

基于 EMTP 的交叉互联型电缆雷电过电压影响因素分析

汪旭旭¹, 郑贤龙², 郭靖³

(1. 国家电网公司直流建设分公司, 北京 100032; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 3. 宁夏送变电工程公司, 银川 750000)

摘要:通过建立交叉互联型电缆电磁暂态程序(EMTP)仿真模型,研究雷电流波形、电缆布置方式、电缆长度、冲击接地电阻的大小、土壤电阻率以及电缆末端负荷的性质与电缆雷电过电压的关系。结果表明:波头越陡,导体上产生的过电压越大;电缆水平布置时产生的雷电过电压较小;电缆长度在 3 000 m 时雷电过电压达最大值,均等长度设置有利于降低雷电过电压;冲击接地电阻及土壤电阻率对雷电过电压影响较小;负荷数值越大电缆雷电过电压越大,负荷为容性或感性时,电缆雷电过电压较电阻性负荷有所增大。

关键词:交叉互联型电缆;雷电过电压;EMTP;影响因素;仿真模型

中图分类号:TM 8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2017)07-0020-04

0 引言

交叉连接的电缆系统^[1-4]由若干个主段组成,各主段包括 3 个小段。如电缆对称敷设,而且它们的长度、负载等均相同,这时电缆护套上产生的感应电动势就为零。在这种电缆系统的每一个交叉连接点上,交叉连接使阻抗不连续。这些阻抗的不连续对于由操作或其他系统扰动所产生的波起着反射点的作用,对这种系统过电压的计算是特别要关注的。当有雷电或操作冲击波在电缆中传播时,导芯和屏蔽层上都会出现暂态过电压,可能损害绝缘,乃至发生故障。因此,对电缆交叉互联时的雷电暂态过电压进行分析、研究也就显得十分必要。

1 模型建立

计算中,电缆采用截面积为 1 000 mm² 的 110 kV 高压电缆,雷电流沿架空线路侵入电缆,交叉互联电缆处的电缆各小段都取 500 m,雷电流选取 1.2/50 μs 和 2.6/50 μs 2 种波形、杆塔模型采用四段模型(四分多波阻抗模型)^[5]。图 1a 为交叉互联电缆示意图,图 1b 为交叉互联电缆过电压的电磁暂态程序(EMTP)仿真模型,其中 J1, J2 分别为交叉互联电缆第 1 个接头和第 2 个接头, Y1, Y2 分别为电缆交第 1 个和第 2 个绝缘接头, D1, D2 分别为交叉互联电缆导体第 1 个点和第 2 个点。

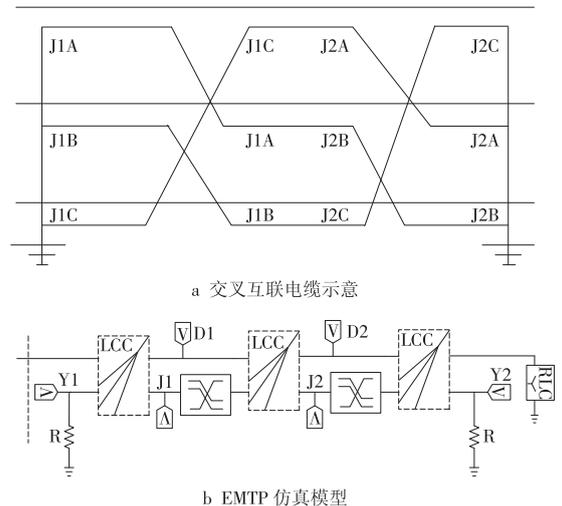


图 1 交叉互联电缆示意图与仿真模型

2 电缆雷电过电压的影响因素

2.1 雷电流波形与幅值对雷电过电压的影响

雷击地线杆塔上的地线时,采用 1.2/50 μs 和 2.6/50 μs 2 种波形对 110 kV 电缆上产生的雷电过电压进行对比分析。按照表 1 中给出的雷电流数据,改变仿真模型中的雷电流波形和幅值,其电缆 J1, J2 处的雷电过电压仿真结果见表 1。

以 1.2/50 μs 波形为例,由表 1 可以看出:当初始电流为 25 kA 时,电缆交叉互联的 J1, J2 的初始雷电压约为 1.1 kV;当雷电流幅值达到 125 kA 时,绝缘子串发生闪络,电缆 J1, J2 处的雷电过电压分别增大到 10.9, 11.5 kV,雷电过电压的增幅均达到 10 倍;雷电流从 125 kA 上升到 300 kA 后,电缆雷电过电压大约升高了 20%。

表 1 电缆 J1, J2 处雷电过电压

雷电流幅值/kA	雷电过电压/kV			
	1.2/50 μ s		2.6/50 μ s	
	J1	J2	J1	J2
25	1.1	1.1	0.7	0.9
50	8.9	8.0	7.4	6.6
75	9.6	9.4	8.5	8.1
100	10.3	10.2	9.8	9.2
125	10.9	11.5	10.1	10.6
150	11.3	11.6	10.7	10.7
175	11.4	11.7	10.9	11.3
200	11.5	11.9	11.0	11.5
225	11.8	12.0	11.4	11.7
250	11.9	12.2	11.5	11.9
275	12.1	12.9	11.9	12.4
300	12.8	13.2	11.9	12.5

同样可以看出,1.2/50 μ s 和 2.6/50 μ s 2 种雷电流波形下,1.2/50 μ s 雷电流波形在电缆上产生的雷电过电压高于 2.6/50 μ s 雷电流波形在电缆上产生的过电压,这是因为 1.2/50 μ s 雷电流波形的波头明显陡于 2.6/50 μ s 雷电流波形的波头。

其他条件不变,按照表 1 给出的雷电流数据,得出电缆 D1 和 D2 处的雷电过电压仿真结果见表 2。

表 2 电缆 D1, D2 处雷电过电压

雷电流幅值/kA	雷电过电压/kV			
	1.2/50 μ s		2.6/50 μ s	
	D1	D2	D1	D2
25	6.0	6.2	3.8	5.1
50	22.0	23.1	18.1	17.1
75	24.7	27.1	20.5	23.6
100	25.9	28.5	22.1	24.8
125	28.1	29.2	24.0	25.3
150	28.3	29.5	25.6	25.7
175	28.7	29.9	26.1	26.0
200	28.8	30.1	27.0	26.5
225	29.0	30.5	28.8	27.0
250	29.1	31.7	29.0	27.1
275	29.5	31.9	29.3	27.9
300	29.8	32.1	29.8	28.1

表 3 电缆 D2 处雷电过电压

排列方式	各点过电压最大值/kV					
	J1	J2	D1	D2	Y1	Y2
三角形排列	11.8	11.5	28.1	29.2	14.0	14.1
水平排列	11.0	8.7	26.1	24.7	13.0	20.0

从表 2 中可以看出,随着雷电流不断增大,电缆导体 D1 和 D2 处的过电压也不断增大,1.2/50 μ s 雷电流波形在电缆导体上产生的雷电过电压高于 2.6/50 μ s 雷电流波形在电缆导体上产生的过电压。

2.2 电缆布置方式对雷电过电压的影响

以长 1 500 m 的电缆为例,通过改变直埋电缆的排列方式来研究雷电流沿着架空线路侵入电缆后雷电过电压的变化特性。电缆^[6-8]采用三角形排列和水平排列分别如图 2a 和图 2b 所示。仿真计算 2 种排列方式电缆各点雷电过电压的最大值,见表 3。

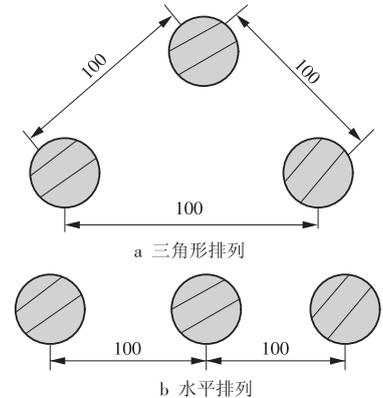


图 2 电缆 2 种排列方式

从表 3 中可以看出,电缆采用三角形排列时电缆的雷电过电压明显大于采用水平排列方式时的相应值,这是因为三角形排列的电缆零序和正序阻抗大于电缆采用水平的相应阻抗^[9-10],较大的阻抗增加了电能的损耗。分析表明,电缆采用水平排列方式优于三角形排列方式。

2.3 电缆长度对雷电过电压的影响

电缆长度对电缆雷电过电压的影响较大,其他条件不变,仅改变电缆的长度,对首段和末段同时接地的交叉互联电缆进行仿真计算,得到护套上的绝缘接头 Y1 点和 Y2 点过电压的最大值,见表 4。由于 EMTP 中电缆的频率相关线路模型(Jmarti)在计算中具有发散性,当电缆每小段的长度较长时,就改用 LCC 模块中的 Begeron 模型。

从表 4 中可以看出:当电缆长度不超过 1 500 m 时,电缆金属护套的雷电过电压值变化较小;当电缆长度为 3 000 m 时,电缆金属护套过电压的值最大;当电缆长度超过 3 000 m 时,电缆金属护套的雷电过电压呈下降趋势。电缆的实际长度一般不会超过

表 4 电缆长度不同时电缆的雷电过电压

电缆长度/m	过电压最大值/kV			
	Y1		Y2	
	Begeron	Jmarti	Begeron	Jmarti
400	11.1	11.2	13.5	14.0
600	11.6	12.1	13.0	13.8
800	11.9	11.1	12.9	13.6
1000	11.2	11.0	12.4	11.9
1500	10.5	11.0	11.8	12.0
2000	10.5	10.9	14.2	15.0
3000	12.1	12.0	15.3	15.1
4000	8.8	—	8.8	—
5000	9.0	—	8.9	—
10000	8.8	—	7.9	—

1500 m,所以在电缆防雷设计中可以不考虑电缆长度对雷电过电压的影响。

为了探讨电缆长度的不均匀性对电缆金属护套雷电过电压的影响,通过改变 3 小段电缆的长度,在交叉互联的方式下得到金属护套交叉互联接头雷电过电压的最大值,见表 5。

表 5 电缆每段长度不同时电缆的雷电过电压

3 小段电缆长度/m	电压最大值/kV	
	J1	J2
500,500,500	11.2	10.0
400,500,600	12.1	11.7
300,500,700	13.0	12.5
200,500,800	11.9	13.4
100,500,900	11.4	15.1

从表 5 中可以看出,电缆长度越不均匀,电缆护套过电压值越大,可以得出分段均匀的电缆防雷效果优于分段不均的电缆。

2.4 冲击接地电阻大小对雷电过电压的影响

当雷电流流入大地时,大地表现出的电阻值就是冲击接地电阻,冲击接地电阻很难测量出来,它跟土壤的电阻率有关。改变冲击接地电阻的大小,其他值不变,得到交叉互联电缆金属护套过电压的最大值,见表 6。

在一般电阻率的地区,冲击接地电阻不会超过 10.0 Ω。从表 6 中可以看出,冲击接地电阻从 0.2 Ω 变化到 10.0 Ω 的过程中,电缆护套过电压的最大值波动较小,从中可以得出结论,冲击接地电阻对电缆雷电过电压的影响不大。

2.5 土壤电阻率对电缆的影响

高压电缆埋于地下时,电缆的等效大地回路的深度是计算电缆雷电过电压大小的一个关键因素,

表 6 冲击接地电阻值不同时电缆的雷电过电压

冲击接地电阻/(Ω·m)	护套过电压最大值/kV	
	Y1	Y2
0.2	14.0	13.6
0.4	13.8	13.8
0.6	13.9	13.7
0.8	14.0	13.6
1.0	13.7	13.9
1.2	14.0	13.8
1.4	14.2	14.0
1.6	14.1	13.8
1.8	14.2	13.9
2.0	13.6	17.5
10.0	13.6	14.8

等效大地回路深度不但与频率有关,而且与土壤的电阻率有关。通过改变土壤电阻率的大小来计算出电缆护套雷电过电压的最大值,它们的关系见表 7。

表 7 土壤电阻率不同时电缆的雷电过电压

大地电阻率/(Ω·m)	护套过电压最大值/kV	
	Y1	Y2
5	13.0	18.0
10	13.2	17.9
20	13.6	17.6
30	13.8	17.5
40	14.1	18.3
50	13.9	17.9
70	13.2	18.1
100	13.3	17.7
150	14.0	18.0
200	14.3	18.4
500	13.4	18.1
1000	12.5	18.8

从表 7 中可以看出,土壤电阻率从 5 Ω·m 变化到 1000 Ω·m 的过程中,电缆护套雷电过电压的值变化不大,因此,可以得出土壤电阻率的大小对电缆雷电过电压的影响较小。

2.6 负荷对电缆的影响

电缆末端负荷设为 316 Ω。在实际运行中,系统的负荷是各式各样的,系统负荷的大小和性质在不同的电缆中也是不同的,因此,有必要对电缆末端不同负荷下电缆雷电的过电压进行讨论。通过改变阻性负荷的大小,得到负荷大小与电缆雷电过电压的关系见表 8。

保持负荷的大小在工频下为 400 Ω 不变,改变电缆末端负荷的性质,得到电缆的雷电过电压与负

荷性质的关系,见表9。

**表8 电缆末端负荷大小(阻性)不同时
电缆的雷电过电压**

负荷/ Ω	护套过电压最大值/kV	
	Y1	Y2
短路	18.1	17.6
10	22.5	22.6
50	16.0	16.1
100	15.0	16.2
200	14.0	16.0
300	13.8	16.1
400	13.6	16.4
500	13.8	16.5
1000	13.1	16.2
2000	12.5	17.5
10000	12.8	17.6
断路	26.1	25.2

表9 电缆末端负荷性质不同时电缆的雷电过电压

负荷/ Ω	护套过电压最大值/kV	
	Y1	Y2
$-j400$	26.5	27.2
$100-j387$	15.0	16.0
$200-j346$	14.0	16.0
$300-j265$	14.0	16.0
400	13.6	16.4
$300+j265$	12.5	17.5
$200+j346$	12.5	17.5
$100+j387$	12.5	17.5
$j400$	13.0	17.5

从表8中可以看出:当电缆末端的负荷逐渐增大时,交叉互联的电缆末端的绝缘接头电压呈上升趋势;当电缆末端短路或断路时,电缆首端绝缘接头和末端绝缘接头的电压都有所增大。

从表9中可以看出:当电缆末端的负荷从容性逐渐变到感性的过程中,负荷为纯阻性时,电缆绝缘接头处的雷电过电压相对较小;负荷为纯容性负荷和纯感性负荷时,电缆绝缘接头的过电压都有所增大,这是因为纯容性负荷相当于电缆断路,纯感性负荷相当于电缆开路。

3 结论

(1)对于 $1.2/50\mu\text{s}$ 和 $2.6/50\mu\text{s}$ 2种类型的雷电波击中杆塔,雷电流沿着架空线路侵入电缆时,通过改变雷电流幅值大小来研究雷电流与电缆雷电过电压的关系,结果表明,在其他条件相同时, $1.2/50$

μs 雷电波在电缆上产生的雷电过电压大于 $2.6/50\mu\text{s}$ 雷电波在电缆上产生的雷电过电压。

(2)改变电缆排列方式,仿真表明,水平排列电缆上的雷电过电压小于三角形排列电缆上的雷电过电压;改变电缆长度,结果表明,电缆长度对电缆雷电过电压影响较小;改变电缆分段的长度,结果表明,电缆分段越均匀,电缆上的雷电过电压越小。

(3)改变冲击接地电阻的大小和土壤的电阻率,仿真分析表明,接地电阻大小和土壤电阻率大小对电缆雷电过电压的影响较小。

(4)改变电缆末端负荷大小和性质,结果表明,电缆末端雷电过电压随阻性负荷的增大而变大,纯容性负荷相当于电缆断路,纯感性负荷相当于电缆开路,2种状况下电缆上的雷电过电压都会增大。

参考文献:

- [1]王伟,王永亮,刘冲,等. 110 kV 三相交叉互联电缆的频变模型及局放仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 117-122.
- [2]章鹿华,王伟,李华春. 交叉互联接地电缆系统局放检测的仿真研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(1): 38-42.
- [3]夏成军,李勇,金兵梅. 基于护套电流和的 110 kV GIS 终端电缆行波故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 91-97.
- [4]韩淑英,李文生,司策. 电力电缆敷设工程图集——设计·加工·安装[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.
- [5]吴文辉,曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [6]韩晓鹏,李华春,周作春. 同相两根并联大截面交联电缆敷设方式的探讨[J]. 高压技术, 2005, 31(11): 66-67.
- [7]柴进爱. 模拟热荷法计算地下电缆群温度场的研究[D]. 西安:西安交通大学, 2008.
- [8]杜建军. 同相两根并联大截面交联电缆敷设方式的探讨[J]. 上海电力, 2005, 18(6): 656.
- [9]赵丹丹,张嘉旻,黄华,等. 220 kV 城市电缆及混合线路过电压及绝缘配合研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 270-273.
- [10]李超群,张嘉旻,谢伟,等. 500 kV 城市电缆线路过电压研究[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 869-872.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

汪旭旭(1988—),男,湖北远安人,助理工程师,工学硕士,从事特高压直流输电工程技术研究方面的工作(E-mail: wxx1481@163.com)。

郑贤龙(1988—),男,湖北荆门人,助理工程师,从事超高压输电线路运行检修与维护技术研究与应用方面的工作(E-mail: 13971455361@163.com)。

郭靖(1985—),男,宁夏银川人,工程师,从事变电站建设施工技术研究方面的工作(E-mail: guojing_0802@163.com)。