

局部放电超高频脉冲分段采集及相角计算方法

胡岳¹, 司良奇¹, 张卫东², 钱勇¹, 盛戈峰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: 采用连续采样方法检测局部放电信号成本较高, 为此提出一种分段采集模式。采用高、低速系统分别采集局部放电超高频脉冲及工频信号, 利用局部放电脉冲同步触发工频信号。采用模糊聚类方法计算所采集工频信号的实时基波频率, 进而基于傅里叶级数算法, 计算所采集工频信号的初始相位角, 并以此作为局部放电脉冲的相角。通过局部放电脉冲相角、局部放电脉冲时间间隔及工频信号频率计算整个局部放电脉冲链相角。仿真试验和现场检测验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 绝缘; 局部放电; 超高频; 信号检测; 傅里叶级数; 模糊聚类; 触发电路; 仿真; 聚类算法; 采样
中图分类号: TM 83 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.013

0 引言

局部放电 PD (Partial Discharge, 以下简称局放) 检测作为绝缘诊断的重要手段, 因其能及时有效地反映电力系统电气设备的绝缘状况, 正为电力行业普及推广^[1-4]。目前应用较多的是基于电量的局放检测方法^[5], 检测信号按照频带可分为 500 kHz 以下宽带或者窄带信号、10 MHz 以下的高频 HF (High Frequency) 信号、200 MHz 以下的甚高频 VHF (Very High Frequency) 信号和 2 GHz 以下的超高频 UHF (Ultra High Frequency) 信号^[6]。相对于其他检测方法, UHF 检测方法因其具有抗干扰能力强、灵敏度高、可用于在线检测及局放源定位的优点, 目前正在广泛推广。

局放信号的处理方式主要有基于局放相位的分析模式 PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) 和基于局放时间的分析模式 TRPD (Time Resolved Partial Discharge) 2 种^[7-9]。前者以局放发生的工频相位 φ ($0 \sim 360^\circ$)、放电幅值 q 和放电次数 n 等检测量为依据进行统计学等方式的分析, 后者则分析局放所检测到的放电波形及时间信息 (不包含相位信息)。运行于 PRPD 下的局放检测系统一般以工频信号过零点为起点连续采集规定工频周期长度的信号^[10-11], 系统通过高通滤波和低频滤波将检测阻抗耦合的信号分离为工频信号和局放信号。因为该模式下的工频信号和局放信号为同源信号, 且利用工频过零点进行了采集同步与时间标定, 局放脉冲的相角可自然标定。而运行于 TRPD 下的局放检测系统, 一般仅采集局放脉冲信号, 因仅含有局放脉冲的时间信息, 不包含工频信号信息, 故不能直接标定局

放信号的相位。要实现局放脉冲的相位标定, 可参考 PRPD 的信号处理模式, 通过连续采集规定工频周期的信号实现。但 TRPD 因分析放电波形频率分布信息的需要, 采样率很高, 特别对局放 UHF 信号而言, 其频带范围达到 3 GHz, 集中分析的频带一般达到 1.5 GHz, 系统的采样率一般为每秒采样 3×10^6 个点以上, 连续采集对采集系统板上存储空间和处理器的要求都非常高^[12]。另一种方法则可通过在 UHF 信号前置处理单元中增加检波或者混频部分^[13], 降低所检测 UHF 信号的频率, 以达到降低检测系统采样率的目的, 但是该方法是以牺牲 UHF 信号的时频信息为代价的, 所得到的信号仅能够进行 PRPD 分析。

为同时实现局放 UHF 信号的 TRPD 与 PRPD 分析, 既保留所采集的 UHF 脉冲信号的时频信息, 又可分析 UHF 脉冲的相角分布, 除了需要超高速采样 UHF 脉冲信号之外, 还要完成采样脉冲的相角标定。为此本文提出一种局放 UHF 脉冲信号分段采集模式, 以局放脉冲本身触发信号采集, 且仅采集局放 UHF 脉冲部分, 并使用该局放 UHF 脉冲所形成的触发信号触发工频信号采集, 通过计算所触发的工频信号初始相位角来标定局放 UHF 脉冲相角。工频信号初始相位角的计算基于傅里叶级数算法^[14], 考虑到电网频率的波动, 为提高相角的计算精度, 相角计算算法以采集信号的实测频率为计算基频。该相位标定方法使用不同采样率分别采集局放脉冲信号和工频信号, 在实现局放脉冲信号连续触发、高速采集和分段存储的同时, 低速采集工频信号, 对局放检测系统板上存储空间的要求大幅度降低, 同时信号处理量也大为减少。

本文首先介绍了局放 UHF 信号分段采集模式的系统设计, 描述了该模式下局放脉冲相角的计算流程, 并应用傅里叶级数算法计算工频信号初始相

收稿日期: 2012-06-26; 修回日期: 2013-03-25

基金项目: 上海市科学技术委员会资助项目 (10dz1203000)

Project supported by Shanghai Municipal Science and Technology Commission (10dz1203000)

位角,即触发工频信号采样的局放脉冲的相角,对使用模糊聚类方法计算工频信号实时频率的原理及实施过程作了详细描述。最后通过仿真计算、误差分析及现场应用对上述相角计算方法进行了验证。

1 系统结构及 UHF 脉冲相角计算流程

为实现 TRPD 下局放 UHF 脉冲信号所在工频信号的相位标定,所设计的系统结构如图 1 所示。

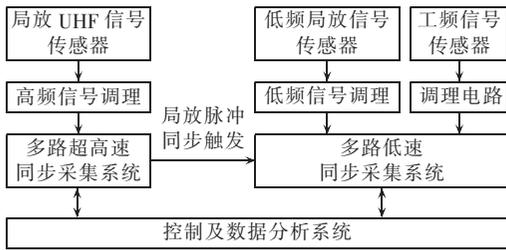


图 1 高/低速采集系统结构图

Fig.1 Structure of high- and low-speed acquisition systems

采集系统分为高速采集和低速采集两部分,分别对经过调理的局放 UHF 信号及其他高频信号(如 HFCT 信号)、工频信号及低频信号(如 AE)进行数字化采集。高/低速采集系统各自可实现同步,这样的结构可实现高/低速系统的分别控制,达到高速系统分段采集存储、低速系统连续采集的要求。

高速采集系统使用脉冲触发、分段采集方式检测与采集局放脉冲信号。在检测到局放触发信号的同时,高速采集系统通过内部硬件电路将其转换为数字触发信号形式的路由信号,该路由信号与局放信号仅有纳秒级时延,且脉冲幅值得以标准化,脉冲宽度延展到百纳秒级。该信号通过信号线连接至低速采集系统的数字触发接口,触发其对工频信号的采集,实现工频信号采集与高速脉冲信号的同步采集。因局放脉冲信号的采集和工频信号的采集是同时进行的,计算出同步采集的工频信号初始相位就得到了触发该段工频信号采集的局放脉冲所在工频信号的相位角。

整个局放 UHF 脉冲序列对应的相角序列计算流程如图 2 所示。分段采集的局放 UHF 脉冲序列标

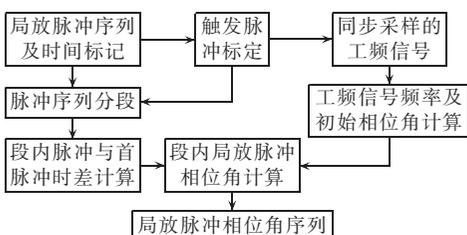


图 2 局放 UHF 脉冲相角计算流程图

Fig.2 Flowchart of phase angle calculation for PD UHF pulses

记有每个脉冲的采样时刻,局放 UHF 脉冲同步触发工频信号采样之后,在工频信号采样时间内高速采集系统输出的触发信号自动被低速采集系统忽略,直至工频信号采样完成后低速采集系统才可再次触发采样。通过标定有效的触发脉冲将局放 UHF 脉冲序列分段,然后计算每段 UHF 脉冲序列内各局放 UHF 脉冲与首个 UHF 脉冲的时间差,结合该段脉冲序列同步的工频信号的初始相位角及采样时段电网的实时频率,依据式(1)可计算段内局放脉冲所在工频信号的相位角。

$$\begin{cases} \varphi_i = 2\pi f \Delta t + \varphi_0 \\ \Delta t = t_i - t_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, φ_i 为段内需计算的第 i 个局放脉冲的相位角; f 为实测工频信号频率; t_i 为段内标记的第 i 个局放脉冲出现的瞬时时刻; t_0 与 φ_0 分别为该计算脉冲群内首脉冲出现的瞬时时刻及相位角, φ_0 等于其触发的工频信号的初始相位角。

2 工频信号初始相位角计算

采样大于 10 个周期的工频信号并标定其过零点,以相继上升沿或者下降沿过零点的时长计算工频信号的实时频率,再基于傅里叶级数及三角函数的正交性计算该信号的初始相位^[14]。

在一个工频信号采样时间段内,假定电力系统的电压值为一个稳定的周期信号,仅含正弦奇次谐波分量。可以证明,电压值属于封闭的线性空间,而傅里叶级数的三角函数系是这个线性空间的一组正交基。电压为该空间的相量,可以由三角函数线性表示。故可将电压分解为傅里叶级数的形式:

$$u = \sum_{k=1}^{\infty} U_{2k-1} \sin[(2k-1)\omega t + \varphi_{u,2k-1}] \quad (2)$$

其中, ω 为电网电压的工频基波角频率; $\varphi_{u,2k-1}$ 为频率为 $(2k-1)\omega$ 的正弦波级数项的初始相位值。对电压分别乘以工频基波的正弦和余弦信号,并在一个工频周期内积分,根据三角函数的正交性质得到:

$$M_s = \int_0^T u \sin \omega t dt = \int_0^T U_1 \sin(\omega t + \varphi_{u,1}) \sin \omega t dt = U_1 \cos \varphi_{u,1} \int_0^T \sin^2 \omega t dt \quad (3)$$

$$M_c = \int_0^T u \cos \omega t dt = \int_0^T U_1 \sin(\omega t + \varphi_{u,1}) \cos \omega t dt = U_1 \sin \varphi_{u,1} \int_0^T \cos^2 \omega t dt \quad (4)$$

由式(4)除以式(3),可得:

$$\frac{M_c}{M_s} = \frac{\sin \varphi_{u,1}}{\cos \varphi_{u,1}} = \tan \varphi_{u,1} \quad (5)$$

对式(5)求反正切,由式(2)的定义可知,电压基波的初相位 $\varphi_{u,1}$,即本文所要求的工频信号初始相位角 φ_0 为:

$$\varphi_0 = \varphi_{u,1} = \arctan \frac{M_c}{M_s} \quad (6)$$

将式(6)离散化并化简,得到基波电压初始相位的离散化计算公式:

$$\varphi_0 = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} U(n) \cos \frac{2\pi nT}{N}}{\sum_{n=0}^{N-1} U(n) \sin \frac{2\pi nT}{N}} \quad (7)$$

其中, $U(n)$ 为第 n 次采样所得到的值; $N = Tf_s$ 为总采样次数, f_s 为采样频率, T 为工频周期。

3 工频信号实时频率测量

一般在局放图谱的相位计算中,默认电网电压为 50 Hz,而实际上电网的频率在 49.5~50.5 Hz 范围内实时波动,特别在 49.8 Hz 至 50.2 Hz 之间波动比较频繁。按照第 2 节所述的初始相位角计算原理,以 50 Hz 为工频基波频率,由此计算出的工频信号初始相位角存在误差,并且按照式(1)计算的脉冲序列段内其他局放脉冲的相位角也存在误差。因此,有必要计算采样工频信号的实时频率。

文献[15]总结了电力系统频率测量方法及其优缺点,其中周期法通过测量信号波形相继过上升沿零点间的时间宽度来计算周期,从而计算频率。该方法物理概念清晰、易于实现,目前常用的锁相环方法也是跟踪工频信号的过零点进行的。这类方法的测量精度取决于过零点提取的精度,主要受谐波、噪声和非周期分量的影响,实际电力系统工频信号过零点附近会产生很多假过零点,引起周期测量偏差。本文从统计学的角度出发,采用聚类方法^[16]将符合过零特征的点进行聚类,找出聚类的中心作为系统的实际过零点,同时连续测量 10 个工频周期进行平均,提高了频率测量的精度。具体测量流程见图 3。

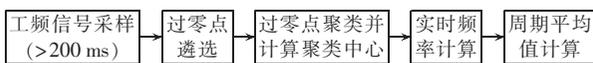


图 3 工频信号实时频率计算流程

Fig.3 Flowchart of real-time power frequency calculation

为了保证在电网实时频率小于 50 Hz 时,能够采满 10 个工频周期信号,采样时间应大于 200 ms。采样数据中的过零点与相邻点采样值的乘积必须小于等于零,且该点绝对值必须小于设定值。遴选结果为集中在每个过零点附近的点群,且各点群之间的区分度非常高。采用聚类方法,求出各点群的聚类中心,便可将其定义为工频信号的正负过零点。聚类中心的求取过程如下^[17]。

先假设遴选的点的集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的每个点都为潜在的聚类中心,按照式(8)评估各点为聚类中心的可能性 P_i ,取可能性最大的点为第一类的中心。

$$\begin{cases} P_{i,1} = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \\ \alpha = 4/r_a^2 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_{i,1}$ 为集合中某点与其他所有点的距离的函数; r_a 为常数,用来定义“邻居”的有效半径距离。含有更多“邻居”的点,其为聚类中心的可能性更大。

假设 x_1^* 、 P_1^* 分别为计算出来的第 1 个聚类中心及其为聚类中心的可能性,根据式(9)重新计算各点为聚类中心的可能性。

$$\begin{cases} P_{i,2} = P_{i,1} - P_1^* e^{-\beta \|x_i - x_1^*\|^2} \\ \beta = 4/r_b^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, r_b 为常数,用来定义 x_1^* 的“邻居”的有效半径。这样 x_1^* 附近的点为潜在聚类中心的可能性大为减少。再依据式(9)的计算结果选取新的可能性最大值 P_2^* 对应的点为第 2 个聚类中心 x_2^* 。依此类推,求出第 k 个聚类中心 x_k^* 及其为聚类中心的可能性 P_k^* 之后可按式(10)求取各点新的可能性。

$$P_{i,k+1} = P_{i,k} - P_k^* e^{-\beta \|x_i - x_k^*\|^2} \quad (10)$$

取最大值对应的点为第 $k+1$ 个聚类中心。

重复上述步骤直至所求的新的聚类中心对应的可能性小于 εP_1^* , ε 为一极小数,实际计算中,可根据情况在 0.15~0.2 之间选取。

4 仿真计算及误差分析

基于虚拟仪器平台 LabView,本文对第 2、3 节提出的基于实时频率的工频信号初始相位角的计算方法进行了仿真计算。

仿真波形设定成频率为 49~51 Hz、初始相位角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 随机选取的工频信号与 5% 的 3 次谐波信号及 10% 的高斯白噪声信号的叠加。仿真波形信号采样频率为 100 kHz,具体设定参数及见表 1。对应表 1 中 12 种参数设定,运用本文所述方法计算出的工频信号实时频率及初始相位的比较如表 2—4 所示。由实测频率数据可知,频率在设定范围内变动,基于模糊聚类的频率测量方法实测的频率绝对误差小于 0.05 Hz,相对误差小于 1‰。假设电网频率为 50 Hz 固定不变的情况下,实测频率偏离 50 Hz 越远,初始相位角测量误差越大。当频率偏差超过 0.5 Hz 时,相角计算误差最大将超过 5° (局放检测标准^[10]中对试验电压相角测量所要求的最大误差);

表 1 频率及相角设定值

Tab.1 Frequency and phase-angle settings

编号	频率/Hz	相角/(°)	编号	频率/Hz	相角/(°)
1	49.5	0	7	50.5	30
2	50.0	0	8	51.0	30
3	50.5	0	9	49.0	200
4	49.0	30	10	49.5	200
5	49.5	30	11	50.0	200
6	50.0	30	12	50.5	200

表 2 实时频率计算结果及误差分析

Tab.2 Results of real-time frequency calculation and its error analysis

实测频率	标准差	测量误差	实测频率	标准差	测量误差
49.54	0.02	0.04	50.56	0.04	0.06
50.01	0.03	0.01	51.10	0.04	0.09
50.46	0.03	0.04	48.93	0.03	0.07
49.11	0.04	0.11	49.46	0.04	0.04
49.54	0.03	0.04	49.99	0.03	0.01
50.01	0.04	0.01	50.47	0.03	0.03

表 3 相角计算结果及误差分析
(计算基频为 50 Hz)

Tab.3 Results of phase angle calculation and its error analysis($f=50$ Hz)

计算值	标准差	测量误差	计算值	标准差	测量误差
-5.21	0.15	-5.21	35.67	0.23	5.67
0.01	0.13	0.01	41.42	0.22	11.42
5.46	0.19	5.46	189.00	0.13	-11.00
18.88	0.25	-11.12	194.36	0.18	-5.64
24.41	0.19	-5.59	199.95	0.24	-0.05
30.05	0.15	0.05	205.60	0.15	5.60

表 4 相角计算结果及误差分析
(计算基频为实时频率)

Tab.4 Results of phase angle calculation and its error analysis(f is real-time frequency)

计算值	标准差	测量误差	计算值	标准差	测量误差
-0.22	0.25	-0.22	29.47	0.49	-0.54
-0.04	0.40	-0.04	29.18	0.50	-0.82
0.47	0.43	0.47	200.81	0.41	0.81
28.91	0.53	-1.09	200.49	0.62	0.49
29.61	0.41	-0.39	200.14	0.47	0.14
29.98	0.54	-0.02	200.32	0.42	0.32

当频率误差为 1 Hz 时相角计算误差超过 10°, 而基于实时频率的相角计算测量误差基本不超过 1°, 明显低于基于固定频率的计算误差。进一步分析实测频率的测量误差与基于实时频率的相角计算误差可以发现相角的测量误差与实测频率的误差成正相关性。

图 4 给出了一个基于模糊聚类的工频信号频率实测的实例。图 4(a) 的模拟信号基波频率为 51 Hz, 幅值为 1 V, 3 次谐波含量为 5%, 噪声含量为 10%, 采样率为每秒采样 10^5 个点, 采样时长为 200 ms。按

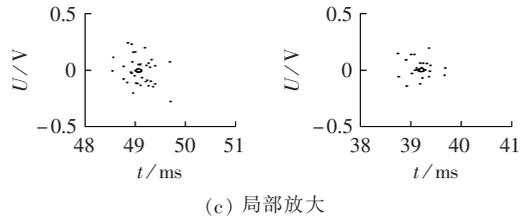
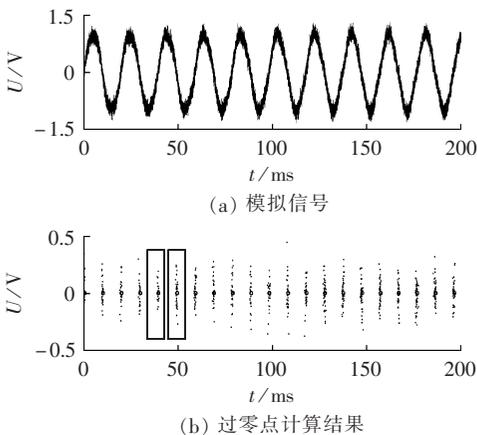


图 4 工频信号模拟及其过零点计算实例

Fig.4 Example of power frequency signal simulation and its zero-crossing point calculation

照过零点的遴选方法甄别出的疑似过零点如图 4 (b) 中黑色小点所示, 由图可知其以点群的形式分布, 每个点群的聚类中心即计算出来的过零点为每个点群中标示的小圆圈。图 4(c) 放大显示了第 5、6 个点群(即方框中的点群)的分布特征及其聚类中心所在时间轴的位置。以图 4 所示的过零点时间差求出的工频信号频率为 51.10 Hz。

5 局放检测应用

通过信号发生器产生初始相位为 90° 的 50 Hz 正弦信号模拟工频信号, 同时信号发生器输出与正弦信号同步的 TTL 信号。该 TTL 电平信号其上升沿时间与下降沿时间小于 1 ns, 对应信号发生器所产生正弦信号的相位角分别为 90° 与 270°。该 TTL 电平信号连接至射频天线用于模拟局放辐射的 UHF 信号。实验室用图 1 所示系统, 采用 NI-5154 高速数字化仪与 NI-6133 多路低速同步采集卡采集所模拟的局放超高频脉冲及模拟工频信号, 每秒分别采样 2×10^6 个点和 10^5 个点。为简单起见, 系统设定每捕捉 100 个局放脉冲触发一次工频信号采集。图 5 为图 1 所示系统, 采用本文所述局放脉冲序列相角计算方法所测试的模拟局放的 PRPD 图谱。图中放电脉冲相位集中在 90° 与 270°, 该测量结果充分验证了本文所述局放脉冲相位角计算方法的有效性与准确性。

图 6 为本文相位角计算方法在局放现场检测中

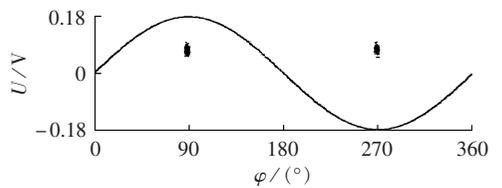


图 5 模拟局放 PRPD 图谱

Fig.5 PRPD pattern of simulated PD

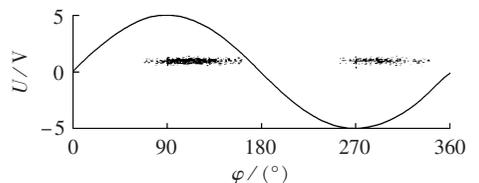


图 6 局放现场检测 PRPD 图谱

Fig.6 PRPD pattern of field tested PD

的应用实例。检测放电类型为悬浮电位放电,局放信号通过 UHF 传感器耦合,工频信号通过变电站站用电引入。所测 PRPD 图谱的相位分布正负周期基本对称,相位相差 180° ;整体有一定的偏移,这是站用电与局放缺陷所受电压存在相位差所致,可以校准。该应用结果显示了本文所述局放脉冲相位角计算方法在局放现场检测中的有效性。

6 结语

本文提出了分段采集局放脉冲片断的局放 UHF 检测方式,并且提出了该模式下的一种局放 UHF 脉冲相角计算方法。该方法使用局放脉冲本身同步触发工频信号采集,在计算电网实时频率基础上,基于傅里叶级数算法,通过计算所采集工频信号的初始相位角来标定触发局放脉冲的相角。

本文提出了基于模糊聚类算法的工频信号实时频率计算方法。该方法将所筛选过零点的聚类中心标定为工频信号过零点,利用相继上升沿过零点的时差来计算其信号周期,从而计算其实时频率。

基于仿真波形(包含大量谐波与噪声)的计算结果表明基于模糊聚类方法计算的工频信号实时频率绝对误差小于 0.05 Hz 。基于实时频率,应用傅里叶级数算法计算的工频信号初始相角误差小于 1° ,满足局放脉冲相位角计算误差小于 5° 的要求。

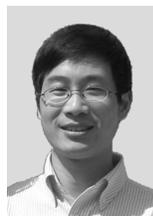
实验室模拟局放图谱与变电站局放现场检测结果验证了本文方法计算局放脉冲相位角的准确性、有效性和实用性。

参考文献:

- [1] 刘君华,姚明,黄成军,等.采用声电联合合法的 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.
- [2] 王国利,郝艳捧,刘果果,等.电力变压器超高频局部放电测量系统[J].高电压技术,2001,27(4):65-67.
WANG Guoli, HAO Yanpeng, LIU Weiguo, et al. Ultra High Frequency(UHF) PD measuring system for power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 65-67.
- [3] 常文治,唐志国,李成榕,等.变压器局部放电超宽带射频定位技术的试验分析[J].高电压技术,2010,36(8):1981-1988.
CHANG Wenzhi, TANG Zhiguo, LI Chengrong, et al. Experimental analysis on partial discharge location in power transformers using UWB RF method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1981-1988.
- [4] 魏钢,唐炬,文习山,等.局部放电信号在交联聚乙烯高压电力电缆中的衰变及其检测[J].高电压技术,2011,37(6):1377-1383.
WEI Gang, TANG Ju, WEN Xishan, et al. Decay and detection of partial discharge signals in high-voltage cross-linked polyethylene power cable[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1377-1383.
- [5] 肖燕,郁惟楠. GIS 中局部放电在线监测研究的现状与展望[J].高电压技术,2005,31(1):47-49.

- XIAO Yan, YU Weiyong. Present status and prospect of research of on-line partial discharge monitoring system in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 47-49.
- [6] Cigré Working Group. D1-11 Knowledge rules of partial discharge diagnosis in service[S]. [S.l.]: Cigré Working Group, 2003.
 - [7] Cigré Working Group. D1-33 Guide for electrical partial discharge measurements in compliance to IEC60270[S]. [S.l.]: Cigré Working Group, 2003.
 - [8] AMIR A A. Discrimination between PD pulse shapes using different neural network paradigms[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1119-1131.
 - [9] 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 characteristic analysis of partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 15-17.
 - [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T7354—2003 局部放电测量[S].北京:中国标准出版社,2003.
 - [11] 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.
 - [12] 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.
 - [13] 李信. GIS 局部放电特高频检测技术的研究[D].北京:华北电力大学,2005.
LI Xin. Research on UHF detection for partial discharge in GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
 - [14] 王又佳,段大鹏,江秀臣,等.基于 Fourier 级数的相位差算法在 MOA 检测中的应用[J].高压电器,2009,45(4):142-145,149.
WANG Youjia, DUAN Dapeng, JIANG Xiuchen, et al. An algorithm of phase difference measurement based on Fourier series with application in detection of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 142-145, 149.
 - [15] 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.
 - [16] NOCK R, NIELSEN F. On weighting clustering[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1-13.
 - [17] CHIU S. Fuzzy model identification based on cluster estimation[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 1994, 2(3): 267-278.

作者简介:



胡岳

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和局部放电检测系统评估方面的研究工作(E-mail: yuehu@sju.edu.cn);

司良奇(1988-),河南内黄人,女,硕士研究生,主要从事电力设备在线检测与故障诊断方面的研究工作(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、状态检修和自动化方面的研究(E-mail: xcjiang@sju.edu.cn)。

(下转第 93 页 continued on page 93)

- China Electrotechnical Society,2010,25(1):167-171.
- [22] 阚加荣. 单相逆变器无互联线并联控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- KAN Jiarong. Research on the parallel single-phase inverters without control interconnection[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2007.
- [23] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of PhotoVoltaic(PV) systems[S]. New York,USA:The Institute of Electrical and Electronics Engineers,Inc,2000.
- [24] 吴志,顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):57-61.

WU Zhi, GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):57-61.

作者简介:

阚加荣(1979-),男,江苏盐城人,讲师,硕士,研究方向为逆变器控制策略(E-mail:kanjr@163.com);

谢少军(1968-),男,湖北天门人,教授,博士研究生导师,从事功率电子变换技术和航空电源系统的研究;

过亮(1983-),男,江苏无锡人,硕士,研究方向为逆变器并网和风力发电控制技术。

Unified control strategy of multiple grid-connected inverters for grid-connected/parallel operation

KAN Jiarong¹, XIE Shaojun², GUO Liang³

(1. Electrical Engineering College, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Nanjing Automation Research Institute/NARI Group Corp., Nanjing 210003, China)

Abstract: The multiple grid-connected inverter system is analyzed and its equivalent circuit is obtained. It is deduced that, the output active power and output reactive power of grid-connected inverter can be regulated by adjusting the phase and amplitude of its output voltage respectively, based on which, a unified control strategy is proposed for its grid-connected and parallel operating modes, which applies the active power loop and reactive power loop to respectively regulate the frequency and amplitude of inverter output voltage. The system operating procedure is given and its inherent anti-islanding ability is analyzed. The simulative and experimental results show that the inverter system with the proposed unified control strategy has better control effectiveness in either grid-connected or parallel operating mode, which allows the smooth transition between two operating modes.

Key words: grid-connection; parallel mode; electric inverters; indirect current control; active power; reactive power; unified control; anti-islanding

(上接第74页 continued from page 74)

Segmental acquisition of partial discharge UHF pulses and its phase angle calculation

HU Yue¹, SI Liangqi¹, ZHANG Weidong², QIAN Yong¹, SHENG Gehao¹, 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: As the cost of partial discharge detection by continuous sampling is high, a method by segmental acquisition is proposed, which uses the partial discharge pulse to simultaneously trigger the power frequency signal while applies both high- and low-speed systems to acquire the UHF(Ultra High Frequency) pulse signal of partial discharge and the power frequency signal respectively. The fuzzy clustering method is applied to calculate the real-time fundamental power frequency and the Fourier series algorithm is applied to calculate the initial phase angle of power frequency signal, which is taken as the phase angle of partial discharge pulse. The phase angle of the whole partial discharge chain is then calculated with the phase angle and time interval of partial discharge pulse and the fundamental power frequency. Results of simulation and field test show the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words: insulation; partial discharge; ultra high frequency; Fourier series; fuzzy clustering; trigger circuits; computer simulation; clustering algorithms; sampling