

Discussion on Circulation Control Standard of Metal Shield Layer in 110 - 220 kV Power Cable

Weijun Sun

State Grid Xiaogan Power Supply Company, Xiaogan
Email: 179168517@qq.com

Received: Oct. 30th, 2013; revised: Nov. 13th, 2013; accepted: Nov. 18th, 2013

Copyright © 2013 Weijun Sun. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Weijun Sun. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Based on calculations of induced voltage and circulation of metal shield layer in cable, regarding different grounding modes and different arrangement, the influence of various factors on circulation is investigated. The reference values of circulation control standard in metal shield layer are given, according to operation status of high voltage power cables of 110 kV or above in Hubei province.

Keywords: Cable; Metal Shielding Layer; Circulation; Control Standard

110~220 kV 电力电缆金属屏蔽层环流控制标准的探讨

孙伟君

国网孝感供电公司, 孝感
Email: 179168517@qq.com

收稿日期: 2013年10月30日; 修回日期: 2013年11月13日; 录用日期: 2013年11月18日

摘要: 根据对不同金属屏蔽层接地方式、不同敷设排列方式情况下的电缆金属屏蔽层感应电压及环流的计算, 分析各种影响因素对环流值大小的影响, 结合湖北地区 110 kV 及以上高压电力电缆运行现状, 给出金属屏蔽层环流控制标准的参考值。

关键词: 电缆; 金属屏蔽层; 环流; 控制标准

1. 引言

单芯电力电缆金属屏蔽层环流是金属护层感应电压在金属护层与大地构成的回路中产生的电流, 其大小体现了电缆外护层绝缘状况及设计的合理性^[1]。对运行中的电缆测量金属屏蔽层环流是带电情况下检测电缆运行状况较为简便、有效的途径^[1-5]。

实际中对环流的检测情况显示: 电缆分段长度、屏蔽层接地方式、电缆排列、外护层绝缘状况、接地电阻等因素对测量值都有影响。对于一条运行中的电

缆线路, 护层环流值很小, 则电缆运行是正常、安全的; 值很大, 不仅会增大线路损耗、降低电缆载流量, 还可能会导致一些因过热导致的安全事故^[2]。所以, 对环流的检测、分析、判断是电缆运行人员应该注意的问题。

理论上讲, 通过各种金属护层接地方式的应用, 可以将护层感应电压降低到运行标准之下, 从而也可将护层环流限制在较小数值。然而对于运行若干年后的电缆, 由于各种原因可能导致环流值增大。目前,

国内几个大城市对电缆护层环流的控制标准为：上海、广州 10%、北京 15%、湖北 20%。

笔者认为：在对屏蔽层感应电压及电流的产生机理进行计算的基础上，结合湖北地区电缆运行状况，对各种情况下的环流值进行综合分析，是确定湖北地区电力电缆环流控制标准最佳值的可能途径。

2. 感应电压及环流的理论计算及分析

由三根单芯电缆组成的交流电缆线路，当导体中有电流通过时，与其平行的金属护套中将产生感应电压，感应电压大小和电缆的长度与流过的电流成正比，当电缆线路很长时，护套上的感应电压叠加起来可达到危害人生安全的程度；当线路不对称或发生短路故障时，护套上感应电压会达到很大的数值；当线路遭受操作过电压或雷击时，护套上感应电压也会达到很大的数值，将使护层绝缘击穿。如果像三芯电缆一样，两端金属护套都直接接地，金属护套中感应电压将形成以大地为回路的循环电流，这就在金属护套中产生电能损耗，并影响电缆线路输送容量^[3]。

2.1. 金属护套中感应电压的计算

电缆单位长度上护套(金属屏蔽层)中的感应电压为：

$$L_s = 2 \ln \frac{2S}{D_s} \times 10^{-7} \text{ H/m};$$

$$U_s = -jIX_s = -jI\omega L_s = -j2\omega I \ln \frac{2S}{D_s} \times 10^{-7} \text{ V/m}$$

$$\text{即 } U_s = 2\omega I \ln \frac{2S}{D_s} \times 10^{-7} \text{ V/m}$$

ω :电源的角频率

I :电缆的载流量

S :电缆排列的中心距离

D_s :电缆护套的平均直径

电缆单位长度上护套中感应的电压与单芯电缆的排列方式有关：

当电缆成品字形排列时(见图 1)

$$U_{s1} = -jI_1 X_s$$

$$U_{s2} = -jI_2 X_s$$

$$U_{s3} = -jI_3 X_s$$

$$X_s = 2\omega \ln \left(\frac{2S}{D_s} \right) \times 10^{-7} \text{ } \Omega/\text{m}$$

ω :电源的角频率

I :电缆的载流量

S :电缆排列的中心距离

D_s :电缆护套的平均直径

可见每相护套中感应电压基本相同。

当电缆成直线排列时(见图 2)。

$$U_{s1} = I_2 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (X_s + X_m) + \frac{1}{2} j (X_s - X_m) \right]$$

$$U_{s2} = -jI_2 X_s$$

$$U_{s3} = I_2 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (X_s + X_m) + \frac{1}{2} j (X_s - X_m) \right]$$

$$X_s = 2\omega \ln \left(\frac{2S}{D_s} \right) \times 10^{-7} \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$X_m = 2\omega \ln 2 \times 10^{-7} \text{ } \Omega/\text{m}$$

ω :电源的角频率

I :电缆的载流量

X_s :电缆自感感抗

X_m :电缆互感感抗

S :电缆排列的中心距离

D_s :电缆护套的平均直径

当电缆成直角等腰三角形排列时(见图 3)。

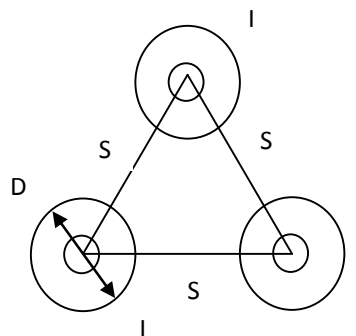


Figure 1. Triangular arrangement
图 1. 品字形排列

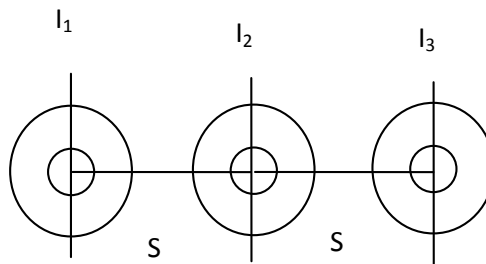


Figure 2. Straight-line arrangement
图 2. 直线排列

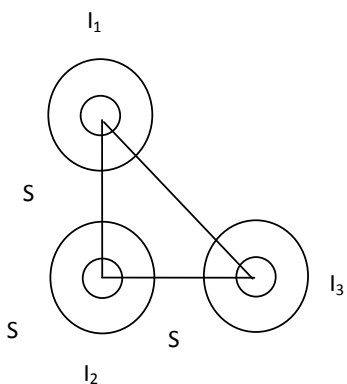


Figure 3. Right-angled isosceles triangular arrangement
图 3. 直角等腰三角形排列

$$U_{S1} = I_2 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \left(X_s + \frac{X_M}{2} \right) + \frac{1}{2} j \left(X_s - \frac{X_M}{2} \right) \right]$$

$$U_{S2} = -jI_2 X_s$$

$$U_{S3} = I_2 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \left(X_s + \frac{X_M}{2} \right) + \frac{1}{2} j \left(X_s - \frac{X_M}{2} \right) \right]$$

$$X_s = 2\omega \ln \left(\frac{2S}{D_s} \right) \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$$

$$X_M = 2\omega \ln 2 \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$$

ω : 电源的角频率

I : 电缆的载流量

X_s : 电缆自感感抗

X_m : 电缆互感感抗

S : 电缆排列的中心距离

D_s : 电缆护套的平均直径

由此可见：采用三相单芯等边敷设时，每相护套中感应电压基本相同，且其单相金属护套中感应的电压最小；采用直线水平排列敷设方式时，边相金属护

套中产生的电压最高。

为了人身和设备安全，在电缆金属护套(或屏蔽层)上，任一点非接地处的正常感应电压必须符合下列规定：

1) 在没有设置防止人员任意接触金属护套的安全措施情况下，正常满负荷时电缆金属护套的感应电压不得超过 50 V。

2) 在设置防止人员任意接触金属护套的安全措施情况下，正常满负荷时电缆金属护套感应电压不得超过 100 V。

2.2. 回路阻抗及接地电流分析

当前，110~220 kV 电力电缆金属屏蔽层接地方式主要有如下两种：一端接地和交叉互联接地。前者用于较短线路，后者用于较长线路，将电缆分为等长的若干段，每三段构成一个换位循环回路^[4]。现就两种接地方式下金属屏蔽层接地环流回路的阻抗特性分析如下：

在一端接地系统中(见图 4)。

其等值电路图为(见图 5)。

当金属屏蔽层一端接地时，单芯电缆的导体与金属护套之间形成以导体和金属护套为两级、XLPE 绝缘料为电介质的电容器，在交流电压作用下，产生电容电流 I_c 。

此时，金属屏蔽层接地电流回路阻抗为

$$Z = R_d + \frac{j}{\omega c}$$

Z : 回路阻抗

c : 电缆电容

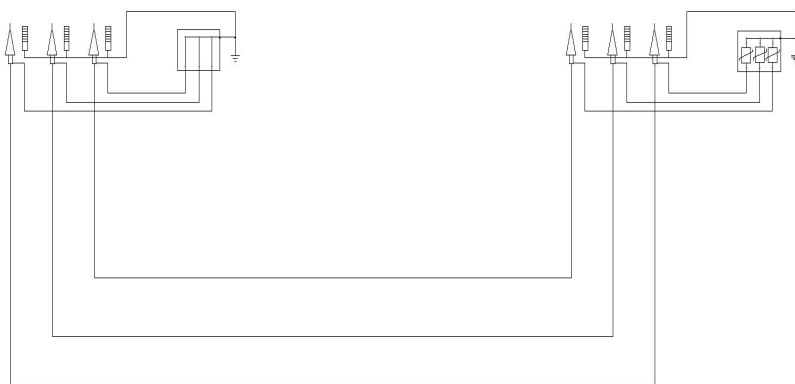


Figure 4. Cable metal sheath is connected to ground triangular
图 4. 电缆金属护层一端接地

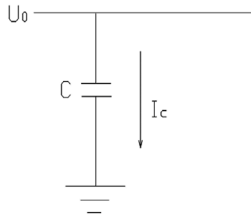


Figure 5. The equivalent circuit is connected to ground
图 5. 一端接地等值电路图

每相电缆的护套接地电流即电缆电容电流

$$I_c = \frac{U}{R_d + \frac{j}{\omega C}}$$

I_c : 电容电流
 U : 感应电压

由上公式可知：金属屏蔽层一端接地时，接地电流与电缆负荷电流无关，与电缆线芯电压成正比。在交叉互联接地方式中(见图 6)。

交叉互联接地方式时，在每一换位循环段内，暂不考虑电缆敷设排列方式对各项电缆护套感应电压的影响，各段金属护套感应电压相位互差 120° ，而幅值相等，因此在两个直接接地点之间的电位差为零，此时护套环流可能非常小(仅为少量电容电流)；如果由于其他段长分配不均、外护层绝缘不良、排列方式不对称等因素造成的感应电压合向量不为零，那么此时电缆金属屏蔽层的接地电流 I_d 将由金属护套感应电流 I_s 和电缆电容电流 I_c 两部分合成。

$$I_d = I_s + I_c$$

I_c : 电容电流
 I_s : 感应电流

其中，感应电流 I_s 回路阻抗为每一相电缆金属屏蔽层

环路交流电阻 R_s 、电抗 X_s 、大地的电阻 R_e 、电抗 X_e 串联而成。

$$Z = (R_s + R_e) + j(X_s + X_e)$$

R_s : 环路交流电阻
 X_s : 环路电抗
 R_e : 大地电阻
 X_e : 大地电抗

电容电流 I_c 回路阻抗仍为 $Z = R_d + j/\omega C$ ，那么此时每相电缆的护套接地电流

$$I_d = I_s + I_c = \frac{j(X_s + X_e)I}{(R_s + R_e) + j(X_s + X_e)} + \frac{U}{R_d + j/\omega C}$$

R_s : 环路交流电阻
 X_s : 环路电抗
 R_e : 大地电阻
 X_e : 大地电抗
 I : 电缆载流量
 U : 护层感应电压

因为电容电流相对较小，其中很大一部分又经交叉互联作用相互抵消，接地电流可近似看为感应电流，即

$$I_d = I_s = \frac{j(X_s + X_e)I}{(R_s + R_e) + j(X_s + X_e)}$$

R_s : 环路交流电阻
 X_s : 环路电抗
 R_e : 大地电阻
 X_e : 大地电抗
 I : 电缆载流量

由此可见：交叉互联直接接地点的接地环流与电缆线芯电压无关，而与电缆负荷电流成正比。

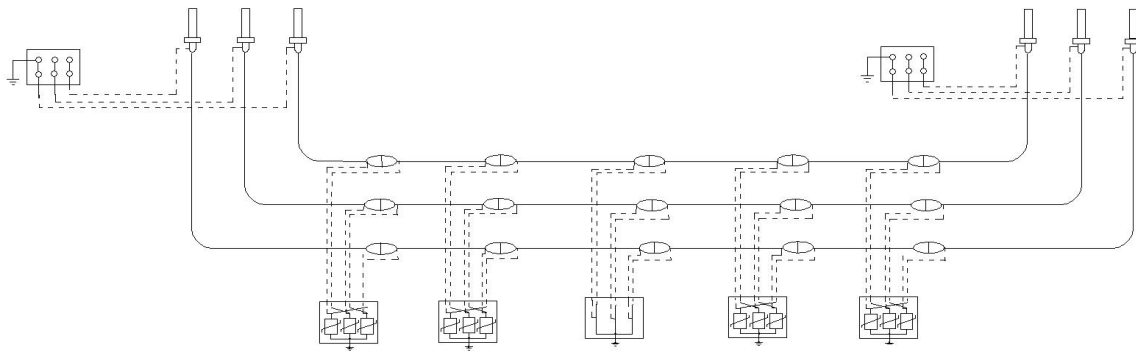


Figure 6. Cross connection mode
图 6. 交叉互联方式

2.3. 接地环流理论计算值与实测值比较分析

维护工作中,湖北公司积极组织了三中情况下的接地环流测量:1) 高负荷时期;2) 新线路投运后一个月内;3) 线路计划停电试验前一周内。测量地点均为直接接地点,测量仪器为钳形电流表。(表 1, 表 2)

通过上表,由计算值不难看出:在理论计算环境下,假设电缆外护层绝缘水平良好,不考虑敷设方式、分段长度及其他互感的影响,电缆金属屏蔽层的环流值应该很小(一般不会超过线芯电流的 4%),这也是电缆线路在设计阶段所想要达到的目的。

3. 护层环流测量值较理论值升高的原因

1) 电缆在正常情况下,护层环流的大小与电缆敷设排列方式、电缆分段长度及同通道敷设的其他电缆等因素的影响。

A、电缆敷设排列方式

由上述 2.1 可知,排列方式的不同决定着每相电

缆上的互感不一样,从而导致每相金属护套上的感应电压不一样。采用三相单芯等边敷设时,每相护套中感应电压基本相同,且其单相金属护套中感应的电压最小;采用直线水平排列敷设方式时,边相金属护套中产生的电压最高。感应电压高的势必接地电流就大^[5]。

B、电缆分段长度

交叉互联接地系统中,如果各段电缆分段长度不平均,长度差超过 100 米,三相金属屏蔽层换位后的感应电压合成向量将不为零,这是造成接地环流存在的主要原因。

C、同通道敷设的其他电缆影响

同通道敷设的其他电力电缆所产生的部分感应磁通将与目标电缆相耦合,造成目标电缆的互感感抗发生变化,从而导致接地环流发生变化;此外,地下各种杂散电流也会造成感应电流增大。

2) 电缆在非正常情况下,护层环流在以下情况下

Table 1. Circulation measured values

表 1. 环流实测值

接地方式	电压等级	线路名称	测量地点	环流值				时负荷电流	比值百分数 (最大相)
				A	B	C	总		
单端接地	110 kV	宗仁荣线仁变段	仁变 GIS 终端	2.5	2	3	1.8 A	106 A	2.8%
	220 kV	徐湾一回	1#下线塔	4	3.5	3.9	0.7 A	90 A	4.4%
	110 kV	英利太英变段	1#下线塔	3	8	1.9	2.5 A	120 A	6.7%
交叉互联接地	110 kV	钢铁台线	24#下线塔	2.2	0	0.8	0.5 A	80 A	2.7%
	220 kV	李民线	21#下线塔	6.4	2.5	7	5.6 A	100 A	6.4%
	110 kV	航营一回	营变 GIS 终端	9	12.5	6.2	2.9 A	118 A	10.1%

Table 2. Circulation calculation

表 2. 环流计算值

接地方式	电压等级	线路名称	计算方法	A	时负荷电流	比值百分数
单端接地	110 kV	宗仁荣线仁变段	线路长度: 180 m; 电缆型号: XLPE-110-1*400; 排列方式: 水平排列; 接地电阻 $R_d = 0.8$; 电缆电容 $C = 0.012 \mu\text{F}$; 感应电压 $U = 80 \text{ V}$ 回路阻抗 $Z = R_d + j1/\omega C = 0.3 \text{ M}\Omega$ 电容电流 $I_c = 80 \text{ V}/0.3 \text{ M} = 0.3 \text{ mA}$	0.3 mA	106 A	28 ppm
交叉互联接地	110 kV	钢铁台线	线路长度: 1605 米; 电缆型号: YJLW-110-1*800; 分段长度: 550 + 550 + 505; 排列方式: 水平排列; 接地电阻 $R_d = 1$; 电缆电容 $C = 0.057 \mu\text{F}$; 感应电压 $U = 38 \text{ V}$; 回路阻抗 $Z = (R_s + R_e) + j(X_s + X_e) = 18.7 \Omega$ 接地环流 $I_d = 2.03 \text{ A}$	2.03 A	80 A	2.5%

会升高:

A、金属护层接地接线错误

在单端接地系统中,若存在错误的两端接地,则在金属护套中产生的感应电压所形成的循环电流与电缆线芯中的负荷电流基本上是同一个数量级,其引起护套发热将降低电缆输送容量约 30%~40%。交叉互联接线中的接线错误将导致金属护套失去换位的作用,造成感应电压骤升,引起接地环流很大,发生象上述单端接地系统中类似的后果。

B、外护层绝缘降低

当电缆外护层绝缘降低,或最坏情况下形成完全接地,将导致一个新的接地点出现,该接地点通过大地与电缆其他直接接点构成回路,在感应电压作用下直接形成环流。交叉互联系统中的外护层接地,可看作电缆分段的平衡性被打破,感应电压不能抵消,或类似于护层接地接线错误。

C、护层保护器失效

护层保护器失效同样会形成接地,后果同上述。

4. 结论

综上所述,高压单芯电力电缆在正常运行情况下其金属屏蔽层将产生感应电压,感应电压在不同接地方式情况下将产生不同性质的环流。运行工作中可通过监测金属屏蔽环流来作为判断电缆运行状况的有力依据之一。

在目前湖北现有的 246 公里高压电缆线路中,采取水平敷设方式的约占 90%,同时,约有 96 公里为多回路共通道敷设,加之 10 kV 低压电缆的同通道运行,导致电缆间互感变化,地下杂散电流的影响,运行中电缆外护层绝缘水平可能不同程度的降低,这些因素都会造成电缆护层环流值较设计有升高现象。在校验金属屏蔽层通过环流时的热稳定性和造成的电缆输送容量降低的基础上,权衡安全与经济,可将武汉地区的电力电缆金属屏蔽层环流控制在负荷电流的 15%以内比较适宜。

本文在理论计算环节的结论数据稍有误差,其原因有三:一是电缆金属屏蔽层的感应电压计算没有考虑不同回路电缆间的感应影响;二是没有考虑地下杂散电流的影响;三是计算结果是基于电缆外护层绝缘状况绝对良好的情况下。

参考文献 (References)

- [1] Heinhold, L., Stubbe, R.(德) (2001) 电力电缆及电线. 中国电力出版社, 北京, 10, 12-13.
- [2] 李海帆 (2004) 电力电缆工程设计、安装、运行、检修技术实用手册. 当代中国音像出版社, 北京, 58-61.
- [3] 史传卿 (2002) 电力电缆. 中国电力出版社, 北京, 41-43.
- [4] 刘帆, 陈柏超, 卞利钢 (2003) 变电站二次电缆屏蔽层接地方式探讨. *电网技术*, 2, 22-24.
- [5] 王敏 (2002) 10 kV 单相电力电缆屏蔽层的感应电压和环流. *高电压技术*, 5, 4-6.