

# 线路避雷器和绝缘子串的伏秒特性配合问题研究

马春华

(中国电力投资集团巴公发电厂, 山西 晋城 048002)

## Study on Voltage-time Characteristic Coordination between Line Arrester and Insulator String

MA Chun-hua

(Bagong Power Plant of China Power Investment Corporation, Jincheng 048002, China)

**摘要:** 给出了金属氧化物避雷器(MOA)相对其它类型避雷器的优点, 并就 MOA 与被保护的绝缘子串之间的配合应用原则进行了论述, 分析计算了 MOA 与绝缘子串两者的伏秒特性。计算结果显示, 当 MOA 与绝缘子串两者进行合理配合应用时, 对线路设备保护的有效性超过了 99.993%, 从而得出在架空输电线路防雷保护中应用 MOA 以防止过电压效果显著, 最后就合理确定 MOA 的主要技术参数提出了意见。

**关键词:** 输电线路; 金属氧化物避雷器; 绝缘子串;

配合应用; 防雷保护

**中图分类号:** TM862

**文献标识码:** B

**Abstract:** This paper presents the advantages of metal oxide arrester comparing with other types arrester, and discusses the principle of coordination between MOA and protected insulator string. The result of analyzing the voltage-time characteristics of MOA and insulator string shows the effectiveness of protection by MOA is more than 99.993%. Then, the conclusion is reached that the effect of MOA preventing overvoltage is remarkable in overhead power transmission lines. Finally, primary technology parameters of MOA are suggested.

**Key words:** overhead power transmission lines; metal oxide arrester(MOA); insulator string; coordination application; thunderboltproof protection

## 0 引言

雷害事故在现代电力系统引起的跳闸事故中占有很大比重, 电力系统所产生的雷电流高达数十甚至数千安, 从而引起巨大的电磁效应、机械效应和热效应。从电力工程的角度来看, 最值得注意的两个方面是: ①雷电放电在电力系统中会引起很高的雷电过电压, 它是造成电力系统绝缘故障和停电事故的主要原因; ②雷电放电所产生的巨大电流, 有可能使被击物体炸毁、燃烧, 使导体熔断或通过电动力引起机械损

坏。因而, 架空输电线路的防雷保护就显得尤为重要。

现代输电线路所采用的保护措施一般有: 加装避雷线(架空地线)、降低杆塔接地电阻、加强线路的绝缘(如: 增加绝缘子串中的片数)、加装耦合地线、加装消弧线圈、采用不平衡绝缘系统和装设自动重合闸设备等, 若这些措施防雷效果不明显, 可以考虑采用 MOA。

## 1 MOA 的特点及结构

与传统的 SiC 避雷器相比, MOA 具有以下优点:

(1) MOA 结构大为简化、体积也可缩小很多, 适合于大规模自动化生产, 降低造价。

(2) 保护特性优越: ①由于 MOA 阀片具有优异的非线性伏安特性, 进一步降低其保护设备绝缘水平的潜力很大; ②它没有火花间隙, 一旦作用电压开始升高, 阀片立即开始吸收过电压的能量, 抑制过电压的发展; ③没有间隙的放电时延, 因而有良好的陡波响应特性, 特别适合于伏秒特性十分平坦的 SF<sub>6</sub> 组合电器和气体绝缘变电所的保护。

(3) 无续流、动作负载轻、能重复动作实施保护: MOA 续流仅为微安级, 实际上可认为无续流, 所以在雷电或内部过电压作用下, 只需吸收过电压的能量, 而不需吸收续流能量, 因而动作负载轻; 再加上 MOA 阀片的通流容量远大于 SiC 阀片, 所以 MOA 具有耐受多重雷击和重复发生的操作过电压的能力, 值得应用。

(4) 通流容量大, 能制成重载避雷器: MOA 的通流能力, 完全不受串联间隙被灼伤的制约, 仅与阀片本身的通流能力有关。实测表明: MOA 阀片单位面积的通流能力要比 SiC 阀片大 4~4.5 倍, 因而可以用来对内部过电压进行保护, 还可很容易地采用多阀片柱并联的办法进一步增大通流容量, 制造出用于

收稿日期: 2006-07-26

作者简介: 马春华(1974-), 男, 山西省晋城市人, 工程师, 从事电气工程及其自动化的研究。

特殊保护对象的重载避雷器,解决长电缆系统、大容量电容器组等的保护问题。

(5)耐污性能好:这种避雷器可避免因瓷套表面不均匀染污使串联火花间隙放电电压不稳定问题,即具有极强的耐污性能,有利于制造耐污型和带电清洗型避雷器。

线路氧化锌避雷器从结构上可分为两种:无间隙和带串联间隙。

无间隙 MOA 采用了非线性伏安特性十分优良的氧化锌电阻片,陡波、雷电波、操作波下的保护特性与传统的碳化硅避雷器相比均有显著改善。实际通常采用带串联间隙避雷器,因为串联间隙的隔离作用,避雷器本体部分(即装有电阻片的部分)基本上不承担系统运行电压,可以不考虑长期运行电压下的电老化问题,且本体部分的故障不会对线路的正常运行产生隐患。其保护原理见图 1,重点针对带串联间隙避雷器进行论述。

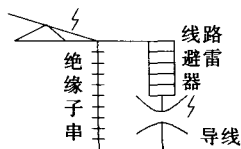


图 1 线路避雷器保护绝缘子串原理图

为了保证避雷器动作的可靠性,其雷电冲击 50%放电电压应低于被保护绝缘子串的雷电冲击 50%闪络电压,二者应进行合理的配合。

## 2 分析计算

一般认为,对于自恢复绝缘的破坏性放电,其放电电压服从正态分布<sup>[1]</sup>,在雷电冲击下,放电电压为  $U \sim N(U_{50}, \sigma^2)$ 。空气间隙雷电冲击击穿电压分散性比较小,击穿电压的标准偏差可取为 3%,即  $\sigma = 3\% U_{50}$ 。对于绝缘子串:

$$U_1 \sim N(U_{150}, 0.03^2 U_{150}^2) \quad (1)$$

式(1)中: $U_1$ 为绝缘子串的闪络电压, $U_{150}$ 为绝缘子串的 50%闪络电压。对于线路避雷器:

$$U_M \sim N(U_{M50}, 0.03^2 U_{M50}^2) \quad (2)$$

式(2)中: $U_M$ 为避雷器的放电电压; $U_{M50}$ 为避雷器的 50%放电电压。

当线路遭受到雷击时,若  $U_M < U_1$ ,则避雷器动作,将雷电能量通过避雷器释放掉,绝缘子串免遭闪络,保护有效;反之,若  $U_M > U_1$ ,则保护失效。设  $U_M, U_1$  相互独立,则:

$$U_M - U_1 \sim (U_{M50} - U_{150}, 0.03^2 U_{M50}^2 + 0.03^2 U_{150}^2) \quad (3)$$

$$\text{令: } t = U_M - U_1$$

$$U_{M50} = k U_{150} \quad (0 < k < 1)$$

则由式(3)可得:

$$t \sim N[(k-1)U_{150}, 0.03^2(k^2+1)U_{150}^2] \quad (4)$$

对式(4)进行标准化,令:

$$Z = \frac{t - (k-1)U_{150}}{0.03 \sqrt{k^2+1} U_{150}}$$

则  $Z$  服从标准正态分布,即  $Z \sim N(0, 1)$ ; 当  $U_M > U_1$  时,保护失效,其概率为:

$$P(U_M > U_1) = P(t > 0) = P(Z > \frac{1-k}{0.03 \sqrt{k^2+1}}) \quad (5)$$

当  $U_{M50} < U_{150} 10\%$  时,  $k = 0.9$ , ( $k$  为 MOA 的 50% 放电电压与绝缘子串的 50% 闪络电压之比) 利用式(5),查标准正态分布表得到:

$$P(U_M > U_1) = P(Z > 2.47) = 0.676\%$$

同理,可得到表 1。

表 1  $k$  值与保护效果

$k$	有效率/%	失效率/%
0.90	99.324	0.676
0.89	99.683	0.317
0.88	99.865	0.135
0.87	99.944	0.056
0.86	99.979	0.021
0.85	99.993	0.007

由表 1 可知,当要求保护有效性超过 99.99% 时,  $U_{M50}$  应低于  $0.85 U_{150}$ 。

## 3 金属氧化物避雷器本体的基本参数

避雷器本体的基本参数包括额定电压  $U_R$ , 直流电流  $I_{mA}$  和参考电压  $U_{1mA}$  等。避雷器本体直流电流  $I_{mA}$  和参考电压  $U_{1mA}$  涉及到避雷器过电压耐受能力。

电力系统中,由于单相接地、突然甩负荷、长线效应及其它原因会产生工频过电压,如果健全相遭雷击而使避雷器放电(串联间隙击穿),则避雷器会承受工频过电压负载。工频过电压常常发生在操作过电压之后,使得避雷器在承受工频过电压前,吸收了初始操作过电压能量,这部分初始能量加上工频过电压能量,都作用于避雷器上,避雷器必须具备耐受这种工频过电压并保持热稳定的能力。在工频过电压下,避雷器的能量损耗可用式(6)来计算<sup>[2-3]</sup>。

$$\text{避雷器的伏安特性方程: } I = K U^a \quad (6)$$

式中: $K, a$ 是与材料有关的常数。设作用于避雷器的工频过电压  $u = U_M \sin \omega t$ , 流过避雷器的电流:

$$i_R = K (U_M \sin \omega t)^a = I_M \sin^a \omega t$$

避雷器上的功率损耗:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i_R dt = \frac{U_M I_M}{T} \int_0^T \sin^{1+a} \omega t dt$$

在工频过电压持续时间  $t$  内, 避雷器上的能量损耗  $W = P t$ , 此能量转换成热量, 使得避雷器电阻片上的温度升高, 考虑到电阻片周围是环氧管和硅橡胶等复合材料介质, 可按绝热过程计算, 其温升可用式(7)求得:

$$\Delta T = \frac{W}{\rho V c} \quad (7)$$

式中: $\rho$ 为电阻片的密度,单位  $\text{kg/m}^3$ ; (下转第 73 页)

与线路零序电流的相轨迹所占矩形面积大小,实现小电流单相接地故障选线,选线结果正确。与其它各种选线方法相比,相轨迹的方法计算简单,适用范围广,有效性高。该方法适用于各种接地故障,如最难判断的间歇性弧光接地故障的选线问题及中性点经消弧线圈接地时系统单相接地故障的检测与选线问题。该方法还需要在工程应用中进一步改进和完善。

## 参考文献:

- [1] David L Swindler. Elegend Ground-fault Solutions for Impossible Problems [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(1): 117-128.
- [2] John Dagenhart. The 40-Ω Ground-fault Phenomenon [J]. IEEE Trans. on Industry Applications. 2001, 36(1): 30-32.
- [3] Peter E Sutherland. Applying CTs with Digital Ground Relays [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001: 71-79.
- [4] Jovan M Nahman, Vladimir B Djordjevic, Dragutin D Salamon. Grounding Effects of HV and MV Underground Cables Associated with Urban Distribution[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 111-116.
- [5] John P Nelson. System Grounding and Ground-fault Protection in the Petrochemical Industry: A Need for a Better Understanding [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2002, 38(6): 1 633-1 640.
- [6] 曾祥君,尹项根,张哲,等.零序导纳法馈线接地保护的

- 研究[J].中国电机工程学报,2001,21(4):5-9.
- [7] ZHANG Qing-chao, ZHANG Yao, SONG Wennan. Transmission Line Fault Location for Single-phase-to-earth Fault On Non-direct-ground Neutral System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 1998, 13(4): 1 086-1 092.
- [8] Oinis Chaari, Michiel Meunier, Francoise Brouaye. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(3): 1 301-1 308.
- [9] ZENG Xiang-Jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. A Novel Technique for Measuring Grounding Capacitance and Grounding Fault Resistance in Ineffectively Grounded Systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 72-73.
- [10] ZHANG Yao, ZHANG Qing-chao, Wennan Song. Transmission Line Fault Location for Double Phase-to-earth Fault on Non-direct-ground Neutral System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(2): 520-524.
- [11] 王耀南,霍百林,王辉,等.基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据 [J].中国电机工程学报,2004,24(6): 54-58.
- [12] 李孟秋,王耀南,王辉,等.小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究 [J].中国电机工程学报,2001,21(10): 6-9.
- [13] 贾清泉,杨奇逊,杨以涵.基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合 [J].中国电机工程学报,2003,23(12): 6-11.
- [14] 贾清泉,杨以涵,杨奇逊.应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护[J].电力系统自动化,2003,27(21): 35-38.

(上接第69页)

$V$ 为电阻片的体积,单位 $\text{m}^3$ ;  $c$ 为电阻片的比热容,单位约 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ; MOA非线性电阻片具有较大的比热容,约 $29.9\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

当持续时间 $t$ 一定时,避雷器所吸收的能量取决于工频过电压幅值和 $U_{\text{ImA}}$ ,它们之间的关系可用经验公式表示为:

$$E^b = A U_T / U_{\text{ImA}} \quad (8)$$

式(8)中: $b$ 和 $A$ 均为常数; $E$ 为避雷器所吸收的能量; $U_T$ 为工频过电压幅值。

由式(8)可知,当 $U_T$ 相同时,避雷器 $U_{\text{ImA}}$ 越高,避雷器所吸收的热能量越少,避雷器对工频过电压耐受能力将更强,因避雷器的残压远小于绝缘子串的50%闪络电压,故提高 $U_{\text{ImA}}$ 不会影响其保护性能。 $U_{\text{ImA}}$ 越高,过电压通过避雷器后,其串联间隙通过的工频续流越小,避雷器越容易熄弧。

选取避雷器额定电压的原则是:避雷器的额定电压必须大于避雷器安装可能出现的最高工频过电压<sup>[4-5]</sup>。对于110 kV线路,工频过电压一般不超过1.3 p.u., $U_R$ 大于94.6 kV,通常取96 kV;对于220 kV线路,工频过电压一般也不超过1.3 p.u., $U_R$ 取192 kV。 $U_R$ 随系统实际情况调整。 $U_{\text{ImA}}$ 的值应大于额定电压的峰值,对于126 kV避雷器, $U_{\text{ImA}}$ 的值应大于140 kV;对于252 kV避雷器, $U_{\text{ImA}}$ 的值应大于280 kV。

## 4 结论

(1) MOA起始动作电压十分稳定,几乎无续流,且通流容量较大,能对内部过电压实施保护,应用场合广泛。

(2) 应用MOA防雷保护时,当要求保护有效性超过99.99%时, $U_{\text{M50}}$ 应低于 $0.85U_{150}$ 。

(3) 应以避雷器和绝缘子串的伏秒特性进行研究,并使两者相互配合,以便全面反映避雷器的保护特性。避雷器在工频过电压下不应动作,必要时对其可能吸收的能量进行校核,确保过电压通过避雷器后,其串联间隙能够可靠熄弧,以使避雷器能有效地发挥防雷作用。

## 参考文献:

- [1] 袁荫棠. 概率论与数理统计[M]. 北京:中国人民大学出版社,1989.
- [2] 吴维韩,何金良. 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.
- [3] 邱毓昌. 高电压工程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.
- [4] GB/T 311.1~311.6-1983. 高压输变电设备的绝缘配合高电压试验技术[S]. 北京:中国标准出版社,1985.
- [5] DL/T 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,1997.