

电感在两级电涌保护器设计中的应用

李祥超¹ 唐宏科¹ 王金虎¹

摘要

介绍了雷电波在遇到串联电感时,不同的时刻折、反射系数会发生变化,雷电波通过它们时将发生波形的改变.雷电波的陡度降低,雷电波的电压幅值也相应降低.根据这一原理,利用 ICGS 冲击平台进行大规模的试验,通过对实验数据进行对比分析,提出在多级电涌保护器的设计中,采用串联电感的方法可以降低电涌保护器的残压,相对地增加 SPD 的承受能力,提高电涌保护器的保护效果,对电力系统的防雷保护具有重要意义.

关键词

雷电波; 串联电感; 电涌保护器

中图分类号 TM644

文献标志码 A

收稿日期 2010-09-26

资助项目 国家自然科学基金(41075025)

作者简介

李祥超,男,实验师,主要从事电涌保护器的研发与测试. lxfanglei@163.com

¹ 南京信息工程大学 大气物理学院,南京, 210044

0 引言

随着电力电子信息系统对雷击电磁脉冲(LEMP, Lightning Electromagnetic Pulse) 保护的需求,电涌保护得到了很大的发展,为了限制各种途径入侵的雷电电涌,应在不同防雷分区的交界面装设电涌保护器(SPD, Surge Protection Device) 按防雷分区逐步削减雷击电磁脉冲.在低压配电系统中,一些敏感设备的过电压保护,采用单级保护无法达到要求,而多级保护的 SPD,能够满足敏感设备保护效果的要求.在多级 SPD 的设计中,必须考虑两级之间的退耦元件——电感的选择.对于退耦电感的研究,目前在国内研究成果较少,未能对退耦电感在实际中发挥的作用给出一个定量的分析结论.

为了便于分析,本文将雷电波等效为无限长直角波,电感中电流不能突变.因而当波遇到串联电感时,它的折、反射系数是变化的,所以当雷电波通过它们时将发生波形的改变,使雷电波的陡度变化,因此对于 SPD 的残压有一定程度的降低,从而起到提高电涌保护器保护效果的目的,并提出了对低压配电系统中运行设备的新的保护措施,有一定的工程实际应用价值.

1 雷电波通过电感时的工作过程

图 1a 表示一无限长直角波 u_{1q} 侵入到具有串联电感 L 的线路上的情况^[1]. L 前后两线路的波阻抗分别为 Z_1 及 Z_2 . 当 u_{1q} 到达 Z_1 和 L 的连接点 A 时将产生折、反射,因 L 为集中参数元件,在其上只有电压降落而无波过程,所以在 L 和 Z_2 的连接点 B 上没有反射过程,折射到 Z_2 的电压波为 A 点电压在 Z_2 上的分压.在 Z_1 线路首端和 Z_2 线路末端的反射波未到达 A 点时,根据彼德逊法则可得如图 1b 所示的等值电路,由此可写出如下回路方程^[2]:

$$2u_{1q} = i_{2q}(Z_1 + Z_2) + L \frac{di_{2q}}{dt}$$

解之得线路 Z_2 中的前行电流波 i_{2q} 为

$$i_{2q} = \frac{2u_{1q}}{Z_1 + Z_2}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

沿线路 Z_2 传播的折射电压波 u_{2q} 为

$$u_{2q} = i_{2q}Z_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}u_{1q}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = \alpha u_{1q}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

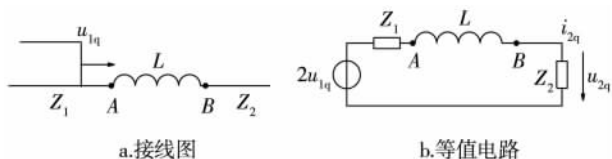


图1 行波通过串联电感

Fig. 1 Traveling wave gets through the series inductance

式中: $T = \frac{L}{Z_1 + Z_2}$, 为该回路的时间常数; $\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$, 为 Z_1 和 Z_2 直接相连时的电压折射系数.

从式(2)可知 u_{2q} 是随时间按指数规律上升的, 如图2所示. 当 $t = 0$ 时, $u_{2q} = 0$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $u_{2q} \rightarrow \alpha u_{1q}$, 说明无限长直角波通过电感后改变为一指数波头的行波, 串联电感起了降低来波上升陡度的作用. u_{2q} 的稳态值与线路 Z_1 和 Z_2 直接相连时一样, 说明串联电感对 u_{2q} 的稳态值没有影响.

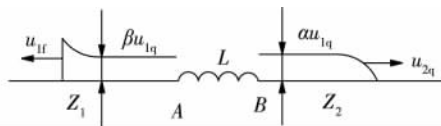


图2 行波通过串联电感时的折射波和反射波
Fig. 1 Refraction & reflection coefficients when the traveling wave gets through the series inductance

由式(2)可求得折射电压波 u_{2q} 的陡度为

$$\frac{du_{2q}}{dt} = \frac{2u_{1q}Z_2}{L} e^{-\frac{t}{T}}$$

最大陡度出现在 $t = 0$ 时, 即

$$\left. \frac{du_{2q}}{dt} \right|_{\max} = \frac{2Z_2}{L} u_{1q} \quad (3)$$

式(3)表明, 最大陡度与 Z_1 无关, 而仅由 Z_2 和 L 决定. L 愈大, 则陡度降低愈多. 作用到电气设备上的雷电波的陡度愈大, 则电气设备上的过电压也愈高, 故降低入侵波的陡度对电力系统的防雷保护具有很重要的意义.

由式(2)还可求出 A 点的反射电压波 u_{1f} . 因线路 Z_1 与 Z_2 串联, 故线路 Z_1 中的电流 i_1 与线路 Z_2 中的电流 i_{2q} 相等, 即

$$i_1 = \frac{u_{1q}}{Z_1} - \frac{u_{1f}}{Z_1} = i_{2q} = \frac{u_{2q}}{Z_2}$$

由此可解得

$$u_{1f} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_{1q} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} u_{1q} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4)$$

从式(4)可知, 当 $t = 0$ 时, $u_{1f} = u_{1q}$, 即在这一时刻电压行波发生了正的全反射, 这是由于电感中的电流不能突变, 电感在这一瞬间相当于开路的缘故. 随后 u_{1f} 按指数规律衰减, $t \rightarrow \infty$ 时, $u_{1f} \rightarrow \beta u_{1q}$, β 为线路 Z_1 和 Z_2 直接相连时的反射系数, 这是由于入射波为无限长直角波, 稳态时 L 相当于短路的缘故. u_{1f} 的波形也示于图2中.

综上所述, 串联电感可以降低入侵波的陡度, 在多级电涌保护器的设计中, 用电感作为退耦元件来降低 SPD 的残压, 又可以实现多级 SPD 间的能量配合问题. 将其电压限制在被保护设备的允许耐受电压水平以下, 有限地保护设备.

2 电涌保护的测试

为了验证串联电感对于雷电波的影响, 试验分为2次测试^[3]: 第1种情况为两级 SPD 不接入退耦电感, 此时相当于2个 SPD 并联; 第2种情况为两级 SPD 接入退耦电感, 在 L-PE 间进行冲击测试. 根据 IEC18802.1 的规定用雷电流为 $8/20 \mu s$ 波形, 使用 ICGS 冲击发生器对电路的 L-PE 间进行冲击试验, 测试数据采用 TDS2022 型示波器进行采集, 并通过工业控制计算机中的系统软件处理. 试验中均采用同种型号的氧化锌压敏电阻作为试验样品, 该试验样品的静态参数基本一致, 从而能够更好地保证此试验的一致性.

2.1 两级间无退耦电感的测试^[4]

测试电路如图3所示. 从理论上讲, 若不接入退耦电感, 电涌保护器的实际作用相当于2片压敏电阻并联使用^[5]. MOV 为参考电压 620 V、标称电流为 20 kA 的氧化锌压敏电阻. 测试数据及波形如表1和图4所示.

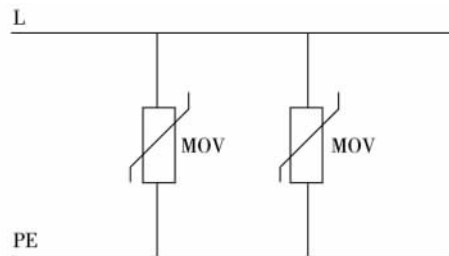


图3 无退耦电感的两级 SPD 内部原理
Fig. 3 Schematic diagram of two-level SPD without decouple inductance

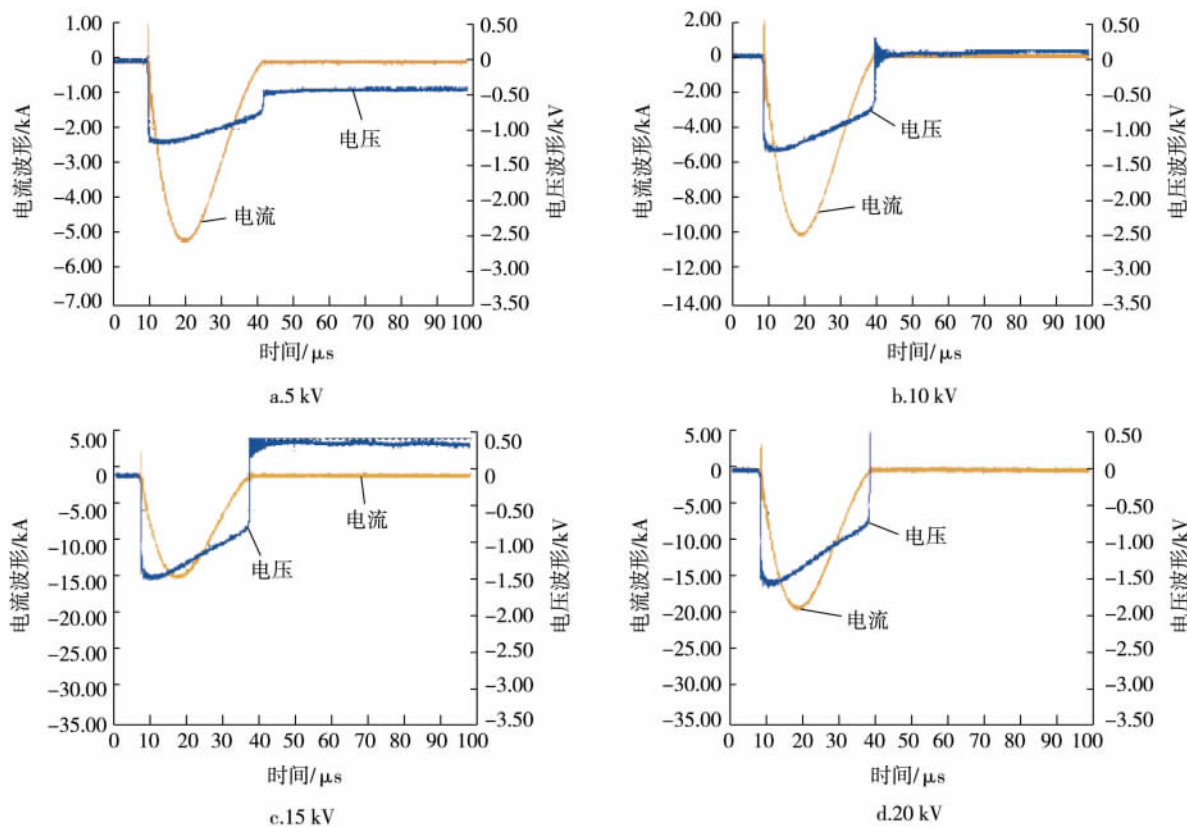


图 4 无退耦电感时不同冲击电压的测试波形

Fig. 4 Test waves in different impulse voltages without decouple inductance

表 1 无退耦电感时的测试数据

Table 1 Test data without decouple inductance

冲击电压/ kV	电流峰值/ kA	波前时间/ μs	波尾时间/ μs	反峰振荡/ kV	电压峰值/ kV
5	5.18	7.76	21.70	0.46	1.22
10	10.11	7.86	21.50	0.94	1.36
15	14.48	8.13	21.60	0.75	1.50
20	19.27	8.06	21.60	1.10	1.62

2.2 两极间有退耦电感的测试^[6]

图 5 为两级 SPD 的原理, 常用于低压配电系统的设备保护。R₁ 为温度保险丝, 其作用是防止压敏电阻漏电流过大造成供电电流短路。L 为退耦电感, L = 5 μH (L 的取值根据供电系统的负载容量推算, 一般情况下, 每平方毫米的导线可通过 5 A 的工频电流)。根据 IEC62305 的规定, 两级限压型 SPD 之间的导线最小距离为 5 m。L 的取值为 5 μH 等同于 5 m 长导线的分布电感值^[7]。测试数据及波形如表 2、3 和图 6 所示。

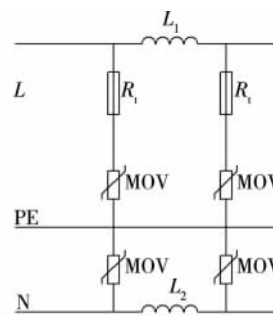


图 5 有退耦电感的两级 SPD 内部原理

Fig. 5 Schematic diagram of the two-level SPD with decouple inductance

2.2.1 接入退耦电感的测试

表 2 接入退耦电感的测试数据

Table 2 Test data with decouple inductance

冲击电压/ kV	电流峰值/ kA	波前时间/ μs	波尾时间/ μs	反峰振荡/ kV	电压峰值/ kV
5	5.12	7.86	21.70	0.39	1.08
10	10.56	8.08	21.60	0.63	1.18
15	14.91	8.22	21.40	0.60	1.24
20	19.72	8.13	21.30	1.48	1.30

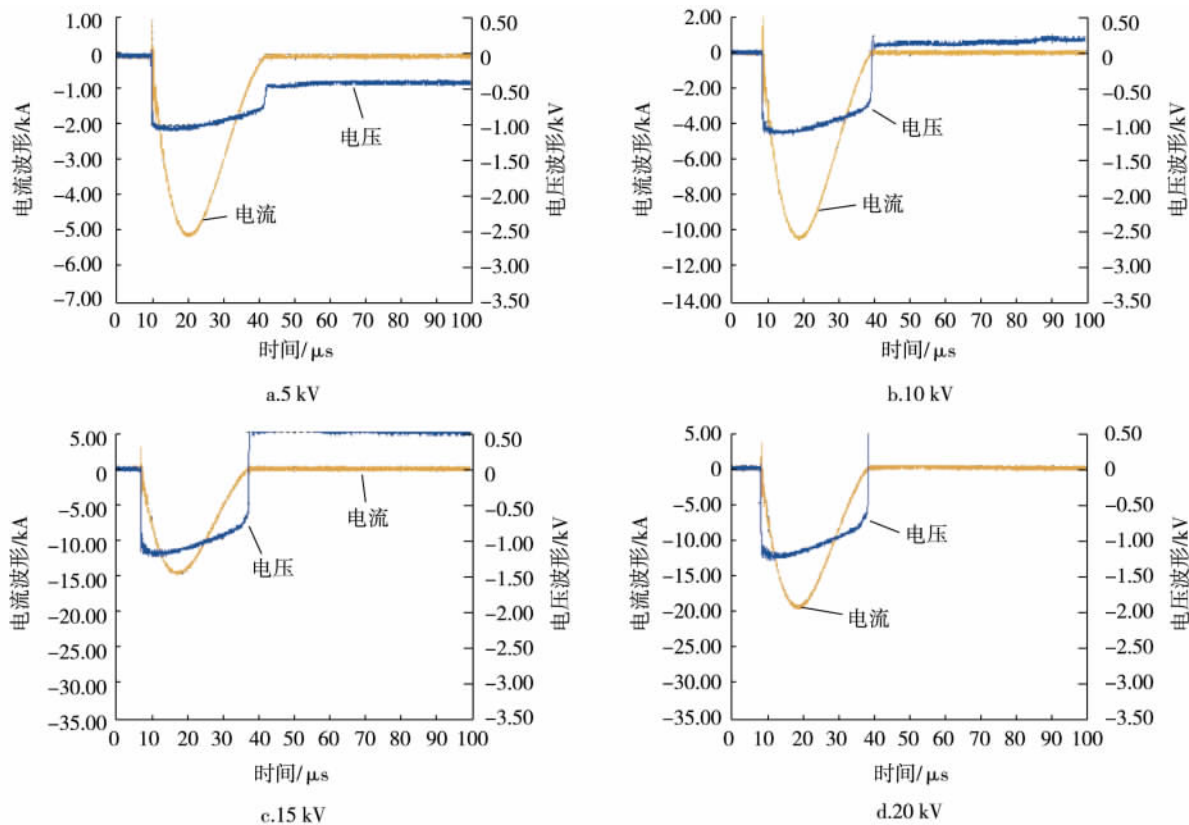


图6 接入退耦电感的测试波形
Fig.6 Test waves with decouple inductance

2.2.2 接入5 m 导线作为退耦电感的测试^[8]

表3 5 m 长导线作为退耦电感的测试数据

Table 3 Test data with 5-meter cable as decouple inductance

冲击电压/ kV	电流峰值/ kA	波前时间/ μs	波尾时间/ μs	反峰振荡/ kV	电压峰值/ kV
5	5.12	7.68	21.50	0.35	1.03
10	10.56	8.03	20.80	0.58	1.11
15	14.91	8.10	20.60	0.61	1.26
20	19.72	7.96	21.00	1.51	1.31

根据表2和表3的测试数据分析,对串联退耦电感的电涌保护器的测试参数与IEC62305规定两级限压型SPD的安装距离为5 m导线的两级电涌保护器的测试参数进行比较^[9].由波头、波前时间以及残压的测试数据可得,其数值差异较小,从而得到两种情况下电涌保护效果是基本一致的^[10].

3 结论

电涌保护器的设计中,利用串联电感对雷电波的折、反射原理,使雷电波的陡度降低.通过两个限压型氧化锌压敏电阻并联冲击测试以及与退耦电感

组合使用的测试,并结合实验数据分析得到以下结论:

- 1) 电涌保护器中接入退耦电感后,降低了SPD的残压.根据实验数据显示,有退耦电感较无退耦电感的情况下,SPD的残压降低了15%~30%,有效地提高了SPD的保护效果.
- 2) 电涌保护器中无退耦电感的两个压敏电阻使用时,在雷电流冲击下,只能增加电涌保护器的通流容量,对SPD的残压大小无影响.
- 3) 含有退耦电感的两级SPD的设计方案,通过实验数据分析,与IEC62305中规定两级限压型SPD安装间距为5 m的要求,其保护效果是一致的.因此,含有退耦电感的SPD相当于防雷工程设计中的两级防雷保护.

参考文献

References

[1] 周希朗.微波技术与天线[M].南京:东南大学出版社2009
ZHOU Xilang. Microwave technique and antenna [M]. Nanjing: Publishing House of Southeast University 2009

- [2] 赵恒轩. 微波技术与天线 [M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1999
ZHAO Hengxuan. Microwave technique and antenna [M]. Urumqi: Publishing House of Xinjiang University, 1999
- [3] GB/T 18802. 21—2004 低压电涌保护器 第 21 部分: 电信和信号网络的电涌保护器(SPD): 性能要求和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社 2004
GB/T 18802. 21—2004 Low-voltage surge protective devices. Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks: Performance requirements and testing methods [S]. Beijing: Standards Press of China 2004
- [4] 张栋, 傅正财, 孙伟, 等. 多分支系统中 SPD 配合的研究[J]. 低压电器 2008(7): 12-15
ZHANG Dong, FU Zhengcai, SUN Wei, et al. Study on the coordination of SPD in multi-line low voltage AC power systems [J]. Low Voltage Apparatus, 2008(7): 12-15
- [5] 任晓明, 傅正财. 限压型低压电涌保护器级间配合研究 [J]. 低压电器 2008(19): 4-7
REN Xiaoming, FU Zhengcai. Research on coordination between levels of voltage-limiting low voltage SPD [J]. Low Voltage Apparatus 2008(19): 4-7
- [6] 任晓明, 徐瑾, 赵洋, 等. 信号电涌保护器电路设计中去耦电阻的选择[J]. 低压电器 2006(4): 13-15
REN Xiaoming, XU Jin, ZHAO Yang, et al. Selecting de-coupling resistance in the design of Surge Protective Devices connected to telecommunications and signaling [J]. Low voltage Apparatus 2006(4): 13-15
- [7] 邢增梓, 侯安校. 低压配电系统电源过电压保护器能量配合分析[J]. 气象研究与应用 2008 29(2): 60-62
XING Zengzi, HOU Anxiao. Discussion about the Surge Protective Devices cooperation in the low-voltage distribution system [J]. Journal of Meteorological Research and Application 2008 29(2): 60-62
- [8] 李庆君, 刘晓东, 马云海, 等. 低压配电系统中多级电涌保护器的能量配合[J]. 内蒙古气象, 2006(4): 56-57
LI Qingjun, LIU Xiaodong, MA Yunhai, et al. Discussion about the multistage protective devices cooperation in the low-voltage distribution system [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia 2006(4): 56-57
- [9] 王亚冬. 浪涌保护器(SPD)的级数配合[J]. 智能建筑电气技术 2010 4(3): 87-89
Wang Yadong. Coordination between the first and second Surge Protective Device(SPD) [J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings 2010 4(3): 87-89
- [10] 韩文生, 卢学峰, 杨东旭, 等. 电源防雷器级间能量配合分析[J]. 气象与环境科学 2007 30(3): 88-89
HAN Wensheng, LU Xuefeng, YANG Dongxu, et al. Analysis of the energy coordination of the multi-power surge protector [J]. Meteorological and Environmental Sciences 2007 30(3): 88-89

Design and application of series inductance in two-stage SPD

LI Xiangchao¹ TANG Hongke¹ WANG Jinhu¹

¹ School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract This paper explains that refraction & reflection coefficients will change at different time when the lightning wave comes, as a result, the shape of lightning wave will change when they get through the series inductance. Voltage amplitude of lightning wave will reduce as long as the gradient of lightning wave decreases. According to this basic principle, a large scale of tests were carried out on ICGS. Comparative analysis shows that the residual voltage could be reduced by adding of the series inductance, thus enhance the tolerance capacity and improve the protection effect of multi-stage SPD. The application of series inductance in SPD is of great significance to the lightning protection in the power distribution system.

Key words lightning wave; series inductance; SPD