

文章编号:1671-251X(2014)02-0058-05

DOI:

周易龙,熊家伟,邓杰文,等.某煤矿通风机站直配线路防雷保护方法研究[J].工矿自动化,2014,40(2):58-62.

某煤矿通风机站直配线路防雷保护方法研究

周易龙¹, 熊家伟², 邓杰文¹, 赵宪¹, 阳萍华³, 童年¹

(1.长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410076;

2.五凌电力有限公司 托口水电厂,湖南 怀化 418106;

3.中国水电工程顾问集团有限公司 中南勘测设计研究院,湖南 长沙 410014)

摘要:针对直配线路上的旋转电动机易受雷击损坏的问题,分析了某煤矿通风机站直配线路的防雷保护现状及存在的问题,指出直配线路仅依靠避雷器的保护是不够的,旋转电动机的防雷保护应考虑主绝缘、匝间绝缘和中性点绝缘的保护要求;提出了一种安全可靠的防雷保护方法,即在直配线路母线侧避雷器端并联电容、电缆进线端串联电抗的方法,并分别从旋转电动机主绝缘、匝间绝缘和感应雷过电压防护等方面进行效果分析。仿真结果表明,该防雷保护方法能有效限制雷电侵入波的陡度和幅值。

关键词:直配线路;旋转电动机;防雷保护;绝缘;避雷器;感应雷过电压

中图分类号:TD611.5 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Research of lightning protection method of direct distribution line of
ventilator station of a coal mine

ZHOU Yilong¹, XIONG Jiawei², DENG Jiewen¹, ZHAO Xian¹,
YANG Pinghua³, TONG Nian¹

(1.College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 2.Tuokou Hydroelectric Power Station, Wuling Power Corporation, Huaihua 418106, China; 3.Mid-South Design and Research Institute, HydroChina Corporation, Changsha 410014, China)

Abstract: In view of problem that rotary motor of direct distribution line is easy to be damaged by lightning, the paper analyzed status of lightning protection of direct distribution line of ventilator station of a coal mine and its problems, indicated that the direct distribution line only depends on protection of arrester is inadequate, the lightning protection of the rotary motor should consider protection requirements of main insulation, turn-to-turn insulation and neutral-point insulation. It proposed a safe and reliable lightning protection method, namely the method parallels capacitor in arrester end of bus side and series reactance in incoming end of cable for the direct distribution line, and made effect analysis for the lightning protection method from main insulation, turn-to-turn insulation and prevention of lighting induced voltage of the rotary motor. The simulation result shows that the lightning protection method can effectively limit gradient and amplitude of incoming lightning.

Key words: direct distribution line; rotary motor; lightning protection; insulation; arrester; lighting induced voltage

收稿日期:2013-06-19;修回日期:2013-12-16。

作者简介:周易龙(1984—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为配电网技术、电力系统过电压及其保护,E-mail:39971028@qq.com。

0 引言

中国北方煤炭资源丰富,建有许多煤矿企业,由于煤矿企业生产的特殊性,6~10 kV 直配线路应用广泛,且大多位于雷电活动频繁的山区;由于工艺、结构及运行方面的特点,旋转电动机冲击耐雷水平低,若不采取有效措施,直接从线路入侵的雷电波将会对旋转电动机的主绝缘、匝间绝缘等构成威胁,旋转电动机一旦遭雷击损坏,不仅维修周期长,而且还严重威胁到井下人员的生命安全^[1-3]。鉴此,本文分析和研究了煤矿通风机站直配线路目前的防雷措施和现状,探讨了安全可靠的防雷保护措施。

1 通风机站直配线路防雷保护现状与防雷弱点分析

煤矿企业拥有自己的电力自供区,直配线路的运行和维护归煤矿企业或集团内部供电分公司负责,相对来讲没有电网那么规范。笔者调查了山西某煤矿若干通风机站直配线路,这些线路大多是 35 kV线路架设,但以 6 kV 电压运行,架空线路采用 p20 绝缘子,这样架空线路的全波雷电冲击放电电压在 180 kV 左右,远高于 6 kV 通风机站旋转电动机的耐雷水平。由此可见,线路上的雷电过电压无法在线路上释放,造成入侵到旋转电动机的雷电过电压过高。通过现场调研发现该煤矿直配线路一般采取如图 1 和图 2 所示的 2 种防雷保护接线:旋

转电动机直接与架空线路相连;旋转电动机通过三相电缆与架空线路相连(图中 MOA 为金属氧化物避雷器)。

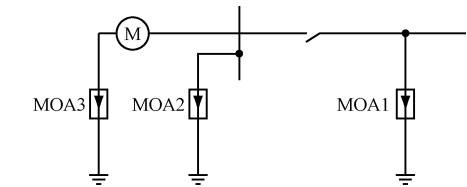


图 1 旋转电动机直接与架空线路相连

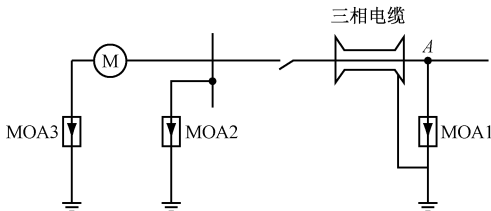


图 2 旋转电动机通过三相电缆与架空线路相连

旋转电动机具有高速旋转的转子,只能采用固体介质,而不能象变压器那样可以采用固体-液体(变压器油)介质组合绝缘,其额定电压、绝缘水平都不可能太高;旋转电动机在运行过程中又容易发生局部放电,导致绝缘劣化;旋转电动机绝缘结构的电场比较均匀,其冲击系数接近于 1,因而在雷电过电压下的电气强度是最薄弱的一环,在同一电压等级的电气设备中,以旋转电动机的冲击电气强度为最低。表 1 列出了旋转电动机主绝缘的出厂耐压值与相同电压等级的变压器出厂耐压值的比较^[4-5]。

表 1 旋转电动机主绝缘的出厂耐压值与相同电压等级的变压器出厂耐压值的比较

旋转电动机额定电压 U_e /kV	旋转电动机出厂工频试验电压/kV	旋转电动机出厂冲击耐压估计值/kV	旋转电动机运行中交流耐压值/kV	同级变压器出厂冲击试验电压/kV	ZnO 避雷器 3 kA 残压值/kV
6.3	10 MW 以下: $2U_e+1$	19.2	13.4	60	15.8
	10 MW 及以上: $2.5U_e$	22.3			
10.5	$2U_e+3$	34.0	22.3	80	26.0

从表 1 可看出,旋转电动机的冲击耐压值只有变压器的 1/3 左右,煤矿通风机站的旋转电动机容量一般在 10 MW 以下,保护旋转电动机用的 ZnO 避雷器残压值和旋转电动机的冲击耐压值比较接近,裕度较小,因此,旋转电动机只靠避雷器保护是不够的,还必须与电容、电抗、电缆等配合来进行保护;同时还需采取进线段保护措施,以限制通过避雷器的电流,使其小于 3 kA。此外,要严格限制匝间绝缘侵入波的陡度,因为旋转电动机的匝间电容很小和不连续,迫使过电压进入旋转电动机绕组后只能沿着绕组导体传播,而旋转电动机每匝绕组的长

度又远比变压器绕组大,作用在相邻两匝间的过电压与侵入波的陡度成正比,为了保护旋转电动机的匝间绝缘,必须严格限制侵入波陡度^[4]。综上所述,旋转电动机的防雷保护应全面考虑绕组的主绝缘、匝间绝缘和中性点绝缘的保护要求。

图 1 的保护方式仅在线路进线段装了一组配电型 ZnO 避雷器限制侵入波陡度,旋转电动机母线上仅装了一组旋转电动机用 ZnO 避雷器,没有并联电容,不能限制侵入波的陡度及有效地限制感应雷过电压,且大多数通风机站位于半山腰上,线路铁塔及避雷器接地装置不合格,接地体表面锈蚀严重,接

地电阻高达 $20\ \Omega$ 以上,会造成避雷器放电残压过大进而对旋转电动机绝缘构成威胁。

图 2 的保护方式较图 1 增加了电缆段,电缆段的作用在于电缆外皮的分流效应,其简化的等值电路如图 3 所示。当侵入波到达 A 点后,MOA1 动作,电缆芯线与外皮短接,此时电压降 iR_1 同时加在电缆芯线和外皮上,由于雷电流的等值频率较高,电缆芯线与外皮为同心圆柱体,其间的互感 L_m 就等于电缆外皮的自感 L_1 。当电缆外皮流过电流 i_1 时,电缆芯线同时会产生反电动势 $L_m \frac{di_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt}$,产生的反电动势阻止沿电缆芯线流向旋转电动机的电流 i_2 ,使绝大部分雷电流都从电缆外皮流走,减少电缆芯线的电流也就减少了流入避雷器的电流,因而能使残压降低^[6-7]。

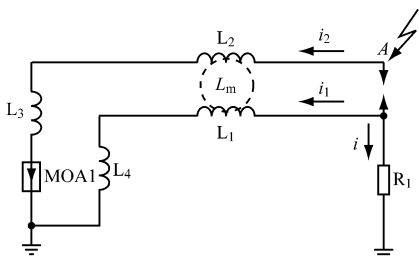


图 3 避雷器动作后电缆的分流作用等值电路

但是该种保护方式电缆的限流作用是以电缆前端配电型 MOA1 动作为前提的,电缆的波阻抗远低于架空线路,由于波阻抗的不连续性,雷电侵入波到达电缆首端 A 点后会发生负反射,使电缆首端 A 点的电压降低,MOA1 可能不动作,从而失去电缆的保护作用,这是该保护方式的弱点。

2 通风电站直配线路防雷保护方法

为有效地保护旋转电动机主绝缘、匝间绝缘,限制入侵到旋转电动机母线的雷电波陡度和幅值及操作过电压,笔者提出了一种安全可靠的防雷保护方法,即对直配线路采用母线并联电容、电缆进线端避雷器与电缆段之间串联电抗的一种防雷保护方法,其等值电路如图 4 所示。

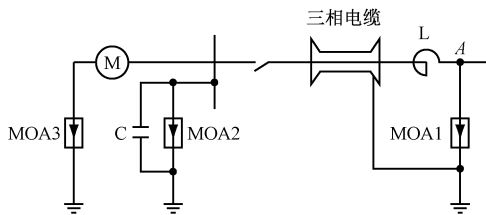


图 4 直配线路母线并联电容及电缆进线端串联电抗的等值电路

该保护方法在旋转电动机母线避雷器上并联一

组电容,电容的容量一般选择每相 $0.25 \sim 0.5\ \mu\text{F}$,同时将避雷器 MOA1 与电缆之间串联一电抗 L 配合终端塔避雷器进行防雷保护,同时其接地阻抗降到 $10\ \Omega$ 以下。下面分别从主绝缘保护、匝间绝缘保护和感应雷过电压防护 3 个方面分析该保护方法的防雷效果。

2.1 主绝缘保护

直接威胁到旋转电动机主绝缘的是侵入波的幅值,在旋转电动机母线上装设 ZnO 避雷器,以限制侵入波幅值。电抗 L 的主要作用是当雷电波沿线路到达电抗线圈时,由于电抗中的电流不能突变,将发生正的反射,使侵入波的陡度和幅值都得到有效削减^[8]。同时电抗对侵入波的正反射波使 MOA1 动作^[9-12],将雷电流大部分泄入大地,保证了流经旋转电动机处避雷器的雷电流不超过 $3\ \text{kA}$,进而消除了侵入波对旋转电动机主绝缘的威胁,提高了高压旋转电动机的耐雷水平。

2.2 匝间绝缘保护

旋转电动机绕组匝间电压与侵入波的陡度直接相关,因此,在旋转电动机母线上并联电容 C 以限制侵入波的陡度来达到保护匝间绝缘的目的。

如图 5 所示,当直角波 U_0 从 E_1 端入侵时,将会在节点 B 上产生折射和反射,其等值电路如图 6 所示。

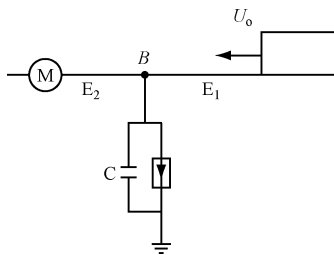


图 5 雷电波入侵旋转电动机母线并联电容电路

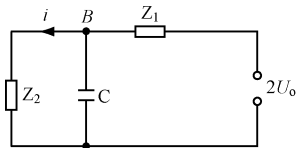


图 6 雷电波入侵旋转电动机母线并联电容等值电路
由图 6 可得

$$2U_0 = u_c + iZ_1 = u_c + \left(\frac{u_c}{Z_2} + C \frac{du_c}{dt} \right) Z_1 = CZ_1 \frac{du_c}{dt} + u_c \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \quad (1)$$

式中: u_c 为电容 C 两端电压; i 为侵入波电流; Z_1 、 Z_2 为波阻抗; t 为雷电波入侵时间。

简化式(1)可得

$$\alpha U_0 = T \frac{du_c}{dt} + u_c \quad (2)$$

式中: α 为折射系数, $\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$; T 为电路时间常数, $T = \frac{CZ_1Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 。

则式(2)的解为

$$u_c = \alpha U_0 [1 - \exp(t/T)] \quad (3)$$

由式(3)可知, 旋转电动机母线上的冲击电压按指数曲线上升, 当 $t=0$ 时, $u_c=0$, 这是因为侵入波传到电容 C 上的一瞬间, 由于电容 C 两端的电压 u_c 不能突变, 而在雷电波到达之前, u_c 等于 0, 即相当于电容 C 短路, B 点的电压突然下降到零, 波首上的电能全部转变为磁能, 随着电容 C 的充电, 电压逐渐上升。当 $t \gg T$ 时, u_c 的极限值为

$$u_{c\max} = \alpha U_0 = \frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

u_c 的最大陡度为

$$\left(\frac{du_c}{dt} \right)_{\max} = \alpha \frac{U_0}{T} = \frac{2U_0}{CZ_1} \quad (5)$$

从式(5)可看出, 并联电容 C 的作用是通过加大时间常数 T 来减少侵入波的陡度。当侵入波的波长时间小于时间常数 T 时, 并联电容 C 不仅能使 B 点后面线路上旋转电动机所受电压陡度降低, 并可使其幅度减小, 再加上避雷器限制侵入波幅值与母线防雷措施配合, 对旋转电动机能起到很好的保护作用。

2.3 感应雷过电压防护

6~10 kV 线路所受雷电危害基本上是感应雷过电压, 感应雷过电压严重威胁旋转电动机绕组的绝缘, 架设避雷线和避雷针等直击雷防护措施对防止感应雷过电压作用有限, 在相同感应电荷条件下, 如增加导线对地电容, 则可在一定程度上降低感应雷过电压。

假设侵入波所占据的直配线路对地电容为 C_1 , 感应电荷为 Q , 旋转电动机母线未加电容时, 线路上的感应雷过电压为 U_{g1} , 加装保护电容 C 后的感应雷过电压 U_g 为

$$U_g = \frac{Q}{C + C_1} = U_{g1} \frac{C_1}{C + C_1} \quad (6)$$

式(6)表明, 适当地选择保护电容 C 的大小, 可使感应雷过电压降低到对旋转电动机绝缘无损害的程度。

3 ATP-EMTP 仿真分析

运用电磁暂态程序 ATP-EMTP (Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program) 对直配线路单相遭受雷击时的过电压情况进行仿真, 仿真线路串联电抗及母线避雷器两端并联电容的防雷效果。忽略电缆及旋转电动机的相关参数, 雷电流幅值为 6 kA, 波形为标准波形 2.6/50 μ s, 线路实际参数选取 ATP 中的 LCC 模型^[2], 如图 7 所示。仿真结果如图 8 所示。

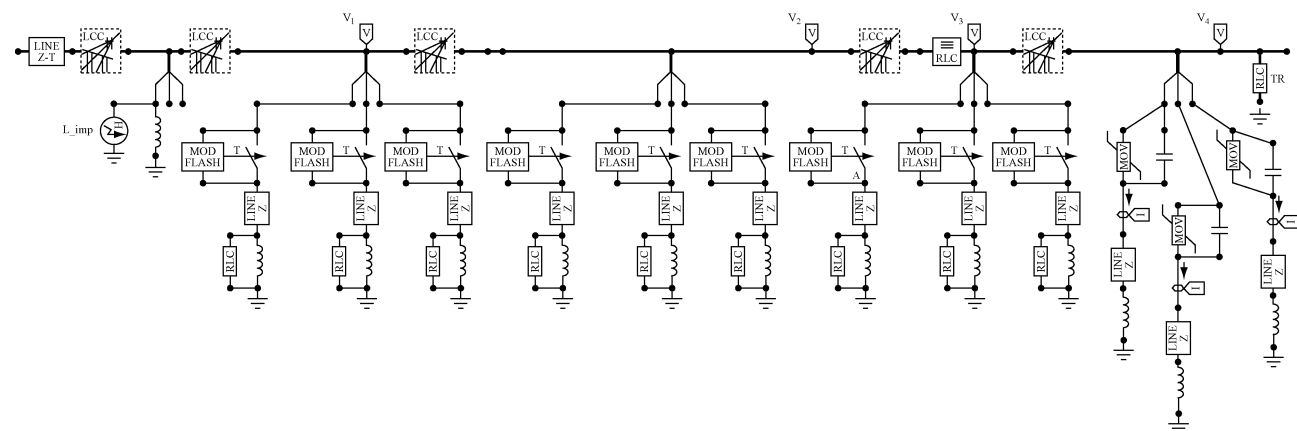
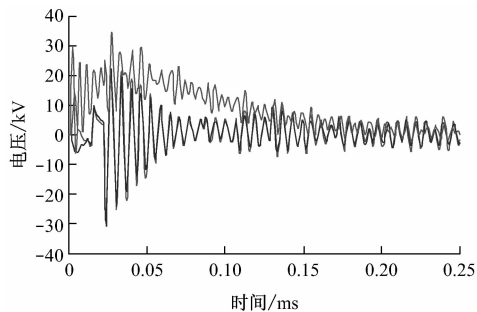


图 7 雷电波入侵旋转电动机仿真模型

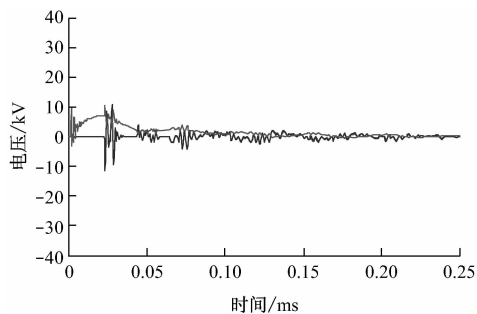
从图 8 可看出, 加装电容、电抗后的旋转电动机感应雷过电压波形幅值降低, 波形变得平坦, 因此, 在直配线路母线侧避雷器端并联电容及电缆前端串联电抗能有效限制侵入波的陡度和幅值。

4 结语

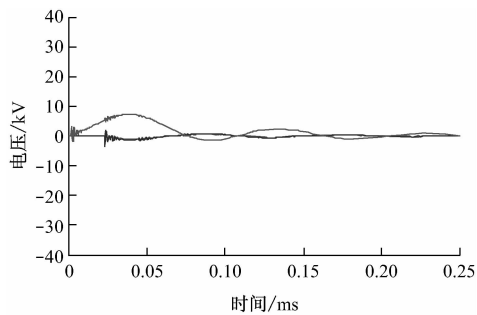
煤矿通风机站直配线路仅单独依靠避雷器的保护是不够的, 旋转电动机保护必须与电容、电抗、电缆段等配合来进行, 在直配线路母线侧安装避雷器



(a) 未加电容、电抗前波形



(b) 仅加电容后波形



(c) 加电容、电抗后波形

图 8 旋转电动机感应雷过电压波形

的基础上需并联电容才能有效限制雷电侵入波的陡度及感应雷过电压;电缆进线段串联电抗能限制雷电侵入波的陡度,提高了直配线路的耐雷水平。建

议相关企业每年应按照 GB 11032—2010《交流无间隙金属氧化物避雷器》对避雷器进行预防性检查试验,不合格者应立即更换;接地阻抗试验每年要认真进行,线路杆塔接地阻抗应限制在 $10\ \Omega$ 以下。

参考文献:

- [1] 许衡,陶凤源,任文斌,等.某煤矿输电线路防雷改造[J].工矿自动化,2012,38(8):138-141.
- [2] 邓杰文,任文斌,刘源,等.煤矿 35 kV 线路防雷保护间隙的研究[J].工矿自动化,2013,39(1):105-109.
- [3] 刘源,彭利强,王伟平,等.配电网架空线路并联可调间隙保护装置研究[J].高压电器,2011,47(4):47-51.
- [4] 谭琼,李景禄,李志强,等.山区电网防雷技术[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [5] 李景禄.现代防雷技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [6] 满超楠,杨帅峥,周琳,等.基于保护间隙的配电网差异性综合防雷保护[J].电瓷避雷器,2013(1):64-67.
- [7] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [8] 李景禄.中小型水力发电厂直配线路防雷保护研究[J].电瓷避雷器,2004(1):33-35.
- [9] 张纬钹,何金良,高玉明.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [10] 李景禄,刘春生.配电网频发故障的原因分析及整改措施[J].高电压技术,1995,21(1):37-39.
- [11] 陈智,陶凤源,周锋,等.某 35 kV 配电架空线路防雷保护装置应用研究[J].电瓷避雷器,2011(6):46-49.
- [12] 邓杰文,任文斌,张东,等.某矿区瓦斯电厂 35 kV 进线遭受雷击事故分析与防雷措施研究[J].电瓷避雷器,2012(6):81-85.