

基于指纹相似性的发电机局部放电稳定性分析

钱 勇,黄成军,黄方能,陈宏福,陈 陈,江秀臣
(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要: 介绍了发电机局部放电数据解释中存在的问题,定义了一个相似率参数,用于分析局部放电数据的稳定性。局部放电的指纹由 26 个相位分布特征参数构成,相似率基于局部放电指纹的相似性,通过相似率分布图谱可以分析局部放电的稳定性。为了揭示局部放电稳定性与相似率分布的关系,结合时域信号和矩特征,对 2 个具体的发电机实例进行了分析研究。当相似率分布图谱只有 1 个主峰或呈现浴盆曲线性状时,局部放电类型较稳定;当相似率出现 2 个明显不同的主峰时,放电情况需要引起注意。分析结果表明,相似率图谱能够有效地反映局部放电类型的稳定性。

关键词: 局部放电; 指纹; 相似性; 放电类型

中图分类号: TM 311; TM 85 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)07-0037-05

0 引言

局部放电是监测发电机绝缘状态的重要参数,由于受到检测方式、负荷、环境、外界干扰等诸多因素的影响,局部放电数据自身有许多的不确定性,如何由局部放电数据评估绝缘状况是典型的不确定问题,也是当前在线监测研究中的难点问题之一。

由于存在明显的不确定性,对于绝缘状况的分析而言,局部放电的趋势比数值更重要^[1]。局部放电的趋势变化主要反映在 2 个方面:放电幅值的变化和放电模式的变化。其中,放电模式的变化是当前分析绝缘状态的主要依据^[2-6]。为了便于分析

放电模式的变化,荷兰 Delft 理工大学的 Gulski 由局部放电的相位分布图谱提取了一系列统计特征参数^[7],在此基础上,国内针对局部放电模式的变化与绝缘的劣化关系做了大量的研究工作^[3-6,8-12]。

但是,由于发电机局部放电检测方式的多样性,特别是中性线检测局部放电的方式,容易发生多相放电的情况,导致得到的局部放电相位分布不规则,已有的绝缘评估结论难以直接适用。为此,拟在系统提取局部放电相位分布特征参数的基础上,尝试通过相关性分析来研究绝缘的劣化趋势。

1 局部放电的指纹参数

在发电机局部放电检测方式中,一种重要的方法就是中性点耦合法,如图 1 所示,局部放电信号

收稿日期:2006-08-29;修回日期:2007-01-09

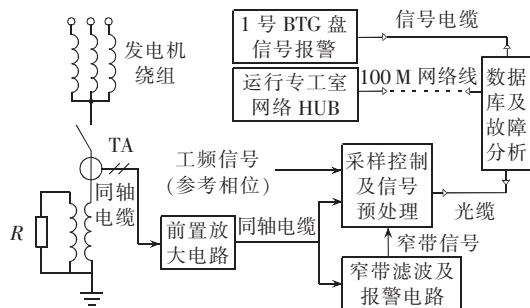


图 1 发电机的局部放电检测系统

Fig.1 Partial discharge detection system

通过安装在发电机接地中性线上的高频电流线圈得到^[13]。

由于所有的局部放电信号都会经过中性线,因而该方法可以检测到发电机整个范围内的局部放电。但同时,由于不同相的放电都会被检测到,使得放电在相位分布上产生重叠干扰,给局部放电数据的解释带来巨大的困难。

常用的局部放电相位分布包括 1 个三维分布图谱和 5 个二维分布图谱。三维图谱即 $\varphi-q-n$ 图谱,二维图谱包括最大放电量相位分布、平均放电量相位分布、放电次数相位分布、放电幅值分布和放电能量分布。

为了识别不同的局部放电类型,可以由三维或二维图谱提取一系列指纹特征参数。对于三维图谱主要提取的是分形特征,对于二维图谱主要提取的是矩特征。表 1 所示为提取的局部放电指纹特征参数,共 26 个,其中, S_k 表示偏斜度, K_u 表示突出度, P_e 表示标准化的局部峰值个数, Q 和 C_c 分别表示正、负半周放电的不对称度和相关系数。

表 1 局部放电相位分布特征参数

Tab.1 Phase distribution characteristic parameters of partial discharge

特征	局部放电相位分布图谱			
	$H_{qms}(\phi)$	$H_{qn}(\phi)$	$H_n(\phi)$	$H(q)$
S_k^+	✓	✓	✓	✓
S_k^-	✓	✓	✓	
K_u^+	✓	✓	✓	✓
K_u^-	✓	✓	✓	
P_e^+	✓	✓	✓	
P_e^-	✓	✓	✓	
Q	✓	✓	✓	
C_c	✓	✓	✓	

由于局部放电信号取自中性线,而实际参考相位仅取自某一相的引出线,按平移角度($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$)的不同,可以重新计算上述的特征参量,因此,所提取的局部放电指纹特征量一共有 78 个(见图 2,图中 A 为特征值, n 为特征项),在后续部分进行实际分析时,仅取其中平移角度为 0° 的 26 个特征参量。

2 相似和相似率

为了便于研究指纹之间的相关性,另外定义了 2 个参数:相似和相似率。

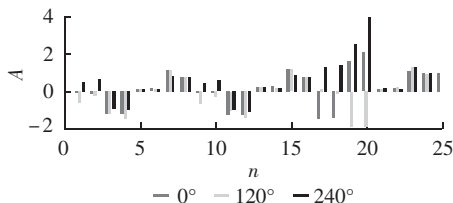


图 2 局部放电的指纹图谱

Fig.2 Fingerprint of partial discharge

a. 相似:当 2 个采样数据指纹之间的互相关系数大于 0.9 时,认为这 2 条数据是相似的。

b. 相似率:对某条采样数据而言,与其相似的数据个数占数据总量的百分比即为该采样数据的相似率。

通过定义相似和相似率,可以用类似聚类的形式揭示指纹样本中可能存在的类型的变化。当局部放电的类型没有发生变化时,局部放电的指纹应该具有较好的一致性;而当局部放电的类型发生变化时,不同的局部放电指纹之间的相似度会发生变化,因此在给出的“相似”的定义下,这些局部放电数据可能不再相似,从而影响到数据的相似率,最终在相似率分布图上反映出来。

3 实例分析

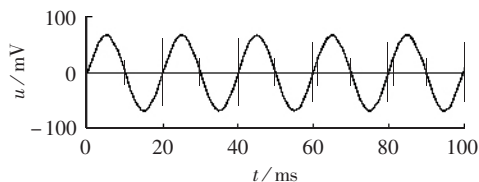
为了研究相似率分布图与局部放电类型之间的关系,给出 2 个具体的发电机实例,2 台发电机都采用中性点耦合的局部放电检测方式,且安装相同型号的局部放电监测系统^[13]。

为简洁起见,将 2 台发电机分别记为发电机 I 和发电机 II。从发电机 I 和发电机 II 的局部放电监测系统所取的数据分别为 9788 条和 3849 条。

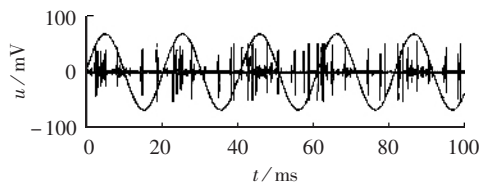
3.1 实例 1

3.1.1 时域信号分析

发电机 I 中有 2 种较典型的局部放电采样数据,如图 3 所示。图 3(a)中的局部放电信号较小,采样数据中存在相位分布较规则的脉冲型干扰。图 3(b)中的局部放电信号出现了明显的增加,数据中存在较多的脉冲型干扰。



(a) 典型数据 1



(b) 典型数据 2

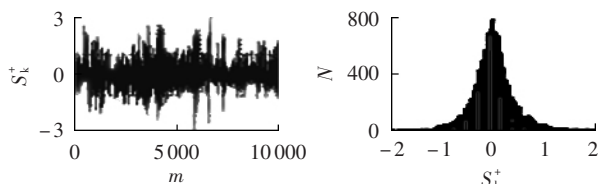
图 3 典型的局部放电采样数据(发电机 I)

Fig.3 Typical PD data(Generator I)

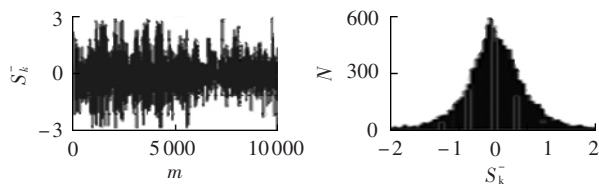
3.1.2 指纹参数分析

如图 3 所示,由发电机 I 检测的数据中存在明显的脉冲型干扰,为正确分析局部放电数据,在获取相位分布图谱前,必须先对干扰进行有效的抑制^[14-16]。

由局部放电相位分布图谱提取出的参数较多,限于篇幅,不便一一给出,仅展示绝缘评估中较常用的偏斜度分析结果^[2-4,6]。如图 4、5 所示,分别为平均放电量和放电次数的偏斜度及其统计分布(图中 S_k^+ 、 S_k^- 分别表示正、负半周的偏斜度, m 为采样数据, N 为数据个数,下同)。



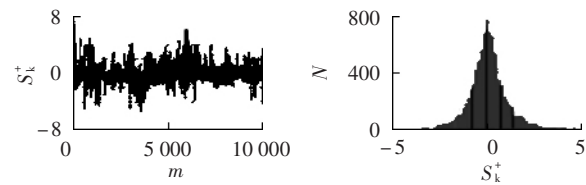
(a) 正半周的偏斜度及其分布



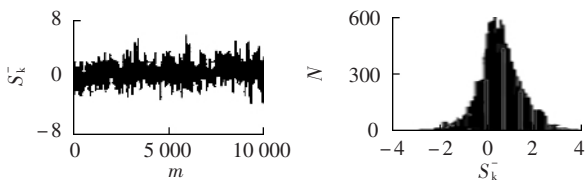
(b) 负半周的偏斜度及其分布

图 4 平均放电量的偏斜度及其分布 (S_k)

Fig.4 Skewness of mean discharge magnitude and its distribution



(a) 正半周的偏斜度及其分布



(b) 负半周的偏斜度及其分布

图 5 放电次数的偏斜度及其分布 (S_k)

Fig.5 Skewness of discharge times and its distribution

由图 4、5 可知,局部放电的平均放电量和放电次数的偏斜度均呈现出正态分布的性状,这表明局部放电的相位分布情况较稳定。

3.1.3 相似分析

图 6 所示为发电机 I 局部放电数据的相似率 R 散点图,在所取的 9788 条采样数据中,绝大部分都具有大于 0.7 的相似率。

图 7 所示为相似率的分布图,数据主要集中在大于 0.7 和小于 0.1 的 2 个区域,呈现出浴盆曲线的性状。对于相似率太低的情况,可以直接认为这些数据属于异常数据(干扰抑制的效果不够理想),不予考虑。只有具有较高相似率的,才认为是正常的

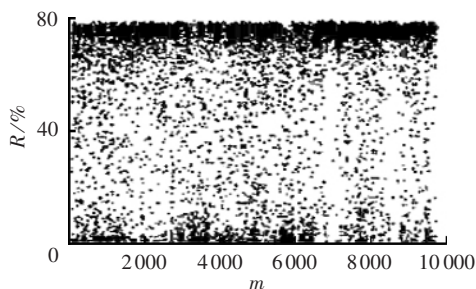


图 6 数据的相似率

Fig.6 Similarity rate of sampling data

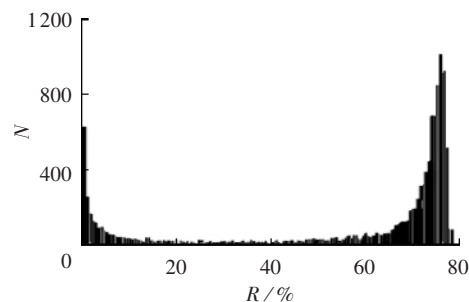


图 7 相似率的分布情况

Fig.7 Distribution of similarity rate

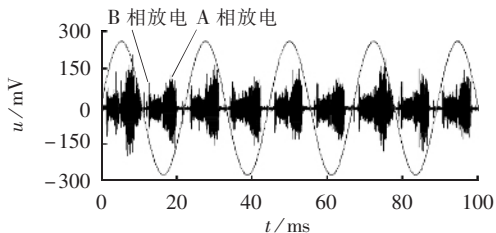
放电数据。对于图 7 所示的情况,在 0.7~0.8 的范围内,集中了绝大部分的数据,且在大于 0.1 的范围内,只有一个数据聚集的主峰,这表明放电数据的整体情况是稳定的。

由上述的相关性分析结果很容易就可以看出,发电机 I 放电数据的指纹总体是一致的。就放电的类型而言,所检测到的局部放电属于同一类型;就放电源而言,所取的局部放电信号应来自较稳定的绝缘缺陷。

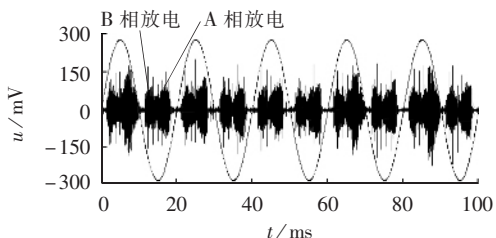
3.2 实例 2

3.2.1 时域信号分析

发电机 II 中也有 2 种较典型的局部放电数据,如图 8 所示。发电机 II 中的放电是明显的 A、B 2 相



(a) 典型数据 1



(b) 典型数据 2

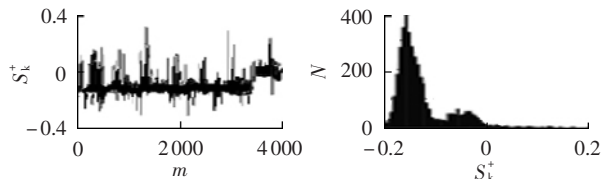
图 8 典型的局部放电采样数据(发电机 II)

Fig.8 Typical PD data(Generator II)

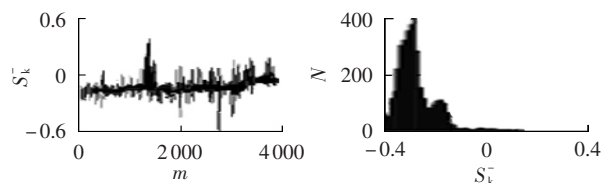
放电(图 8 中的参考相位取自 B 相)。图 8(a)中放电信号的相位分布较规则,干扰水平相对较低。图 8(b)中 B 相放电几乎没有变化,但是 A 相的放电幅值却出现了明显的增加。

3.2.2 指纹参数分析

图 9 和 10 所示分别为发电机 II 中平均放电量和放电次数的偏斜度及其统计分布。



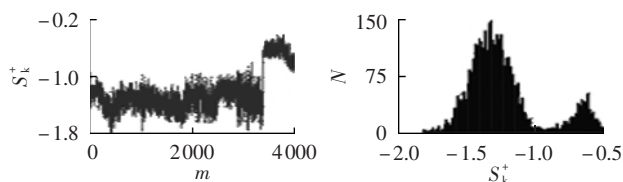
(a) 正半周的偏斜度及其分布



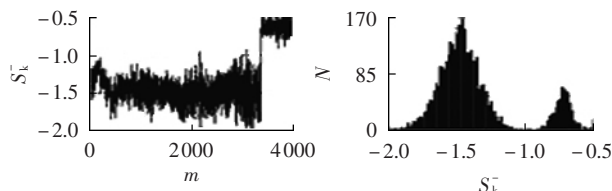
(b) 负半周的偏斜度及其分布

图 9 平均放电量的偏斜度及其分布(S_k)

Fig.9 Skewness of mean discharge magnitude and its distribution



(a) 正半周的偏斜度及其分布



(b) 负半周的偏斜度及其分布

图 10 放电次数的偏斜度及其分布(S_k)

Fig.10 Skewness of discharge times and its distribution

由图 9 和 10 可知,平均放电量和放电次数的偏斜度都发生了明显的变化,统计分布图上出现了 2 个不同的主峰,这表明,在发电机 II 的局部放电数据中存在 2 种性状相差较大的指纹。

需要强调的是:对比图 9、10 中偏斜度的变化趋势和文献[5-6]中的结论,不难发现,该组数据的变化趋势与绝缘劣化时偏斜度应该变小的结论不相符。这主要是因为文献[5-6]中没有考虑多相放电的情况,在出现多相放电时,该结论是不适用的。

3.2.3 相似分析

图 11 所示为发电机 II 局部放电数据的相似率散点图,在所取的数据中,一部分具有大于 0.8 的相似率,而另一部分的相似率却只有 0.15 左右。

图 12 所示为相似率的分布图,数据主要集中在相似率为 0.15 和 0.8 左右的 2 个区域,形成了 2 个主峰,这表明,在这组数据中存在着 2 种不同类型的

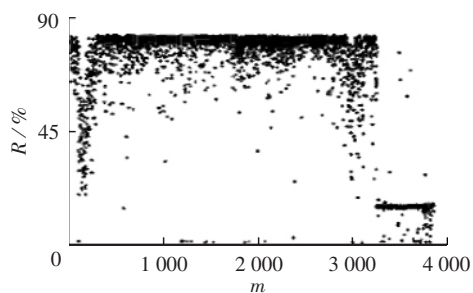


图 11 数据的相似率

Fig.11 Similarity rate of sampling data

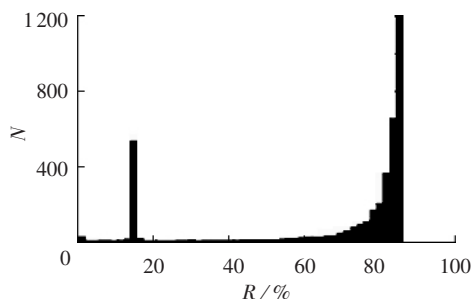


图 12 相似率的分布情况

Fig.12 Distribution of similarity rate

指纹。比较图 11 和图 12 可以看到,第 2 种指纹主要是在采样时间的后期出现的,这表明局部放电的类型很可能发生了变化。

由上述的相关性分析结果很容易就可以看出,发电机 II 的放电指纹出现了较明显的变化,发电机的绝缘状态可能有劣化的趋势,需要引起注意。

4 结论

对于中性点耦合检测局部放电的方式,通过构造相似率分布图谱,给出了一种用于分析局部放电稳定性的方法,并结合 2 个具体的发电机实例对该方法的有效性进行了验证。

a. 如果相似率分布图只出现 1 个主峰,表明局部放电的类型很稳定。

b. 当相似率分布图呈现出浴盆曲线性状时,表明局部放电的类型较稳定,系统中存在一定程度的干扰。

c. 当相似率分布图中出现 2 个主峰时,表明局部放电的类型出现了变化,此时系统的绝缘状况可能有劣化的趋势,应该引起注意。

参考文献:

- [1] 黄成军,郁惟镛,PAOLETTI G,等. 局部放电在线监测及其在大型电机中的应用[J]. 大电机技术,2000(6):33-38.
HUANG Cheng-jun, YU Wei-yong, PAOLETTI G, et al. Partial discharge on-line monitoring and its application to large generators[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2000(6):33-38.
- [2] TANAKA T. Partial discharge pulse distribution pattern analysis[J]. IEE Proceedings of Science, Measurement and Technology, 1995, 142(1):46-50.
- [3] 乐波,李俊,张晓虹,等. 基于指纹参量的环氧云母绝缘多因子老化的实验研究[J]. 电工电能新技术,2001,20(2):29-32,68.

- YUE Bo, LI Jian, ZHANG Xiao-hong, et al. Study on multi-stress aging of epoxy/mica insulation based on fingerprint parameters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001, 20(2): 29-32, 68.
- [4] 宋建成, 谢恒堃, 石宗义, 等. 基于数字局部放电检测的大型电动机主绝缘老化特性的研究[J]. 电工电能新技术, 2001, 20(2): 1-6, F004.
- SONG Jian-cheng, XIE Heng-kun, SHI Zong-yi, et al. Study on aging diagnostics of large motor winding insulation based on digital partial discharge detection[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001, 20(2): 1-6, F004.
- [5] 张百华, 高乃奎, 马小芹, 等. 基于运行历史的大电机主绝缘老化特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 134-137.
- ZHANG Bai-hua, GAO Nai-kui, MA Xiao-qin, et al. Study on the aging characteristics of stator winding insulation in large generator based on operating history[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 134-137.
- [6] 张晓虹, 张亮, 乐波, 等. 基于局部放电的矩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 of 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.
- [7] GULSKI E. Diagnosis of HV components by digital PD analyzer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 630-640.
- [8] 乐波, 李俭, 闫波, 等. 用最大放电电量增加率评定定子绝缘老化状态[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 1-3, 81.
- YUE Bo, LI Jian, YAN Bo, et al. Study on the evaluation of aging condition of stator insulation based on the increasing rate of maximum PD quantity[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 1-3, 81.
- [9] 宋建成, 乐波, 谢恒堃. 大型发电机主绝缘多因子老化试验系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 9-13, 18.
- SONG Jian-cheng, YUE Bo, XIE Heng-kun. Study on multi-stress aging test system for stator winding insulation of large generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 9-13, 18.
- [10] 杨丽君, 廖瑞金, 孙才新, 等. 油纸绝缘老化阶段的多元统计分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 151-156.
- YANG Li-jun, LIAO Rui-jin, SUN Cai-xin, et al. Using multivariate statistical method to recognize different aging stages of oil-paper[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 151-156.
- [11] 张晓虹, 卢伟胜, 张亮, 等. 大电机主绝缘老化试验系统和试样设计[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 18-20, 56.
- ZHANG Xiao-hong, LU Wei-sheng, ZHANG Liang, et al. The study on test system of aging for stator winding insulation of large generator[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 18-20, 56.
- [12] 郝艳捧, 王国利, 谢恒堃, 等. 基于局部放电和超声波法研究大电机定子绝缘的老化特性[J]. 电工技术学报, 2002, 17(2): 1-6.
- HAO Yan-peng, WANG Guo-li, XIE Heng-kun, et al. Study on aging characteristics of generator stator insulation based on partial discharge and ultrasonic wave method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(2): 1-6.
- [13] 黄成军. 基于小波理论的大型汽轮发电机局部放电在线监测系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
- HUANG Cheng-jun. Study of partial discharge on-line monitoring system for large turbine generators based on wavelet analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2000.
- [14] 钱勇, 黄成军, 陈陈, 等. 基于经验模态分解的局部放电去噪方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 53-56, 60.
- QIAN Yong, HUANG Cheng-jun, CHEN Chen, et al. Denoising of partial discharge based on empirical mode decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 53-56, 60.
- [15] 邵震宇, 黄成军, 肖燕, 等. 用 PSO 算法训练神经网络抑制发电机局放随机脉冲干扰[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 49-52.
- SHAO Zhen-yu, HUANG Cheng-jun, XIAO Yan, et al. Application of PSO based neural network in suppression of stochastic pulse interference for partial discharge monitoring in large generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 49-52.
- [16] 徐冰雁, 黄成军, 钱勇, 等. 多小波相邻系数法在局部放电去噪中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 61-64, 70.
- XU Bing-yan, HUANG Cheng-jun, QIAN Yong, et al. Application of multiwavelet based neighboring coefficient method in denoising of partial discharge[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 61-64, 70.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

钱勇(1977-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断、电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: qian_yong@sjtu.edu.cn);

黄成军(1970-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 博士, 研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断技术;

黄方能(1976-), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 研究方向为 FACTS 在电力系统中的应用;

陈宏福(1981-), 男, 山东莱阳人, 硕士研究生, 研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断技术;

陈陈(1938-), 女, 上海人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统稳定性及控制、电力系统算法及软件;

江秀臣(1965-), 男, 山东郓城人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为高电压绝缘技术及绝缘在线监测、自动化设备。

Fingerprint similarity based analysis of generator partial discharge stability

QIAN Yong, HUANG Cheng-jun, HUANG Fang-neng,

CHEN Hong-fu, CHEN Chen, JIANG Xiu-chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Similarity rates are introduced in the interpretation of partial discharge data to analyze its stability, which is based on 26 phase distribution characteristic parameters of the fingerprint of partial discharge. With the distribution plot of similarity rates, the stability of partial discharge is analyzed. Combined with time domain signal and moment analysis, two practical cases are studied to investigate the relation between partial discharge stability and similarity rate distribution. When the similarity rate distribution plot has only one main peak or shows a tub curve, the discharge is stable, however, when two distinct main peaks occur, more attention should be paid. Results demonstrate that the similarity rate distribution plot can effectively reflect the stability of partial discharge.

Key words: partial discharge; fingerprint; similarity; discharge type