

基于拟积分算法的发电机局部放电在线监测技术的研究

贾少磊

(中国石油大学(华东)石大科技集团, 山东 东营 257062)

摘要: 局部放电监测是发电机定子绕组绝缘状况监测的有效手段,笔者提出了拟积分(quasi-integration)局部放电信号采集算法,克服了局部放电信号时域处理方法存在的缺陷,提高了系统的精确度和分辨率。文中分析研究了各拟积分参数对积分效果的影响,并选取了适合该系统的拟积分参数,通过FPGA实现了算法。同时在实验室建立了典型的故障放电模型,构建了一套能够对发电机整个定子绕组绝缘劣化状况进行在线监测的系统,分析了该系统所捕获的故障放电图谱的合理性,得到了较好的实验效果,仿真和实验分别验证了拟积分法监测发电机局部放电的可行性和可靠性。

关键词: 局部放电; 拟积分; 在线监测; 定子绕组

中图分类号: TM31

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0081-06

On-line Generator Partial Discharge Monitoring Technology Based on Quasi-integration

JIA Shaolei

(China University of Petroleum (East China) Star Science & Technology Group, Shandong Dongying 257062, China)

Abstract: The measurement of partial discharge(PD) is an effective method to monitor the insulation condition of stator windings. In this paper, an algorithm for partial discharge signal acquisition based on quasi-integration is proposed to overcome the defect in partial discharge time domain signal processing method, and to improve the accuracy and resolution of the partial discharge monitoring system. The influences of the quasi-integration parameters on pulse resolution and calculation are analyzed, the suited parameters are selected for generator PD monitoring and the algorithm is implemented through FPGA. A typical fault PD model and a on-line generator PD monitoring system are established in laboratory, and the rationality of the captured fault PD spectrum is analyzed. Simulations and experiments verify the feasibility and reliability of the proposed method for monitoring generator PD based on quasi-integration.

Key words: partial discharge(PD); quasi-integration; on-line monitoring; stator winding

0 引言

发电机在整个电力系统中起着至关重要的作用,作为关键设备,其定子绕组的绝缘状况对发电机运行的可靠性直接起着决定性的作用,对电力系统的稳定性有着很大程度的影响。然而,由于运行时长期的热、电、环境和机械应力的影响,以及局部强电场的作用,发电机绝缘系统经常存在着局部放电的问题,能够加速绝缘的劣化,进而破坏绝缘系

统。因此,发电机局部放电特性的在线监测、放电模式的判断、故障类型的诊断,对大型发电机从预防性维修阶段转变为预知性维修阶段有着重大的意义,有助于提高电力系统的经济效益。

和基于绝缘劣化的化学变化分析以及基于声脉冲、光、热等的分析方法相比,基于电信号的分析方法准确、直接、灵敏,可有效地判断绝缘故障发生的位置和严重程度。目前常用的基于电量的监测方法有以下几种^[1]:①中性点耦合监测法,利用该方法可检测一些发电机绕组松动的现象,适合中性点对地电位较低的情况;②射频监测法,传感器装在低

压点上,对机组影响小,而且可监测到整个绕组内的局部放电,但灵敏度较低,信号处理的难度较大;③PDA(partial discharge analyzer)监测法^[2-3],该方法可区分外部噪声和发电机内部的局部放电信号,但仅限于滤除发电机外部的噪声;④定子槽耦合器(SSC)监测法^[4],但是该方法只对发生在比较靠近传感器安装位置的局部放电有效,且成本比较高;⑤基于埋置在定子槽内的电阻式测温元件导线的监测法,该方法不需单独安装传感器,但RTD导线本身灵敏度较低,易将引入噪声,影响测量效果;⑥电容耦合监测法^[5-7],此方法可靠、灵活、灵敏度高,信号带宽更宽。但由于耦合有噪声信号,需要高性能的抗干扰数字处理算法作基础^[8-12]。传统的时域信号处理时,放电信号的无规律使得积分变得非常复杂,神经网络分析等智能方法能方便检测出是否放电,但无法诊断出放电程度,且当诊断数据偏离训练模版时,网络的识别能力下降,甚至识别错误^[13-16]。

在以上方法的基础上,笔者采用电容耦合传感器监测法,选取了三相高压出线端作为监测发电机局部放电信号的理想位置,把视在放电量作为局部放电水平测量和表征的对象,这样既避免了SSC法的安装位置的局限性,又不会引入RTD导线产生的噪声,成本相对较低,却具有较高的灵敏度^[17-21]。笔者提出了拟积分的局部放电信号采集算法,利用频谱幅度求得信号积分,实现了从硬件采集得到的局部放电脉冲信号向电量信号的转换,从而采用电的方法实现了对电机局部放电的检测,即避免了时域积分的复杂,又能精确地检测出放电信号的强弱。

1 拟积分算法的原理

在时域内,一个脉冲电流信号包含的电量等于其对时间的积分,即

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt. \quad (1)$$

对其进行连续傅里叶变换

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

式(2)中, $\omega = 2\pi f$ 。

当 $\omega = 2\pi f = 0$ 时,式(2)可变为

$$F(\omega)|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt|_{\omega=0} = \int_0^{\infty} i(t) dt. \quad (3)$$

综合式(1)及式(3),得

$$F(0) = q. \quad (4)$$

式(4)说明,该脉冲信号包含的电量 q 等于其直

流量,即其傅里叶变换 0 频分量的幅值 $F(0)$ 。此外,在一定频率范围内,傅里叶变换频谱幅度基本保持恒定的信号的电量近似等于 $F(f)$,因此

$$q = F(0) = F(f). \quad (5)$$

这种利用频谱幅度求信号积分的方法称为拟积分(quasi-integration)。

局部放电信号脉宽较窄,其幅频曲线见图1,对一定频带范围内的测量系统相当于冲激信号。

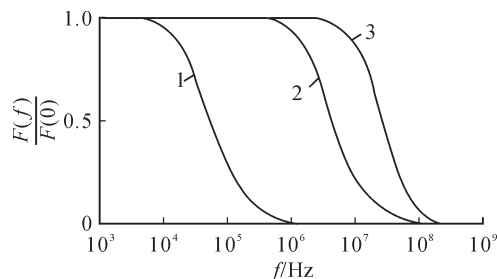


图1 典型局部放电信号幅频曲线

Fig. 1 Typical PD signal amplitude-frequency curve

理想带通滤波器的冲激响应时域内波形见图2。

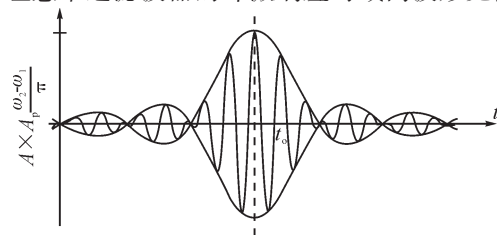


图2 理想带通滤波器的冲激响应

Fig. 2 Ideal band-pass filter impulse response

其峰值为

$$S_{\max} = A \times A_p \frac{\omega_2 - \omega_1}{\pi} = 2 \times A \times A_p \times \Delta f. \quad (6)$$

对于通带增益 A_p 和 Δf 固定的同一理想带通滤波器,其冲激响应峰值与冲激信号直流量(或任意频率)的频谱幅值 A 成正比。因此,通带在放电信号频谱平坦区内的带通滤波器对局部放电信号响应的峰值也近似满足如下关系

$$S_{\max} \propto A = F(0) = F(f) = q. \quad (7)$$

即该类带通滤波器对局部放电信号响应的峰值与输入的局部放电信号所包含的电量值成正比^[22-24]。

2 拟积分参数的确定及仿真分析

拟积分效果的不同会使监测结果差异较大,故需比较不同的拟积分参数对积分效果的影响,总结出对发电机局部放电水平监测的最优的拟积分参数及其相应的积分效果。为克服实际的不理想因素,同时考虑到数字滤波器的性能、结构、传输特性及工倍

频等干扰信号等因素,选取阶数不高、低通截止频率为 2 MHz 以下、高通截止频率为 30 kHz 以上的巴特沃斯、切比雪夫 I 和切比雪夫 II 型滤波器为研究对象,利用 MATLAB 实现效果模拟。积分效果主要从积分误差和脉冲分辨时间两方面考虑。下面以 4 阶带通滤波器为例,将各参数作为唯一变量,分析比较数字滤波器各参数对积分效果的影响。

首先,固定高通截止频率为 30 kHz,观察改变低通截止频率时的积分效果,见图 3、4。随低通截止频率的增加,积分误差增加,滤波器的脉冲分辨时间 t 减少,即脉冲分辨率提高。

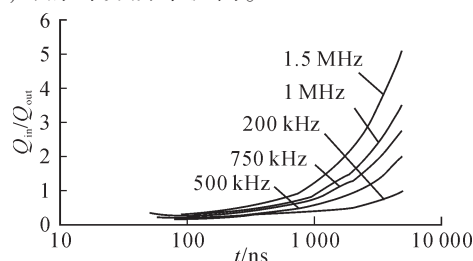


图 3 低通截止频率对积分误差的影响

Fig. 3 The influence of low-pass cut-off frequency on integral error

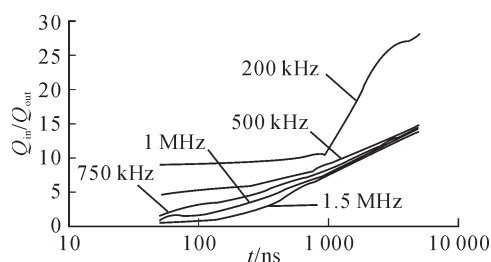


图 4 低通截止频率对脉冲分辨率的影响

Fig. 4 The influence of low-pass cut-off frequency on pulse resolution

其次,低通截止频率固定为 2 MHz,观察改变高通截止频率时的积分效果,见图 5。高通截止频率较低时,积分误差基本不变,但较高时出现了负值,见图 6。输入信号的时间常数 τ 较小时,脉冲分辨时间比较接近,但 τ 增大时,高通截止频率较低的滤波器的脉冲分辨率降低,脉冲分辨时间明显增大。

再次,考虑滤波器阶数对积分效果的影响,见图 7(a),滤波器响应没有出现剧烈振荡时,随着阶数的上升,积分误差降低,但降低的趋势减缓。但如图 7(b)所示,滤波器响应出现剧烈振荡时,无明显规律。如图 8 所示,不同阶数的滤波器脉冲分辨时间的曲线相互交差或接近,但总体上基本随着滤波器阶数的升高,脉冲分辨时间增加,即脉冲分辨率随阶数的升高而降低。

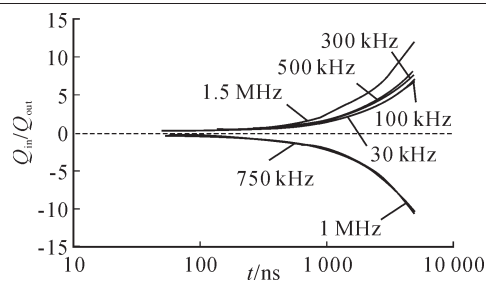


图 5 高通截止频率对积分误差的影响

Fig. 5 The influence of high-pass cut-off frequency on integral error

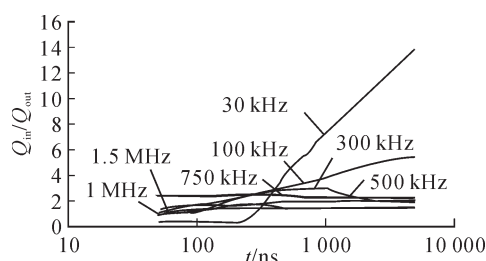
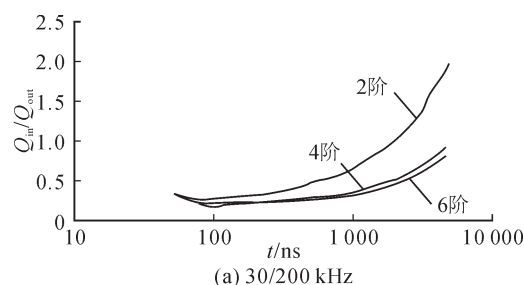
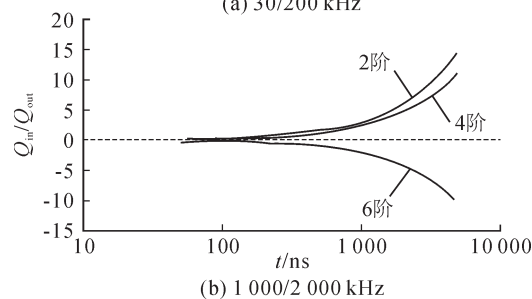


图 6 高通截止频率对脉冲分辨率的影响

Fig. 6 The influence of high-pass cut-off frequency on the pulse resolution



(a) 30/200 kHz



(b) 1000/2000 kHz

图 7 滤波器阶数对积分误差的影响

Fig. 7 The influence of filter order on integral error

最后,由仿真 Butterworth、Chebyshev I 和 Chebyshev II 型滤波器,分析可知滤波器的类型对积分误差和脉冲分辨时间的影响都很小。

最终,选取 Butterworth 型,4 阶带通滤波器,并设置可选的高通截止频率为 30、100、200、300、400、500 kHz;低通截止频率为 200、500、750、1 000、1 500、2 000 kHz。在实际中,应根据不同的传输特性和路径选择合适的截止频率,避开谐振频率,获得尽可能好的积分效果。

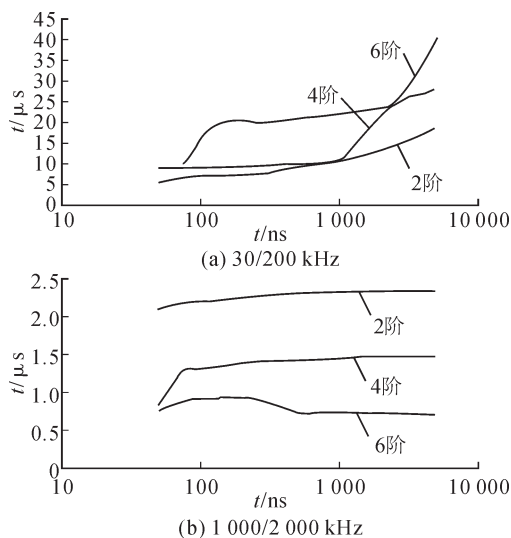


图 8 滤波器阶数对脉冲分辨率的影响
Fig. 8 The influence of filter order on pulse resolution

另外,截止频率参数不同,对应的系统的脉冲分辨率就不同,因此,需要计算出各截止频率参数的滤波器对应的脉冲分辨时间设置参考,见表 1。

表 1 各截止频率参数的滤波器对应的脉冲分辨时间设置参考

Tab. 1 The reference of pulse resolution time setting correspond to the cut-off frequency parameters of filter μs

频率/kHz	频率/kHz					
	200	500	750	1 000	1 500	2 000
30	50	30	30	30	30	30
100	—	30	20	18	18	10
200	—	25	18	17	12	8
300	—	—	16	13	8	5
400	—	—	—	7	5	5
500	—	—	—	—	5	4

3 系统的实现及实验结果

3.1 硬件的实现

该系统硬件电路采用 4 通道并行处理设计,每通道主要分为局部放电信号调理及采集部分、采集触发信号产生和输入保护电路部分。系统单个通道的硬件框架设计见图 9。

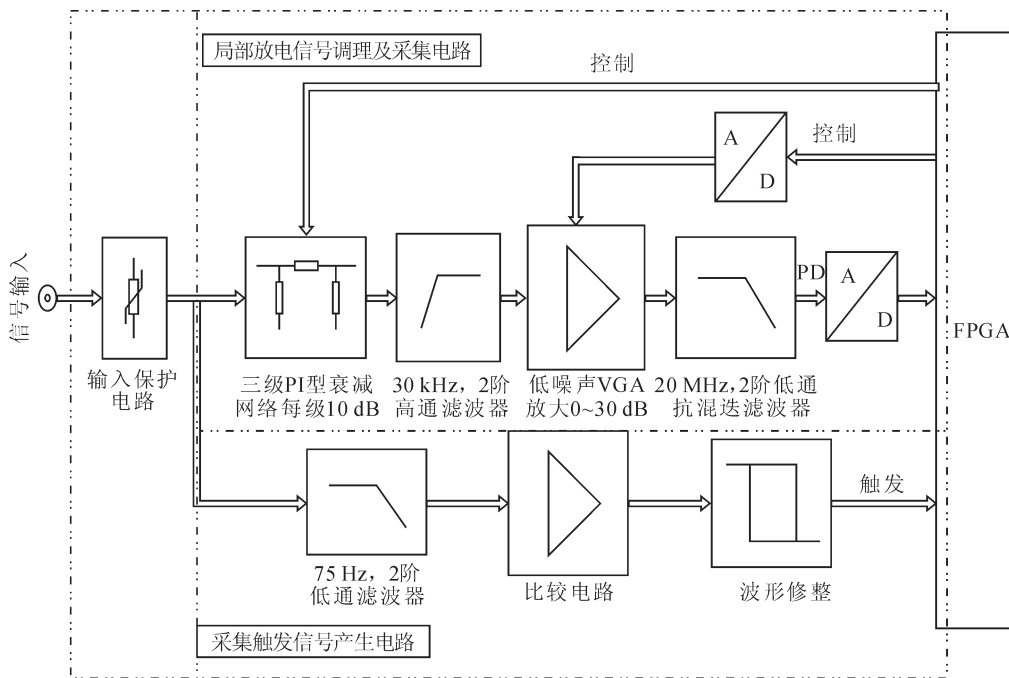


图 9 系统硬件框架
Fig. 9 The frame of system hardware

3.2 软件的实现

系统的软件部分主要是利用第 2 部分所介绍的拟积分的方法进行编程,在大型可编程逻辑阵列 FPGA 中实现,完成了与硬件部分的接口、实时获取硬件采集的数据流、滤除干扰、辨别实际的放电脉冲、计算放电脉冲的电量值和反映局部放电水平的特征值,缓存和上传数据。

3.3 现场安装使用

经准确性测量和运行稳定性测试及在高压屏蔽实验室的电晕放电、悬浮电极放电和沿面放电 3 种典型局部放电模型测试后,特征放电图谱与理论分析吻合,认为该系统已初步具备了在现场运行和使用的条件。因此,在某电厂 2 号燃气轮机发电机上安装调试了该局部放电在线监测系统。

发电机投入运行后,利用该局部放电在线监测系统所捕获的某相绕组的故障放电图谱见图 10,与诊断案例库中的典型放电图谱进行对比分析,图 10 中 A 区所示放电图谱为沿面放电,也就是发电机出槽口处的防晕层和端部半导体涂层部位被污染或者损坏导致的故障放电;B 区所示的电图谱为悬浮电位放电,可能是发电机母线套管或者出线箱中有处于悬浮电位的导电污染物。但是从其视在放电量水平和故障趋势观察,该故障严重程度较低,发展趋势较缓慢、稳定,故建议厂方时刻关注故障放电发展的趋势,同时设置一个合理的报警阈值,并且在停机检修时重点检查上述故障放电区域。

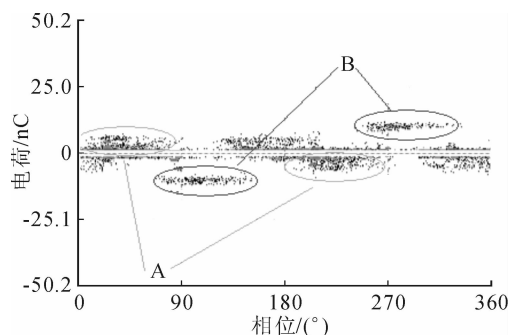


图 10 某相绕组故障图谱

Fig. 10 One phase winding fault map

4 结语

笔者提出了基于拟积分算法的发电机局部放电在线检测技术的方法,通过设计各种数字滤波器,分析了拟积分各项参数对系统的影响,研究得出积分误差会随着带通滤波器的低通截止频率的降低而减小,基本不受滤波器高通截止频率升高的影响,但积分结果会随着滤波器阶数的升高而降低。同时,脉冲分辨率会随着带通滤波器的低通截止频率的降低而减小,随着高通截止频率的升高而提高,随着滤波器阶数的升高而降低。仿真分析和实验检测都验证了拟积分参数对系统量化的影响与合理设置拟积分参数的必要性,并提出了实际使用中具体参数的选择建议,论文具有较好的理论及实际意义。

参考文献:

[1] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005,20(2):29-35.
GUO Jun,WU Guangning,ZHANG Xieqin,et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005,20(2):29-35.

[2] 付海涛,余维坤,张松涛. 基于 PDA 技术的水轮发电机局部放电在线监测[J]. 大电机技术,2010(2):25-29.
FU Haitao,YU Weikun,ZHANG Songtao. On-line monitoring of partial discharge for hydrogenerators based on PDA[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2010(2): 25-29.
[3] 李润秋,董明,孙强,等. 标准操作冲击电压下 220 kV GIS 中典型缺陷局部放电特征[J]. 电网与清洁能源,2011, 27(10):13-18.
LI Runqiu,DONG Ming,SUN Qiang,et al. Partial discharge characteristics of typical defects in 220 kV GIS under standard switching impulse[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(10):13-18.
[4] 陈志刚,林令知,王雷鸣. 定子槽耦合器法在发电机局部放电监测中的应用[J]. 华电技术,2010,32(12):4-6.
CHEN Zhigang,LIN Lingzhi,WANG Leiming. Application of stator slot coupler method in partial discharge monitoring of generator[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery,2010,32(12):4-6.
[5] 张征平,喇元,刘炜,等. 基于双电容耦合的发电机局部放电离线式测量新方法[J]. 大电机技术,2009(6):6-9.
ZHANG Zhengping,LA Yuan,LIU Wei,et al. A novel off-line method to measure the partial discharge of generator based on double coupling capacitors[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2009(6):6-9.
[6] 张俊安. XLPE 电缆附件局部放电 UHF 和 VHF 联合检测[J]. 电网与清洁能源,2011,27(10):43-47.
ZHANG Jun'an. Detection of the partial discharge signals in XLPE cable accessories based on UHF and VHF[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(10):43-47.
[7] FUHR J. 水轮发电机局部放电(PD)监测系统的经验[J]. 国外大电机,2011(2):20-30.
FUHR J. Experience of the partial discharge(PD) for hydro monitoring system[J]. External Big Motor,2011(2):20-30.
[8] 吴延坤,喻岩龙,武炬臻,等. 光学方法在电力电缆局部放电测量中的研究现状[J]. 电网与清洁能源,2011,27(8): 7-12.
WU Yankun,YU Yanlong,WU Juzhen,et al. Application of acoustic-optical partial discharge detection in power cable [J]. Power System and Clean Energy,2011,27(8):7-12.
[9] 罗日成,李卫国,熊浩,等. 电力变压器局部放电在线检测系统的研制[J]. 电网技术,2004,28(16):56-59.
LUO Richeng,LI Weiguo,XIONG Hao,et al. Development of on-line monitoring system for partial discharge within power transformer[J]. Power System Technology,2004,28 (16):56-59.
[10] WOOD J W,SEDDING H G,HOGG W K,et al. Partial discharges in HV machines;initial considerations for a PD specification[J]. IEE Proceedings A Science,Measurement and Technology,1993,140(5):409-416.

- [11] KONIG D, NARAYANA R Y. Partial discharge in electrical apparatus[M]. Berlin, Germany: VDEVERLAG, 1993.
- [12] KUFFEL E, ZAENGL W S, KUFFEL J. High voltage engineering fundamentals[M]. London, Great Britain: Butterworth, 2000.
- [13] ANSI/ICEA standard for partial discharge test procedure [S]. New York, USA: IEEE Power Engineering Society, 2007.
- [14] 万伟江, 王伟, 李成榕, 等. 超高频法在发电机局部放电检测中的应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 38-40.
WAN Weijiang, WANG Wei, LI Chengrong, et al. Application of UHF in PD detection in generator[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 38-40.
- [15] 陈宏福, 黄成军, 钱勇, 等. 发电机局部放电评估方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 155-159.
CHEN Hongfu, HUANG Chengjun, QIAN Yong, et al. Preliminary investigation of the assessing method for PD in generator[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 155-159.
- [16] 满玉岩, 高文胜, 高凯, 等. 发电机局部放电的统计特征识别[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 41-45.
MAN Yuyan, GAO Wensheng, GAO Kai, et al. Statistical recognition of discharge patterns in power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 41-45.
- [17] 魏燕飞, 曹海翔, 孙旭东, 等. 基于 PEEC 法的发电机定子绕组线棒高频电路模型[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(3): 6-10.
WEI Yanfei, CAO Haixiang, SUN Xudong, et al. HF circuit model of generator stator bar based on PEEC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(3): 6-10.
- [18] QIN Shaozhen, BIRLASEKARAN S. The study of PD propagation phenomenon in power network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1083-1091.
- [19] VENEZUELA C J. Experiences in identification of partial discharge patterns in large hydrogenerators[C]//IEEE 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America.[S.l.]: IEEE, 2006: 1-6.
- [20] 李宪栋, 唐新文, 石月春, 等. 发电机局部放电在线监测系统现场应用探讨[J]. 水电能源科学, 2011, 29(10): 150-154.
LI Xiandong, TANG Xinwen, SHI Yuechun, et al. Discuss on site application of generator partial discharge on-line monitoring[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(10): 150-154.
- [21] 程养春, 李成榕, 王伟. 发电机局部放电脉冲沿定子绕组传播规律的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 65-70.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, WANG Wei. Research on propagation rule of partial discharge pulses inside generator along stator windings[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 65-70.
- [22] 李新, 孙才新, 李剑, 等. 从放电能量分布特征量识别 PD 类型的方法[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 26-27.
LI Xin, SUN Caixin, LI Jian, et al. Research on PD pattern recognition based on extracting features from PD energy distribution[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 26-27.
- [23] 王伟, 李成榕, 孟庭荣, 等. 发电机定子局部放电在不同检测频段下的统计特性[J]. 高电压技术, 2002, 28(z1): 3-4.
WANG Wei, LI Chengrong, MENG Tingrong, et al. Study on PD statistic characteristics of generator stator winding insulation under the different frequency domain[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(z1): 3-4.
- [24] 王伟, 李成榕, 孟庭荣, 等. 基于传感器阈值法的局部放电信号自消噪[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1578-1582.
WANG Wei, LI Chengrong, MENG Tingrong, et al. Method for PD signal self-denoising based on sensor threshold[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1578-1582.

贾少磊(1970—),男,研究生,高级工程师,研究方向为机电设备的设计及检测。

(上接第 80 页)

Bursa, Turkey: [s.n.], 2001: 26-31.

- [19] IEC/TR 62271-302:2010 High-voltage switchgear and controlgear-Part302: Alternating current circuit-breaker with intentionally non-simultaneous pole operation[S]. 2010.
- [20] SUGIYAMA K T, HIRANO Y. Development of new hydraulic drive and its application for circuit breaker [C]//1988 National Convention of IEE of Japan. [S.l.]: IEEE, 1988: 1546-1547.
- [21] RAJOTTE R J, CHARPENTIER C, BRAULT S, et al. Field tests of a circuit-breaker synchronous control[J]. IEEE PES Winter Meeting on PWRD, 1995, 13(2): 472-479.

张浩(1981—),男,工程师,硕士,从事高压开关设备的工程设计及新产品研发。

郑宇宏(1970—),男,高级工程师,硕士,从事高压开关设备的研制及管理工作。

王娜(1981—),女,工程师,硕士,从事高压电器设计及高电压绝缘技术的研究工作。