

基于复合波响应的压敏电阻状态检测研究

寇晓透, 李梅, 孙宏伟, 袁健华, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on Condition Detection for the Varistor Based on the Response to Combination Wave

KOU Xiao-kuo, LI Mei, SUN Hong-wei, YUAN Jian-hua, LI Yan-ming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 为了维护低压电源系统及信息系统的可靠运行,需要对用于电涌防护的压敏电阻进行及时有效的状态检测。笔者对不同故障状态的压敏电阻的复合波响应进行了试验研究,结果表明,不同故障状态的压敏电阻由于伏安特性的差异将呈现不同的复合波响应特征,利用其响应特征可以判别压敏电阻是否存在故障及具体故障类型。

关键词: 电涌防护; 压敏电阻; 复合波响应; 故障诊断

中图分类号: TM83 **文献标识码:** A

Abstract: In order to maintain operational reliability of low-voltage supply system and information system, it is very important to detect the varistor's condition timely and effectively. In this paper, several types of failure modes of varistor are concerned. According to the research of varistor's response to combination wave, it shows that the responses vary with the varistor's failure modes because of the difference in V-A characteristic. Based on the response, the kind of failure modes of varistor could be determined.

Key words: surge protection; varistor; response of combination wave; fault diagnosis

1 前言

当前低压电源系统及信息系统大量使用各种类型的电涌防护器件来防护雷击和其它原因引起的电涌电压及电涌电流^[1-3]。在各类的电涌防护器件中,压敏电阻因具有限压特性优良、响应速度快、漏电流小、通流量大、无续流、可靠性高等优点而成为最主要的元件^[4]。在长期使用中,压敏电阻由于承受诸如电应力、热应力等各种应力的作用,会发生损坏或性能的劣化,从而丧失或降低其防护电涌的能力。有些含有压敏电阻的SPD在压敏电阻损坏时可自动切断电源,引起线路的保险动作或SPD中的热保护动作等;而有些组成方式在有压敏电阻损坏时无法产生保护性动作,如由压敏电阻和气体放电管或放电间隙串联

组成的支路,这样就丧失了其电涌防护的能力。所以对压敏电阻故障类型进行分析研究,找出有效检测其故障的方法就是一个亟待研究和解决的问题。

在IEEE Std C62.36-2000以及IEC 61643-1:1998中规定了检测压敏电阻静态和动态性能的试验方法^[5,6]。上述试验标准有以下缺点:①程序复杂,操作繁琐;②不能在线或带电检测。此外对于压敏电阻的冲击试验一般采用冲击电流来进行,由于冲击电流的容量较大,对压敏电阻的性能会产生一定的负面影响。笔者对不同状态的压敏电阻进行一定幅度的复合波冲击试验,通过对响应的分析,研究压敏电阻主要故障类型的故障特征,从而可使该方法用于压敏电阻状态的在线或带电检测。

2 压敏电阻的故障类型及检测原理

2.1 压敏电阻的故障类型

从压敏电阻损坏或性能劣化的物理过程来分析,压敏电阻主要有两种故障模式。

(1)老化:指在外加应力和外界环境的作用下,性能逐渐恶化,偏离起始性能指标的现象。具体表现为泄漏电流增加、电容减小、功率损耗增加、压敏电阻电压不稳定等。

(2)热崩溃:在承受持续电压或幅值较大的电涌冲击时,由于压敏电阻内部晶粒分布不均匀,造成电流分布不均匀。在电流集中的地方会出现熔洞,造成热击穿;如果出现不均匀的受热则会造成开裂。

2.2 复合波响应检测压敏电阻状态的原理

对于发生穿孔故障的压敏电阻,等效电路为压敏电阻阀片并联一个气体间隙。对于发生老化故障的压敏电阻,一些实验室的试验表明,其伏安特性会产生非线性特性的漂移现象,并且在预击穿区的漂移程度要比击穿区大的多^[7]。同性能良好的压敏电阻相比,这些差异会造成伏安特性上的不同。

在 IEC1000 -4 -5/12,IEEE/ANSI C62 -41,

ETS300-047 等标准中规定,复合波为冲击源开路输出 $1.2/50 \mu\text{s}$ 冲击电压,短路时输出 $8/20 \mu\text{s}$ 冲击电流。对压敏电阻进行复合波试验,既可以观察其开路特性,又可以观察其短路特性,可以比较全面地反映压敏电阻的状态特性。具体来讲,对于性能良好的压敏电阻,由于具有上述的伏安特性,在施加复合波冲击时其响应曲线上应该具有不同工作区域的特征:在对于有故障的压敏电阻施加复合波冲击时,由于伏安特性上的差异会造成其响应特性的区别,例如有穿孔故障的压敏电阻可能出现气体间隙击穿等。所以可以通过试验研究不同故障类型压敏电阻的响应特征来分析其与故障类型的联系。

3 试验及测量回路

试验采用的回路见图 1。复合波发生器采用 PSURGE6 SURGE TESTER。当外加试品电阻小于 2Ω 时,输出为 $8/20 \mu\text{s}$ 电流波(由于仪器本身问题,实测波形参数为 $12/32 \mu\text{s}$),电流幅值 $0 \sim 3 \text{ kA}$;当外加试品电阻大于 2Ω 时输出为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 电压波,幅值 $0 \sim 6 \text{ kV}$ 。

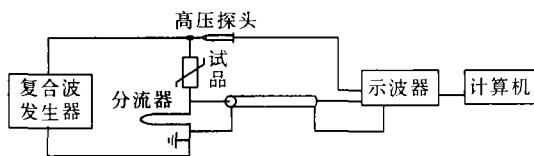


图 1 试验和测量回路

考虑到所测电流波时间常数为微秒级,采用分流器和示波器来测量回路的电流,分流器的电阻为 $3.48 \text{ m}\Omega$ 。

采用型号为 Tektronix P6015 高压探头来测量压敏电阻两端的电压,其衰减比为 $1000:1$ 。所检测到的信号由带宽为 500 MHz ,最高采样率为 5 GS/s ,型号为 Tektronix TDS 3052 的示波器进行记录,并传输到计算机进行下一步的处理。

试品采用某压敏电阻生产厂家生产的 MYL1 型压敏电阻器,压敏电压为 $320 \sim 2200 \text{ V}$ 。为便于试验研究,通过试验对试品进行了破坏处理得到了上述介绍的压敏电阻的各种故障模式。

4 试验结果及分析

4.1 性能良好压敏电阻的复合波响应

图 2 为 MYL1-620/20 型(压敏电压为 620 V ,通流容量为 20 kA)压敏电阻的复合波响应曲线,冲击电压幅值为 1.0 kV 。

从图 2 中可以看到,响应电压在很短时间内随冲击电压上升至最大值 0.88 kV ,然后呈现缓慢下降趋势, $38 \mu\text{s}$ 时电压突然跌落至 0.6 kV 左右,然后呈指数下降。

当压敏电阻电压幅值较低时,即电场强度较小

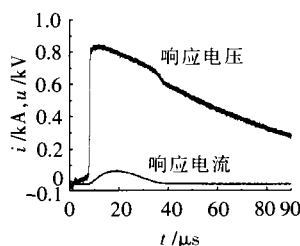


图 2 性能良好压敏电阻的复合波响应

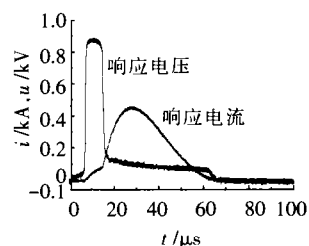


图 3 有穿孔故障压敏电阻的复合波响应

时,压敏电阻工作在预击穿区,此时冲击源相当于开路。随着两端电压的上升,电场强度随之改变,当电场强度大于击穿区的阈值,压敏电阻进入击穿区。在这个区域压敏电阻电流的上升引起两端电压的变化很小,所以压敏电阻进入箝压状态。由于电源容量有限,压敏电阻不能进入到回归区。随着作用在压敏电阻上场强的减小,压敏电阻从击穿区回到预击穿区。

已知冲击电压参数为 1.0 kV , $1.2/50 \mu\text{s}$,按照半峰值电压 0.5 kV 计算,可得电压跌落电压响应半峰值时间为 $49 \mu\text{s}$,同标准冲击电压的半峰值时间常数相同,即电压跌落压敏电阻两端电压为冲击源输出电压。可见电压跌落的部分为击穿区与预击穿区的转换区。通过对波头部分的分析计算可得到相同的结论。

从电流响应曲线分析,预击穿区电流很小,在击穿区,流过压敏电阻的电流达到最大值,当压敏电阻重新进入预击穿区,流过压敏电阻的电流约为零。

由以上分析可得,在施加复合波响应时压敏电阻经历了预击穿区-击穿区-预击穿区的过程,同理论分析吻合。

4.2 有穿孔故障压敏电阻的复合波响应

试品 2 型号为 MYL1-620/20,该试品被 $8/20 \mu\text{s}$ 仿雷电波击穿,压敏电阻中间有一贯穿性小洞。其响应曲线见图 3,冲击电压幅值为 1.0 kV 。

电压响应起始阶段与正常的压敏电阻响应相同,电压随冲击源上升至 0.9 kV ,然后电压保持, $15 \mu\text{s}$ 时电压跌落。与图 2 不同,电压降至 100 V 左右,然后维持在这个电压水平。流过压敏电阻的电流缓慢增加,到 $15 \mu\text{s}$ 电流波陡度变大, $28 \mu\text{s}$ 时到达最大值 0.45 kA ,然后呈指数下降,在 $66 \mu\text{s}$ 时电流接近于零。

试品为发生穿孔故障的压敏电阻,其等效模型为压敏电阻片并联气体间隙。随着压敏电阻两端电压升高,间隙处的场强可能已经达到空气间隙的击穿场强,但是由于放电有一定的时延,所以此时压敏电阻没有表现放电特征。此时压敏电阻进入击穿区,电压箝位在一定的电压值。经过一段时间的电离过程,间隙击穿,两端电压突然降低。由于间隙击穿后产生的电弧在间隙两端有一定的弧压降,所以响应电压维持在一个较小的幅值。此时对于冲击源而言,相当于接入低阻值的试品,根据冲击源的特性,此时

冲击源输出 8/20 μs 电流波。通过拟合电压下降后的电流响应, 计算波前时间 $t_1=12 \mu\text{s}$ 、半峰值时间 $t_2=32 \mu\text{s}$; 从幅值看, 电压幅值约为 0.9 kV, 而电流幅值约为 0.45 kA, 这些都符合外部短路时的关系。

由气体放电理论可知, 冲击电压峰值和气体间隙击穿时间的关系如下^[8]。

$$U_m - U_w = A t_B^{-\beta} \quad (1)$$

式中: U_w 为间隙的耐受电压, 它和间隙本身的形状及施加冲击的波形和幅值有关; U_m 为施加冲击源的最高幅值, t_B 为气体间隙放电时间; A 和 β 是与间隙本身及冲击源参数有关的常数。

由式(1)可得: 间隙一定时, 冲击电压幅值越高, 气体放电时延就越短。图4为试品2在不同电压幅值下的冲击响应。从图中明显可以看到, 随着冲击电压幅值的增加, 其电压保持时间逐渐缩短。这也进一步说明响应过程中发生了气体放电。

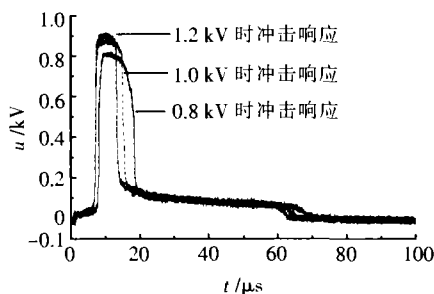


图4 不同幅值冲击下压敏电阻的响应

4.3 发生开裂故障压敏电阻的复合波响应

发生开裂故障的压敏电阻试品型号为 MYL1-14k-681 (被 8/20 μs 仿雷电波击穿, 压敏电阻边缘有裂纹), MYL1-14k-222 (被 8/20 μs 仿雷电波击穿, 压敏电阻边缘有裂纹, 中间有不完全贯穿小孔), 压敏电压分别为 680 V 和 2 200 V, 其复合波响应分别见图5, 图6。

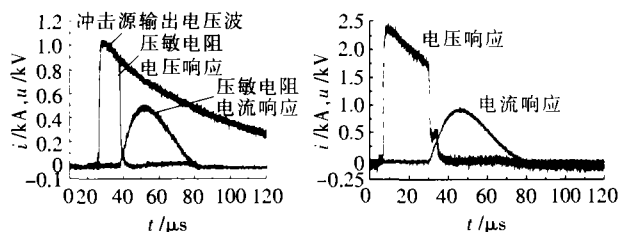


图5 开裂故障压敏电阻复合波响应

图6 开裂及不完全穿孔压敏电阻复合波响应

与发生穿孔故障的压敏电阻响应相同, 响应曲线都存在电压大幅跌落的现象, 如前分析, 在响应过程中出现了气体放电。与穿孔故障的压敏电阻不同, 此时气体放电形式为沿面放电, 其放电电压与压敏电阻两极间最短空气距离有关。图5, 图6中响应在放电之前, 响应与冲击源标准输出电压类似。在图5中, 把电压响应与冲击源标准波形进行了比较, 可以看到, 在击穿前两者变化趋势一致, 可见在该响应过程中, 压敏电阻始终处于预击穿区,

从电流响应来分析, 在击穿前没有电流流过压敏电阻。从图6也可得到相同的结果。

图6中电压响应下降沿出现的一段小转折, 分析原因可能是由于电源容量有限, 气体放电后, 随着电流增加, 放电电弧两端的电压由于外部电压增加而降低, 从而不能维持放电, 电弧熄灭, 此时电压施加在压敏电阻上面。随着压敏电阻两端电压回升, 间隙上场强增加, 达到其击穿场强时, 间隙放电, 从而出现响应曲线上的特征。

4.4 老化故障压敏电阻的复合波响应

型号为 MYL1-620/20 压敏电阻 (压敏电压不稳定) 复合波冲击响应见图7, 为了便于比较, 图中所示为同一试品在参数相同的冲击下的两次试验响应。从图中可以看到, 两次响应基本类似, 但是响应曲线中电压电流幅值有一定的差异。

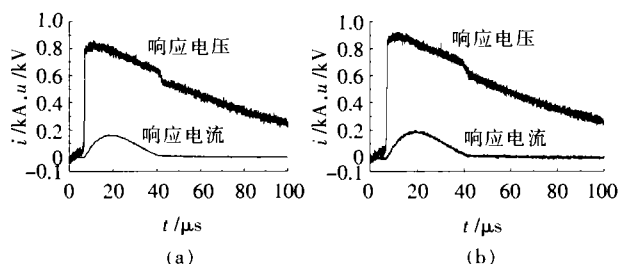


图7 压敏电压不稳定的压敏电阻两次冲击的比较

对其它类型的老化故障压敏电阻进行了大量的试验, 结果同上述一致。故障压敏电阻与同型号的压敏电阻在波形和幅值上有一定的变化, 这主要和发生老化故障的压敏电阻伏安特性的漂移有关。但是要通过该方法准确检测压敏电阻老化故障的具体类型还有一定困难: 一方面压敏电阻的老化一般集中在预击穿区, 击穿区的老化程度很小; 另一方面由于复合冲击波发生器输出分散性以及试品性能的不稳定会造成误差。因此在这方面还需做进一步的研究。

5 结论

对不同状态的压敏电阻施加复合波冲击并分析其响应特性的结果表明, 对于发生热破坏性故障的压敏电阻, 其复合波响应有明显的气体放电特征。对于发生老化故障的压敏电阻阀片, 与同型号的 (性能良好的) 压敏电阻比较, 其冲击响应呈现一定程度的漂移特征。

参考文献:

- [1] Roland B Standler. Protection of Electro-magnetic Circuits from Over Voltage[M]. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [2] I Braithwaite. Surge Protection Devices Installation Issues[A]. IEE Colloquium on Surges, Transients and EMC[C], 1998.
- [3] F D Martzloff. Coordination of Surge (下转第 97 页)

测量其分布电容 C_0 , 继续研究其动态特性, 将有利于优选线圈的其它电磁参数(如终端电阻 R_s , 积分参数等), 确保测量回路的稳定性、准确性与可靠性, 文[8,9]已有论述, 此处省略。

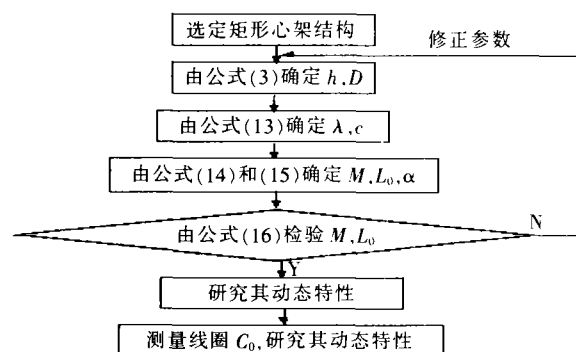
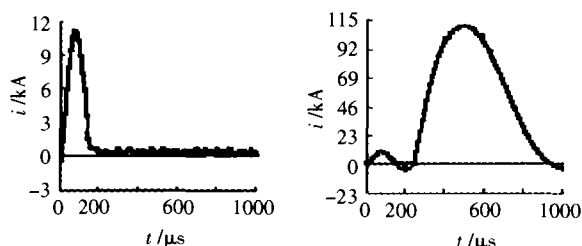


图 11 罗氏线圈设计流程图

因此, 在选取线圈结构和电磁参数时, 必须综合考虑被测量电流的特点、线圈动态性能和感应信号强弱等方面的情况。

6 实验结果

检测对象为神光 III 高功率激光实验装置中的能源模块^[9], 它主要包括预电离和主放电两部分。每台能源模块由 10 路氙灯提供泵浦能量, 电流波形为临界阻尼脉冲波形。测量线圈的结构和电气参数^[8,9]如下: $a=0.100\text{ m}$, $b=0.120\text{ m}$, $r_c \approx 0.055\text{ m}$, $d=0.01\text{ m}$, $M=2.0 \times 10^{-7}\text{ H}$, $L_0=2.8 \times 10^{-4}\text{ H}$, $C_0=3.1 \times 10^{-8}\text{ F}$, $n=1\ 400$ 匝, $R_0=18.2\ \Omega$, 其测量结果见图 12(a)和(b)。



(a) 脉宽 140 μs , 峰值电流 11.5 kA (b) 脉宽 600 μs , 峰值电流 111.5 kA

图 12 氙灯电流的试验采集波形

7 结论

基于罗氏线圈集中参数的数学模型, 分析其结构和电磁参数影响特点, 以及它们对线圈性能影响的特点, 给出了设计准则, 简化了设计过程, 提高了设计效率, 保证了测量回路的测试准确度。

参考文献:

- [1] 李维波, 毛承雄, 陆继明. 新型磁位计在线检测技术研究[J]. 传感器技术, 2001, 20(11): 14-17.
- [2] G R Turner, I W Hofsjajer. Rogowski Coils for Short Duration ($<10\ \mu\text{s}$) Pulsed Current ($>10\ \text{kA}$) Measurements[A]. 1999 IEEE Africon Conference[C], Africon, 1999.
- [3] Liao Ruijin, Sun Caixin, Gu Leguan. The Development of the Linear Rogowski Coil for Measuring Large Impulse Current [A]. Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials[C], 1998.
- [4] W F Ray, C R Hewson. High Performance Rogowski Current Transducers [J], IEEE Industry Applications Confer, 2000 (5): 3 083-3 090.
- [5] D A Ward, J La T Exon. Using Rogowski Coils for Transient Current Measurements [J]. IEEE Science and Engineering Journal, 1993, 2(3):105-113.
- [6] 陈本孝. Rogowski Coil 在交流大电流测量中的应用 [J]. 华中科技大学学报, 1998, 26(2): 82-84.
- [7] 李芙英, 陈翔. 基于 Rogowski 线圈和压频变换的电流测量方法[J]. 清华大学学报(自科版), 2000, 40(3): 28-31.
- [8] 李维波, 毛承雄, 李启炎, 等. 陡脉冲大电流的 Rogowski 测量线圈仿真研究[J]. 高压技术, 2002, 28(8): 11-13.
- [9] 李维波, 毛承雄, 李启炎, 等. 神光 III 强激光能源模块测量线圈研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 53-57.
- [10] J D Ramboz. Machinable Rogowski Coil, Design and Calibration [J]. IEEE Trans. on Instrumentation & Measurement, 1996, 45(2): 511-515.
- [11] 李维波, 毛承雄, 陆继明, 等. 高压变频器谐波抑制措施仿真研究[J]. 高压电器, 2003, 39(5):16-19.

作者简介:李维波(1973-),男,博士研究生,主要从事高压大电流智能化检测技术研究。

(上接第 93 页)

- Protectors in Low-voltage AC Power Circuit[J]. IEEE Trans. on PAS-99, 1980(1): 129-133.
- [4] 吴维韩, 何金良, 高玉明. 金属氧化物非线性电阻特性和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
 - [5] IEEE Std C62.36-2000, IEEE Standard Test Methods for Surge Protectors Used in Low-voltage Data, Communications, and Signaling Circuits[S].
 - [6] IEC 61643-1:1998. IDT. Surge Protective Device Connected to Low-voltage Power Distribution Systems Part 1: Performance Requirements and Testing Methods[S].

- [7] K Eda, A Iga, M Matsuoka. Degradation Mechanism of Non-ohmic Zinc Oxide Ceramics [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(5): 2 678-2 684.
- [8] A Haddad. Co-ordination of Spark-gap Protection with Zinc-oxide Surge Arresters [J]. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 2001, 148(1): 21-27.

作者简介:寇晓遥(1978-),男,河南人,硕士生,从事电磁兼容及低压系统过电压研究。