自主脉冲标定式特高频局部放电带电检测相位同步方法

胡 岳1,司良奇1,张卫东2,钱 勇1,曹灵钰1,江秀臣1

(1. 上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 山东电力集团公司威海供电公司,山东 威海 264200)

摘要:针对现有的特高频局部放电带电检测系统,提出一种基于特高频自主标定脉冲的相位同步方法。该方 法使用一个同步电路,在工频信号上升沿过零点同步输出一时频特性固定的特高频时间标定信号,实现相位 的同步。此信号与局部放电脉冲信号同时被局部放电特高频检测系统所采集,并以其时频参数为特征参量, 采用聚类方法加以分类标记。利用局部放电特高频脉冲与其前后时间标定信号的时差便可计算其在工频信 号的相角位置。实验结果验证了该方法的有效性和实用性。

关键词:局部放电;特高频;相位同步;标定脉冲 中图分类号:TM 83 文献标识码:A

0 引言

局部放电 PD(Partial Discharge,以下简称局放) 检测因能够在早期及时发现电气设备的绝缘缺陷并 可判断其严重程度,已成为当前电力行业的研究热 点^[1-2]。目前局放检测中应用较多的检测数据分析 方法主要有基于相位的局放 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)分析模式和基于时间的局放 TRPD (Time Resolved Partial Discharge)^{①[3-4]}分析模式。在 局放带电检测中,特高频检测方法因其检测灵敏度高、 抗干扰能力强、可用于定位等优点,正被电力行业大 力推广^[56]。

目前应用的特高频局放带电检测系统主要有以 下2种形式。

a.采用检波或者混频等方法降频之后,使用低频采样系统检测局放特高频脉冲信号的幅值和相位,进行 PRPD 分析,用于放电模式识别。采用该形式的局放检测系统成本低,但是对干扰脉冲的排除 有一定的局限性。

b. 采用分段采集模式超高速采集局放特高频脉冲信号,进行 TRPD 分析,用于局放定位与识别。采 用该形式的局放检测系统因采样率高,能获得详尽 的局放特高频脉冲信号的时频特性。但其仅记录局 放脉冲波形的时间和幅值信息,不包含相位信息,一 般不能同时实现 PRPD 分析。而在局放检测过程中, 相位信息对于放电模式识别非常重要。

对于采用分段采集模式的特高频局放带电检测 系统,要在进行 TRPD 分析的同时实现 PRPD 分析,

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.008

以综合 2 种分析方法的优点,计算局放特高频脉冲 的相角是关键。本文在不改变现有分段采集模式特 高频局放带电检测系统结构的基础上,提出了一种 基于自主脉冲标定的局放特高频脉冲相角测量方 法。利用特高频脉冲标定工频信号过零点,再利用局 放特高频脉冲与其前后过零点标定脉冲的时差计算 其在工频信号的相角位置。

本文在介绍现有局放特高频检测系统结构的基础上,描述了基于自主脉冲标定的局放特高频脉冲 相角测量的方法、流程与关键步骤的实施,并以高压 导体尖端放电为例,通过设计局放试验与分析试验 结果,对该方法的有效性进行了验证。

1 同步方法

局放脉冲相角指局放脉冲所在交流试验电压的 相角位置,通过式(1)计算。

$$\varphi_i = \frac{t_i}{T} \times 360 \tag{1}$$

其中,t_i为局放脉冲发生瞬间与试验电压最近一次正向过零点之间的时间间隔,T为试验电压的周期。传统局放检测系统计算就是依照此原理,从检测阻抗中分离出工频信号,并标记其过零点时刻,从而计算局放脉冲相角^[78]。

在现有的局放特高频带电检测系统中,很多系统因分析局放特高频脉冲时频信息的需要,采样率都在 GS/s(S/s为采样率单位,表示每秒采样数)量级,该类系统主要利用超高速采集的特高频脉冲所含的丰富的频谱信息,来进行放电波形的分类与识别。由于采样率高,如果采用连续采集的方式,现有硬件技术在数据存储与处理速度上达不到要求,因此一般采用分段采集模式,仅采集局放脉冲部分^[9]。

收稿日期:2012-12-04;修回日期:2013-08-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(SS-2012AA050803)

Projected supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(SS2012AA-050803)

① Cigré Working Group D1.33. Guide for electrical partial discharge measurements in compliance to IEC60270. 2008.

分段采集模式可以记录局放特高频脉冲的瞬时时 刻,但试验电压的过零点位置不能同步标记,因此脉 冲相角一般不能准确计算出来。近似的计算则假设 工频电压的频率为50Hz不变,这样计算出来的相角 因系统实际频率与假定频率的偏差及其波动,会给计 算带来误差,特别对某些放电类型,如悬浮放电,因 每周期内放电脉冲个数有限,要积累一定量的放电脉 冲,需要较长时间的数据采集,计算误差就会更大。

对于分段采集模式的特高频局放带电检测系统,计算放电脉冲相角的关键是标记试验电压的过零点位置,以实现相位同步^[10]。为解决这一问题,本 文采用自主特高频脉冲标定的方法。通过一特高频 脉冲同步标记电路,在试验电压过零点位置(0°、360°) 同步发射一频率特性固定的特高频脉冲,使得该标 记脉冲能够与局放特高频脉冲同时被特高频局放带 电检测系统检测到;再通过分析系统所检测到的特 高频脉冲的时频特性,采用聚类的方法将与过零点 同步的特高频标记脉冲分离出来;最后利用式(1), 计算局放特高频脉冲的相角。如图1所示,*φ*_i为待测 局放脉冲相角,*t*_j=*t*_j-*t*_{j0},*T*=*t*_{j1}-*t*_{j0},*t*_j 为局放脉冲发生 的瞬时时刻,*t*_{j0},*t*_{j1}分别为局放脉冲发生瞬时时刻对 应的试验电压最近一次前、后上升沿过零点时刻。



图 1 局放特高频脉冲相角计算示意图 Fig.1 Schematic diagram of phase angle calculation for UHF PD pulse

本文所提相角计算方式具有以下优点:

a. 不改变现有特高频局放带电检测系统的硬件 结构;

b. 对于分段采集模式的特高频局放带电检测 系统,因其本身也需要进行特高频脉冲信号的时频 分析,未增加系统的额外负担;

c. 计算原理简单,能同步标记试验电压过零点 时刻,相角计算误差小。

2 系统实现

为实现上述相角计算方法,本文在已有的局放特 高频采集系统的基础上^[11-12],构建了一套特高频局 放带电检测及特高频脉冲相位标定试验系统,如图 2所示,虚线框内为已有局放特高频带电检测系统。 局放特高频信号经过传感、滤波及放大等调理之后 为超高速数据采集系统所记录,数据分析系统则对



图 2 特高频局放带电检测及特高频脉冲相位标定系统 Fig.2 UHF PD detection and UHF pulse phase mark system

所采集的特高频脉冲进行时频分析。试验系统采用 超高速示波器代替数据采集系统,数据分析则依托 实验室的局放分析软件实施。在此基础上硬件部分 增加了特高频同步标定电路,以在试验电压过零点 位置,通过特高频标定天线发射出过零点标定脉冲; 软件部分则增加以时频参数为特征量的脉冲识别模 块,以分离过零点标定脉冲与局放特高频脉冲。

2.1 特高频同步标定电路[13-14]

特高频同步标定电路的主要作用是在试验电 压过零点时刻同步发射出一个固定频率的特高频信 号。实现该功能的关键是试验电压的同步获取以及 特高频脉冲信号的产生。如图 3(a)所示,试验电压 信号的传感采用微型电压传感器,如果在室内也可 以通过光敏二极管,从照明灯中耦合电压信号;使用 低通滤波电路滤除传感电压信号中的某些"毛刺"信 号后,输入过零比较器,并对比较器输出的信号进行 整形,用以触发驱动 ns 级脉冲输出电路。ns 级脉冲 通过雪崩三极管放电实现,如图 3(b)所示。前级触发 信号从雪崩三极管 V_{TI} 基极输入,直流电源 U_{cc} 通过 限流器电阻 R1,加到雪崩三极管集电极,输出负载 R3 经电容串接于雪崩三极管集电极与地之间, Vm 导通 时, C_1 上所充电荷经 R_3 ;瞬时释放,形成脉冲。 C_1 , R_1 和 V_π 的参数决定了脉冲的特性。参数选定后,该脉 冲的上升沿等特性固定。本文中使用的雪崩三极管 为 NXP 公司的 BFS17, C₁ 为 22 pF, R₁ 为 51 Ω, 脉冲



(负脉冲)上升沿约为4ns,通过并接在R₃上的单频 射频天线(433 MHz)输出与试验电压过零点同步的 特高频标定信号。该标定脉冲的频率特性固定,频带 包含在局放特高频传感器范围之内,但又与局放脉 冲的时频特性存在明显差异,便于后续的分离。

2.2 标定脉冲分离

过零点同步标定特高频脉冲信号时频特性固定,可以在对检测的特高频信号进行时频分析时,采 用聚类方法,将其和局放脉冲信号分离开来。具体流 程如下^[16]。

a. 事先计算并保存特高频同步标定电路产生的 特高频标定脉冲信号的时频参数^[16] f_{0ref} 、 T_{ref} 、 W_{ref} ,并 以此为向量元素构成参考向量 $X_{ref} = (f_{0ref}, T_{ref}, W_{ref})$ 。

b. 类似地将每个记录的特高频脉冲信号的时频 参数构成一个向量 $X_{j}=(f_{0j},T_{j},W_{j})$,并以此特征向量 组成一个集合 $\{X_{1},X_{2},\cdots,X_{j},\cdots,X_{n}\}$,*n* 为记录的特 高频脉冲信号的总数。以 X_{j} 为特征参数,采用模糊聚 类方法对 *n* 个特高频脉冲进行分类,并求取聚类中心 $X_{k}(k=1,2,\cdots,m,$ 其中 *m* 为分类数)。

c. 计算步骤 **b** 中求得的各聚类中心 X_k 与步骤 **a** 中参考向量 X_{ref} 的几何距离,分析所求距离最小的 聚类中心 X_i ,按照式(2)评估该聚类中心为标定脉冲 聚类中心的可能性。如果 P 接近于 1,则认定该类特 高频脉冲为与过零点同步的标定脉冲。

$$P = e^{-\alpha \|X_i - X_{ref}\|^2} \quad \alpha = 0.25$$
 (2)

d. 在所认定的标定脉冲聚类中心中,计算相邻 特高频脉冲的时差是否约为 20 ms,再次验证标定脉 冲提取的正确性与完整性。

经过以上步骤就实现了基于波形时频特征的局 放特高频脉冲与过零点标定脉冲信号的分离,并提 取出了过零点标定脉冲信号。

3 试验验证

3.1 试验系统

为验证相角计算方法的可行性,本文构建了一局放检测试验电路如图4所示。自制的针-板局放模型接在200kV无局放试验电源上,施加电压后,使



图 4 局放检测试验电路 Fig.4 Test circuit of PD detection

用耦合电容法检测的数字局放仪与上文所述的特高 频局放检测系统同时检测局放信号。特高频同步标 定电路接在试验电源的输入侧。试验时,逐步升高放 电模型两端所加试验电压,直至数字局放仪检测到 稳定放电现象。校准特高频标定脉冲的相差之后,使 用特高频局放检测系统采集特高频脉冲信号。所采 集数据传送并存储到数据分析系统进行后续分析。

试验中设计了一针-板模型用于模拟尖端放电^[17]。 如图 5 所示,2 个平行金属圆板上,各自安装了圆形 金属平板电极和不锈钢针,针尖经过光滑处理,针的 大小和长度可更换,其距金属圆板电极位置可调。试 验时在空气中模拟了尖端放电,针的直径为 0.25 mm, 针尖距下极板 3 mm。



图 5 针-板放电模型及试验系统实物图 Fig.5 Needle-plate PD model and PD test system

3.2 试验结果

放电模型两端的试验电压升至 2.4 kV 时,通过 数字局放仪可以观察到明显的局放信号,此时局放 特高频检测系统也能观察到特高频信号。检测系统 在分段采集模式记录下1000个特高频脉冲波形,并 按照本文上节中所述标定脉冲分离流程对其进行时 频分析。图 6 为所采集特高频波形的 $T^2 - W^2$ 图谱, 本文采用 2.2 节中描述的模糊聚类方法对特高频脉 冲的时频向量进行分离,结果显示其被分为2类,其 中一类的聚类中心与参考向量中心十分接近,判断 为特高频标记脉冲。从图中可以看出,标记脉冲的 $T^2 - W^2$ 图谱相对集中,反映其时频特性相对比较稳 定。图7给出了所采集的2类特高频脉冲的典型波 形,可以看出局放特高频脉冲和试验电压过零点同 步的特高频标定脉冲有明显的区别,说明特高频标 定脉冲发生电路对发射脉冲时间参数的选取合适。 图 8 为采用本文方法计算得到的局放特高频脉冲的 PRPD 图谱,局放信号的相位分布在 270° 左右,符合



图 6 特高频脉冲波形的时频参数图谱 Fig.6 Time-frequency parametric spectrum of UHF pulses





Fig.8 PRPD spectrum of UHF PD pulses

尖端放电的相位分布特性。

4 结论

本文针对分段采集模式下特高频局放检测系统,提出了一种特高频局放相位同步与脉冲相角计算方法。使用特高频标定脉冲标记试验电压过零点时刻,进而利用局放特高频脉冲与标定脉冲的时差计算其相角。标定脉冲与局放脉冲的分离通过模糊 聚类方法实现。本文方法不改变现有特高频局放带 电检测系统的硬件结构,未增加数据分析系统的额 外负担,实现方式简单,计算准确度高。试验结果表 明,特高频标定脉冲信号能够准确记录试验电压过 零点时刻。局放特高频检测系统能够区分该标定脉冲 有所绘制的 PRPD 图谱符合理论相角分布,验证 了基于自主脉冲标定的相角计算方法的准确性和有 效性。

参考文献:

 王国利,郑毅,郝艳捧,等.用于变压器局部放电检测的超高频传 感器的初步研究[J].中国电机工程学报,2002,22(4):154-160.
 WANG Guoli,ZHENG Yi,HAO Yanpeng, et al. Study on the ultra-high-frequency sensor for PD detection in power transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):154-160. [2] 刘君华,姚明,黄成军,等. 采用声电联合法的 GIS 局部放电定位 试验研究[J]. 高电压技术,2009,35(10):2458-2463.

LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Experimental research on partial discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2458-2463.

- [3] MAZROUA A A, BARTNIKAS R, SALAMA M M A. Discrimination between PD pulse shapes using different neural network paradigms[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1994, 1(6):1119-1131.
- [4] 郑重,谈克雄,高凯. 局部放电脉冲波形特性分析[J]. 高电压技术,1999,25(4):15-17.
 ZHENG Zhong,TAN Kexiong,GAO Kai. Pulse shape characte-

ristic analysis of partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 15-17.

- [5] 杜林,颜梁钦,甘德刚,等. 超高频扫描比较式局部放电在线监测系统[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):120-124.
 DU Lin,YAN Liangqin,GAN Degang, et al. Online partial discharge monitoring system by UHF scanning and comparison[J].
 Electrical Power Automation Equipment,2012,32(6):120-124.
- [6] 邱毓昌. 用超高频法对 GIS 绝缘进行在线监测[J]. 高压电器,1997, 33(4):36-40.
- [7] 中华人民共和国国家质量检验检疫总局. GB/T7354—2003 局部 放电测量[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [8] 贾勇勇,姚林朋,黄成军.应用于局部放电检测的高速实时数据 传输系统的设计与实现[J].电气自动化,2011,33(2):82-85. JIA Yongyong,YAO Linpeng,HUANG Chengjun. Design and realization of a high-speed and real-time data transmission system used for partial discharging detection[J]. Electrical Automation, 2011,33(2):82-85.
- [9] 唐炬,廖华,张晓星,等. GIS 局放超高频在线监测系统研制[J]. 重庆大学学报,2008,31(1):29-33.
 TANG Ju,LIAO Hua,ZHANG Xiaoxing, et al. GIS partial discharge UHF on-line monitoring system based on virtual instruments[J]. Journal of Chongqing University,2008,31(1):29-33.
- [10] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述[J]. 电力系统自动化, 1999,23(3):54-58.

XIE Xiaorong, HAN Yingduo. An overview on power system frequency measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3):54-58.

- [11] GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong. Research on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4):2621-2629.
- [12] BORSL H. A PD measuring and evaluation system based on digital signal processing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 7(1):21-29.
- [13] 张海平. 超宽带(UWB)窄脉冲发生器的研究[D]. 成都:西南交 通大学,2004.
 ZHANG Haiping. Studies of Ultra-Wide Band(UWB) narrow pulse
- generator[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2004. [14] 李超,勇明,刘君华,等. 局部放电检测用超高频脉冲发生器[J]. 电工技术,2009(10):47-48. LI Chao,YONG Ming,LIU Junhua,et al. Partial discharging detection used ultra-high frequency pulse generator[J]. Electric Engineering,2009(10):47-48.
- [15] CHIU S L. Fuzzy model identification based on cluster estima-

tion[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 1994, 2:267-278.

- [16] CONTIN A, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 335-348.
- [17] 刘玲,廖瑞金,周湶,等. 基于放电时差的局部放电模式识别的 研究[J]. 高电压技术,2007,33(8):35-39.

LIU Ling,LIAO Ruijin,ZHOU Quan,et al. PD pattern recognition using inter-time[J]. High Voltage Engineering,2007,33(8); 35-39. 作者简介:

胡 岳(1978-),男,湖南湘阴人,助理研究员,博士,主要 从事局部放电检测、局部放电检测系统评估的研究(E-mail: yuehu@sjtu.edu.cn);

司良奇(1988-), 女, 河南内黄人, 硕士研究生, 主要从事 电力设备在线检测与故障诊断的研究(E-mail:slq9@sina. com):

江秀臣(1965-),男,山东郓城人,教授,博士研究生导师,博士,从事电气设备在线监测、状态检修和自动化的研究 (E-mail:xcjiang@sjtu.edu.cn)。

Phase synchronization based on independent reference pulse for online UHF PD detection

HU Yue¹, SI Liangqi¹, ZHANG Weidong², QIAN Yong¹, CAO Lingyu¹, JIANG Xiuchen¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shandong Weihai Power Supply Company, Weihai 264200, China)

Abstract: A method of phase synchronization based on UHF (Ultra High Frequency) independent reference pulse is proposed for the existing UHF PD (Partial Discharge) detection system, which outputs a reference UHF pulse for phase synchronization by the synch circuit when the rising edge of power frequency signal passes zero point. The reference pulse is sampled together with PD pulses by the UHF PD detection system and distinguished from the PD pulses by the clustering method according to its time-frequency characteristic. The phase angle of PD pulse can be calculated according to the time difference between it and its neighboring reference pulse. Experiment verifies its effectiveness and practicality.

Key words: partial discharge; ultra high frequency; phase synchronization; reference pulse

(上接第43页 continued from page 43)

Fast SVPWM algorithm with DC voltage equalization for five-level diode-clamped converter

ZHU Haifeng, SHU Zeliang, GAO Shibin

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

Abstract: A fast SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) algorithm with DC voltage equalization is proposed for multilevel diode-clamped converter, which decomposes the reference vector transformation, vertex calculation, vector location determination and dwelling time calculation into simple and fast calculations in $\alpha'\beta'$ coordinates, forecasts the influence of all redundant switching vectors on the DC-link capacitor voltages for the next switching period, and selects the optimal switching vector to realize DC-link capacitor voltage equalization. The simulative results are compared between the traditional PWM algorithm and the proposed SVPWM algorithm, which validates the effectiveness of the proposed algorithm. Its control core is designed based on FPGA (Field Programmable Gate Array) and its excellent static and dynamic performances are validated by the experimental results of a small-scale test system.

Key words: diode-clamped multilevel converter; DC voltage equalization and stabilization; SVPWM; electric converters; pulse width modulation

43