低

阻带的搭接部位损伤^[1]。高阻带和低阻带的搭接部位的本质为电气连接,若搭接部位损伤,绕组端部不再“接地”,而是电位“悬浮”,并且由于电容耦合作用,其电压倾向于升高到线圈内铜导体的电压水平。处于高电位的绕组与周围低电位的绕组间形成电势差,当电场强度大于起始放电场强时,就会发生相间放电。一台运行多年的 10 kV 三相异步电动机定子绕组端部,由于振动而引发相间放电,见图 1。从图 1 可看出,表面有明显的灼烧痕迹。

在高压电机线棒放电指纹研究方面,加拿大的 Claude Hudon 制作了存在于大电机定子线棒绝缘中的多种故障模型,并提取其放电指纹^[6-7]。Greg

收稿日期:2016-06-30; 修回日期:2016-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377113); 山西省自然科学基金项目(2014011024-3)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (513771137), National Natural Science Foundation of Shanxi Province(2014011024-3).

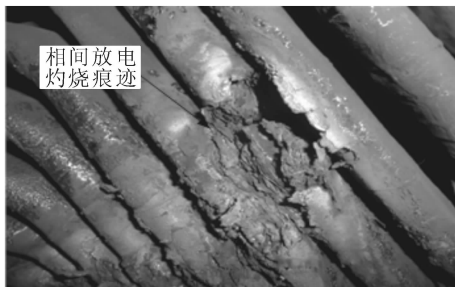


图1 遭受相间放电灼烧的定子绕组

Fig. 1 A stator winding burned by bar-to-bar discharge

Stone结合实验室试验与现场监测,给出了存在于高压电机中多种放电类型的指纹分布^[8-10]。然而其放电对象均为大型水轮发电机线棒,对于放电机理也未见报道。针对于高压电动机定子绕组局部放电指纹分布规律的研究,国内也做了一些研究,但其研究重点多为定子绕组槽部放电及电晕放电^[11-13]。对于高压电机定子绕组相间放电,虽然建立了其试验方法^[14],但对于放电谱图随电压的变化规律及其放电机理,并未进行深入研究。

文中利用定制的真机 10 kV 的 F 级绝缘三相异步电动机定子绕组作为试验对象,对绕组低阻带与高阻带搭接部位进行磨损老化,嵌入自制定子铁心槽。在屏蔽室环境下,通过无局放升压变压器施加电压,诱发线圈产生相间放电,利用 1 000 pF 无局放耦合电容器采集局部放电信号,再通过哈弗莱 DDX9101 局部放电分析仪观察并分析定子绕组相间放电指纹随电压的变化规律。同时利用 FLIR 红外热像仪对相间放电发热部位进行观察。该研究能够为 10 kV 三相异步电动机主绝缘在线监测提供判断依据。

1 相间放电机理分析

高压电动机定子绕组直线部分的半导体层和端部防晕层的搭接处具有优化绕组端部电场的作用,二者的良好接触能够确保绕组端部电场均匀。当高压电动机运行时,定子绕组受到定子电流和旋转磁场交互作用产生的电磁力的作用,如果绕组端部绑扎不牢固或由于绕组本身尺寸问题造成端部绑扎不整齐,就会发生振动。假设槽部的线圈或线棒被槽部支撑系统完全固定,那么径向和切向的振动将以槽口处为支撑点,线棒或线圈绝缘上的疲劳断裂最终会发生在槽外部分,这种故障会导致相间或单相接地故障。当搭接处由于振动磨损后,在表面电导电流的作用下,主绝缘极大的电阻率将使磨损处电位迅速发生变化,导致绕组端部绝缘表面产

生非常高的电位和密集的电场,使得该处发生相间放电。

2 试验方案

2.1 试验绕组

电动机定子绕组绝缘材料及制做方式是由电动机额定电压和绝缘等级决定的,与电动机容量和机身大小无直接联系^[12]。文中试验用绕组采用 10 kV 电动机新绕组,其主要绝缘材料是厚度为 3.04 mm 的环氧云母带,见图 2。

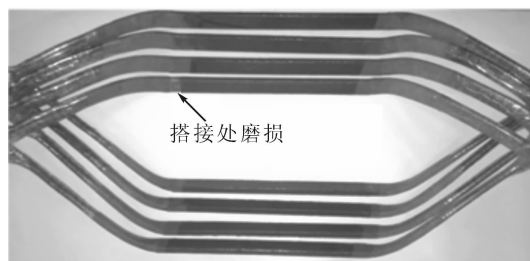


图2 试验用定子绕组(箭头所示为试验磨损处)

Fig. 2 Testing stator windings(the junction section, which was being abraded when experimenting, showing as the arrow)

2.2 定子铁心槽部模型

自制的定子铁心双槽模型是由工业硅钢片叠压而成,槽长 120 mm,槽深 43 mm^[15],见图 3。嵌线时,将槽底部垫环氧玻璃布板以调节槽深,其上叠放一片环氧防电晕玻璃布板,将绕组放入,调节压紧薄片数,使 2 根绕组与槽壁贴紧。然后用橡皮锤敲入磁性环氧玻璃引拔槽楔,绕组同槽楔之间间隙通过填充环氧防电晕玻璃布板来调节,保证绕组在垂直方向上紧固,使其不会在外部应力作用下发生松动^[16]。

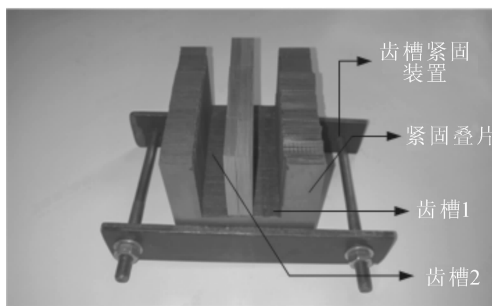


图3 定子铁心槽模型

Fig. 3 The mockup stator core

2.3 试验方法

实验前,先检查绕组表面是否损坏、受潮、落有灰尘等,因为绝缘表面的损伤、潮湿及异物堆积会改变绝缘的整体性能,破坏绕组优化改善电场的能

力。在施加电压以后会在该位置产生密集电场, 导致局部放电, 对试验造成干扰^[17]。

确保绕组表面没有上述现象后, 将绕组按照 2.2 所述方法嵌入槽内, 1 根连高电压, 另 1 根接地, 嵌入绕组后两绕组端部磨损处间隙为 1 mm。利用磨损器对施加高压绕组的高阻带与低阻带搭接处进行磨损, 利用激光测距仪确保磨损深度为 0.3 mm, 使其失去半导体物理链接, 从接地绕组处通过无局放耦合电容采集放电信号, 可以有效避免干扰。试验重复进行 3 次, 每次试验间隔 1 h, 确保绝缘恢复到正常水平后再进行下一次试验, 以确保试验的可信度。在施加 6 kV 电压 4 h 后, 依次在 3~10 kV 采集局部放电信号, 旨在得到相应电压等级下的相间放电指纹分布规律。

2.4 局部放电信号采集系统

文中局部放电采集系统见图 4。图 4 中, 电源为 220 V 交流电源; BPF 为带通滤波器, 其作用是滤除电源中的谐波成分; LPF 为无局放隔离变压器低通滤波器, 其作用是滤除来自前级设备的高频干扰; T 为充气式无局放试验变压器, 其作用是保证试验过程中仅有试验绕组产生局部放电; R 为保护电阻; C_X 为试验绕组; C_C 为 1 000 pF 无局放耦合电容器, 其作用是局部放电信号提供高频通道; PDD 为局部放电检测仪, 用于采集试验过程中的局部放电信号; 实线框为电磁屏蔽室, 可以保证试验过程中的背景干扰小于 2 pC。

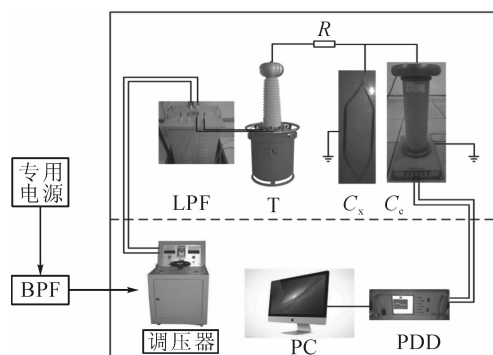


图 4 局部放电信号采集系统示意图

Fig. 4 The schematic diagram of partial discharge detection system

3 试验结果分析

3.1 放电指纹分布

依次为 3、4、5、6、7、8、9、10 kV 下定子绕组相间放电指纹分布见图 5~12。

由图 5~12 可知, 在 3 kV 时, 正放电最大放电量高于负放电最大放电量。而且, 放电指纹呈现正

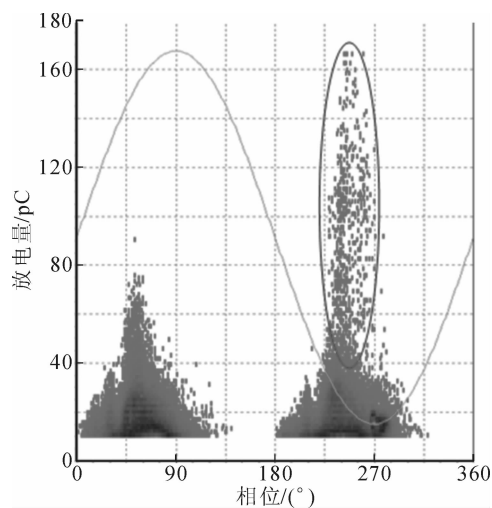


图 5 3 kV 时放电指纹分布

Fig. 5 Distribution of the bar-to-bar discharge under 3 kV

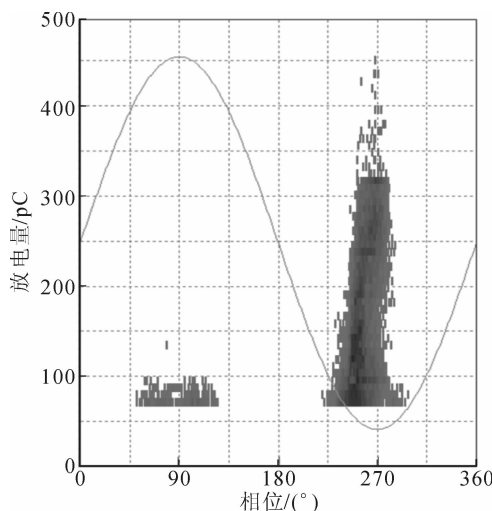


图 6 4 kV 时放电指纹分布

Fig. 6 Distribution of the bar-to-bar discharge under 4 kV

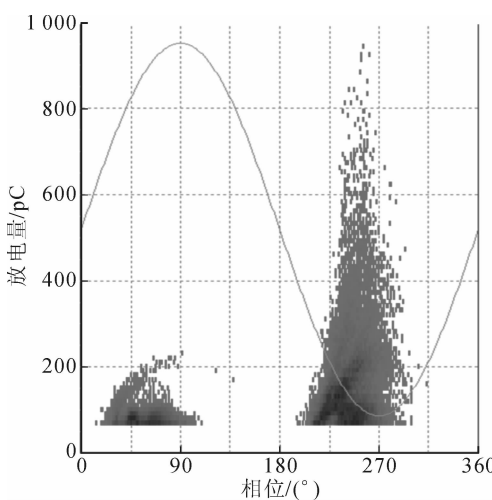


图 7 5 kV 时放电指纹分布

Fig. 7 Distribution of the bar-to-bar discharge under 5 kV

放电窄相位高幅值的外形包络线, 见图 5 椭圆曲线, 这是明显的相间放电特征^[8]。相间放电一旦发

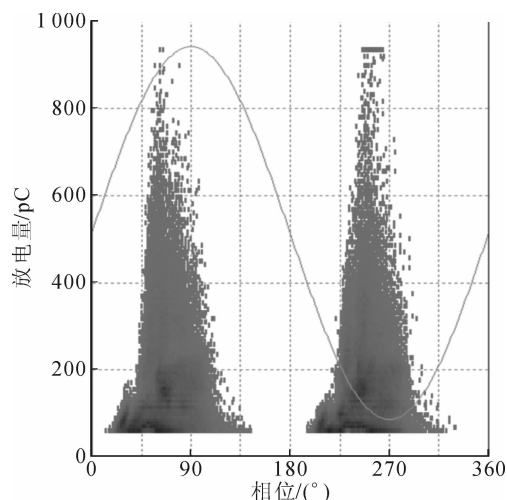


图8 6 kV时放电指纹分布

Fig. 8 Distribution of the bar-to-bar discharge under 6 kV

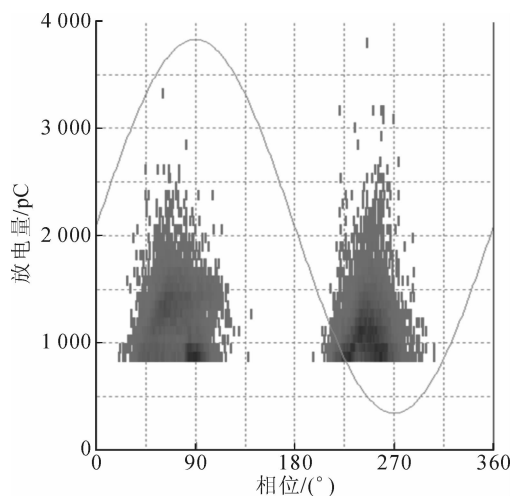


图11 9 kV时放电指纹分布

Fig. 11 Distribution of the bar-to-bar discharge under 9 kV

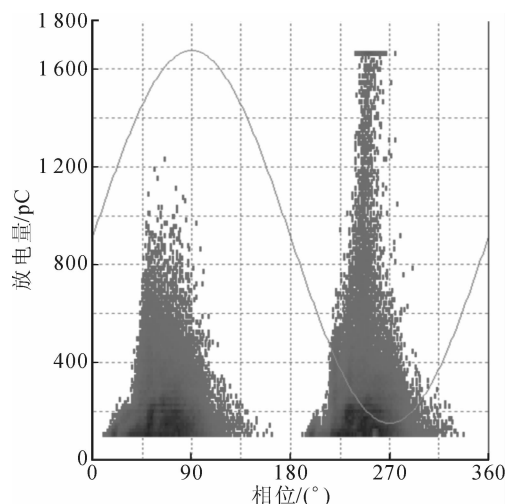


图9 7 kV时放电指纹分布

Fig. 9 Distribution of the bar-to-bar discharge under 7 kV

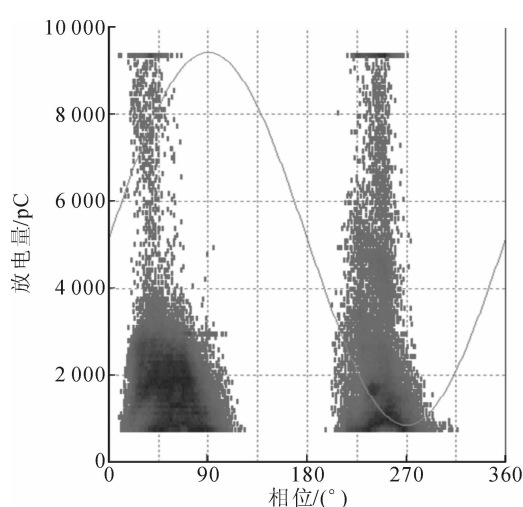


图12 10 kV时放电指纹分布

Fig. 12 Distribution of the bar-to-bar discharge under 10 kV

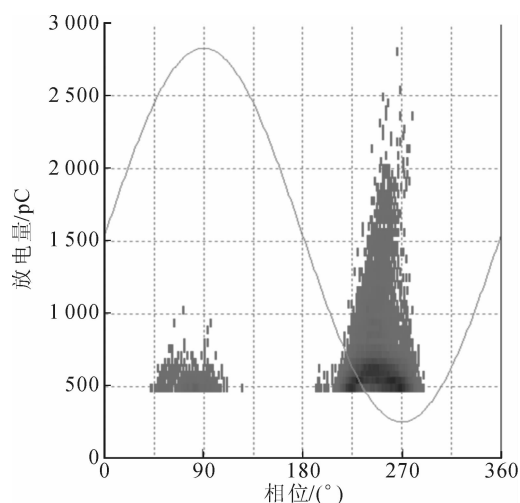


图10 8 kV时放电指纹分布

Fig. 10 Distribution of the bar-to-bar discharge under 8 kV

生,就具有很高的放电能量,远远超过相同电压等级下的内部放电最大放电能量,该特征使其能够有效

地区分开其他放电类型。

相间放电指纹分布特征为:负半周正放电的最大放电能量较正半周负放电占有明显优势;放电指纹分布表现为负半周270°附近有一系列高幅值、多次数、外形包络线为锥形的放电脉冲;当外施电压在6 kV以上时,90°附近也出现一相似情形的放电脉冲。

3.2 结果分析

从最大放电能量角度分析,正脉冲最大放电能量($Q_{\max+}$)占优,并且随着电压等级的升高,负脉冲最大放电能量($Q_{\max-}$)有追赶 $Q_{\max+}$ 的趋势,当电压达到10 kV时, $Q_{\max+}$ 与 $Q_{\max-}$ 基本相当,见图13。

从起始放电相位的角度来分析,随着电压升高,正负放电脉冲的起始放电相位有向左偏移的迹象。该现象的出现,主要是由于绕组端部主绝缘在缠绕过程中会留有气泡,当外施电压足够高时,主

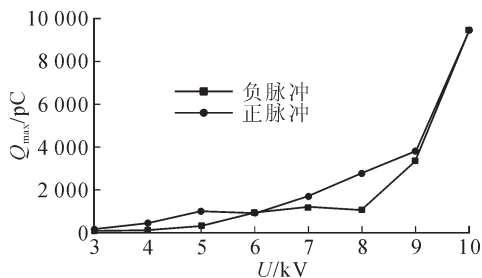


图 13 正负最大放电量随电压变化曲线

Fig. 13 $\pm Q_{\max}$ curve under different voltage

绝缘内气泡电场强度达到放电起始场强时,气泡内会发生放电现象,放电过程中产生的大量空间电荷在外电场作用下迁移到气泡壁上,这样就在气泡壁上残留有部分电荷。所以,即使外施电压为零时,仍存在场强,而且随着电压的升高,该电场强度足以激发放电,使得放电相位左移。

另外,除上述局部放电电气参量特征外,端部相间放电的一些外在物理特征也能够帮助进一步识别。具体如下。

当外施电压达到 8 kV 时,能够听到明显的嘶嘶放电声,同时可以闻到臭氧味道,电压进一步升高,可以观察到放电细丝。通过红外热像仪对试验绕组进行观察,绕组端部振动磨损处可见清晰的红热现象,这是由于绕组端部磨损后,破坏了防晕层优化电场线的作用,使得绕组端部电场不再均匀,密集的电场线及电荷使得该处易于发生局部放电,同时放电产生的高热量使得绕组端部局部温度迅速升高,进一步加速绝缘的老化。试验绕组放电热点位置分布见图 14。



图 14 相间放电位置红外热像图

Fig. 14 Hot spot distribution on bar-to-bar discharge

4 讨论

高压电机定子绕组端部绝缘损坏是产生相间放电的先决条件。为此,试验对绕组端部的高阻带和低阻带搭接处进行磨损,以诱发相间放电。并利用静电电压表分别测量老化前后表面电动势随槽口距离的变化分布,见图 15。

相间放电的发生分为 2 个阶段,第 1 阶段为绕

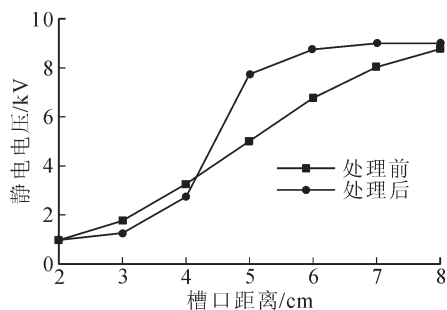


图 15 老化前后绕组端部静电电压随槽口距离变化

Fig. 15 The electrostatic voltage distribution of end-winding along slot exit before and after aging

组搭接处的电晕放电;第 2 阶段为 2 个绕组间的介质阻挡放电。

当搭接部位被破坏以后,由于主绝缘的高阻抗,会在破坏部位产生高场强。电子将在此高场强作用下加速,与空气中的部分气体分子发生碰撞电离。随着电压的升高,电离逐渐从绕组表面向附近空间中发展,使得空间中的电子集聚增加,这一过程中产生的热量又导致热电离,在绕组表面形成电晕放电,放电过程的发展见图 16,此为相间放电的第 1 阶段。其放电谱图见图 5。

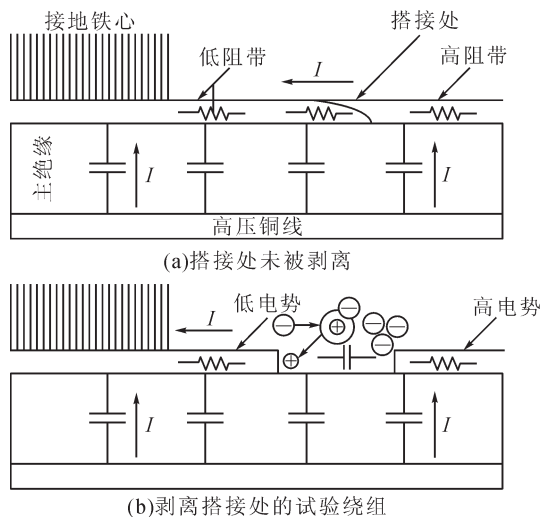


图 16 搭接处剥离前后电势分布及放电位置等效示意图

Fig. 16 The potential distribution and discharge position equivalent schematic of the coil before and after the junction section being abraded

随着电压等级的继续升高,高压电极附近的空气被电离,电子会在电场的加速下与气隙中的气体分子或原子碰撞,形成电离,最终导致整个气隙的击穿。但由于介质的阻挡作用,这种放电不能形成持续的放电电弧,只能形成断续的放电细丝,此为相间放电的第 2 阶段。放电过程的发展见图 17。

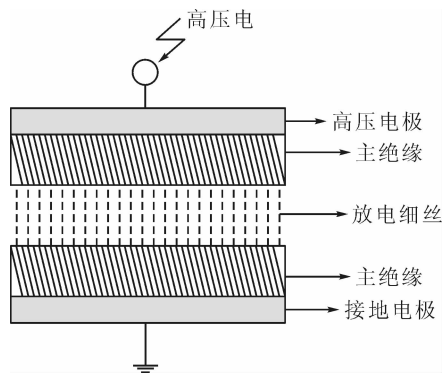


图 17 相间放电等效原理图

Fig. 17 The equivalent schematic of bar-to-bar discharge

5 结论

文中建立了 10 kV 三相异步电动机相间放电真机试验模型,对真机整根定子绕组搭接处进行振动磨损,在实验室环境下诱发绕组端部相间放电,并通过提取不同电压等级下的放电指纹,研究了其分布规律,结论如下:

1)绕组端部半导体层和防晕层搭接处被破坏是诱发相间放电的先决条件。相间放电的发展过程分为 2 个阶段,第 1 阶段为绕组表面附近的电晕放电,第 2 阶段为绕组间的介质阻挡放电;

2)端部相间放电在从诱发到发展过程中,最大放电量呈现 q^- 较 q^+ 占优势的特征,但随着电压等级的升高,优势逐渐减小,最终 q^- 与 q^+ 放电量相当。其外形特征表现为电压负半周的窄相位段高能放电,及正电压半周的宽相位段低能量放电,且其几何外形不随电压的变化而发生改变;

3)随着电压等级的提高,相间放电起始放电相位会发生左移,这主要是由于主绝缘内部的气泡放电所致,相间放电相位主要分布在 $20^\circ \sim 85^\circ$ 和 $215^\circ \sim 260^\circ$ 间;

4)端部相间放电属于介质阻挡放电类型,相间放电发展过程中,随着外施电压的升高,大量中性气体被电离,电子与原子或分子发生碰撞,形成电子崩或流注,在绕组之间形成导电通道。但由于绝缘介质的存在,导电通道不能持续,其只能发展为跨接于绝缘间的放电细丝,不能形成稳定的电弧;

5)绕组端部在发生相间放电时能够产生高温,降低主绝缘的绝缘性能,大大加速端部绝缘的老化。文中的试验和结果分析既充实了高压电机定子绕组端部的绝缘性能研究,又为高压电机定子绕组主绝缘状态的监测监控提供了参考依据。

参考文献:

- [1] STONE G, BOULTER E A, CULBERT I, et al. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair[M]. US: John Wiley & Sons, 2004.
- [2] LEVESQUE M, HUDON C, DAVID E. Insulation degradation analysis of stator bars subjected to slot partial discharges[C]//Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE. [S.l.]: IEEE, 2013: 479-483.
- [3] STONE G C. A perspective on online partial discharge monitoring for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation[J]. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2012, 28(5): 8-13.
- [4] STONE G C, WARREN V. Effect of manufacturer, winding age and insulation type on stator winding partial discharge levels[J]. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2004, 20(5): 13-17.
- [5] PENG X, JIA Z, GAO S, et al. Study on stator winding degradation under bar vibration[C]//2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, [S.l.]: IEEE, 2009: 100-103.
- [6] LEVESQUE M, DAVID E, HUDON C, et al. Contribution of humidity to the evolution of slot partial discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 61-75.
- [7] HUDON C, BELEC M. Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics[J]. IEEE Transactions on Insulation Dielectrics and Electrical, 2005, 12(2): 297-319.
- [8] STONE G C. Relevance of phase resolved PD analysis to insulation diagnosis in industrial equipment [C]//10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). [S.l.]: IEEE, 2010: 1-5.
- [9] STONE G C, WU R. Examples of stator winding insulation deterioration in new generators [C]//9th IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. [S.l.]: IEEE, 2009: 180-185.
- [10] STONE G C, MAUGHAN C V, NELSON D, et al. Impact of slot discharges and vibration sparking on stator winding life in large generators[J]. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2008, 24(5): 14-21.
- [11] LI C, SONG J, LIN L, et al. Effects of vapor with different chemical properties on corona partial discharges of stator windings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 964-972.
- [12] SONG J, LI C, LIN L, et al. Slot discharge pattern of 10 kV induction motor stator coils under condition of insulation degradation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2091-2098.
- [13] LI C, SONG J, KANG A, et al. PD patterns of stator wind-

- ings by in-factory experiment on a 10 kV motor[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Electrical Insulating Materials(ISEIM). [S.l.]:IEEE,2014: 168-171.
- [14] 李传扬,宋建成,吝伶俐,等. 10 kV 三相异步电动机局部放电指纹库建立方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015,27(4):44-48.
- LI Chuanyang,SONG Jiancheng,LIN Lingyan,et al. Method for establishing partial discharge fingerprint database of 10 kV three phase asynchronous motor[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2015, 27(4):44-48.
- [15] 李传扬,宋建成,吝伶俐,等. 10 kV 异步电动机定子绕组老化槽放电指纹分布规律的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 35-43.
- LI Chuanyang,SONG Jiancheng,LIN Lingyan,et al. Slot discharge fingerprint distribution of 10 kV asynchronous motor stator windings in the case of insulation degradation [J]. High Voltage Apparatus,2015,51(2): 35-43.
- [16] 李传扬,宋建成,吝伶俐. 10 kV 异步电动机定子绕组电晕放电指纹分布规律的研究[J]. 大电机技术,2014(1): 18-23.
- LI Chuanyang,SONG Jiancheng,LIN Lingyan. Study on corona discharge patterns of stator windings for 10 kV induction motors[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2014(1): 18-23.
- [17] EL-KISHKY H. Experience with development and evaluation of corona-suppression systems for HV rotating machines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2002,9(4): 569-576.
- 康爱亮(1988—),男,硕士,研究方向为高压电机主绝缘故障诊断及其局部放电特性分析。
- 吝伶俐(1969—),女,副教授,研究方向为智能电器技术及电机 CAD。
- 宋建成(1957—),男,博士生导师,研究方向为电气工程学科矿用智能电器、电力设备寿命评估、电力系统继电保护、煤矿安全监测监控等领域。
- 雷志鹏(1983—),男,博士研究生,研究方向为高压电缆故障的状态评估及其局部放电特性分析。