

大型发电机定子绕组局部放电 在线监测方法的研究

陈 卓, 刘 念, 薄丽雅, 郝江涛, 幸晋渝

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 考虑放电脉冲在定子绕组中的传播规律, 通过安装在定子绕组线圈上的感应传感器监测发电机定子绕组局部放电, 确保局部放电信号在变形和衰减前被分离, 同时对局部放电信号进行处理。分析了其监测原理, 以高压电缆接头或定子绕组线圈发生局部放电为例, 将 2 个传感器分别置于试件两侧, 分析这 2 个传感器上电压的关系, 可判断局部放电是发生在试件的内部还是外部, 并计算内部局部放电时的脉冲灵敏度或外部局部放电时的噪声干扰灵敏度。

关键词: 大型发电机; 主绝缘; 局部放电; 在线监测

中图分类号: TM 307⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0022-04

0 引言

长期运行过程中, 大型发电机定子绕组绝缘会受到电、热、机械振动、环境等因素的影响, 使得绝缘内部产生气隙、分层、裂纹等绝缘缺陷, 在强电场的作用下容易产生局部放电。持续增强的局部放电现象有可能造成设备的绝缘击穿, 从而造成发电机定子绕组绝缘故障。所以为了延长发电机的使用寿命, 需适时对发电机绝缘老化的程度进行检测。使用的方法是以局部放电监测为中心, 综合利用计算机监控技术对发电机主绝缘进行诊断分析^[1,2], 这种情况下对大型发电机定子绕组局部放电的研究显得较为重要。

由于放电点到检测点之间存在距离, 局部放电脉冲在单根线棒、单相绕组中传播特性不同, 同时还会受到相间耦合作用的影响, 所以局部放电信号在不同绕组中具有不同的传播特性。为了区分内部放电和外部干扰信号, 准确定位放电点, 本文首先对发电机定子绕组局部放电脉冲传播规律作了研究, 然后提出一种局部放电监测的方法, 利用在绕组端的传感器采集的局部放电信号区分内部放电和外部干扰, 有效地抑制局部放电信号的衰减和变形。

1 放电脉冲在发电机定子绕组中的传播规律

基于局部放电在线监测, 为发电机定子绕组的绝缘诊断提供了在操作应力下放电过程的信息, 包括局部放电的定位、放电量的标定以及实际电机中各种绝缘故障放电模式的识别, 这些都与放电脉冲沿定子绕组到检测系统的传播特性密切相关^[3-7]。放电脉冲沿绕组传播过程中由于传播介质不均匀以及信号在传播中的衰减等因素的影响, 使放电脉冲在发电

机定子绕组中的传播较为复杂。图 1 为单相绕组的注入和激励的传播(曲线 1 为注入, 曲线 2 为响应)。

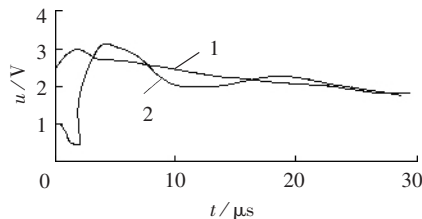


图 1 单相绕组实验的注入与响应

Fig.1 Injection and response measured on single-phase winding

由图 1 可以看出响应中出现了与激励反向的部分, 通常是由于电磁耦合引起的。同时响应的第一峰值受到沿绕组传播的慢波的影响, 随脉冲传播距离的增加而有一定的时间延迟, 各频率波也随之衰减。

除此以外, 当脉冲在大型汽轮发电机定子绕组中传播时, 还需要考虑相间耦合的作用。实验表明在同一槽内以及同层绕组相邻线棒之间存在耦合效应, 因此脉冲在绕组中传播仍需考虑沿线棒之间的电磁耦合效应传播^[8]。

文献[9]中针对脉冲在大型发电机定子绕组中的传播特性, 建立了大型汽轮发电机多段多导体传输线模型, 也就是脉冲传播模型, 这一模型可以用于研究局部放电信号在定子绕组中的传播规律。

2 大型发电机定子绕组局部放电在线监测

2.1 局部放电在线监测及方法介绍

传统的离线测量发电机的局部放电信号忽略了从放电源到绕组终端传输过程中局部放电信号的衰减和变形, 同时还存在放电量标定准确性的问题。将定子绕组等效为集中式电容时, 则根据 ASTM D1868 或 IEC 270 标准标定是准确的, 但是实际上将定子绕组等效为分布式电容而非集中式^[10]。

20 世纪 90 年代以前针对大型发电机定子绕组的局部放电信号,通常是由安装在定子绕组中心线上的传感器提取的,或是通过绕组上加装的电容耦合提取信号进行局部放电信号的在线监测。这样使得局部放电信号在绕组的传输过程中易于受到干扰的影响。近年来,出现了一种局部放电在线监测的方法是利用安装在定子槽内的宽带定向电磁耦合器在线监测局部放电信号^[11,12]。这种方法缩短了放电点到检测传感器的距离,有利于区分内部放电信号和外部干扰信号,但是对于局部放电信号的衰减和变形方面的抑制考虑不足。

考虑到放电脉冲在定子绕组中的传播特性,影响对局部放电信号的分析,本文采用在上层定子线棒端口安装感应传感器用于分离局部放电脉冲。这种方法的特点是局部放电脉冲在衰减和变形之前被提取,而且在定子线圈上可以直接进行放电量的标定。如图 2 所示。

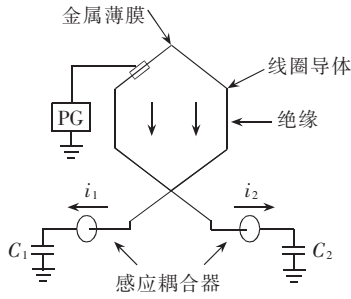


图 2 放电量标定图

Fig.2 Calibration of discharge quantity

C_1 和 C_2 表示对地电容,PG 是脉冲源。经金属薄膜和导体之间的电容,注入幅值为 ΔU 的方波脉冲信号,标定放电量 $Q = \Delta UC$ 。其中电容 C 由电容测量仪测得,通过改变 ΔU 可确定放电量 Q 。但需要指出,利用注入方波的视在电荷量的标定方法所产生的误差较大。

2.2 监测原理

这种测量技术是通过安装在绕组终端的感应传感器分离局部放电脉冲信号,同时进行传感器信号的处理。例如,在高压电缆接头或者一个定子绕组线圈发生局部放电,传感器 S_{RC1} 和 S_{RC2} 分别置于试件的两侧,如图 3 所示,存在有两种不同的情况:放电

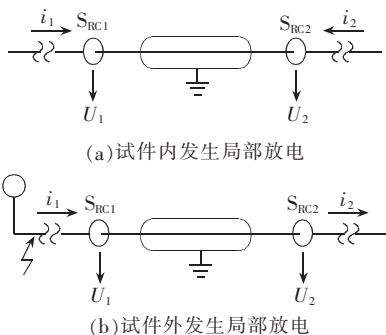


图 3 局部放电信号监测原理图

Fig.3 The principle of PD monitoring

源在试件内部;放电源或干扰源在试件外部。

图 3(a)中,试件内发生局部放电时产生的放电电流 i_1 和 i_2 反相流经传感器 S_{RC1} 和 S_{RC2} ,在传感器上分别产生电压 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$,电压与电流的关系如下:

$$u_1(t) = K \frac{di_1(t)}{dt} \tag{1}$$

$$u_2(t) = K \frac{di_2(t)}{dt} \tag{2}$$

其中 K 是传感器与导体之间的电磁耦合系数,感应电压 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 极性相反,如图 4(a)所示。

将式(1)(2)相加、相减后得:

$$u_1(t) - u_2(t) = K \frac{di_1(t)}{dt} - K \frac{di_2(t)}{dt} \tag{3}$$

$$u_1(t) + u_2(t) = K \frac{di_1(t)}{dt} + K \frac{di_2(t)}{dt} \tag{4}$$

当放电处距离试件两侧的阻抗相等时,并且与高压电缆阻抗相比节点阻抗可以忽略的条件下,电压和电流的关系式可以简化为

$$i_1 = -i_2 \Rightarrow u_1 = -u_2 = u \tag{5}$$

$$u_1 - u_2 = 2u \tag{6}$$

$$u_1 + u_2 = 0 \tag{7}$$

如图 3(b)所示,局部放电或噪声干扰发生在试件外部时,所产生电流 i_1 , i_2 同相,传感器上产生电压 u_1 , u_2 见图 4(b),若试件阻抗较小时,关系如下:

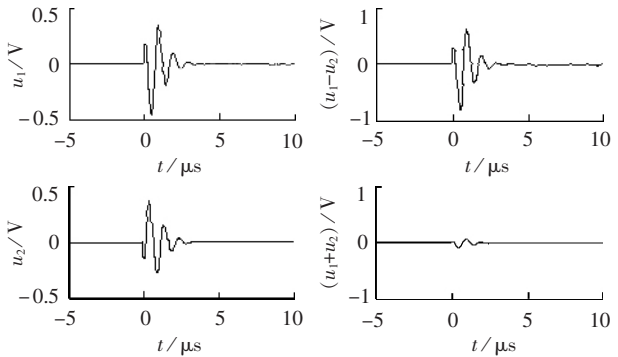
$$i_1 = i_2 \Rightarrow u_1 = u_2 = u \tag{8}$$

$$u_1 - u_2 = 0 \tag{9}$$

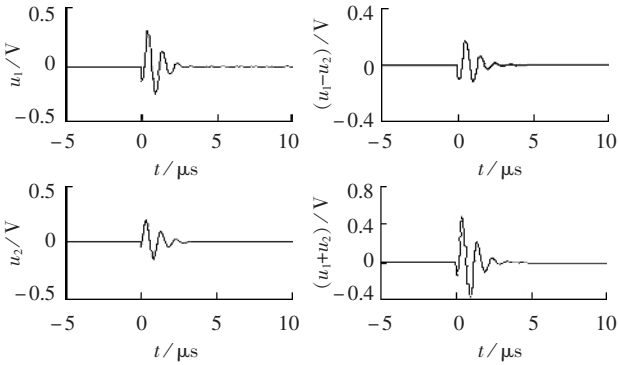
$$u_1 + u_2 = 2u \tag{10}$$

将式(6)(7)与(9)(10)结合,可以判断局部放电发生在试件的内部还是外部。如图 4(a)所示,当局部放电发生在试件内部时,局部放电脉冲灵敏度: $SR_{PD} = |u_1 - u_2| / |u_1 + u_2| \gg 1$;局部放电发生在试件外部时,如图 4(b)所示,电压 u_1 和 u_2 同相,噪声干扰灵敏度 $SR_{Nois} = |u_1 - u_2| / |u_1 + u_2| \ll 1$ 。

考虑图 3(b)若试件阻抗不能忽略,例如测试定子线圈或是定子线圈股,则电压 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 的幅值和相位不能简单的代数加减,这使得 SR_{PD} 降低,然而,只要存在压差,被检测到的脉冲就可以作为局部放电脉冲被辨别出来。同理,噪声灵敏系数 SR_{Nois} 增大,被检测到的脉冲也可以作为噪声被区分开。



(a)试件内部发生局部放电



(b) 试件外部发生局部放电

图 4 监测原理波形图

Fig.4 The waves monitored

还有一种情况,局部放电脉冲的背景噪声增加,使得测量灵敏度降低,只有局部放电信号比噪声信号大时才能被检测出来。

2.3 监测系统结构

发电机定子绕组局部放电监测系统如图 5 所示,包括:

- a. 安装在定子线棒端口的感应传感器;
- b. 多路转换开关 MUX,由 PC 控制,用于改变传感器的连接;
- c. 前置放大滤波器;
- d. 信号处理单元,将局部放电信号与背景噪声分离;
- e. PC 控制和数字信号处理软件;
- f. 通信设备。

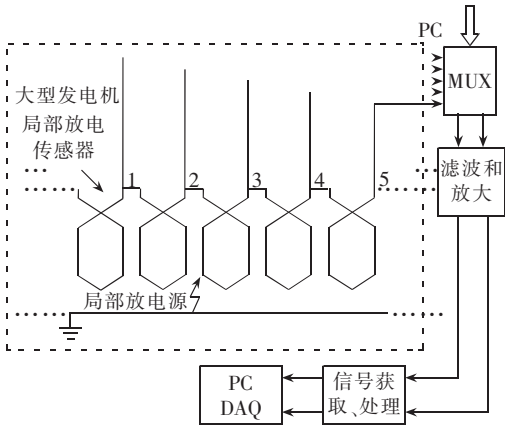


图 5 大型发电机在线监测系统图解

Fig.5 The schematic diagram of online monitoring system for large generator

经传感器去耦合后的信号传输到多路转换器 MUX 上,这个 MUX 由一台计算机控制,使得计算机限定在任意时刻只有两个传感信号从 MUX 端口输出,将选定的信号经相加、相减后,进入信号处理单元,经数字处理后提取出局部放电信号显示到计算机监视器上。将各个定子线圈测量值记录进行比较,可以判断出局部放电发生的位置,如图 6,7 所示。由图 6,7 比较,可以判定局部放电发生在传感器 2,3 之间的定子线圈上。

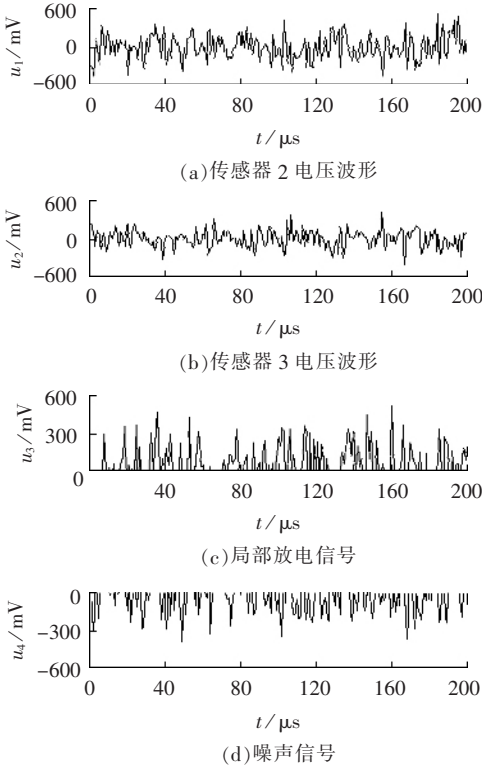


图 6 传感器 2,3 测量结果

Fig.6 The measurements of sensor 2 and 3

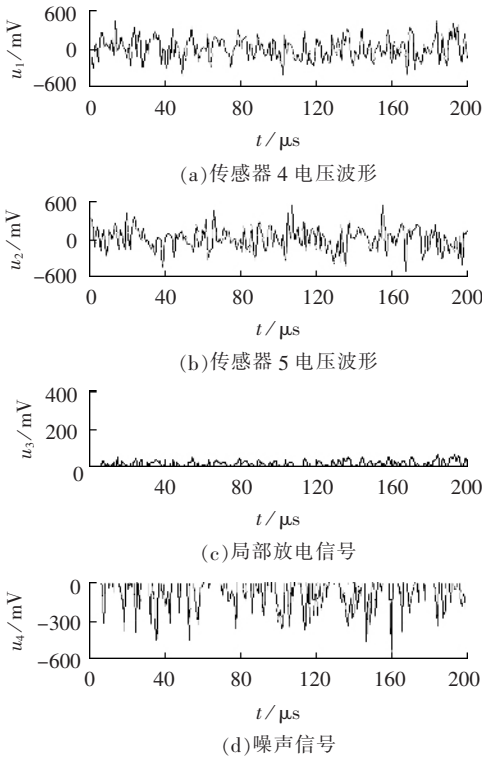


图 7 传感器 4,5 测量结果

Fig.7 The measurements of sensor 4 and 5

此系统可用于水轮和汽轮发电机定子绕组的局部放电监测。在新发电机内安装传感器相对容易,而较老式发电机的定子线棒端口空间较小,所以传感器的安装较困难,同时传感器的尺寸应根据定子线棒的直径而定。

3 结论

局部放电在线监测能够较好地反映放电强度,有利于对发电机绝缘系统老化的检测,同时也可以导致电力短缺的严重故障发生之前发现绝缘隐患。本文阐述的是基于定子绕组局部放电在线监测建立的监测系统。此系统有利于噪声的抑制、局部放电脉冲的衰减和标定,故障线圈的定位等问题的解决。建立起来的数据库包含发电机定子线圈局部放电强度的信息,有利于对发电机绝缘状态的控制,有助于发电机的寿命评估。

由于通过传感器对每个发电机定子线棒状态进行在线监测,从而实现局部放电定位。同时监测系统结合计算机、通信等技术,对信号进行处理,使得这种方法有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨合民,李超晖,王宏. 基于局部放电监测的水轮发电机主绝缘诊断分析系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 61-65.
YANG He-min, LI Chao-hui, WANG Hong. Integrated diagnosis and analyzing system for stator insulation of large-size hydro-generators based on partial discharge[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2004, 28(15): 61-65.
- [2] 张晓虹,张亮,乐波,等. 基于局部放电的距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): 94-98.
ZHANG Xiao-hong, ZHANG Liang, YUE Bo, et al. Analysis on aging condition of stator winding insulation of generator based on the moment characteristics of partial discharge[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2002, 22(5): 94-98.
- [3] GEARY R, KEMP I J, WILSON A. Towards improved calibration in the measurement of partial discharges in rotating machinery [A]. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation** [C]. Toronto, Canada: [s.n.], 1990. 141-144.
- [4] ZHOU C, KEMP I J, ALLAN M. The PD pulse behavior in rotating machine stator windings [A]. **IEEE Conference on Electrical and Dielectric Phenomena** [C].

- Pitscataway: [s.n.], 1995. 372-375.
- [5] WOOD J W, SEDDING H G, HOGG W K. Partial discharge in HV machines; Initial consideration for a PD specification[J]. **IEE Proceedings A**, 1993, 140(5): 409-416.
- [6] KEMP I J, ZHU H G. Towards a new partial discharge calibration strategy based on the transfer function of machine stator windings [J]. **IEE Proceedings, Scientific Measurement Technology**, 1996, 143(1): 57-62.
- [7] WILSON A, JACKSON R J, WANG N. Discharge detection techniques for stator windings [A]. **IEE Proceedings -B** [C]. [s.l.]: IEE, 1985. 234-244.
- [8] 李琼,姜建国,谈克雄,等. 发电机定子绕组中放电脉冲传播规律的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(7): 2-7.
LI Qiong, JIANG Jian-quo, TAN Ke-xiong, et al. Experimental study of the pulse propagation in turbine generator stator windings [J]. **Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.)**, 1996, 36(7): 2-7.
- [9] 邓晖,姜建国,曹海翔,等. 大型汽轮发电机定子绕组的脉冲传播模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 7-11.
DENG Hui, JIANG Jian-guo, CAO Hai-xiang, et al. Pulse propagation model of turbine generator stator windings [J]. **Proceedings of the CSEE**, 1999, 19(8): 7-11.
- [10] BARTNIKAS R. Detection of partial discharge in electrical apparatus [J]. **IEEE Trans. on Electric Insulation**, 1999, 25(2): 111-124.
- [11] SEDDING H G, COMBELL G C. Partial online partial discharge tests for turbine generators and motors [J]. **IEEE Trans. EC**, 1991, 9(2): 281-287.
- [12] LI Qiong, JIANG Jian-guo, TAN Ke-xiong. Modeling of turbine generator stator windings for pulse propagation studies [A]. **Proceedings CICEM** [C]. Hangzhou, China: [s.n.], 1995. 741-746.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

陈卓(1980-),女,陕西汉中人,硕士研究生,从事发电机定子绕组故障诊断与监测研究(E-mail: maomaocz@163.com);

刘念(1956-),男,四川成都人,教授,博士,从事电力设备运行监测和故障诊断技术研究。

Study on online PD monitoring of large generator stator winding

CHEN Zhuo, LIU Nian, BO Li-ya, HAO Jiang-tao, XING Jin-yu

(Electrical Information Institution, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Considering the propagation law of discharge pulse in stator winding, inductive sensors are installed on the stator coils to monitor its PD (Partial Discharge). The PD pulses are separated before attenuation and distortion, and then processed. The monitoring principle is analyzed with an example of the PD in high-voltage cable connector or stator coil. Two inductive sensors are installed at both sides of test object. By analyzing the voltages of sensors, whether the PD source is inside or outside the test object can be determined. Furthermore, the pulse sensitivity of inside PD or the interference sensitivity of outside PD is calculated.

Key words: large generator; stator winding insulation; partial discharge; online monitoring