

基于三相电流法的金属氧化物 避雷器带电测量研究

赵 伟^{1,2}, 万德均¹, 岳建民³

(1. 东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096;
2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;
3. 南京伏安电力设备公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 分析了金属氧化物避雷器 MOA(Metal Oxide Arrester)带电测量时泄漏电流的特点, 提出带电测量时判断 MOA 早期故障的依据是阻性电流是否存在增量, 并指出带电测量的关键是正确测量阻性电流基波的变化。提出了一种三相电流法测量阻性电流, 并在理论分析的基础上, 研制了 MOA 带电测量装置。利用该装置进行了模拟阻性电流增大的实验, 结果表明, 三相电流法能够正确测量出阻性电流的增量, 可以方便地对 MOA 早期故障进行判断。

关键词: 三相电流法; 金属氧化物避雷器; 阻性电流; 带电测量

中图分类号: TM 862; TM 930.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)04-0006-05

0 引言

金属氧化物避雷器 MOA(Metal Oxide Arrester)以其优越的非线性特性, 在电力系统得到了广泛应用。MOA 中的氧化锌电阻片作为电力设备的过电压保护元件, 要直接长期耐受工频运行电压及各种过电压冲击, 事故损坏率较高。氧化锌避雷器性能变差的原因有两个^[1]: 一是避雷器结构密封不严致使内部受潮, 其特征量是系统正常运行电压下的阻性电流增大, 基波量增大更为明显; 二是氧化锌阀片长期承受工频电压而易于老化, 使其非线性特性变差, 其特征量也是系统正常运行电压下的阻性电流增大, 但高次谐波分量更为显著。无论出现上述何种情况, 结果都会引起阻性电流增大。因此, 检测 MOA 运行是否正常的正确确定泄漏电流中阻性电流基波和谐波是否出现增量, 即阻性电流出现增量。

由于氧化锌避雷器的非线性, 泄漏电流中的 3 次谐波 I_3 是一个特征量, 它敏感地反映避雷器的老化及故障。但 3 次谐波只能判断 MOA 的老化程度, 不能判断受潮, 这是采用谐波法测量的缺点。运行统计表明, MOA 事故主要是受潮引起的, 对于生产工艺已经成熟的电阻片, 由老化引起的损坏则相对少许多。3 次谐波电流的测量不需要电压参考量, 测量方便; 而基波的确定则需要电压参考, 一般采用引入 TV 二次侧电压的方法实现^[2], 但这种方法在测量时很不方便, 工作效率低, 而且还有可能对其他设备造成影响。因此, 在测定 MOA 泄漏电流阻性分量时的关键问题是能否方便地测出其基波分量。本文针对

这一问题进行了细致分析, 提出了一种简单实用的测量阻性电流的方法。

1 运行中的 MOA 泄漏电流分析

1.1 单相 MOA 泄漏电流分析

运行中的单相 MOA 小电流范围的简化等值电路如图 1 所示^[3,4]。在运行电压 U 作用下, 通过 MOA 的泄漏电流 I_X 由容性电流 I_C 及阻性电流 I_R 组成。它们的基波值向量图如图 2 所示^[3], 图中 I_{X1} 和 U_1 分别为泄漏电流和运行电压的基波(下同, 本文所述电压和电流若无特别说明均为基波), 若能测出基波 I_{X1} 及 U_1 与 I_{X1} 的夹角 α , 则阻性电流的基波值可由 $I_{R1} = I_{X1} \cos \alpha$ 计算得知。因此, 对于单相 MOA, 只要测出泄漏电流的峰值及夹角 α , MOA 的阻性电流基波峰值就可计算得到, 再叠加各次谐波峰值, 阻性电流峰值即可得知。

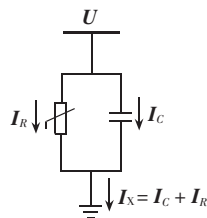


图 1 MOA 小电流下的等值电路
Fig.1 The equivalent circuit of MOA with small current

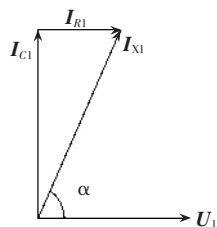


图 2 MOA 等值电路的基波向量图
Fig.2 The fundamental vectors of the equivalent circuit of MOA

1.2 两相 MOA 泄漏电流分析

实际运行中的两相 MOA 小电流范围的简化等值电路如图 3 所示, 它们的基波向量关系如图 4 所示。

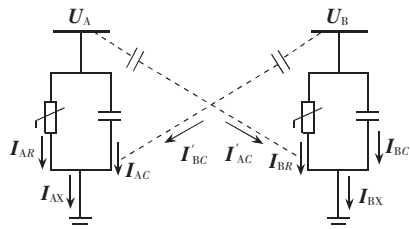


图 3 两相 MOA 小电流范围等值电路图
Fig.3 The equivalent circuit of two MOAs with small current at different phases

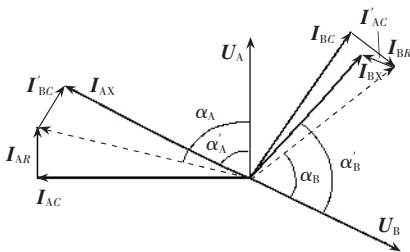


图 4 两相 MOA 电流电压基波值的向量关系
Fig.4 The fundamental vectors of two MOAs at different phases

从图 3 可以看出,运行中的两相 MOA 由于相间存在耦合电容,邻相电压通过耦合电容对另一相产生耦合电容电流,该容性电流为基波容性电流,因此使得泄漏电流基波 I_X 及夹角 α 都发生变化。超前相 A 相对 B 相的影响是使 B 相 I_{BX} 与电压夹角 α_B 向超前方向移动,即图 4 所示 $\alpha'_B > \alpha_B$ 。相反,滞后相 B 相对 A 相的影响是使夹角 α_A 减小,即 $\alpha'_A < \alpha_A$,如果仍用 $I'_{AR} = I_{AX} \cos \alpha'_A$ 和 $I'_{BR} = I_{BX} \cos \alpha'_B$ 计算 A 相和 B 相阻性电流基波峰值,则计算所得 I'_{AR} 偏大,而 I'_{BR} 偏小^[5]。

将运行中的两相 MOA 推广到运行中的三相 MOA,继而推广到运行中的三相 MOA 有一个或两个边相邻近有运行设备时。复杂的相间耦合电容使得采用测量 MOA 泄漏电流及其与电压夹角计算得到阻性电流的方法(简称 IU 法)多数情况下无法测出 MOA 阻性电流基波的真实值。因此,通过对带电状态测得的阻性电流判断 MOA 是否出现早期故障的方案是不可行的。

1.3 判断 MOA 早期故障的依据

测量 MOA 阻性电流最终目的是及时发现 MOA 早期故障。IU 法虽然在多数情况下无法测出 I_R 真实值,但采用该法能否发现 MOA 早期故障,关键在于能否测出阻性电流 I_R 的变化。

阻性电流 I_R 增大时的向量图如图 5 所示。由于有耦合电容电流 I'_C 的存在,实际带电测量得到的并不是阻性电流的真实值 I_R ,而是 I'_R 。但当真实值 I_R 增大到 $I_R + \Delta I_R$ 时,阻性电流真实值变化量为 ΔI_R 。实际测量时, I_X 由 I'_X 变为 I''_X , 夹角由 α' 变为 α'' , 其变化量也是 ΔI_R 。因此,在相同的干扰环境下,如果 I_R 增大,采用 IU 法可以得到 I_R 的变化值。所以,观察阻性电流在相同干扰条件下的变化值,是及时发

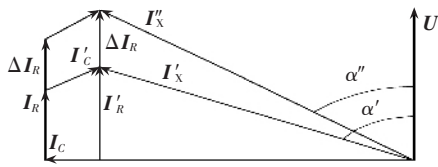


图 5 在相同干扰情况下测量 ΔI_R 的向量图
Fig.5 The vector diagram of ΔI_R measuring under same disturbance

现 MOA 早期故障的有效方法。采用 IU 法虽然可以在相同干扰条件下判断 I_R 的变化,但测量时必须从 TV 二次侧取得电压信号,操作很不方便。针对这种情况,本文提出了三相电流法,可以简易地实现这种方式。

2 三相泄漏电流相角比较法测量三相 MOA 阻性电流及其变化

从图 5 可以看出,随 I_R 的变化,除 I_X 幅值稍有变化外,最明显的变化是 α 角。此处 α 角指的是电流与电压的夹角,采用 IU 法测量时必须从 TV 二次侧取得电压信号才能得到该 α 角。其实 I_R 的变化也可以用三相 MOA 电流之间的夹角变化判断。图 6 表示了三相 MOA 泄漏电流基波之间的夹角关系。

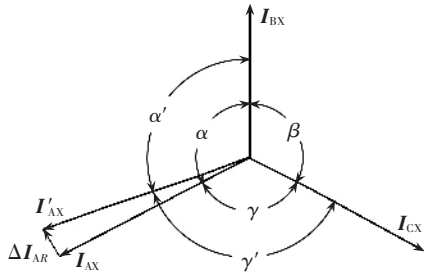


图 6 A 相异常时三相 MOA I_X 之间夹角关系
Fig.6 The angle relationships among three MOA current I_X s at different phases when phase A is abnormal

设三相正常时 I_{AX} 与 I_{BX} 之间夹角为 α , I_{BX} 与 I_{CX} 之间夹角为 β , I_{CX} 与 I_{AX} 之间夹角为 γ 。若其中某相,如 A 相阻性电流增大, I_{AX} 必然向滞后方向(顺时针)移动,与 A 相有关的 α 角减小为 α' , γ 角增大为 γ' ,与 A 相无关的角 β 仍然保持不变。因此,当了解清楚各种电压等级及 MOA 各种分布方式时正常的三相泄漏电流基波夹角关系,就可以将所测得的三相 MOA 的泄漏电流及其之间的夹角与正常的夹角进行比较,当超出正常范围,就可以根据夹角大小的变化,判断出三相 MOA 中的异常相。然后,对正常相采用正常的标定方法得到正常相的阻性电流值,异常相的阻性电流由异常相的标定方法标定。这就是本文提出的“三相 MOA 泄漏电流相角比较法”(简称 3 I 法,专利号 02264187.4),并依据该方法开发出 ZD-1 型 MOA 阻性电流带电测量仪。

2.1 基于三相电流法的阻性电流确定

在运行电压下,MOA 长期运行在伏安特性的小电流区,该区的非线性指数接近于 1,只有在发生过

电压或 MOA 特性变差时才工作在非线性指数小于 1 的大电流区^[6]。因此,在持续运行电压下,正常 MOA 的内部泄漏电流中以基波为主,其中阻性电流、容性电流和全电流的关系如图 7 所示(图中 1 为容性电流基波,2 为阻性电流基波,3 为全电流基波)。

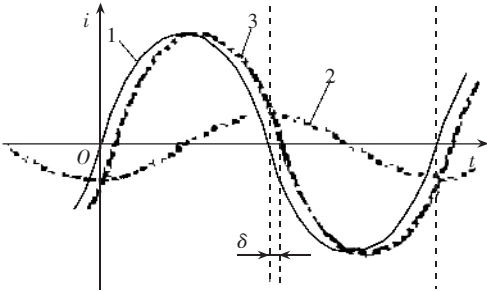


图 7 正常 MOA 阻性电流基波、容性电流和全电流之间的关系

Fig.7 The relationships among normal MOA fundamental resistive current, capacitive current and full current

由于曲线 1,2 之间在相位上相差 90°,因此全电流曲线 3 在相位上比容性电流 1 滞后 δ 。据此,将全电流基波的过零点位置向前移动 δ 即可得到容性电流过零点位置,该位置恰好是阻性电流的峰值点,据此可以得到正常相的 MOA 阻性电流基波峰值。对于异常相的阻性电流值可以按照下述方式得到:将相邻正常相的阻性电流峰值点的位置向前或向后(根据正常相和异常相的相位关系而定)移动 120°便可得到异常相的阻性电流基波峰值,再叠加各次谐波峰值,便可求得阻性电流峰值。

利用上述方法得到阻性电流的关键是正确确定 δ 值,该值可以对各种正常 MOA 进行大量实验统计获得。对于具体某一支 MOA 而言,统计出来的 δ 值会存在误差,但 δ 角位置对应的是阻性电流基波的峰值位置,而在峰值附近阻性电流的变化量很小,即使在角度上存在 1°~2° 的误差对测量结果的影响也很小;此外,该误差还可以简单等效为周围容性耦合带来的影响误差,并不影响阻性电流基波增量的测量,如图 5 所示。因此,采用该法得到的阻性电流的基波值虽然并不是非常准确,但非常接近于真实值,而且并不影响阻性电流基波增量的测量。故采用该法可以得到能准确反应阻性电流基波变化的合理的阻性电流基波测量值,再叠加各次谐波峰值,进而可以得到合理的阻性电流值。

2.2 存在干扰时阻性电流确定

实际上,运行中的 MOA 各相之间都存在容性耦合干扰,因此,利用 3 I 法在实际的测量过程中如不考虑邻相耦合干扰的影响会存在着较大的测量误差。这是由于电容耦合干扰电流均为邻相容性电流基波,会造成全电流基波的相位变化,进而引起电流电压之间的夹角 α 发生变化,影响阻性电流测量值。文献^[2]针对周围杂散电容对被测 MOA 的影响进行了大量实测和统计研究,并得出了有益结论,表 1 为以 B 相测量值为基准时一字形排列三相 MOA 阻性

表 1 三相 MOA 阻性电流偏差
Tab.1 The deviations of three MOA resistive currents at different phases

系统电压 / kV	阻性电流偏差 / %		
	A 相	B 相	C 相
110	+10	0	-10
220	+25	0	-25
500	+40	0	-40

电流在不同电压等级下的测量偏差统计结果。由于 AC 两相对 B 相的干扰影响基本对称,因此以 B 相作为参考是合理的。根据表 1 可以得到:AC 相的阻性电流的偏差值相当于电流与电压的夹角 α 在 110 kV,220 kV 和 500 kV 时分别变化 0.9°,2.2° 和 3.2°,即由于邻相耦合容性电流的干扰造成 AC 相的全电流基波在 110 kV,220 kV 和 500 kV 时分别变化 0.9°,2.2° 和 3.2°。因此,只要将周围杂散电容的影响造成的 α 角的偏差在测量时进行校正就可以得到正确的阻性电流基波值。文献^[7]利用对 α 角校正的方式成功研制了 MOA 阻性电流测量装置,使带电测量结果更加可信。但文献^[7]仍然采用 IU 法进行测量,即需要从 TV 取参考电压。

在利用三相电流法进行测量时,对于周围杂散电容的影响,也可以采用对 α 角校正法进行测量。被测三相泄漏电流基波之间的关系如图 8 所示。由于存在邻相耦合电容影响,使 $\alpha=\beta=120^\circ-\Delta\alpha$, $\gamma=120^\circ+2\Delta\alpha$ 。因此,当测得三相电流之间的夹角符合上述关系时,可以判断三相 MOA 均为正常。若三相电流之间的夹角不符合上述关系,则根据前述方法容易判断出异常相。

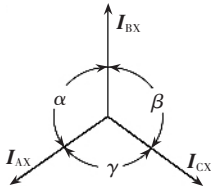


图 8 三相 MOA I_x 之间夹角关系

Fig.8 The angle relationship among three MOA current I_x s at different phases

在判断出正常相和异常相以后,需要对含干扰的泄漏电流进行阻性电流基波标定。由于耦合干扰的结果只是将全电流的基波在相位上进行了平移,而幅值变化很小,因此对正常相的阻性电流基波进行标定时仍然按照正常相标定方法进行。但对于异常相的标定,需要以正常的邻相相位作为参考,根据正常相和异常相的相位关系,并考虑到周围耦合电容干扰的影响。异常相的阻性电流峰值和参考相基波过零点相位关系如表 2 中所示,根据表 2 和参考相过零点位置便可得到异常相阻性电流峰值。在得到阻性电流基波以后,再分别叠加各自的谐波分量就得到各相阻性电流峰值测量值。

表 2 异常相的标定角度
Tab.2 The demarcating angles of abnormal phase

异常相	参考相	标定角度	异常相	参考相	标定角度
A	B	$120^\circ-\Delta\alpha+\delta$	B	C	$120^\circ-\Delta\alpha+\delta$
A	C	$120^\circ+2\Delta\alpha-\delta$	C	A	$120^\circ+2\Delta\alpha+\delta$
B	A	$120^\circ-\Delta\alpha-\delta$	C	B	$120^\circ-\Delta\alpha-\delta$

2.3 系统设计

为检验本文提出的测量方法的正确性,设计了三相电流法测量 MOA 阻性电流的测量系统。根据测量原理,需要同时对三相电流信号进行交流采样,以保证三相电流之间的相位关系不变;为了分离出各相电流的基波和谐波分量,在软件上采用了傅里叶分解算法。整个系统的硬件设计框图如图 9 所示。

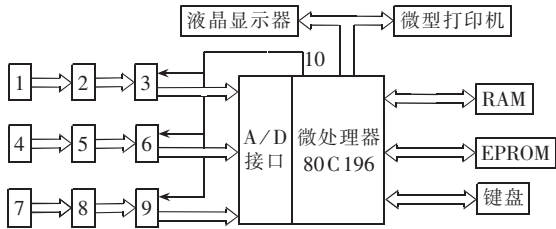


图 9 三相电流法 MOA 阻性电流带电测量仪原理框图
Fig.9 The electrified measuring instrument of MOA resistive current based on three-phase current method

三相 MOA 泄漏电流信号经在线监测器 1,4,7 (分别对应 A,B,C 相,下同)两端送至三路零输入阻抗变换电路 2,5,8,零输入阻抗变换电路的设计是为了保证在不断开 MOA 接地引下线的前提下能检测到 MOA 的全部泄漏电流,零输入阻抗变换电路同时将电流信号转换为电压信号,分别送到三路采样/保持电路 3,6,9,三路采样/保持电路 3,6,9 受微处理器的采样/保持信号 10 的控制实现对三路信号的同时采样和保持,确保对三路信号采样的同时性,以利于用微处理器对三路电流的相位进行判断;采样/保持电路输出到微处理器的多路 A/D 转换器,实现对三路信号的采集。微处理器对采集到的三相泄漏电流按图 10 所示的流程进行处理,然后将各相泄漏电流和阻性电流峰值通过液晶显示器循环显示出来,同时通过键盘控制可以将测量结果通过微型打印机打印。RAM 和 EPROM 分别为数据存储器 and 程序存储器,和微处理器一起构成微计算机系统。

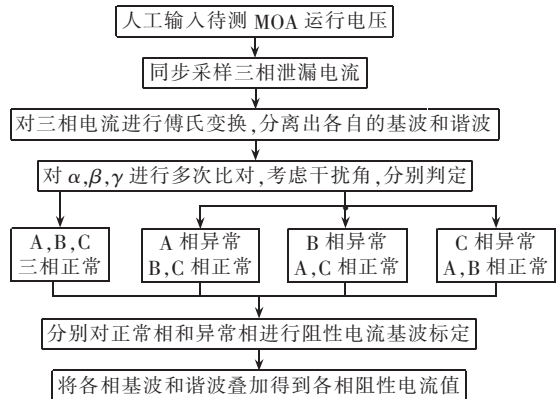


图 10 三相电流法带电测量阻性电程序流程图
Fig.10 The electrified measuring procedures of MOA resistive current based on three-phase current method

3 实验

为检验本文所提方法和系统设计的正确性,利

用本装置进行了 220 kV 电压等级下人工增大阻性电流测试实验。实验地点设在武汉大学电气工程学院的国家电力公司高电压与绝缘重点实验室的 220 kV 试验变电站,有 220 kV 各种设备(主变、断路器、压变、流变、避雷器等),且按 220 kV 变电站标准距离安装。其中,避雷器为国产无间隙氧化锌避雷器,每相由上下两节组成,在接地回路中串有放电计数器。采用人工增大 MOA 阻性电流方法进行测量。用 2 根 1 m 长环氧玻璃套管,内各装有 7 支串联的 50 MΩ 高压线性电阻,组成 350 MΩ 电阻杆两根。分 3 种情况进行实验:

- a. 不并任何电阻,测量 MOA,结果见表 3;
- b. 用 1 根 350 MΩ 电阻杆并在 MOA 某一相的下节,测得并联后的结果见表 4;
- c. 用 2 根 350 MΩ 电阻杆一起(相当于 175 MΩ 电阻)并在 MOA 某一相的下节,测得并联后的结果见表 5。

测量时对 MOA 所施加线电压为 215~222 kV,所有测量数据均为峰值。

表 3 三相 MOA 均正常时测量结果
Tab.3 The measurements of three normal MOAs at different phases

相别	I_A	I_R
A	1.019	0.200
B	0.962	0.159
C	0.978	0.176

注: I_A 为全电流, I_R 为阻性电流;下同。

表 4 MOA 一相下节并联 350 MΩ 电阻时测量结果
Tab.4 The measurements of three MOAs at different phases,one of which is connected with a 350 MΩ resistance in parallel

相别	A 相增大 I_R		B 相增大 I_R		C 相增大 I_R	
	I_A	I_R	I_A	I_R	I_A	I_R
A	1.071	0.358	0.953	0.196	0.957	0.194
B	0.945	0.157	0.958	0.305	0.955	0.154
C	0.991	0.187	0.998	0.176	1.008	0.324

表 5 MOA 一相下节并联 175 MΩ 电阻时测量结果
Tab.5 The measurements of three MOAs at different phases,one of which is connected with a 175 MΩ resistance in parallel

相别	A 相增大 I_R		B 相增大 I_R		C 相增大 I_R	
	I_A	I_R	I_A	I_R	I_A	I_R
A	1.193	0.467	0.969	0.218	0.973	0.203
B	0.946	0.185	1.041	0.477	0.959	0.153
C	1.010	0.209	1.002	0.191	1.159	0.513

为便于对比阻性电流的变化,由表 3、表 4 和表 5 所测数据整理出人工增加阻性电流前后全电流的变化及阻性电流变化见图 11 和图 12。图中用 7 根线代表不同情况下(共 7 次试验)测量得到的数值,其中细线表示未并电阻,最粗的线表示并 175 MΩ 电阻,较粗的线表示并 350 MΩ 电阻。

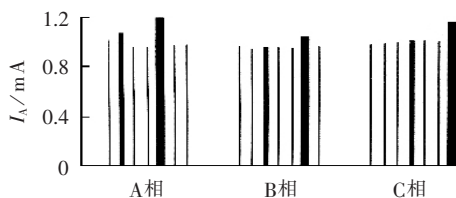


图 11 全电流数据

Fig.11 Full current chart

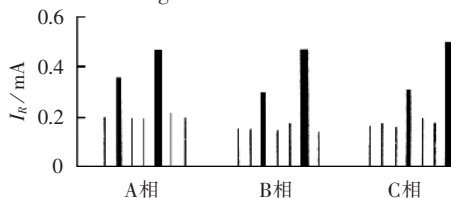


图 12 阻性电流数据

Fig.12 Resistive current chart

4 结论

从实验结果可以看出,当 MOA 下节并联 $350\text{ M}\Omega$ 电阻后,并联相阻性电流由原来的 $0.159\sim 0.200\text{ mA}$ 变到 $0.305\sim 0.358\text{ mA}$,增大 $80\%\sim 90\%$;而全电流的变化很少,由原来的 $0.962\sim 1.019\text{ mA}$ 变到 $0.958\sim 1.071\text{ mA}$,仅增大 $3\%\sim 5\%$,非并联相即正常相的阻性电流因数据采集的分散性,有 $-2\%\sim +6\%$ 的变化。当 MOA 下节并联 $175\text{ M}\Omega$ 电阻后,并联相的阻性电流变到 $0.467\sim 0.513\text{ mA}$,增大 $134\%\sim 200\%$;而全电流变到 $1.002\sim 1.193\text{ mA}$,仅增大 $8\%\sim 18\%$ 。可见对 MOA 人工增大阻性电流,特别是在阻性电流基波增大时,该测量仪均能明显地反映出阻性电流的增量。因此,用本文提出的三相电流法能够很方便地对 MOA 早期故障进行正确判断。

参考文献:

- [1] 周 龙,陈继东,文远芳. 氧化锌避雷器阻性电流的谐波分析法[J]. 华东电力,1997,(7):44-45.
ZHOU Long, CHEN Ji-dong, WEN Yuan-fang. Harmonic analysis of resistive current of zinc oxide arresters[J]. East China Electrical Power, 1997, (7):44-45.

- [2] 郑 劲,彭晓莺. LCD-4 型检测仪带电测试氧化锌避雷器的误差分析及检测效果 [J]. 电瓷避雷器,1995,(6):34-40.
ZHENG Jin, PENG Xiao-ying. Error analysis and performance of measurement of zinc oxide arresters using LCD-4 instrument[J]. Insulators and Surge Arresters, 1995, (6):34-40.
- [3] 蔡翊涛. 在运行电压下测量 MOA 阻性电流[J]. 电瓷避雷器,2004,(5):30-35.
CAI Yi-tao. Measuring resistive current of MOA according to the service voltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004, (5):30-35.
- [4] 邵 涛,周文俊,闰华光,等. 电压谐波对金属氧化物避雷器泄漏电流及其阻性分量的影响[J]. 电网技术,2004,28(8):55-59.
SHAO Tao, ZHOU Wen-jun, YAN Hua-guang. Influence of voltage harmonics on leakage current and its resistive component of MOA [J]. Power System Technology, 2004, 28(8):55-59.
- [5] 王洪新,贺景亮. 氧化锌避雷器在线监测中相间干扰的分析研究[J]. 高电压技术,1997,23(2):26-30.
WANG Hong-xin, HE Jing-liang. The research of interphase interference in on-line monitoring measurement of ZnO arresters[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(2):26-30.
- [6] 邵 涛,孙广生. MOA 泄漏电流阻性分量分析 [J]. 高压电器,2003,39(6):60-62.
SHAO Tao, SUN Guang-sheng. Analysis of resistive component characteristics of MOA leakage current[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6):60-62.
- [7] 盛亚军. MOA 带电测试及其角度校正 [J]. 电瓷避雷器,2003,(1):33-35.
SHENG Ya-jun. On-line measurement of MOA angle emendation [J]. Insulators and Surge Arresters, 2003, (1):33-35.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

赵 伟(1971-),男,山东邹城人,讲师,在站博士后,从事精密仪器与机械研究(E-mail:zhwac@nuaa.edu.cn)。

Electrified measuring of MOA using three-phase current method

ZHAO Wei^{1,2}, WAN De-jun¹, YUE Jian-min³

(1.Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3.Nanjing Voltamp Electric Limited Company, Nanjing 210029, China)

Abstract: The features of leakage current of MOA (Metal Oxide Arrester) during electrified measuring are analyzed. The increment of resistive current is the criterion to detect its early fault, and the key of electrified measuring is the correct measuring of its fundamental resistive current variation. A three-phase current method is presented to measure resistive current, based on which an electrified measuring instrument for MOA is developed. An experiment of simulative resistive current increase is carried out. The results show that the three-phase current method can measure the increment of resistive current correctly, which eases the detection of early MOA fault.

Key words: three-phase current method; MOA; resistive current; electrified measurement