

智能电器监控单元浪涌抑制网络工作状态分析和改进

牛 博, 宋政湘, 王建华, 耿英三, 白 鹏

(西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

Working-state Analysis and Improvement of Surge Depress Net of Digital Relay

NIU Bo, SONG Zheng-xiang, WANG Jian-hua, GENG Ying-san, BAI Peng

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 将由电源滤波器、压敏电阻、瞬态电压抑制器(TVS)组成的串级浪涌抑制网络应用于智能电器监控单元电源端口,通过试验观察到该网络的残压水平过高,对后级电路存在着潜在的危险,采用波过程理论对这一现象进行分析,发现开关电源阻抗变化会影响到串级浪涌抑制网络的配合。对抑制网络的结构进行了改进,通过试验可以证明改进后的抑制网络能够明显提高对浪涌过电压的抑制效果。

关键词: 智能电器监控单元; 浪涌; 抑制; 配合; 波过程中图分类号: TM862 文献标志码: A

Abstract: The serial surge suppresses net which was constituted with mains filter, varistor and transient voltage suppressor was applied to the power supply port. The over-high residual voltage and potential danger to posterior circuit were found by experiment. Through analyzing experiment phenomena by using the traveling wave theory, it was found that coordination of the depress net was influenced by variation of resistance of switch power. The structure of suppress net was redesigned and it was proved that the new structure can improve suppress result obviously by experiment.

Key words: digital relay; surge; suppress; coordination; traveling wave

0 引言

有针对性地研究电力系统中的电磁暂态尤其是雷电对接入其中的电气设备的干扰和影响及其防护技术也是电力系统电磁兼容研究的重要内容^[1-3]。现在控制设备微电子化、多功能、小型化的趋势使得这一问题更为突出,因此研究如何设计和实施低压电源线电涌防护成为电子设备防雷的关键环节^[4]。目前针对低压系统及弱电装置的浪涌抑制理论及防护技术的研究已经日趋成熟^[5-11]。而对低压系统中电源浪涌抑制网络的实际工作状态分析还少见报

道,笔者对低压系统中智能电器控制单元的浪涌抑制网络的工作状态进行了分析,并对网络的结构进行了改进,通过试验可以证明改进后的抑制网络能够明显提高对浪涌过电压的抑制效果。

1 浪涌抑制网络的试验分析

1.1 浪涌抑制网络的组成原理

串级浪涌抑制网络的设计通过第1级压敏电阻释放大部分浪涌能量,从而使到达次级TVS的浪涌能量较小,再经过次级TVS释放浪涌能量,可以对负载形成可靠保护,但浪涌抑制网络的首末两级浪涌抑制器件的电气参数配合的不同将造成不同的能量分配,从而引起浪涌抑制效果的变化,这要求浪涌抑制器的首末两级参数配合得当。笔者设计的面向智能电器装置的串级浪涌抑制网络由多级抑制器件串连组成,安装于电源端口开关电源的前端。图1是一个典型的单相串级浪涌抑制器的原理图。

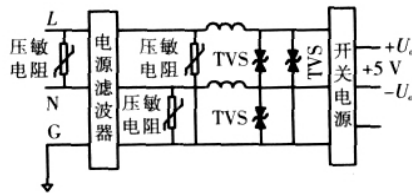


图1 浪涌抑制网络原理图

其作用原理是采用两级抑制器件配合保护,即第1级由压敏电阻和电源滤波器组成,释放浪涌电流携带的大部分能量,次级TVS只分担少量能量而主要使电压钳位在后级被保护电路能够经受住的范围内。当线路上的浪涌过电压以陡波形式侵入时,由于陡波的上升时间非常快,从而使得第1级抑制网络中的压敏电阻迅速导通,从而分流大部分过电压能量,小部分过电压能量流过电感使过电压加于第

收稿日期: 2007-01-23; 修回日期: 2007-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477026); 新世纪优秀人才资助项目(NCET-04-0924)。

作者简介: 牛 博(1980-),男,博士研究生,从事智能化电器和电磁兼容方面的研究。

2级TVS,此处的过电压较之第1级压敏电阻上的电压低,第2级TVS动作再泄漏一部分过电压能量,使过电压基本限制于第2级TVS的箝位电压水平,这是设备可以接受的。由于浪涌的波尾 $di/dt < 0$,抑制网络的1级与2级之间电感对于抬高第1级压敏电阻上的电压而言呈负作用。而典型浪涌的波尾陡度较波头小,电感作用抬高的电压影响不显著,此时第2级TVS虽相对分得更多能量,但大部分能量仍通过首级压敏电阻释放。对于串级浪涌抑制网络来说,首级压敏电阻通流量相对较大,次级TVS通流量相对较小,这样的配合方式符合首级泄流,次级限压的设计思想,同时节约成本。

1.2 浪涌抑制网络的试验分析

由于电力系统典型的浪涌电压波形如1.2/50 μs电压波波头陡度大,且持续时间不长,因此可以通过对串级浪涌抑制网络两级浪涌抑制器件的动作电压进行合理分配,即浪涌抑制网络的首级选用动作电压值为470V的压敏电阻,次级选用动作电压值为400V的TVS,组成如图1所示的浪涌抑制网络,来满足首级泄流,次级限压的设想,实现对浪涌电压的抑制作用依据标准ANSI/IEEE C62.41-1980^[12]中

的典型浪涌波形1.2/50 μs电压波,对该网络进行峰值为1kV浪涌(冲击)抗扰度试验,浪涌发生器选用TRANSIENT-2000型综合发生器,采用PHILIPS PM8931高压探头测量浪涌抑制网络各端的电压,其衰减比率为100:1所检测到的信号由Tektronix 3054示波器进行记录,图2是由示波器观测到的抑制网络各个端点的波形。图2(a)是浪涌发生器输出的标准1.2/50 μs的浪涌电压波形,由图2(b)可以看出,首级电压峰值被限制在450V附近(由于过冲及开关闭合的电弧所产生的高频信号,致使第1个波峰明显高于其它波峰峰值),经过第1级的压敏电阻降压以后,第2级TVS进行了钳位,由图2(c)可以看出,两个电压值差别不大,浪涌电压峰值依然保持在一个较高的水平,图2(d)是浪涌电压经过开关电源,在+5V直流侧输出的波形,从中可以看出电压的峰值可以达到60V以上,随着浪涌电压等级的提高,这个电压值也势必进一步增大,这对后级微电子器件为核心的电路来说,依旧存在着危险。

2 波过程理论

假设波阻抗分别为 Z, Z_1 和 Z_2 的3根半无限长

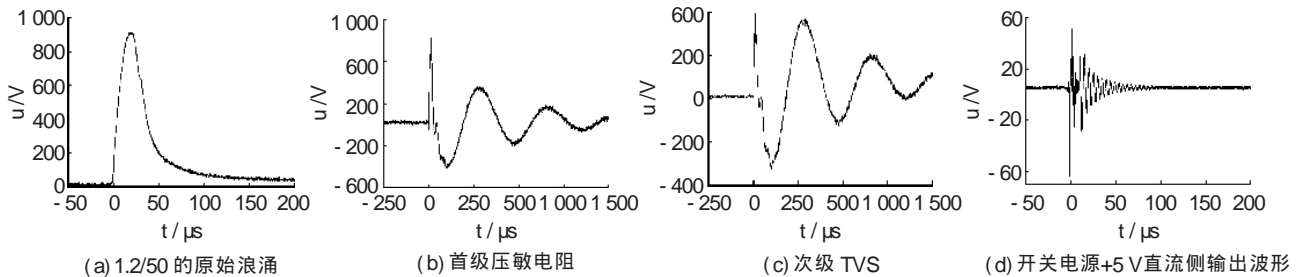


图2 电压波形

导线在A点连接,入射波 U_1 沿导线 Z 传播,在A点分别产生折、反射,其电压、电流及方向见图3。并有^[13]

$$\begin{aligned} U_1 &= Z I_1; U_{11} = U_1 + U_2; U_{11} = Z_1 I_{11} \\ U_2 &= -Z I_2; U_{12} = U_1 + U_2; U_{12} = Z_2 I_{12} \end{aligned} \quad (1)$$

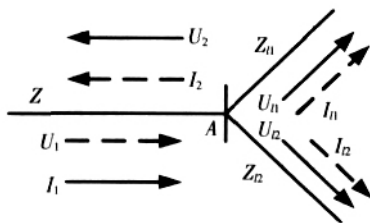


图3 3根导体在A点连接时的结构

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_{11} + I_{12} \\ U_2 &= \frac{Z_1 Z_2 - Z(Z_1 + Z_2)}{Z_1 Z_2 + Z(Z_1 + Z_2)} \cdot U_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$I_2 = -\frac{Z_1 Z_2 - Z(Z_1 + Z_2)}{Z_1 Z_2 + Z(Z_1 + Z_2)} \cdot I_1 \quad (3)$$

$$U_{11} = U_{12} = \frac{2Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 + Z(Z_1 + Z_2)} \cdot U_1 \quad (4)$$

$$I_{11} = 2Z Z_2 I_1 / [Z_1 Z_2 + Z(Z_1 + Z_2)] \quad (5)$$

$$I_{12} = 2Z Z_1 I_1 / [Z_1 Z_2 + Z(Z_1 + Z_2)] \quad (6)$$

3 浪涌抑制网络的工作状态分析

将浪涌抑制网络中压敏电阻与TVS的连接结构简化见图4。压敏电阻 V 作为第1级保护,TVS作为第2级保护,两级之间的阻抗值为 Z_{AB} ,其中包括电感的阻抗 Z_L 和导线阻抗,A点的前级阻抗为 Z ,B点的后级阻抗为 Z_k 。在节点A外施加入射电压;流经压敏电阻上的电流为 I_V ,经过压敏电阻后继续沿导线传播的电流为 $I_{11}(V)$,在节点B入射电流为 $I_1(D)$,不考虑由于导线阻抗引起的电流衰减以及畸变,这时 $I_{11}(V) = I_1(D)$,即二极管处入射电流 $I_1(D)$ 就是经过压敏电阻后继续流过导线的电流 $I_{11}(V)$;流经二极管的电流为 I_D ,经过二极管后继续在导线上传播的电流为 $I_{11}(D)$ 。计算时忽略导线阻抗,用压敏电阻

的阻抗 Z_V 代替 A 点和 C 点的阻抗, 用电感的阻抗 Z_L 代替 A 点和 B 点的阻抗, 用 TVS 的阻抗 Z_D 代替 B 点和 D 点的阻抗。

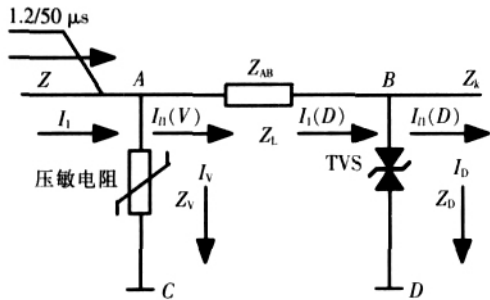


图 4 压敏电阻和 TVS 的配合图

对图 4 的结构采用波过程理论进行分析, 对于节点 B 来说, 可以将 TVS 的动态特性作为已知条件, 利用式 (2) ~ (6) 对其反射和折射的电压电流进行求解。TVS 的阻抗 Z_D 是其电流 I_D 的函数, 图 5 是系列 TVS 的 U-I 特性曲线。

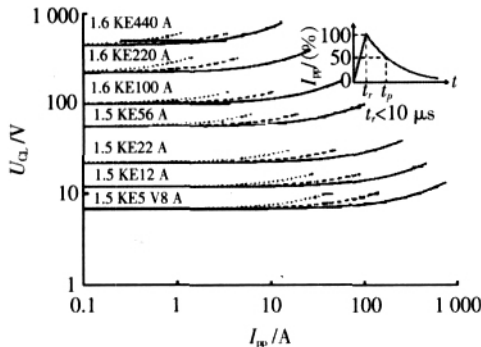


图 5 系列 TVS 的伏安特性

由图中 I_D 和 Z_D 的对应关系可以求得所要求参数的对应值, 曲线拟合后可以得到压敏电阻的动态特性。当 I_D 为一定值时, 将 $Z_L, Z_k, Z_D, I_1(D), I_{11}(D), I_D$ 分别带入式 (2) ~ (6) 替换 $Z, Z_1, Z_2, I_1, I_{11}, I_2$, 得到如下关系

$$I_1(D) = [Z_k Z_D + Z_L (Z_k + Z_D)] I_D / (2 Z_L Z_k) \quad (7)$$

同理, 在 A 点利用式 (2) ~ (6) 进行波过程的分析, 得到 I_V 与 $I_{11}(V)$ 之间的关系为

$$I_{11}(V) = Z_L I_V / Z_V \quad (8)$$

由 $I_{11}(V) = I_1(D)$, 联立以上 2 式, 得到 I_V 与 I_D 之间的关系为

$$\frac{I_V}{I_D} = \frac{[Z_k Z_D + Z_L (Z_k + Z_D)] Z_V}{2 Z_L^2 Z_k} \quad (9)$$

式 (9) 描述了压敏电阻和 TVS 的配合关系, 从式 (9) 可以看出, 压敏电阻和 TVS 的配合受到后级阻抗 Z_k 的影响, 当后级阻抗发生变化时会引起压敏电阻和 TVS 配合特性的改变。当浪涌电压经过后级开关电源的时候, 开关电源的阻抗是处在一个动态变化的范围内, 引起两级浪涌抑制器件配合特性的变化, 从而引起抑制网络浪涌抑制效能的降低, 这也解释了该抑制网络在进行浪涌(冲击)抗扰度试验

时 TVS 两端电压和开关电源 +5 V 直流侧输出电压过高的现象。

4 浪涌抑制网络的改进

上述的试验观察和理论分析发现, 在开关电源前级使用由压敏电阻和 TVS 组成的两级浪涌抑制网络时, 压敏电阻和 TVS 的配合情况会受到后级开关电源阻抗变化的影响, 从而影响到两级抑制网络对浪涌的抑制效果。因此需要对原有的浪涌抑制网络进行改进, 在不额外增加元件的情况下, 在开关电源的前后级分别采用单一浪涌抑制器件, 前级选用动作电压为 470 V 的压敏电阻, 后级选用动作电压为 12 V 的 TVS。改进后的浪涌抑制网络见图 6。

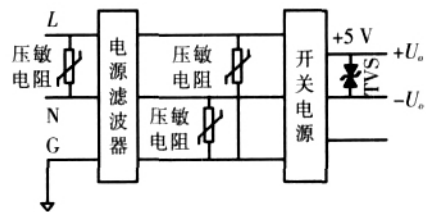


图 6 改进后的浪涌抑制网络

压敏电阻的通流量大, 用于首级保护, TVS 的响应时间快, 用于末级保护。当线路上过电压以陡波的形式入侵时, 开关电源的电感效应会抬高第 1 级压敏电阻上的电压, 使得压敏电阻迅速导通, 从而分流大部分能量。开关电源阻抗的变化会引起反射和折射电流的变化, 从而引起压敏电阻动态特性的变化, 不过对于后级的 TVS 来说, 一旦开关电源输出电压超过 TVS 的动作电压, TVS 立即动作, 这时首级的压敏电阻已经释放了大部分能量, 后级的浪涌过电压将被 TVS 钳位在一个较低的水平。

对改进后的浪涌抑制网络进行 1 kV 的冲击抗扰度试验, 图 7 是改进后的浪涌抑制网络的压敏电阻两端以及开关电源 +5 V 直流侧输出的电压波形。

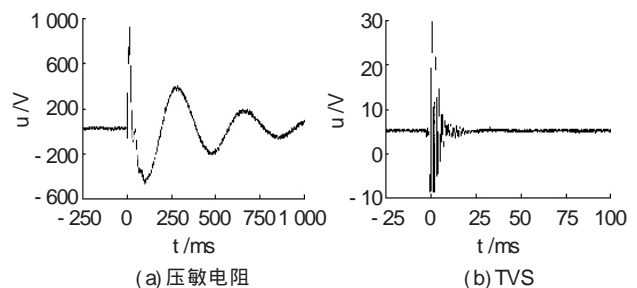


图 7 改进后抑制网络压敏电阻和 TVS 两端的电压

由图 7(a) 可以观察到改进后的抑制网络的压敏电阻峰值与原网络的压敏电阻两端的电压大致相同, 通过式 (2) ~ (6) 分析, 在压敏电阻动作电流一定的情况下, 电压 U_1 与阻抗 Z_1 无关, 这也充分说明了在后级阻抗发生变化时, 浪涌抑制器件节点的电压不发生变化, 变化的是折射和反射电流。由图 7(b)

可以观察到,抑制网络后级输出电压较改进前已经大为降低,这种改善将会随着浪涌电压等级的升高而愈加明显。在有些要求严格的场合可以采用如图8所示的多级浪涌抑制网络。

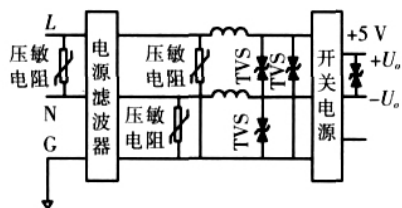


图8 多级浪涌抑制网络

5 结语

(1) 通过对智能电器监控单元浪涌抑制网络的实际工作状态分析发现,浪涌抑制网络中不同浪涌抑制器件的配合特性将受到负载阻抗特性的影响。

(2) 智能电器监控单元浪涌抑制网络应该延伸至电源通道最末端的出口处,覆盖整个电源通道,这样才能保证其对于浪涌过电压具有良好的抑制效果。

参考文献:

[1] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines [C]// New York, USA: IEEE, 1997: 1 410-1 997.

[2] IEEE Working Group Report. Estimating Lightning

Performance of Transmission Lines II, Updates to Analytical Models [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1993, 8(3): 1 254-1 267.

[3] RACHIDI F, J ANISCHEWSKYJ W, HUSSEIN A M, et al. Current and Electromagnetic Field Associated with Lightning-return Strokes to Tall Towers [J]. IEEE Trans. on EMC, 2001, 43 (3): 356-367.

[4] 莫付江, 阮江军, 陈允平. 浪涌抑制与电磁兼容 [J]. 电网技术, 2004, 28(5): 69-72.

[5] LAI K C, LEE W J, JACKSON W V. Testing and Selecting Surge Suppressors for Low-voltage AC Circuits[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1990, 6(26): 976-982.

[6] PAUL D. Light Rail Transit DC Traction Power System Surge Overvoltage Protection [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2002, 38(1): 21-28.

[7] 方志, 邱毓昌. 电子设备的雷电浪涌抗扰性试验 [J]. 高压电器, 2004, 40(1): 9-10.

[8] 李清泉, 张伟政, 袁鹏, 等. 浪涌抑制器配合的动态研究 [J]. 高电压技术, 2002, 28(9): 11-14.

[9] 李清泉, 范士锋, 袁鹏, 等. 振荡波两级低压浪涌保护器配合情况的实验研究[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 9-10.

[10] 周鹏. 变电站内弱电设备的浪涌抑制 [J]. 高电压技术, 2004, 3(30): 43-46.

[11] 贾江波, 张乔根, 李彦明. 低压串级浪涌抑制配合的研究[J]. 电磁避雷器, 2004(3): 43.

[12] ANSI/IEEE C6214121980. IEEE Guide for Surge Voltages in Low-voltage AC Power Circuits [S].

[13] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

(上接第255页)

有巨大的应用潜力,笔者介绍了其基本的耐压机理,对几何参数的确定进行了初步研究,并对Kapton用于真空高压绝缘时的优越性进行了讨论,对实际设计微堆层绝缘子具有参考价值。

参考文献:

[1] ELIZONDO J M. Novel High Voltage Surface Flashover Insulator Technology [C]// 9th IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, 1993: 257-260.

[2] SAMPAYAN S E, VITELLO P A. Multilayer High Gradient Insulator Technology [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 17(3): 334-339.

[3] SAMPAYAN S E, CAPORASO G J, SANDERS D M, et al. High-performance Insulator Structures for Accelerator Applications[C]// 1998 Particle Accelerator Conference, New York, 1998: 1 308-1 310.

[4] CRAVEY W R, DEVLIN G L, MAYBERRY C S. Investigation of a High Voltage Vacuum Insulator for the DARHT Accelerator [C]// 11th IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimore, 1997: 555-558.

[5] PILLAI A S, HACKAM R. Surface Flashover of Solid Dielectric in Vacuum[J]. J. Appl. P. hys. 1980, 53(4): 2 983-2 987.

[6] NUNNALLY W C, KROGH M. Investigation of Vacuum Ins

ulator Surface Dielectric Strength with Nanosecond Pulses [C]// 2003 Pulsed Power Conference, Dallas, Texas, June, 2003: 15-18.

[7] EOIN W GRAY. Vacuum Surface Flashover: A high-pressure Phenomenon [J]. J. Appl. P. hys. 1985, 58(1): 132-141.

[8] 唐传林, 季承钧, 单书发. 绝缘材料工艺原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[9] GRZYBOWSKI S, THOMPSON J E. Electric Surface Strength and Surface Deterioration of Thermoplastic Insulator in Vacuum [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1983, EI-18: 301-309.

[10] ANDERSON R A, BRAINARD J P. Mechanism of Pulsed Surface Flashover Involving Electron-stimulated Desorptions [J]. J. Appl. P. hys. 1980(51): 1 414-1 421.

[11] BLAISE G, GRESSUS C L. Charging and Flashover Induced by Surface Polarization Relaxation Process [J]. J. Appl. P. hys. 1991(69): 6 334-6 339.

[12] AVDIENKO A A, MALEV M D. Surface Breakdown of Solid Dielectrics in Vacuum Mechanism for Surface Breakdown [J]. Sov. Phys. Tech. Phys, 1977(22): 986-990.

[13] MILLER H C, NEY R J. Gases Released by Surface Flashover of Insulators [J]. J. Appl. P. hys. 1988, 63(3): 668-673.

[14] BURKE E A. Secondary Emission from Polymers [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1980, 27(6): 1 760-1 764.