

高压电缆交叉互联金属护套环流影响因素分析及解决方法

郑大白¹, 刘哲², 王凤凯³

(1.南通茂联信息技术咨询有限公司,南通 226000; 2.中国电建集团河北省电力勘测设计研究院,石家庄 050031;
3.天津市泰达工程设计有限公司,天津 300457)

摘要:介绍了高压电缆线路采用金属护套交叉互联电缆本体不换位方式设计时金属护套接地环流的现状,以及国家电网公司和南方电网公司对于接地环流的技术要求。提出了接地环流产生的原理,结合部分电力公司的实际案例,指出了接地环流可能对高压电缆线路产生的潜在危害,分析了影响接地环流的若干因素,给出了在相应影响因素下接地环流值及负荷占比。针对影响环流的因素,提出了有效的解决措施和方法,为高压电缆线路使用交叉互联设计以及改造提供了技术支持。

关键词:高压电缆;交叉互联;接地环流;故障

中图分类号:TM247

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2022)01-0019-07

Analysis and Solution of Metal Sheath Ground Circulating Current in Cross Connection of High Voltage Cable

ZHENG Dabai¹, LIU Zhe², WANG Fengkai³

(1. Nantong Maolian Information Consulting Co., Ltd., Nantong 226000, China;
2. Power China Hebei Electric Power Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China;
3. Tianjin TEDA Engineering & Designing Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: The metal sheath grounding circulating situation was introduced when the high voltage cable line was designed in the mode of the non transposition cable body with the metal sheath cross interconnection, and the technical requirements of State Grid Corporation and Southern Power Grid Corporation for grounding circulating current. Then the principle of high voltage cable metal sheath grounding circulating current was proposed. Combined with the actual cases of the power company, it pointed out the potential harm of circulating current to high voltage cable line. Then the affecting factors about the circulating current was analyzed. The grounding circulating current value and load proportion under the corresponding influence factors were given. At last the solution ways of the circulating current were proposed. It provides guidance for the design of high voltage cable line.

Key words: high voltage cable; cross connection; ground circulating current; failure

0 引言

目前,随着城市电力需求的不断增加,以及城市电网入地改造不断进行,高压电缆的用量越来越大。但是,北京、上海、天津、广州等地运维部门在日常线路检修中发现,目前国内高压电缆交叉互联接地时都存在大小不一的环流,尤其是隧道中敷设的电缆,由于载流量较大,当线路满负荷运行时,很多线路接地环流都在几十安培以上,部分电缆线路环流甚至超过线芯负荷电流的50%~80%。接地环流对高压电缆影响很大,会产生大量热量,造成电缆温度升

高,从而减少线路的输送容量。另外,温度升高也会造成绝缘和外护套老化,甚至诱发电缆本体或附件热击穿,引起线路火灾等事故。

国家电网和南方电网对高压电缆金属护层接地环流有严格的要求。Q/GDW 11262—2014《电力电缆及通道检修规程》规定,高压电缆接地电流应不大于100 A,接地电流/线芯负荷应小于20%,单相接地电流最大值/最小值小于3且不应有明显变化。Q/CSG 1206007—2017《电力设备检修试验规程》规定,高压电缆接地电流不能超过电缆负荷的10%。

因此,本工作对高压电缆金属护套环流进行分析和监测,对高压电缆线路正常运行和维护,具有重大的意义。

收稿日期:2021-01-18

作者简介:郑大白(1983—),男,工程师。

E-mail:109247184@qq.com

1 高压电缆环流分析

1.1 高压电缆金属护套接地环流产生的机理

高压电缆一般为单芯电缆,高压电缆金属护套的接地方式主要有两端接地、单端接地、中点接地、分段单端接地和相间交叉互连接地^[1]。电缆线路的段长设计严格执行 GB/T 50217—2018 规定,电缆线路的正常感应电势最大值应满足以下规定^[2]:

- (1) 未采取能有效防止人员任意接触金属层的安全措施时,不得大于 50 V;
- (2) 除上述情况外,不得大于 300 V。

当电缆线路长度采用单点接地或中点接地、金属护套感应电压超过上述要求时,电缆线路设计一般采用交叉互联。这种方法是将电缆线路分成若干大段,每大段两侧采用金属护套直接接地,每大段原则上分成长度相等的三小段,每小段之间装设绝缘接头。绝缘接头处护套三相之间用同轴电缆经交叉互联箱、保护器接地。典型的高压电缆交叉互联线路设计图如图 1 所示。

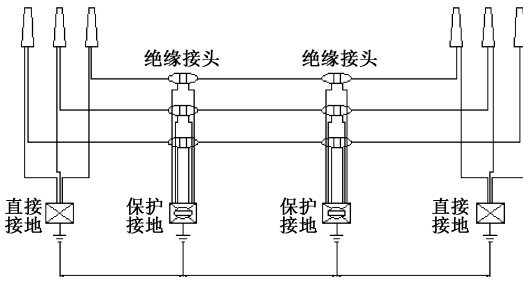


图 1 典型的高压电缆交叉互联线路设计图

当高压单芯电缆线芯通过交流电流时,在线芯周围会产生感应磁场,由于涡流效应,其金属护套上会产生感应电压。这样,金属护套通过接地线、构筑物、大地等组成一个完整的电气回路,从而产生接地电流。典型的高压电缆交叉互联电气原理图如图 2 所示。

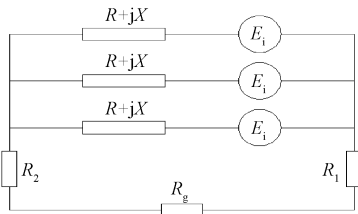


图 2 典型的高压电缆交叉互联电气原理图

图 2 中, R 为各相高压电缆金属护套工作时的电阻; X 为各相高压电缆金属护套工作时的电抗; R_1 、 R_2 分别为交叉互联大段的接地电阻; R_g 为大地的泄漏电阻, $R_g = 0.0493 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$; E_i 为各相高压电缆金属护套的合成电压。

根据电气原理图,由基尔霍夫定律可知:

$$I_A + I_B + I_C = I \quad (1)$$

$$Z_A I_A + (R_1 + R_2 + R_g) I = U_A \quad (2)$$

$$Z_B I_B + (R_1 + R_2 + R_g) I = U_B \quad (3)$$

$$Z_C I_C + (R_1 + R_2 + R_g) I = U_C \quad (4)$$

式中, I 为入地电流; I_A 、 I_B 、 I_C 为各相金属护套环形电流; Z_A 、 Z_B 、 Z_C 为各相电缆金属护套阻抗; U_A 、 U_B 、 U_C 为各相金属护套感应电压。

任意高压单芯电力电缆 A、B、C 三相,它们之间的距离分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,位置图见图 3。

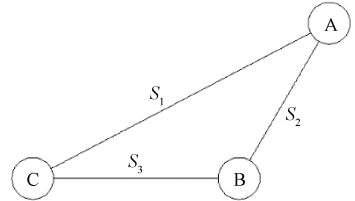


图 3 任意的高压电缆位置图

则其单位长度高压电缆金属护套产生的感应电势 (E) 分别为:

$$E_A = 2\omega \times 10^{-7} \left[I_B \ln \left(\frac{S_2}{GMR_s} \right) + I_C \ln \left(\frac{S_1}{GMR_s} \right) \right] \quad (5)$$

$$E_B = 2\omega \times 10^{-7} \left[I_A \ln \left(\frac{S_2}{GMR_s} \right) + I_C \ln \left(\frac{S_3}{GMR_s} \right) \right] \quad (6)$$

$$E_C = 2\omega \times 10^{-7} \left[I_A \ln \left(\frac{S_1}{GMR_s} \right) + I_B \ln \left(\frac{S_3}{GMR_s} \right) \right] \quad (7)$$

式中, ω 为角频率; GMR_s 为金属护套几何平均半径。

由上式可知,高压电缆等边三角形排列金属护套交叉互联,电缆本体换位之后金属护套交叉互联,这两种情况下感应所产生的金属护套环流为零。但是环流还受电容电流等其他因素的影响,因此,目前国内几乎所有的交叉互联电缆线路都存在接地环流。

1.2 高压电缆金属护套环流原因分析

1.2.1 敷设排列影响因素

电缆排列一般分为三角形排列和水平排列。以水平排列金属护套交叉互联为例,其电缆之间的距离分别为 S 和 $2S$,则其单位长度高压电缆金属护套产生的感应电势 Ψ 为:

$$\Psi_A = 2 \times 10^{-7} \left[I_B \ln \left(\frac{S}{GMR_s} \right) + I_C \ln \left(\frac{2S}{GMR_s} \right) \right] \quad (8)$$

$$\Psi_B = 2 \times 10^{-7} \left[I_A \ln \left(\frac{S}{GMR_s} \right) + I_C \ln \left(\frac{S}{GMR_s} \right) \right] \quad (9)$$

$$\Psi_C = 2 \times 10^{-7} \left[I_A \ln \left(\frac{2S}{GMR_s} \right) + I_B \ln \left(\frac{S}{GMR_s} \right) \right] \quad (10)$$

假设三相电流平衡,三相之间互差 120° 相位角,则:

$$\dot{I}_1 = I \angle 0^\circ \quad (11)$$

$$\dot{I}_2 = I \angle 120^\circ = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot I \quad (12)$$

$$\dot{I}_3 = I \angle -120^\circ = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot I \quad (13)$$

由以上各式可知,水平敷设等段长交叉互联单位长度高压电缆金属护套合成电压(U)为:

$$U = 2\omega I \times 10^{-7} \ln(2) \times \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (14)$$

水平敷设等段长交叉互联单位长度高压电缆金属护套所产生的感应电压与电缆分段长度的分布图见图 4。

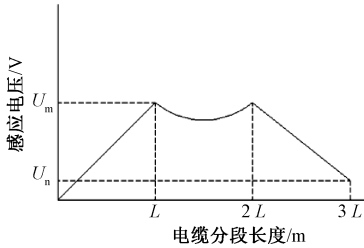


图 4 高压电缆金属护套感应电压趋势图

如果水平隧道敷设,交叉互联每小段的电缆长度为 500 m,三段等长度敷设,110~220 kV 电缆间距 250 mm,330~500 kV 电缆间距 300 mm,接地电阻为 2 Ω,则电缆满负荷运行时,110~500 kV 电缆的金属护套接地环流见表 1。

由表 1 可知:高压电缆采用水平等间距排列等长度分段金属护套交叉互联线路设计方式时,在一个交叉互联大段结束时,金属护套是存在合成电压的,而且该值与电缆负荷成正比。

1.2.2 布置方式影响因素

在实际的高压电缆线路设计和施工过程中,由于受地形或某些特殊因素制约,经常也会碰到混合布置的情况,即交叉互联三段,某段可能为三角形敷设,另外一段为水平敷设,典型的混合布置如图 5 所示。

以三角-水平-三角电缆混合排列为例,电缆敷设在隧道中,交叉互联敷设,每段长度 500 m,接地

表 1 110~500 kV 高压电缆水平交叉互联等段长敷设金属护套接地环流

标称截面/ mm ²	金属护套接地环流							
	110 kV		220 kV		330 kV		500 kV	
	环流/ A	负荷 占比/ %	环流/ A	负荷 占比/ %	环流/ A	负荷 占比/ %	环流/ A	负荷 占比/ %
240	2.4	0.4	—	—	—	—	—	—
300	2.7	0.4	—	—	—	—	—	—
400	3.0	0.4	3.8	0.5	—	—	—	—
500	3.4	0.3	4.2	0.4	—	—	—	—
630	3.9	0.3	4.7	0.4	5.8	0.5	—	—
800	4.4	0.3	5.2	0.4	6.3	0.5	8.1	0.7
1 000	5.1	0.3	6.2	0.4	7.2	0.5	9.1	0.6
1 200	5.5	0.3	6.6	0.4	7.7	0.5	9.7	0.6
1 600	6.2	0.3	7.4	0.4	8.7	0.5	10.9	0.6
2 000	—	—	8.1	0.4	9.6	0.5	12.2	0.6
2 500	—	—	8.8	0.4	10.4	0.5	13.2	0.6

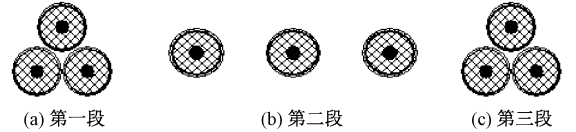


图 5 典型的三角-水平-三角电缆混合排列布置图

电阻为 2 Ω,电缆满负荷运行时,110~500 kV 电缆的金属护套接地环流见表 2。

表 2 110~500 kV 高压电缆三角-水平-三角等段长敷设金属护套接地环流

标称截面/ mm ²	金属护套接地环流							
	110 kV		220 kV		330 kV		500 kV	
	环流/ A	负荷 占比/ %	环流/ A	负荷 占比/ %	环流/ A	负荷 占比/ %	环流/ A	负荷 占比/ %
240	128	22	—	—	—	—	—	—
300	145	22	—	—	—	—	—	—
400	166	22	152	20	—	—	—	—
500	191	22	171	20	—	—	—	—
630	214	21	194	20	266	25	—	—
800	240	21	216	20	253	23	250	23
1 000	274	21	244	19	269	21	288	23
1 200	288	20	256	18	263	19	303	22
1 600	319	20	278	17	266	17	337	22
2 000	—	—	283	16	254	15	355	21
2 500	—	—	285	15	225	12	365	20

由表 2 可知:当高压电缆采用三角-水平-三角电缆混合排列、满负荷运行时,其金属护套接地环流和负荷占比超出了国家电网和南方电网的要求。因此,当采用混合排列时,应校核高压电缆金属护套的接地环流,以确保满足相关标准的要求。

1.2.3 电缆分段长度

在高压电缆线路设计中,尤其是在进行线路改

造时,经常会碰到电缆长度不均匀分段的情况。当电缆长度分段不均匀时,会出现金属护套环流较大的情况。假设交叉互联三组电缆中两组电缆为标准长度为500 m,另一组电缆长度依次为300,400,600,700 m,则其接地环流见表3~表6。

表3 110 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设金属护套接地环流

标称截面/mm ²	金属护套接地环流							
	300 m		400 m		600 m		700 m	
	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%
240	147	23	69	11	59	9	111	17
300	170	23	80	11	68	9	128	17
400	199	23	93	11	80	9	150	17
500	235	24	110	11	94	9	178	18
630	276	24	129	11	111	10	209	18
800	323	25	151	11	130	10	245	19
1 000	404	26	189	12	162	10	306	20
1 200	451	27	211	12	182	11	342	20
1 600	545	28	255	13	219	11	413	21

表4 220 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设金属护套接地环流

标称截面/mm ²	金属护套接地环流							
	300 m		400 m		600 m		700 m	
	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%
400	221	27	104	13	89	11	167	20
500	259	27	122	13	104	11	196	21
630	302	28	142	13	121	11	228	21
800	349	28	164	13	140	11	264	21
1 000	427	29	200	13	172	12	323	22
1 200	475	29	223	14	191	12	360	22
1 600	567	30	265	14	228	12	430	23
2 000	647	31	303	15	260	13	490	24
2 500	729	32	341	15	294	13	553	24

表5 330 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设金属护套接地环流

标称截面/mm ²	金属护套接地环流							
	300 m		400 m		600 m		700 m	
	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%
630	344	32	162	15	138	13	260	24
800	399	33	187	15	160	13	302	25
1 000	483	33	227	16	194	13	366	25
1 200	536	34	251	16	216	14	406	26
1 600	634	35	297	16	255	14	480	26
2 000	719	35	337	17	290	14	545	27
2 500	809	36	379	17	326	15	614	28

表6 500 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设金属护套接地环流

标称截面/mm ²	金属护套接地环流							
	300 m		400 m		600 m		700 m	
	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%	环流/A	负荷占比/%
800	403	34	190	16	162	14	304	26
1 000	485	34	228	16	195	14	367	26
1 200	538	35	253	16	217	14	407	26
1 600	638	36	300	17	257	14	483	27
2 000	729	36	343	17	294	15	552	27
2 500	826	37	388	18	333	15	626	28

由表3~表6可知,当高压电缆分段不均匀超过20%时,大部分的高压电缆接地环流的负荷占比就超过了10%,而且满负荷运行时,接地环流也超过了100 A。因此,电缆分段应尽量均匀。

另外,国内某城市在对电力电缆故障调查报告中指出,电缆头和电缆终端故障率合计51%以上,电缆本体故障率仅占4.4%^[2]。因此,为了提高电网的安全运行质量,减少事故发生次数,大长度高压电缆也得到了广泛应用。随着电缆段长增加,高压电缆金属护套环流也将增大。以YJLW03 127/220 kV 1×2 500 mm² 电缆等段长水平敷设交叉互联为例,电缆典型结构示意图见图6。

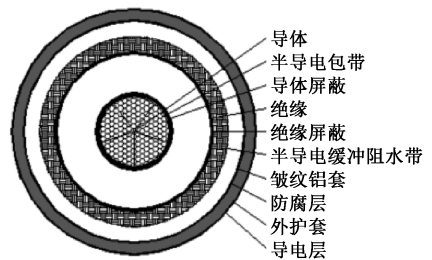


图6 YJLW03 127/220 kV 1×2 500 mm² 电缆典型结构示意图

金属护套环流的大小与电缆段长有密切的关系,水平敷设交叉互联接地环流与段长曲线图见图7。

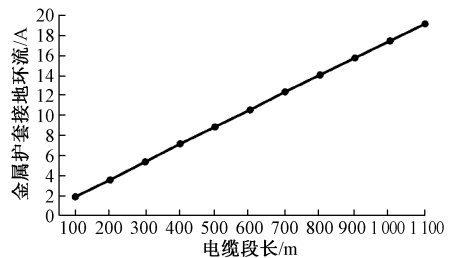


图7 水平敷设交叉互联接地环流与段长曲线图

由图7可知:随着每一小段电缆长度的增加,金属护套接地环流也在成比例增长。

1.2.4 电缆运行负荷

电缆在交变电压下运行时,线芯中通过的交变电流会产生交变的磁场。根据安培环路定理,电流增加时,磁通量和磁场强度也将增加。因此,当高压电缆线芯负荷电流增加时,所产生的接地环流也将增加。假设隧道水平敷设,交叉互联三组电缆中两组电缆为标准长度为500 m,另一组电缆长度依次为400,600 m,满负荷运行时电流为*I*,则带电负荷分别为0.6*I*,0.7*I*,0.8*I*,0.9*I*,则110~500 kV电缆的金属护套接地环流见表7~表10。

表7 110 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设
不同带电负荷与金属护套接地环流

标称 截面 面积/ mm ²	金属护套接地环流							
	400 m				600 m			
	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A
240	42	49	56	62	36	41	47	53
300	48	56	64	72	41	48	55	61
400	56	66	75	84	48	56	64	72
500	67	78	88	99	57	66	75	85
630	78	91	104	117	67	78	89	100
800	92	106	121	136	78	91	104	117
1 000	114	133	152	170	98	114	130	146
1 200	128	149	169	190	109	127	145	163
1 600	154	179	204	230	132	154	176	197

表8 220 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设
不同带电负荷与金属护套接地环流

标称 截面 面积/ mm ²	金属护套接地环流							
	400 m				600 m			
	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A
400	63	73	83	94	53	62	71	80
500	74	86	98	110	63	73	84	94
630	86	100	114	128	73	85	97	109
800	99	115	131	148	84	98	112	126
1 000	121	141	161	180	103	120	138	155
1 200	135	157	179	201	115	134	153	172
1 600	161	187	213	239	137	160	183	205
2 000	183	213	243	273	157	183	209	235
2 500	206	240	274	308	177	206	235	265

表9 330 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设
不同带电负荷与金属护套接地环流

标称 截面 面积/ mm ²	金属护套接地环流							
	400 m				600 m			
	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A
630	98	114	130	146	83	97	111	125
800	114	132	150	169	97	113	128	144
1 000	138	160	182	205	117	136	156	175
1 200	152	177	202	227	130	151	173	194
1 600	180	209	239	268	154	179	204	230
2 000	204	237	271	304	174	203	232	261
2 500	230	267	304	342	196	229	261	294

表10 500 kV 高压电缆水平交叉互联不均匀分段敷设
不同带电负荷与金属护套接地环流

标称 截面 面积/ mm ²	金属护套接地环流							
	400 m				600 m			
	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A	0.6 <i>I</i> / A	0.7 <i>I</i> / A	0.8 <i>I</i> / A	0.9 <i>I</i> / A
800	116	135	153	172	98	114	130	146
1 000	139	162	184	206	118	137	156	176
1 200	154	179	204	229	131	152	174	195
1 600	183	212	241	271	155	180	206	231
2 000	209	242	276	309	177	206	235	265
2 500	236	274	312	350	201	234	267	300

由表7~表10可知,在电缆不均匀分段下,接地环流大小与线芯负荷密切相关。这就带来一个启示,南方电网只规定了接地电流的负荷占比,更具有科学性,但是应注意南方电网由于没有对接地电流数值进行要求,这给隧道防火带来了一定压力。

另外,电网在实际运行中,受各种因素影响,三相负荷很难以相同的电流运行,假设电缆满负荷运行时,三相电流分别为*I*,0.95*I*,0.9*I*,将电缆水平敷设在隧道中,交叉互联分段长度为500 m,三段等长度敷设,则110~500 kV电缆的金属护套接地环流见表11。

表11 110~500 kV 高压电缆水平交叉互联等段长敷设
三相不平衡运行金属护套接地环流

标称 截面 面积/ mm ²	金属护套接地环流							
	110 kV		220 kV		330 kV		500 kV	
	环流/ A	负荷 占比/%	环流/ A	负荷 占比/%	环流/ A	负荷 占比/%	环流/ A	负荷 占比/%
240	2.3	0.3	—	—	—	—	—	—
300	2.5	0.3	—	—	—	—	—	—
400	2.9	0.3	3.5	0.4	—	—	—	—
500	3.2	0.3	3.9	0.4	—	—	—	—
630	3.7	0.3	4.4	0.4	5.4	0.5	—	—
800	4.1	0.3	4.9	0.4	5.9	0.5	7.6	0.6
1 000	4.8	0.3	5.7	0.4	6.7	0.5	8.6	0.6
1 200	5.2	0.3	6.2	0.4	7.2	0.5	9.1	0.6
1 600	5.9	0.3	6.9	0.4	8.1	0.4	10.2	0.6
2 000	—	—	7.5	0.4	9.0	0.4	11.4	0.6
2 500	—	—	8.2	0.4	9.8	0.4	12.5	0.6

对比表1和表11,可以明显发现,当电缆均匀分段且三相不平衡运行时,金属护套感应电流明显增加。

1.2.5 接地电阻

国家标准 GB 50169—2016《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》规定,高压电缆金属护套接地电阻不能大于4 Ω^[3]。金属护套接地环流在与大地形成的等效电气回路中,接地电阻的阻值也

对接地环流影响比较大。以 YJLW03 127/220 kV $1 \times 2 \ 500 \text{ mm}^2$ 电缆 500 m 等段长隧道敷设为例,满负荷运行时,高压电缆金属护套接地环流与接地电阻见图 8。

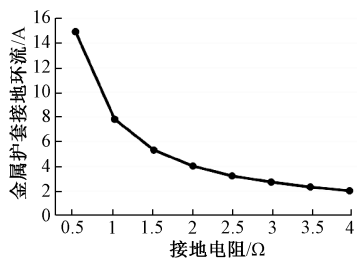


图 8 高压电缆金属护套接地环流与接地电阻曲线图

由图 8 可知:接地电阻对接地环流有影响,此外还需要注意电缆的入地电流,由于入地电流是三相接地电流的矢量和,因此,入地环流受接地电阻影响较大。

1.2.6 其他因素

由于高压电缆系统是一个复杂的系统,影响电缆接地环流的因素还有很多。

(1) 电缆本体。当电缆本体受到机械损坏,白蚁侵蚀或外护套老化等情况时,轻则会造成外护套泄露电流增加,重则会造成电缆金属护套多点接地,这些都会使得金属护套环流增加。目前,国内已发生多起由于外护套损耗导致金属护套多端接地,造成电力中断的事故。另外,上海和北京等地电力公司发现电缆运行一段时间后,检查电缆表面没有发现任何损伤,但是外护套绝缘电阻与电缆投运时相比,下降了数十到数千个数量级,某些高压电缆线路的聚氯乙烯护套的绝缘电阻甚至小于 $0.1 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ 。目前,国家标准缺乏对高压电缆外护套绝缘电阻长期稳定性指标的规定。外护套绝缘电阻下降使得泄露电流增加,进而增加了金属护套环流。江苏某地电缆由于护套破损,导致金属护套发生多点接地,产生较大接地环流,电缆发热严重,造成电缆沟内起火,引发火灾。

(2) 地电位影响。在变电站等大接地电流附近,变电站系统的接地电流本应通过大地流回系统中性点,但是由于高压电缆金属护套为铝套,铝套面积比较大,电阻比较小,会有部分接地电流流经金属护套的现象,这样就形成了环流。辽宁某地 66 kV 高压电缆在变电站侧,即使电缆本体没有送电,电缆处于开路状态,检测铝护套,发现也有十几安培的环路电流流过。另外,高铁沿线电缆也会出现类似的现象。当高铁综合接地系统出现故障或轨道绝缘出现问题时,会有大量杂散电流进入电缆系统,这样会

堵塞接地电流通路,从而会造成地电位升高,形成跨步电压,产生环流。陕西某地电力公司因为杂散电流堵塞接地回路,电缆产生了严重的电蚀现象。

(3) 交叉互联接线错误或松脱。电缆刚投运的时候,由于交叉互联接线错误,导致交叉互联失效,从而造成接地环流急剧增加。广东某地电缆线路,投运前未做仔细检查,交叉互联接线错误,导致金属护套环流偏大。

(4) 护层保护器失效。当电缆接头井长期浸泡在水中或者因其他原因导致护层保护器失效时,相当于电缆多点接地,从而造成接地环流增加。

(5) 附件使用错误。交叉互联电缆三段之间采用绝缘接头做电气隔离,如果接头使用直通接头,就会造成交叉互联失效,从而产生环流。山东某地电缆线路由于交叉互联错误使用直通接头,产生环流,最后造成电缆附件热击穿。

(6) 其他。影响高压电缆接地环流的因素还有很多,比如土壤电阻率,电缆间距排列均匀性,多回电缆的互相感应,交叉互联箱受潮,绝缘接头隔板绝缘性能,金属护套结构尺寸,以及电阻等。

2 金属护套接地环流解决办法

由以上分析可知,金属护套环流影响因素较多,尤其是多因素叠加,会极大地增加高压电缆金属护套环流。想要彻底消除环流,比较困难,但是可以从多个方面来降低环流。

2.1 电缆排布

电缆排布对接地环流影响较大,在每个交叉互联大段内,尽量采用同一种排列方式,避免混合排列情况出现。

电缆排布采用正三角形敷设,由于三相始终保持高度对称状态,电缆三相负荷也比较均匀,而且三相之间距离稳定,因此能够极大地减少金属护套接地环流,而且金属护套感应电压和短时过电压也小很多。需注意的是,三角形敷设的电缆载流量远小于水平敷设,为了满足负荷,三角形敷设电缆标称截面往往比水平敷设大一个规格,造成成本增加,因此需要综合权衡多方利弊。

如果采用水平交叉互联,由于水平敷设先天性的缺陷难以消除(如三相负荷的均匀性,自身的合成电压等),因此应降低其他因素的引入,以降低金属护套环路电流。

当有多回路高压电缆敷设于同一通道中时,不同回路之间间距应增大,以减少回路之间互相感应的影

2.2 电缆段长均匀分段

电缆段长分段是否均匀,对金属护套接地环流影响极大。因此,在设计高压电缆线路时,应力求分段均匀。

2.3 加强运维检修

电缆在实际运行过程中,会有很多因素导致金属护套环流增加,因此应加强运维检修工作,做到早发现、早解决,以免酿成重大责任事故。

2.4 做好接地环流在线监测

接地环流在线监测手段目前比较成熟,通过对接地线安装罗氏线圈,可以非常有效地对接地环流进行测量,然后经由网络通信,通过 APP 或其他程序可以与运维人员的手机或电脑等终端系统做到实时互通互联,并能设置报警以提醒运维人员。这对电缆运维具有极大的帮助,典型的高压电缆金属护套电流在线监测系统原理见图 9。

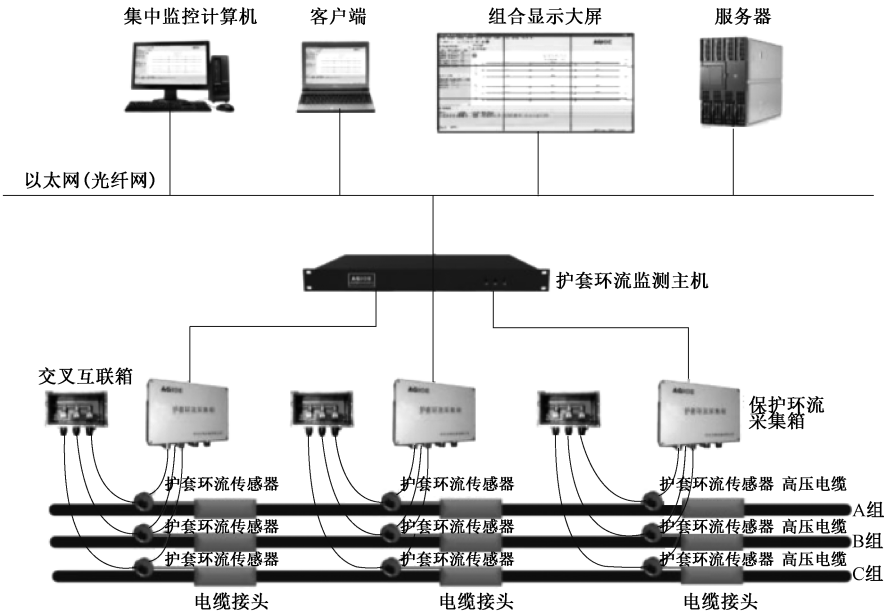


图 9 典型的高压电缆金属护套电流在线监测系统原理图

2.5 采用逐段单端接地方式

当电缆线路受制于地形或其他因素,导致电缆不能做到均匀分段或统一排布时,核验测得金属护套接地环流超过标准规范允许值,就可以采用逐段单端接地方式。在使用逐段单端接地方式时,应注意对过电压进行复核,以确定是否需要使用回流线等。典型的逐段单端接地见图 10。

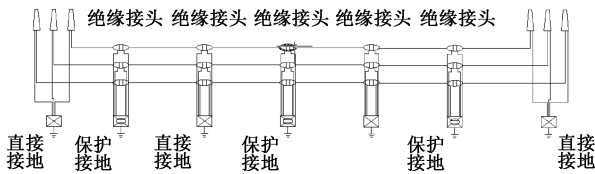


图 10 典型的逐段单端接地线路图

当采用逐段单端接地方式后,在整个电气回路上,没有环流点,只剩下电容电流。假设电缆在隧道水平敷设,每个小段长度 500 m,则在满负荷运行状态条件下,110~500 kV 高压电缆的电容电流见表 12。

2.6 串接合适的电阻

接地电阻对接地环流产生较大的影响,那么,设计金属护套接地电阻时,在标准规定范围内,越大越

表 12 110~500 kV 高压电缆电容电流表

标称截面/mm ²	金属护套接地环流/A			
	110 kV	220 kV	330 kV	500 kV
240	1.4	—	—	—
300	1.5	—	—	—
400	1.6	2.5	—	—
500	1.8	2.6	—	—
630	2.0	2.9	4.0	—
800	2.2	3.2	4.3	6.2
1 000	2.5	3.7	4.9	6.9
1 200	2.7	4.0	5.1	7.2
1 600	3.0	4.3	5.7	8.0
2 000	—	4.7	6.3	8.9
2 500	—	5.1	6.8	9.7

好这是不对的,还需要考虑短时过电压因素。当电缆线路发生短路、雷电冲击、操作冲击或谐振过电压等情况时,金属护套会产生很大的感应电压^[5]。假设短路故障时,短路电流全部以大地作为回路,则短时过电压计算如下:

$$E_A = \left[R + (R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_e}{GMR_s}) L \right] I_p \quad (15)$$

(下转第 28 页)

成比例增加。采用分割导体结构可以有效减小集肤效应,但对于大截面导体,改善效果仍不理想。单丝绝缘或氧化处理是当前研究的一个热点,可很好地解决集肤效应。

3.2 改善铝护套结构

高压电缆皱纹铝护套结构的半导电缓冲层大多采用绕包两层半导电缓冲(阻水)带,皱纹铝护套结构电缆纵剖面示意图见图4。半导电缓冲(阻水)带由蓬松棉和半导电无纺布组成,其蓬松多孔结构,内有大量的空气。此外,皱纹铝护套和缓冲层间也存在一定的气隙,缓冲层的热阻其实就是半导电缓冲带和空气的混合热阻,而静止空气的热阻非常大,约 $40.0 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ (远远高于IEC 60287标准给定值 $6.0 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$,空气和缓冲层混合热阻系数 $20.0 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ 较为合理)^[1-2]。热阻越大,越阻碍着电缆线芯表面热量的散失,对载流量不利。

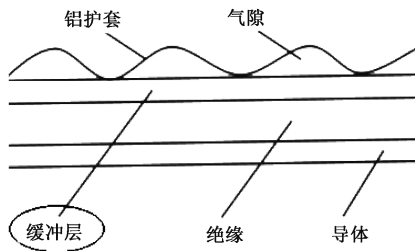


图4 皱纹铝护套结构电缆纵剖面示意图

近年来,缓冲层烧蚀问题频频出现,因此平板铝护套结构受到越来越多的厂家关注。从对载流量影响来看,平板铝护套结构使得缓冲层厚度普遍减小,铝护套和缓冲层紧密接触,很大程度压缩了空气隙的厚度,有效提高了导热性能,其综合热阻明显降低(约 $11.0 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$)。

(上接第25页)

式中: R 为接地电阻, Ω ; R_g 为大地电阻, Ω ; L 为电缆长度, km ; I_p 为短路电流, A ; D_0 为金属护套平均直径, mm 。

由式(15)可知,当接地电阻增加时,金属护套的短时过电压也将增加,从而可能会影响护层保护器的选择,严重情况下会造成护层保护器的损坏,甚至会造成高压电缆外护套的击穿。因此,在做接地电阻阻值设计时,应校核金属护套短路故障时的过电压是否满足设计要求。

3 结束语

高压电缆接地环流对电缆线路影响较大,本工作对造成环流的各因素进行了分析,并提出了解决

3.3 优化安装敷设环节

多条电力电缆并列敷设时会形成邻近效应和集肤效应,使电荷集中在导线截面表面,降低了导线允许载流量。而且多条并列敷设导致热量集聚,也会降低载流量。所以在三角形、平行敷设时均应考虑电缆之间的间距。

对敷设环境加以优化,例如在电缆管道内填充喷润土、降阻沙或利用天然的地下水,降低环境温度,从而达到降低热阻系数,加快散热,提高载流量的目的。同样,对电缆的排列方式采用最合理的布局,尽量减少电缆与电缆之间相互影响。

电缆安装环境时,必须对几个主要步骤加以改进和控制:比如在金属导体对接或压接的时候,确保足够的接触面积和压强,降低电缆阻抗产生的损耗;在绝缘处理的时候,要绝对保证绝缘处理粗糙度,以满足运行时的零局放要求;应考虑绝缘的热老化问题,避免在进行接地焊接的时候对绝缘集中加热引起老化;还应确保电缆接地系统的完整与准确,及时修复电缆外护层的破损点;等等。

4 结束语

本工作在参数选择过程中,按照常规的皱纹铝护套结构对220 kV电力电缆计算了不同条件下的理论载流量。结合理论计算过程,分析了提高载流量的方法,以供大家参考。

参考文献:

[1] 赵健康,樊友兵,王晓兵,等.高压电力电缆金属护套下热阻特性分析[J].高电压技术,2008(34):2483-2486.
[2] 朱远标.浅析高压电缆缓冲层的设计[J].电力科技,2012(4):98-99.

措施,为电缆环流数值计算,线路设计,以及电缆敷设提供了科学的技术支持。

参考文献:

[1] 李鸿泽,陈杰,张迺龙,等.金属护套接地失效时电缆支架对电缆电气性能影响[J].电线电缆,2019(4):8-12.
[2] 中国电力企业联合会.电力工程电缆设计规范:GB/T 50217-2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
[3] 王凤凯,郑大白,陈振辉,等.大长度高压电力电缆线路设计及应用研究[C]//2019年(第四届)全国电网技术交流会论文集.北京:中国电工技术学会,2019:440-446.
[4] 中国电力企业联合会.电气装置安装工程接地装置施工及验收规范:GB 50169-2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
[5] 郑大白,龙治华,王凤凯.大长度高压电力电缆在海底电缆登陆段的设计与应用[J].电线电缆,2021(1):10-13.