

灭弧室真空度测量新方法实验研究

顾保华¹, 赵子玉¹, 江秀臣¹, 王建伯¹, 刘崇方², 周海³

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 广东必达电器有限公司, 广东 顺德 528308; 3. 河南新乡供电公司, 河南 新乡 430002)

Experimental Study on the New Measurements of Vacuum Degree in Vacuum Interrupters

GU Bao-hua¹, ZHAO Zi-yu¹, JIANG Xiu-chen¹, WANG Jian-bo¹, LIU Chong-fang², ZHOU Hai³

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Guangdong Bida Electric Co. Ltd., Shunde 528308, China; 3. Henan Xinxiang Power Supply Co., Xinxiang 430002, China)

摘要: 笔者在实验室对真空开关灭弧室真空度停电测量新方法“发射电流衰减法”和在线检测新方法“屏蔽罩磁控放电法”进行了实验研究。结果表明: ①在将真空开关的真空间隙调整为 0.8 mm 的小间隙以后, 不需要施加磁场, 使用发射电流衰减法可以停电测量灭弧室内的真空度; ②研制出具有良好内外绝缘的励磁线圈以后, 使用磁控放电法能以 6×10^{-2} Pa 的灵敏度在线检测真空开关真空度。

关键词: 灭弧室; 真空度; 测量

中图分类号: TM561.2

文献标志码: A

Abstract: Two new methods were researched experimentally for on-site and on-line measurement of vacuum degree in vacuum interrupters. The experimental results show that:

① the emission current decay method can be used to determine vacuum degree on-site without imposing magnetic field while the vacuum gap distance is adjusted to 0.8 mm;

② the magnetron method can be adopted to sensitively detect the vacuum degree on-line in 6×10^{-2} Pa if an excitation coil with favorable insulation structure is available.

Key words vacuum interrupters vacuum degree measurement

0 引言

笔者所述的灭弧室真空度测量新方法包括停电测量和在线检测。

(1) 停电测量

当前常用的真空度停电测试方法是工频耐压法和磁控放电法。当真空间隙耐压大于 42 kV 时, 灭弧室内的真空压强 $P < 1$ Pa, 所以说, 工频耐压法的测量灵敏度在 1 Pa 左右。真空开关真空度的合格标准为 $P < 6 \times 10^{-2}$ Pa, 故工频耐压法的测量灵敏度较低。在用常规磁控放电法测试灭弧室的真空度时, 需从断路器上卸下灭弧室, 并置于螺线管线圈内。

目前, 国内进行不拆卸测量的励磁线圈主要有侧靠式^[1]、排线插接式、两半组合式^[2]、和瓦状^[3]线圈。对于侧靠式线圈来说, 线圈产生的轴向磁场不很均匀, 使测量数据分散性变大; 对于排线插接式线圈来说, 线圈产生的轴向磁场均匀性好, 但强度较弱, 若增大插接式线圈的电流, 可提高其轴向磁场, 但大电流时插接件易烧坏; 对于两半组合式线圈来说, 可以较准确地测试 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa 的灭弧室, 但由于某些真空开关的无障碍空间较小, 套装不上两半组合式线圈, 这就使其适用范围受到限制, 改用瓦状线圈时可使其适用范围变宽。虽然这些磁控放电不拆卸测量的精度较高, 但是对于现在的紧凑型变电站, 为了减少相间距, 真空开关灭弧室通常是绝缘全封闭的, 励磁线圈无法靠近。所以必须寻求一种无需施加磁场的高精度真空度测量新方法。笔者所述的“发射电流衰减法”不用励磁线圈, 它是通过较小真空间隙(如 0.8 mm)之间流过的工频发射电流随时间衰减的快慢来估算真空度, 真空压强越高, 发射电流衰减的越快。

(2) 在线检测

现在国内外常用的真空度在线监测方法主要有屏蔽罩电位法^[4]、微型冷阴极磁控计法^[5]、自闭力法^[6]、放电声发射检测法^[7]、局部放电法^[8, 9]等。

微型冷阴极磁控计法是把微型计管焊在开关管的一根导电杆上, 使计管空间与开关管空间连通, 冷阴极计测出的压强值即为开关管内的压强值。改进方法是励磁使用永磁, 利用系统高压并从一端接地的高压离子柱上取样。该方法灵敏度较高, 但是需要改造真空灭弧室。

自闭力法是利用波纹管 and 弹簧压力平衡的原理, 使真空压力的变化影响自闭力的变化, 通过外接

收稿日期: 2007-05-27; 修回日期: 2007-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50377024)。

作者简介: 顾保华(1973-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统安全生产管理。

波纹管、定簧板、平衡簧、改进的千分表来检测真空管的自闭力,从而实现真空度的在线检测。其不足之处是需要改动断路器的部分结构。

在灭弧室真空度下降到一定水平时,触头与屏蔽罩之间会发生击穿,从而产生电和声信号。电信号是局部放电脉冲,声信号是可闻声波或超声波。通过测定视在放电量或声发射波大小来检测真空度。局部放电法或放电声发射检测法的缺点是检测灵敏度较低。

对于绝缘全封闭真空灭弧室,不拆卸测量真空度时励磁线圈无法靠近。如果在真空开关生产过程中,就在灭弧室外套上装上励磁线圈,并解决好绝缘问题,就可以应用触头与屏蔽罩之间的磁控放电法实现真空开关真空度的在线监测了。因此,笔者在实验室开展了真空度在线检测新方法-屏蔽罩磁控放电法的实验研究。它是利用屏蔽罩交流电位法连续地监测灭弧室的真空度,其测量灵敏度为几个帕,使用屏蔽罩与触头间的磁控放电法间断地在线测量灭弧室的真空度(如每隔几小时测量一次),其测量灵敏度为 6×10^{-2} Pa。研制出的具有良好内外绝缘的 10 kV 真空开关真空度测量用励磁线圈,能够承受 75 kV 冲击耐压和 42 kV 的 1 min 工频耐压。还研制了一套计算机分布式真空度在线监测系统,它可以以较高的灵敏度实现变电站真空开关真空度的在线监测。

1 测量原理

1.1 停电测量新方法-发射电流衰减法原理

真空灭弧室内真空度使用真空压强 P 来表示,真空度越高,真空压强 P 越低,即真空灭弧室内残留的气体分子浓度越小。真空灭弧室的内表面包括触头表面都要吸附气体分子而形成气体分子层,在高电场作用下,触头电极内的电子会被‘拉’出到电极外面,形成场致发射电流,因为此时触头表面的温度为常温,故场致发射也称为冷电子发射。

经典的福勒-诺尔海姆(Fowler-nordheim)场致发射电流公式见式(1)。

$$j_e/S = A \cdot (E)^2 \exp(-\frac{B\phi^{3/2}}{E}) \quad (1)$$

式(1)中 j_e 为发射电流;S 为发射面积;E(=U/d, U 为极间电压, d 为极间距离)为极间电场; ϕ 为电场增强系数; ϕ 为触头材料逸出功函数, A、B 可认为是常数。

由式(1)可见,场致发射电流不仅与 E 有关外,还与 ϕ 有关。当 E 恒定时,增大触头材料的逸出功函数 ϕ 会引起发射电流 j_e 下降。

触头表面单位面积吸附量 ϕ_1 与逸出功函数 ϕ 之间有简单的线性关系

$$\phi = C + \phi_0 \quad (2)$$

式(2)中 ϕ 为表面有吸附分子时的功函数; ϕ_0 为 $\phi = \phi_0$ 时的功函数; C 为常数。

触头表面的吸附层有两个来源: ① 残留气体分子的布朗运动使分子碰撞触头表面, 获得吸附量为 ϕ_0 的表面; ② 离子捕集, 其过程为: 在真空间隙上施加一定的工频电压后, 间隙之间会流过场致发射电流 j_e 。当场致发射电流 j_e 较小(<35 μ A) 时, j_e 中的电子与残余气体分子发生碰撞, 产生离子, 离子在电场作用下移动形成离子流, 离子流撞击触头表面, 被表面捕获, 会导致吸附量由 ϕ_0 增加到 ϕ_1 。

当 j_e 较大 (>500 μ A) 时, 场致发射电流中的电子轰击触头表面, 吸附分子被电子轰击而脱附, 导致吸附量由 ϕ_1 减少到 ϕ_0 。

笔者利用吸附量的变化即发射电流的变化测量真空度。首先使用较大的 j_e , 利用其产生的电子轰击脱附作用, 使吸附量由 ϕ_1 减少到 ϕ_0 , 然后再使用较小的 j_e , 利用其产生的离子捕集作用, 使吸附量由 ϕ_0 增加到 ϕ_1 。

真空压强 P 越大, 吸附量的增加速度越快, 而吸附量的增加将导致触头材料功函数的增加, 功函数的增加又引起场致发射电流 j_e 的衰减。通过理论推导^[10]可以获得

$$t \cdot P = k_2/d \quad (3)$$

式(3)中 P 为真空压强, Pa; t 为发射电流衰减时间, s; k_1 、 k_2 为分别常数, $0 < \lambda < 1$; d 为极间距离, mm。

由式(3)可见,真空压强 P 不同,发射电流的衰减速度(= j_e/t , 其中 j_e 为衰减量, t 为衰减时间)就不同,故在 j_e 一定时,通过检测发射电流的衰减时间 t 就可以测量灭弧室内的真空度。

1.2 在线检测新方法-屏蔽罩磁控放电法原理

可利用屏蔽罩磁控放电法在线检测灭弧室真空度,见图 1。使用一套真空度在线检测装置,同时实现: ① 连续检测严重劣化的灭弧室的真空度; ② 间断地在线测量灭弧室的真空度。

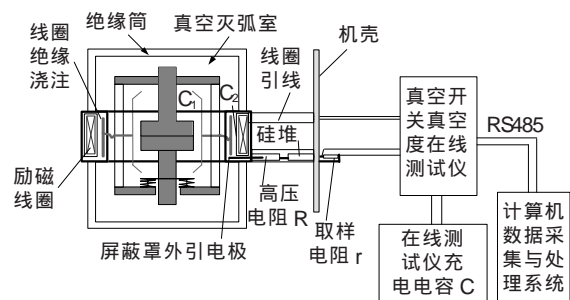


图 1 使用磁控放电进行真空开关真空度在线检测

(1) 连续检测严重劣化的真空灭弧室

真空开关在运行状态下, 闭合的触头所带工频交流高压为 U, 在灭弧室真空压强 $P < 1$ Pa 时, 当屏蔽罩外引电极接入高压电阻 R 和硅堆后, 其屏蔽罩电位被拉低到接近地电位。当灭弧室内真空压强 $P =$

1~10³ Pa时,触头导杆与屏蔽罩之间发生放电,屏蔽罩电位被拉高到接近触头电位U,故通过测量屏蔽罩电位就可以检出严重劣化的真空灭弧室。

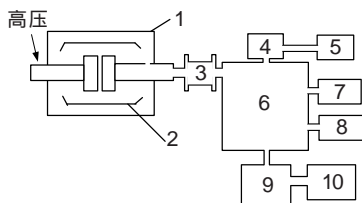
(2)在线检测真空压强 P=10⁻⁴~1 Pa的真空灭弧室

测量原理为:真空灭弧室位于螺线管励磁线圈中心,真空开关在运行状态下,当线圈中通入10ms以上的脉冲电流时,在真空灭弧室内部将产生一个纵向脉冲磁场。屏蔽罩电位由C₁(导电杆、触头与屏蔽罩之间的分布电容)和C₂(屏蔽罩外引电极与励磁线圈之间的电容)、R+r(R为高压电阻,r为取样电阻)的分压决定。在触头导杆与屏蔽罩间会产生工频交流电场,由于所建立的交流电场在触头附近几乎与脉冲磁场垂直相交,使存在于真空灭弧室内的少量自由电子在向阳极的运动途径中,沿电极作螺旋运动,这就显著地增加了电子运动的路径以及与残余气体分子的碰撞概率,这样,当在内部压强P=10⁻⁴~1 Pa时,在真空灭弧室内部就有一个稳定的与脉冲磁场同步的汤逊放电,该放电电流会流过与屏蔽罩相连的高压电阻,由硅堆整流、取样电阻取样后获得半个工频周期的离子电流。该离子电流的大小与真空灭弧室内部压强近似成正比,故可以根据离子电流的大小来在线测量灭弧室的真空度。

2 实验装置、测量电路及实验结果

2.1 停电测量实验装置、测量电路及实验结果

真空比对系统由真空池、机械泵、分子泵、进气微调阀、N₂气瓶、复合真空计和副标真空计组成,见图2。将灭弧室与真空比对系统相连接,通过改变真空比对系统的真空压强来改变灭弧室内的真空压强,可获得真空灭弧室内10⁻⁵~1 Pa的真空度。



1—灭弧室 2—屏蔽罩 3—真空绝缘管 4—进气微调阀门 5—氮气瓶 6—真空池 7—复合真空计 8—副标真空计 9—机械泵 10—分子泵

图2 与真空灭弧室相连的真空比对系统

实验中使用了0.4、0.8 mm的真空间隙。在真空间隙上施加工频电压,通过C₁支路进行容性电流的补偿,见图3。C₂代表真空灭弧室,依据真空间隙大小的不同,其电容在15~几十pF;r₁=r₂=1 kΩ为取样电阻;R_{lim}=3.3 MΩ为限流电阻;R₁=R₂=800 kΩ为保护电阻;TVS₁、TVS₂为快速恢复二极管,是用来保护示波器的。

通过调压器和升压器对C₂和C₁两条支路施加

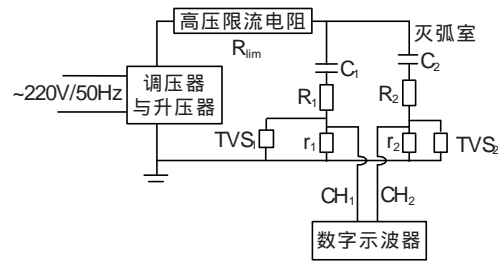


图3 发射电流测量电路

工频电压U,发射电流由C₂和C₁两条支路的差动获得,即从r₂、r₁两端用数字示波器采样两个通道的信号CH₂、CH₁,然后取其差分信号CH₂-CH₁作为发射电流。当施加的交流电压U=U_i时,真空间隙间将出现一个几微安的可测发射电流,U_i称为发射电流起始电压。通过以下方法测得发射电流:首先在真空间隙上施加较低的电压,即施加电压U<U_i,此时发射电流应为零,故通过调节C₁的大小可使CH₂-CH₁为零,当CH₂-CH₁=0时,就完全补偿掉了容性电流。然后,再升高电压使U>U_i,此时CH₂-CH₁的输出就是发射电流j_e。这是因为:CH₂通道的容性电流i₂由j_e和i_{c2}两部分组成,即i₂=j_e+i_{c2},而CH₁通道的电流i₁仅有一个容性电流成分i_{c1},即i₁=i_{c1}。当U<U_i时,j_e=0,i₂=i_{c2},i₁=i_{c1},通过调节C₁、C₁或C₂,就可以使CH₂-CH₁=i₂-i₁=i_{c2}-i_{c1}=0。当U>U_i时,j_e≠0,i₂=j_e+i_{c2},i₁=i_{c1},所以此时的CH₂-CH₁=i₂-i₁=j_e+i_{c2}-i_{c1}=j_e+0=j_e。

实验表明,发射电流正负极性的波形有时是对称的,有时是不对称的。波形不对称表示两触头的吸附量有差异,此时,发射电流的有效值近似为峰值除以2√2。

应用图2所示的真空比对系统改变灭弧室内的真空度,应用图3所示的电路测量发射电流,实验过程为:首先使d=0.8 mm,在动态真空压强P₀下,通过短时增高施加电压使发射电流大于500 μA从而除去分子吸附层,再降低施加电压使发射电流为35 μA有效值,然后测量发射电流从35 μA衰减到13 μA的衰减时间t₀,获得P-t曲线上的一个标定点(P₀, t₀);通过调节进气量得另一稳定气压值P₁,再除去吸附层,然后测量发射电流从35 μA有效值到13 μA的衰减时间t₁得另一标定点(P₁, t₁)。依此类推,就可获得真空灭弧室P-t曲线上的实验点,见图4中的。将d=0.8 mm和两个实验点(10⁻³ Pa, 10³ s)、(10⁻¹ Pa, 10² s)代入式(3)得k₁=0.5, k₂=25.3。同理可获d=0.4 mm时的实验点,见图4中的。可见当d固定时P与t成正比,当P不变时d与t成反比。

实验中使用的灭弧室为两只TD3462样管,触头材料为CuCr50,直径为90 mm。实验表明,对于同一型号的两只灭弧室,其P-t曲线差异较小。

实验发现,当d<1 mm时,发射电流的稳定性好;当d=1~2 mm时,发射电流稳定性逐渐变差。当

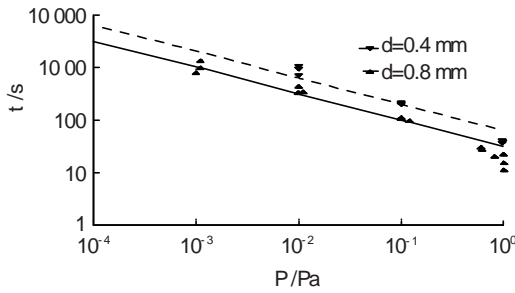


图 4 发射电流的衰减时间 t 与真空灭弧室真空压强 P 的关系

$d > 2 \text{ mm}$ 后, 随着 d 的增加, 发射电流逐渐演变成微放电。仅从稳定性方面考虑, d 应取小值, 但若 d 取的太小, 测量时间又过长, 故 d 取 0.8 mm 左右为佳。

在正常操作条件下真空开关只有“闭合”与“断开”两种状态。对于 10 kV 真空开关, 在触头“断开”后触头间隙为 10 mm 左右, 在触头“闭合”状态下, 触头超程为 $\approx 4 \text{ mm}$ 左右。真空开关两触头的压力和超程是由压力弹簧提供的, 在“闭合”状态下, 若真空开关的触头超程为 δ , 在不拆卸灭弧室、不改变机械参数的条件下拉紧该压力弹簧 $+0.8 \text{ mm}$ 就可以获取 0.8 mm 的真空间隙。对该实验中使用的 ZN22B-12/T1250-31.5 型户内高压真空断路器, 其超程 $\approx 4.1 \text{ mm}$, 使用一自制的拉伸器将压力弹簧拉紧 $4.1 \text{ mm} + 0.8 \text{ mm}$ 后即获取了 0.8 mm 的真空间隙。在测量发射电流前, 可以固定补偿电容 C_1 , 通过调节触头间隙 d 及改变灭弧室电容 C_2 来补偿灭弧室的容性电流。如: 触头半径为 45 mm , 固定 $C_1 = 8.85 \times 10^{-12} \times \pi \times 0.045^2 / 0.0008 = 31 \text{ pF}$, 当真空间隙 d 调到 0.8 mm 后, $C_1 = C_2$, 此时, 容性电流就被完全补偿掉。

2.2 在线检测实验装置、测量电路及实验结果

图 1 中的励磁线圈在采用一定的屏蔽措施和环氧浇注后, 可以承受 42 kV 工频电压和 75 kV 冲击电压。其设计参数为: 匝数 $N = 250$, 长度 $2b = 0.06 \text{ m}$, 内径 $a_1 = 0.065 \text{ m}$, 外径 $a_2 = 0.07 \text{ m}$, 平均直径 $D = a_1 + a_2 = 0.135$, 形状系数 $u = (a_2 - a_1) / D = 0.037$, $v = 2b / D = 0.444$, 励磁线圈电感由公式 $L = (\mu_0 / 4\pi) N^2 D T(u, v)$ 计算^[11], 查表可得

$T(u, v) = T(0.444, 0.037) = 10.5$, 故 $L = 4 \times 10^{-7} / 4 \times 250^2 \times 0.135 \times 10.5 = 8.8 \text{ mH}$ 。L 的实测值为 8.9 mH , 与计算值基本一致。

储能电容 $C = 1650 \mu\text{F}$, 该电容充电到 $U = 1700 \text{ V}$ 时, 经过硅堆对励磁线圈放电, 放电前半周参数按无阻尼的二阶电路估算, 故励磁电流脉宽

$$T = (LC)^{1/2} = 12 \text{ ms}$$

电容 C 上的电荷 $C U$ 在 $(T/2)$ 时间内放完, 其平均放电电流为 $C U / (T/2)$, 故励磁电流峰值

$$I = (\pi/2) C U / (T/2) =$$

$$(3.14/0.012) \times 0.00165 \times 1700 = 734 \text{ A}$$

励磁线圈中心点磁场为^[11]

$$B = K(\mu_0/4\pi) \mu_0 J \ln \left\{ \left[1 + \left(\frac{2a_2}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} / \left[1 + \left(\frac{2a_1}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

其中 $\mu_0/4\pi = 0.07/0.065 = 1.077$; $\mu_0/a_1 = 0.03/0.065 = 0.462$, 查表可得: $K(\mu_0/4\pi, \mu_0/a_1) = K(1.077, 0.462) = 1.7$; 电流密度 $J = NI / [2b(a_2 - a_1)] = 250 \times 734 / (0.06 \times 0.005) = 6.12 \times 10^8 \text{ A/m}^2$, 故 $B = 1.7 \times 1.077 \times 10^{-7} \times 0.003 \times 6.12 \times 10^8 \times 0.06776 = 0.27 \text{ T}$ 。

实验发现, C 上的充电电压 U 越高, 磁场越强, 磁控放电的点火越可靠。该实验中当 U 从 1700 V 降低到 700 V , 即 B 从 0.27 T 降低到 0.11 T 时, 点火开始不可靠。实验表明, 真空压强 $P = 1 \text{ Pa}$ 左右时, 离子电流峰值可以由 $i = 1.414U/R$ 估算, 实验中 $U = 7 \text{ kV}$, R 为 3.3 M 时, $i = 3000 \mu\text{A}$ 。测试时施加脉冲磁场的时刻是随机的, 而离子电流与施加的工频电压 U 是同相位的, 故每次测得的离子电流相位是随机的。图 5(a)、(b) 为不同真空压强 P 下, 实测离子电流典型波形。

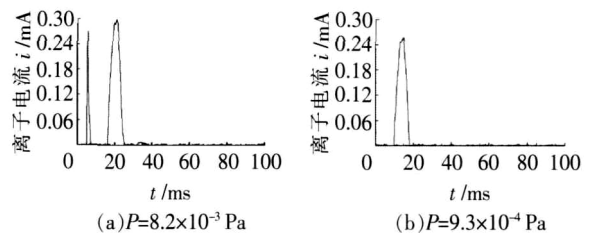


图 5 屏蔽罩磁控放电法采集到的离子电流波形

图 6 是实测离子电流与真空度的关系曲线。由图 6 可见, 当离子电流峰值大于 $2000 \mu\text{A}$ 时, 真空压强 $P > 6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 故通过检测离子电流就可判定灭弧室真空度是否合格。

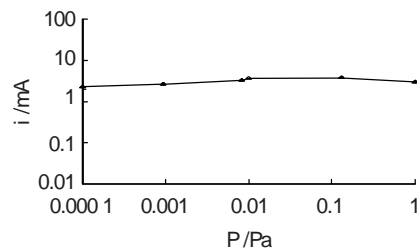


图 6 屏蔽罩磁控放电法离子电流与真空度关系曲线

应用屏蔽罩磁控放电法, 研制了真空开关真空度在线检测系统。使用一台主机对各台真空开关的真空度测量仪进行控制, 计算机采用主控方式, 单片机采用中断方式。通信采用带光电隔离的 RS485, 这样, 一台计算机可以与多台真空度测量仪进行通信, 通信距离 1.2 km 。在线监测过程为: 真空开关真空度在线测试仪连续监测屏蔽罩电位的变化, 由计算机循环地给各台真空开关测试仪发送磁控放电测试指令, 各台测试仪接收到指令后进行测试, 然后将测量结果传送给计算机。

3 结论

笔者对提出的真空开关真空度停电与在线检测新方法进行了实验研究, 结果表明: (下转第 408 页)

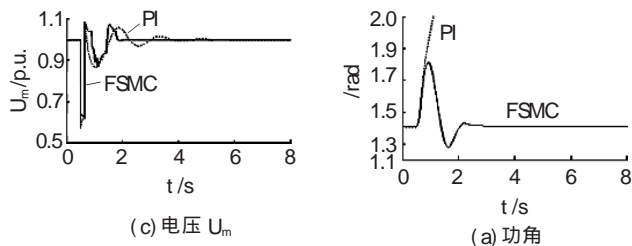


图 7 暂态响应曲线($\alpha=57^\circ$)

制器能使系统的动态品质优于常规 PI 控制的动态品质,同时增加了系统阻尼,并在维持节点电压上有更快的响应速度和更平稳的调节过程。图 8 表明,在大功角、大扰动情况下,STATCOM 模糊控制器较常规 PI 控制器能更有效地提高系统的暂态稳定极限、维持节点电压稳定。

4 结语

应用模糊滑模控制理论,设计了以同时改善系统功角特性和节点电压动态特性为目标的 STATCOM 模糊滑模控制器。该控制器综合了滑模变结构控制和模糊控制二者的优点,改善了动态特性,抑制了“抖振”,增强了鲁棒性,同时结合经典控制方法,提高了系统的稳态性能。仿真实验结果验证了 FSMC 控制器在提高电力系统稳定性上的正确有效性。

参考文献:

[1] PADIYAR K R, PRABHU N. Design and Performance Evaluation of Subsynchronous Damping Controller with STATCOM[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(3): 1398-1405.

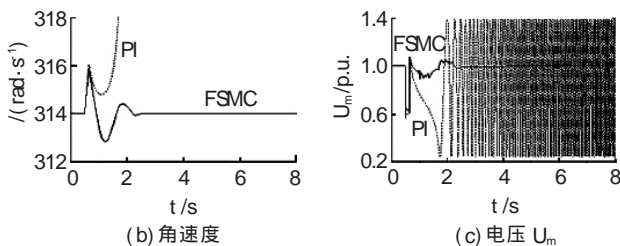


图 8 暂态响应曲线($\alpha=75^\circ$)

[2] EL-MOURSI M S, SHARAF A M. Novel Controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(4): 1985-1997.

[3] DONG SHEN, LEHN P W. Modeling, Analysis, and Control of a Current Source Inverter-based STATCOM[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 248-253.

[4] RAO P, CROW M L, YANG Z. Statcom Control for Power System Voltage Control Applications[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(4): 1311-1317.

[5] YANG Z, SHEN C, ZHANG L, et al. Integration of a STATCOM and Battery Energy Storage [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(2): 254-260.

[6] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[7] KAZEMI A, SOHRFOROUZANI M V. Power System Damping Using Fuzzy Controlled FACTS Devices [C]// International Conference on PowerCon, 2004: 21-24.

[8] SCHAUDER C, GERNHARDT M, STACEY E, et al. Operation of ± 100 MVAR TVA STATCON[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1805-1811.

[9] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.

[10] KUMKRATUG P, HAQUE M H. Versatile Model of a Unified Power Flow Controller in a Simple Power System[J]. IEE Proc., Gener. Transm. Distrib., 2003, 150(2): 155-161.

(上接第 404 页)

(1) 在将真空开关的真空间隙调整为小间隙(如 0.8 mm)以后,使用发射电流衰减法,不需要施加磁场,通过停电测量发射电流的衰减情况可以测得灭弧室内的真空度。

(2) 研制具有良好内外绝缘的励磁线圈以后,使用磁控放电法能以 6×10^{-2} Pa 的灵敏度在线检测真空开关真空度。

参考文献:

[1] 赵子玉, 邹积岩, 何俊佳, 等. 真空灭弧室真空度现场测试技术研究[J]. 高压电器, 1999, 35(2): 10-12, 16.

[2] 赵子玉, 陈 雾, 李兆治, 等. 不拆卸灭弧室测量真空度的技术研究[J]. 电工技术杂志, 2003(8): 32-35.

[3] 李 曼, 赵子玉. 真空灭弧室内部气体压力测试仪励磁线圈磁场计算[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 439-441, 445.

[4] 邹积岩, 何俊佳, 程礼椿. 真空灭弧室的真空度测试与在线监测[J]. 高压电器, 1993, 29(5): 13-17.

[5] 旭光股份. 10 kV 真空开关在线监测装置简介[Z]. 成都旭光电子股份有限公司产品简介, 2005.

[6] 严金城, 邱一新, 赵学文. 真空开关真空度在线监测原理与应用[J]. 江苏电器, 2002(1): 36-38, 35.

[7] 舒乃秋, 王成江, 毛慧和, 等. 放电声发射法检测真空灭弧室内部气体压力的研究[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 43-48.

[8] KAMAROL M, OHTSUJKA S, SAITOU H, et al. Diagnosis of Vacuum Degree in Vacuum Interrupter Based on Partial Discharge [C]// 22nd Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum-matsue, 2006: 165-168.

[9] HITOSHI SAITOU, YOSHIHIKO MATSUI, MASAYUKI SAKAKI. Discharge Properties in Low Vacuum and Vacuum Monitoring Method for Vacuum Circuit Breakers[C]// 22nd Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum-matsue, 2006: 181-184.

[10] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣, 等. 一种测量真空开关灭弧室的真空度的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 144-149.

[11] 雷银照. 轴对称线圈磁场计算 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.