

± 800 kV/500 kV 交直流混联输电线路反击耐雷水平

李瑞芳¹,曹晓斌¹,张先怡²,陈 奎¹,沈佳杰³

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031;2. 四川电力设计咨询有限公司,四川 成都 610000;
3. 德州仪器半导体技术有限公司,上海 200122)

摘要: 采用 PSCAD/EMTDC 建立了 ± 800 kV/500 kV 交直流混联输电线路反击耐雷水平仿真模型,讨论了杆塔接地电阻、绝缘子片数、雷电流波形、杆塔高度、避雷器变化对耐雷水平的影响,着重从分流系数的角度分析了接地电阻影响反击耐雷水平的原因,比较了 ± 800 kV/500 kV 交直流混联输电线路和 500 kV 同塔双回线路、 ± 800 kV 直流线路的反击耐雷水平。理论分析表明:在交直流混联线路中, ± 800 kV 线路的反击耐雷水平是其交流 500 kV 线路的 2 倍以上;反击耐雷水平在接地电阻为某一定值时急剧降低;交直流混联线路中,交流线路和直流线路的反击耐雷水平分别大于单独 500 kV 同塔双回线路、 ± 800 kV 直流线路。

关键词: 交直流混联; 反击; 耐雷水平; 分流系数; PSCAD/EMTDC; 交流输电; 直流输电

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.015

0 引言

由于在大容量、远距离输电上具有优势,直流输电在我国电力系统中广泛使用,并形成了南方电网、华东电网等交直流混联大电网^[1-4]。雷击跳闸是影响电网安全运行的重要原因之一,因此,研究 ± 800 kV/500 kV 同塔多回交直流混联输电线路反击耐雷水平具有重要的意义和价值。

国内外在同塔多回输电线路反击耐雷水平方面已经开展了很多相关的研究工作^[5-15],如:文献[8-9]仿真研究了 1000 kV/500 kV 同塔多回交流线路中相序排列方式、间隙长度等对反击跳闸率的影响;文献[10-11]重点分析了 1000 kV/500 kV 同塔多回交流线路中,500 kV 上层横担外侧导线和一侧导线绝缘水平及 500 kV 相序排列方式对反击耐雷性能的影响;文献[12-13]分别分析了 500 kV 同塔四回线路和 220 kV 同塔四回输电线路的反击耐雷性能;文献[14-15]对云广 ± 800 kV 和 ± 500 kV 三沪 II 回直流输电线路做了耐雷性能研究。

尽管目前开展了很多工作,但是,专门针对同塔多回交直流混联线路的反击耐雷水平的研究很少,因此,本文以 ± 800 kV/500 kV 交直流混联输电线路为研究对象,在建立雷电流模型、输电线路模型、杆塔波阻抗模型、绝缘子闪络模型等基础上,采用 PSCAD/EMTDC 软件进行仿真分析,讨论了杆塔接地电阻、绝缘子片数、雷电流波形、杆塔高度、避雷

器等因素变化时对耐雷水平造成的影响,重点从分流系数的角度解释了接地电阻对耐雷水平影响的原因,着重比较了 ± 800 kV/500 kV 交直流混联输电线路和 500 kV 同塔双回线路、 ± 800 kV 直流线路的耐雷水平并分析了原因。

1 杆塔塔型及线路参数

± 800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路杆塔尺寸及布置如图 1 所示。杆塔总高为 77.6 m,呼称高度 32.6 m,避雷线在杆塔的顶端, ± 800 kV 直流线路在避雷线与交流线路之间,500 kV 交流输电线路位于杆塔的下边 2 层横担,呈三角形排列。

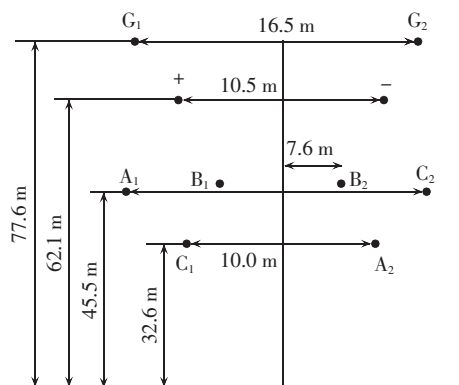


图 1 杆塔尺寸及布置图

Fig.1 Dimensions and arrangement of tower

± 800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路中,输电导线采用 4×LGJ630/45 型号,弧垂 $f_c=19$ m,取分裂间距 $d=0.45$ m,导线半径 $r=0.016875$ m,直流电阻取为 $0.05 \Omega/\text{km}$ 。2 根避雷线为水平架设,采用 LBGJ240 型号,弧垂 $f_0=11$ m,直径 $d_0=0.01$ m,直流电阻取为 $0.358 \Omega/\text{km}$ 。线路档距为 400 m,平均土壤电阻率取为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。

收稿日期:2014-07-24;修回日期:2015-06-29

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(268-2014CX022)
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2682014CX022)

2 仿真模型

2.1 雷电流波形

很多资料和运行经验均显示雷击杆塔时,流经杆塔的雷电流是负极性的,所以本文仿真中的雷电流波形设置为 $-2.6/50\text{ }\mu\text{s}$ 。

在 PSCAD 中搭建雷电流模型时,需搭建一个雷电通道的等值电路。仿真中用受控雷电流源和波阻抗 Z_0 并联组成雷电通道的等值电路, $Z_0=300\text{ }\Omega$ 。受控电流源一般表示为双指数函数 $i=I_0(e^{\alpha t}-e^{\beta t})$,其中, $I_0=1.058$, $\alpha=-15000$, $\beta=-1860000$ 。采用 PSCAD 元件模型库中的指数函数和加/减法器构成函数 $i=I_0(e^{\alpha t}-e^{\beta t})$ 。

2.2 输电线路模型

PSCAD/EMTDC 中的输电线路模型有贝杰龙模型 (Bergeron model) 和频率相关模型 (frequency dependent model) 2 种。

雷击会产生大量的高次谐波,频率一旦变化,输电线路的参数也会变化,谐波分量的频率不同,在线路中通过时造成的变化也不同。所以本文在仿真中采用频率相关模型。

在 PSCAD 中搭建 $\pm 800\text{ kV}/500\text{ kV}$ 交直流混联四回输电线路雷击模型如图 2 所示。

2.3 杆塔模型

本文采用波阻抗模型,计算垂直导体波阻抗时,可以将其分成 4 段分别计算。每段都分为主体部分和支架部分,并假定每段分布均匀,根据各部分几何尺寸可计算出波阻抗。

主体部分的波阻抗 Z_{Tk} 可以表示为:

$$Z_{Tk}=60\left(\ln\frac{2\sqrt{2}h_k}{r_{ek}}-2\right)\quad k=1,2,3,4\quad (1)$$

其中, r_{ek} 为第 k 段的等效半径; h_k 为第 k 段顶端对地面的高度。支架部分波阻抗 Z_{Lk} 为对应主体部分波阻抗的 9 倍^[16],即 $Z_{Lk}=9Z_{Tk}(k=1,2,3,4)$ 。

电磁波通过多导体系统时,有无支架会影响其通过所用的时间。在有支架时,所用时间要多一些。

横杆的波阻抗用式(2)计算^[17]:

$$Z_{Ak}=60\ln\frac{2h_k}{r_{Ak}}\quad k=1,2,3,4,5\quad (2)$$

其中, r_{Ak} 为第 k 段的横杆的半径,通常取 1/4 的横杆宽度。

根据以上分析得杆塔的多波阻抗模型如图 3 所示,图中: $Z_{Ak}(k=1,2,3,4,5)$ 为横杆波阻抗; $Z_{Tk}(k=1,2,3,4)$ 、 $Z_{Lk}(k=1,2,3,4)$ 别为杆塔主体和支架波阻抗。由公式计算的波阻抗值为: $Z_{A1}=217.6\text{ }\Omega$, $Z_{A2}=231.4\text{ }\Omega$, $Z_{A3}=101.5\text{ }\Omega$, $Z_{A4}=81.5\text{ }\Omega$, $Z_{A5}=195.7\text{ }\Omega$; $Z_{T1}=99.8\text{ }\Omega$, $Z_{T2}=85.3\text{ }\Omega$, $Z_{T3}=63.0\text{ }\Omega$, $Z_{T4}=39.1\text{ }\Omega$; $Z_{L1}=898.2\text{ }\Omega$, $Z_{L2}=768.3\text{ }\Omega$, $Z_{L3}=567.8\text{ }\Omega$, $Z_{L4}=352.3\text{ }\Omega$ 。

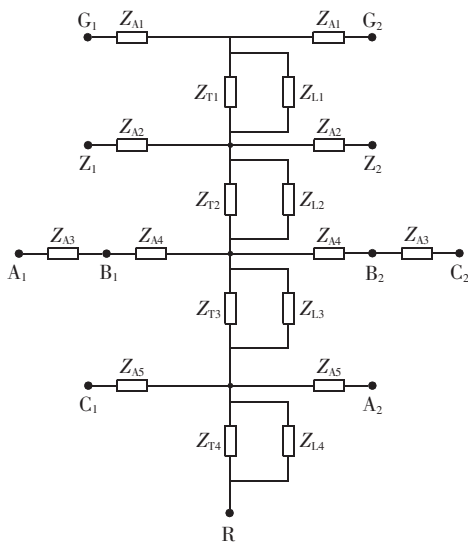


图 3 杆塔多波阻抗仿真模型

Fig.3 Simulation model of multi-wave impedance for tower

2.4 绝缘子串络判据模型

雷击塔顶时,用比较法来判断绝缘子是否闪络: U_t 为杆塔最高点电压, U_c 为输电线电压, $U_{50\%}$ 为负极

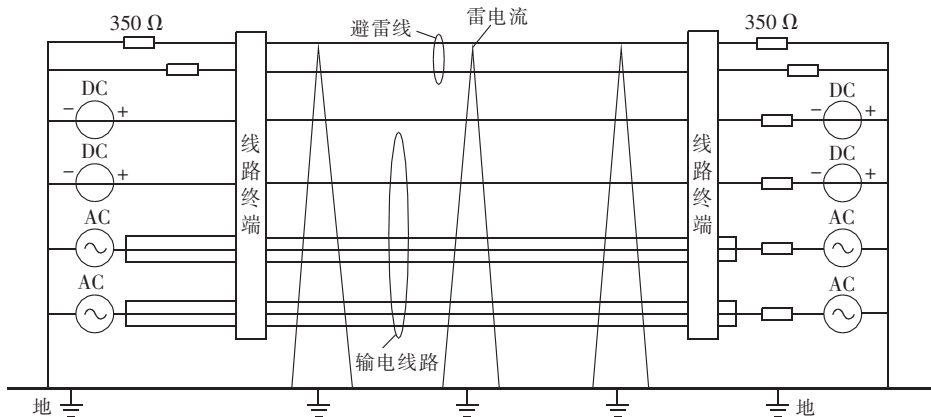


图 2 $\pm 800\text{ kV}/500\text{ kV}$ 交直流混联四回输电线路雷击模型

Fig.2 Model of lightning strike for $\pm 800\text{ kV}/500\text{ kV}$ AC-DC hybrid four-loop lines

性 50% 冲击放电电压, 当 $|U_1 - U_c| > U_{50\%}$ 时, 判定绝缘子发生闪络。在本文中, 交流 500 kV 绝缘子雷击闪络电压为 2520.645 kV, 直流 ±800 kV 绝缘子雷击闪络电压为 4472.11 kV。

在 PSCAD 中建立绝缘子模型时, 采用 PSCAD 中的电压控制开关元件, 开关设置为常开状态。绝缘子闪络模型如图 4 所示。图中, E_{al} 为绝缘子两端的电压差; $|X|$ 表示取绝对值; BRK_{al} 为逻辑输出。

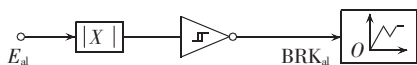


图 4 绝缘子闪络模型

Fig.4 Model of insulator flashover

3 反击耐雷性能的影响因素分析

3.1 ±800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路的耐雷水平

基于 ±800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路雷击模型, 分析了交直流混联线路中 500 kV 交流和 ±800 kV 直流线路各自的耐雷水平, 结果如图 5 所示。

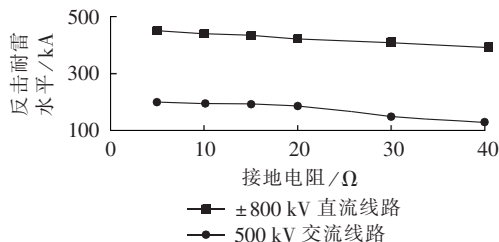


图 5 500 kV 交流线路和 ±800 kV 直流线路的耐雷水平

Fig.5 Lightning resistance level of 500 kV AC and ±800 kV DC lines

从图 5 中可以看出, ±800 kV 直流线路的反击耐雷水平超过 400 kA, 交流 500 kV 线路的反击耐雷水平约在 150~210 kA, 比 ±800 kV 直流线路小得多。所以, 交直流混联线路中, ±800 kV 直流线路基本不会发生反击闪络。这是因为尽管 ±800 kV 线路位于 500 kV 交流线路上方, 因此雷电流经过杆塔入地时, ±800 kV 线路导线绝缘子上方的电位升要比 500 kV 线路导线绝缘子上方的电位升高, 但是由于 ±800 kV 线路的绝缘强度比 500 kV 线路高更多, 导致 ±800 kV 线路绝缘子两端的电压差难以使绝缘子闪络。

例如, 当接地电阻为 15 Ω、雷电流为 280 kA 时, ±800 kV 线路绝缘子上端的电位升为 4888 kV, 绝缘子两端的电压差为 4888 - 800 = 4088 (kV), 小于闪络电压 4472.11 kV, 因此不会闪络。同样的雷电流和接地电阻下, 500 kV 线路绝缘子上端的电位升为 3732 kV, 绝缘子两端电压差为 3723 - 500 = 3223 (kV), 大于闪络电压 2520.645 kV, 会发生闪络。所以下文中讨论 ±800 kV/500 kV 交直流混联线路耐雷水平时, 着重考虑双回 500 kV 交流线路的反击耐雷水平。

3.2 接地电阻对反击耐雷水平的影响

基于 ±800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路雷击模型, 分析杆塔接地电阻对耐雷水平的影响。接地电阻变化时, 耐雷水平发生变化如图 6 所示。

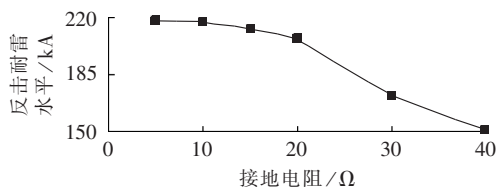


图 6 杆塔接地电阻对耐雷水平的影响

Fig.6 Effect of tower grounding resistance on lightning resistance level

从图 6 中看出, 接地电阻增加会导致输电线路反击耐雷水平降低。当接地电阻从 5 Ω 增大至 40 Ω 时, 线路反击耐雷水平从 218.8 kA 降低到 151.2 kA, 降低了 30.1%。当接地电阻在 20 Ω 以下时, 接地电阻的变化对反击耐雷水平影响较小; 当接地电阻在 20 Ω 以上时, 随着阻值增加, 反击耐雷水平急剧降低。20 Ω 的接地电阻成为 1 个变化的拐点, 这是因为杆塔的接地电阻和分流系数 β 有着密切的联系, 杆塔接地电阻越大, 分流系数 β 越小。当接地电阻增大到一定程度时, 分流系数 β 会急剧减小。在本文仿真中, 接地电阻大于 20 Ω 时, 分流系数 β 下降较快, 由 $U = (1 - \beta) \left(Ri + L \frac{di}{dt} \right)$ (其中, R 为杆塔接地电阻; L 为杆塔的电感; i 为流经杆塔的电流) 可知, 杆塔电位会迅速增加, 引起绝缘子两端的电位差快速增加而闪络, 线路反击耐雷水平急剧降低。接地电阻对分流系数的影响如图 7 所示。

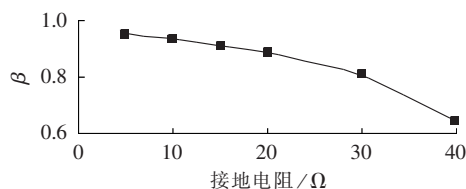


图 7 杆塔接地电阻对分流系数的影响

Fig.7 Effect of tower grounding resistance on shunt coefficient

3.3 绝缘子片数对反击耐雷水平的影响

基于 ±800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路雷击模型, 分析了交流 500 kV 线路安装不同片数的绝缘子对耐雷水平的影响。绝缘子片数变化时, 反击耐雷水平发生变化, 结果如图 8 所示。

从图 8 中看出, 当绝缘子从 27 片增加到 31 片时, 线路反击耐雷水平逐渐增加。当接地电阻为 5 Ω 时, 27 片绝缘子的反击耐雷水平是 194.9 kA, 31 片绝缘子的反击耐雷水平是 218.8 kA, 增加 4 片绝缘子后, 反击耐雷水平提高 12.3%。在接地电阻为 40 Ω

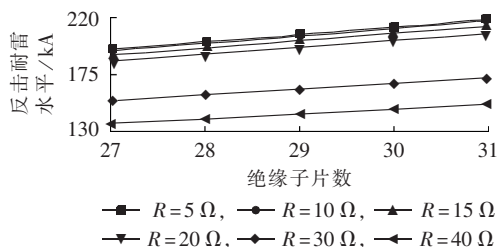


图 8 绝缘子片数对耐雷水平的影响

Fig.8 Effect of insulator piece quantity on lightning resistance level

时,27 片绝缘子的反击耐雷水平是 135.4 kA,31 片绝缘子的反击耐雷水平是 151.2 kA,增加 4 片绝缘子后,反击耐雷水平同样提高了 11.7%。不同接地电阻下,增加相同片数的绝缘子,对反击耐雷水平的提高效果基本相同。这是因为绝缘子串的闪络电压和绝缘子片数成线性关系,增加相同片数的绝缘子时,闪络电压的变化量相同,耐雷水平变化的百分比也基本相等。

3.4 雷电流波形对反击耐雷水平的影响

基于 ± 800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路雷击模型,分析雷电流波形对反击耐雷水平的影响。雷电流波形变化时,反击耐雷水平发生变化,如图 9 所示。

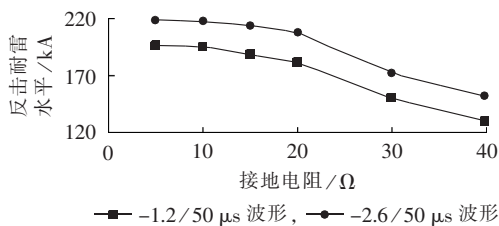


图 9 雷电流波形对耐雷水平的影响

Fig.9 Effect of lightning waveform on lightning resistance level

从图 9 中看出,在相同杆塔冲击接地电阻下, $-2.6/50 \mu\text{s}$ 雷电流波形作用下的线路反击耐雷水平,明显高于 $-1.2/50 \mu\text{s}$ 雷电流波形作用下的线路反击耐雷水平。在接地电阻为 5Ω 时, $-1.2/50 \mu\text{s}$ 雷电流波形下的反击耐雷水平为 196.3 kA,比在 $-2.6/50 \mu\text{s}$ 雷电流波形下的反击耐雷水平 218.8 kA 低 10.3%;在接地电阻为 40Ω 时, $-1.2/50 \mu\text{s}$ 雷电流波形下的反击耐雷水平为 129.2 kA,比在 $-2.6/50 \mu\text{s}$ 雷电流波形下的反击耐雷水平 151.2 kA 低 14.6%。这主要是由于雷电流的波头时间越短,其高频分量能量越高,杆塔的冲击响应电压越大,从而降低了线路的反击耐雷水平。由此可见,我国防雷设计中雷击塔顶时线路反击耐雷水平的估计过于保守。

3.5 杆塔高度对反击耐雷水平的影响

基于 ± 800 kV/500 kV 交直流混联四回输电线路雷击模型,分析杆塔高度对反击耐雷水平的影响。杆

塔高度变化时,反击耐雷水平变化结果如图 10 所示。

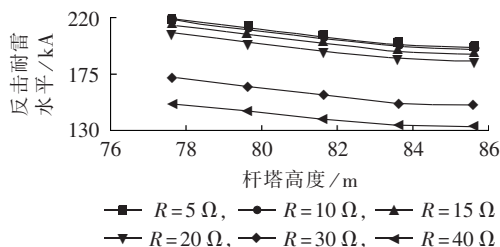


图 10 杆塔高度对耐雷水平的影响

Fig.10 Effect of tower height on lightning resistance level

从图 10 中看出,杆塔高度增加会引起反击耐雷水平下降。当接地电阻等于 5Ω 时,77.6 m 高的杆塔的反击耐雷水平是 218.8 kA,85.6 m 高的杆塔的反击耐雷水平是 195.5 kA,降低了 10.6%;当接地电阻等于 40Ω 时,77.6 m 高的杆塔的反击耐雷水平是 151.2 kA,85.6 m 高的杆塔的反击耐雷水平是 132.8 kA,降低了 12.2%;这是因为雷电流从杆塔流入大地时,塔顶会有一电压分量,电压的大小与雷电流在杆塔中的传播时间有关,增大杆塔的高度,使雷电流在杆塔中的传播时间增加,塔顶的电位升高,导致耐雷水平降低。

3.6 500 kV 交流线路安装避雷器时的反击耐雷水平

避雷器模型利用 PSCAD 中的金属氧化物避雷器 MOSA(Metal Oxide Surge Arrester)来模拟,参数根据伏安特性曲线图设置。图 11 为避雷器的伏安特性曲线图。

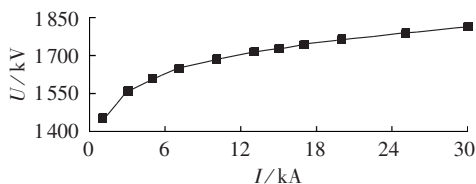


图 11 避雷器伏安特性曲线图

Fig.11 Volt-ampere characteristics of lightning arrester

仿真中在未安装避雷器时,500 kV 交流回路会发生绝缘子闪络,所以分 3 种情况来研究避雷器对耐雷水平的影响:在 500 kV 交流回路的 A 相安装 1 个避雷器,在 A、B 相各安装 1 个避雷器,在 A、B、C 相各安装 1 个避雷器。仿真结果如图 12 所示。

由图 12 可知,当接地电阻等于 5Ω 时,未安装避雷器时的反击耐雷水平为 218.8 kA,在 A 相安装 1 个避雷器的反击耐雷水平为 229.0 kA,比未安装时提高了 4.6%;在 A、B 相各安装 1 个避雷器的反击耐雷水平为 232.3 kA,比未安装时提高了 6.2%;在 A、B、C 相各安装 1 个避雷器的反击耐雷水平为 426.8 kA,相比未安装时提高了 95.1%。当接地电阻为 40Ω 时,未安装避雷器的反击耐雷水平为 151.2 kA,在 A

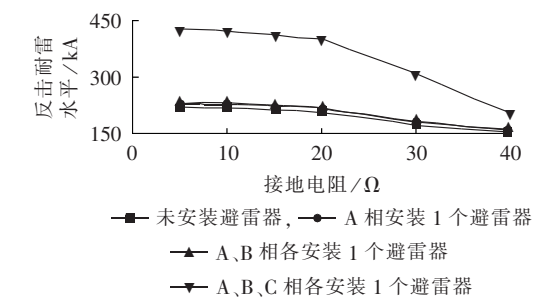


图 12 避雷器对耐雷水平的影响

Fig.12 Effect of lightning arrester on lightning resistance level

交流回路与常规 500 kV 交流同塔双回路单回反击耐雷水平的仿真结果见图 14。

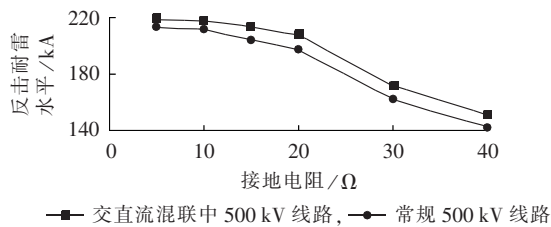


图 14 交直流混联输电线路 500 kV 回路与交流回路耐雷水平对比

Fig.14 Comparison of lightning resistance level between 500 kV AC line of ±800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines and general 500 kV AC line

从图 15 中可以看出,±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路的 500 kV 交流回路反击耐雷水平比一般 500 kV 同塔双回交流线路略高一些。这是因为交直流混联线路与单独的同塔双回线路比较,相当于增加了 2 条线路,因而增加了整体线路的对地电容,使得避雷线的波阻抗降低,增加了避雷线上的雷电流分流,从而使杆塔的入地电流减小,反击耐雷水平提高。虽然这个作用在与单独±800 kV 线路比较的解释中同样适用,但是由于 500 kV 线路先闪络导致的雷电流泄放作用比这个大得多,因此可以忽略这个因素。

5 结论

本文研究了±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路反击耐雷水平的影响因素,并分别与±800 kV 直流线路和 500 kV 交流线路进行了比较分析,主要结论如下。

a. 在±800 kV/500 kV 交直流混联线路中,尽管 800 kV 线路位于 500 kV 交流线路上方,导线绝缘子上方的电位升高于 500 kV 线路导线绝缘子的电位升,但是由于±800 kV 线路的绝缘强度高,反击耐雷水平是 500 kV 线路的 2 倍以上,因此,考虑反击耐雷水平时,主要考虑 500 kV 线路部分即可。

b. 杆塔的接地电阻增加时,±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路反击耐雷水平降低,反击耐雷水平出现急剧下降时对应的接地电阻是 20 Ω。这种现象产生的主要原因是分流系数的显著下降。

c. ±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路中,当杆塔受到雷击时,500 kV 交流线路先发生闪络,几乎所有的雷电流都沿着 500 kV 交流导线和杆塔流入大地,使得双回 500 kV 交流线路起到类似线路避雷器的分流作用,±800 kV 直流回路起到很好的保护作用。而普通的±800 kV 线路则没有这样的保护,所以±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路反击耐雷水平高于普通的±800 kV 线路。

相安装 1 个避雷器的反击耐雷水平为 157.7 kA,相比未安装时提高了 4.3%;在 A、B 相各安装 1 个避雷器的反击耐雷水平为 159.5 kA,相比未安装时提高了 5.5%;在 A、B、C 相各安装 1 个避雷器的反击耐雷水平为 185.8 kA,相比未安装时提高了 22.9%。由此可见,在 A 相安装 1 个避雷器和在 A、B 相各安装 1 个避雷器起到的防雷效果相近,而在 A、B、C 相各安装 1 个避雷器能起到很好的防雷效果。

4 反击耐雷性能与 500 kV 同塔双回线路、±800 kV 直流线路耐雷性能的比较

±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路的±800 kV 直流回路与一般的±800 kV 直流线路反击耐雷水平的仿真结果见图 13。

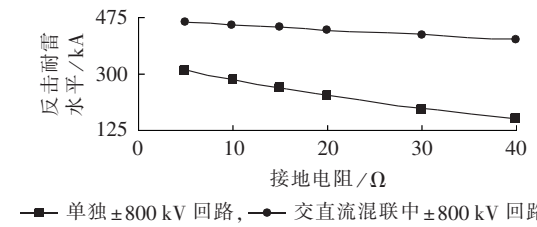


图 13 交直流混联中±800 kV 直流线路与单回直流线路的耐雷水平比较

Fig.13 Comparison of lightning resistance level between ±800 kV DC line of ±800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines and single-loop DC line

从图 13 中可以看出,±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路的±800 kV 直流回路的反击耐雷水平比常规单回±800 kV 直流线路反击耐雷水平高。这是因为对于交直流混联线路,由于±800 kV 直流线路的设计绝缘强度比 500 kV 交流线路绝缘强度大得多,当杆塔受到雷击时,500 kV 交流线路先发生闪络,几乎所有的雷电流都沿着 500 kV 交流导线和杆塔流入大地,使得双回 500 kV 交流线路起到类似线路避雷器的作用,对±800 kV 直流回路起到很好的保护作用。而普通的±800 kV 线路则没有这样的保护,所以反击耐雷水平会低得多。

±800 kV/500 kV 交直流混联输电线路的 500 kV

d. ± 800 kV/500 kV 交直流混联输电线路中, 500 kV 交流线路反击耐雷水平与一般 500 kV 同塔双回交流线路相比略高。交直流混联线路与单独的同塔双回线路相比增加了 2 条线路, 整体线路的对地电容增加, 线路的波阻抗降低, 雷电流分流增加, 从而使杆塔的入地电流减小, 反击耐雷水平提高。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): T1-T8.
LIU Zhengya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): T1-T8.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 175-179.
- [3] 杨勇, 陆家榆, 鞠勇. 交流线路与 ± 800 kV 直流线路同走廊时的地面混合电场研究[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 54-59.
YANG Yong, LU Jiayu, JU Yong. Study on the hybrid electric field over the ground surface under AC lines and ± 800 kV DC lines in the same corridor[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 54-59.
- [4] 吴桂芳, 袁春峰, 陆家榆, 等. 特高压直流线路与交流线路同走廊时混合电磁环境的计算[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 14-19.
WU Guifang, YUAN Chunfeng, LU Jiayu, et al. Calculation on electromagnetic environment of UHVDC and EHVAC transmission lines erected in a common corridor[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 14-19.
- [5] 束洪春, 曹璞璘, 张广斌, 等. 雷电流波形参数检测视角下的 ± 800 kV 直流输电线路反击电磁暂态分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 1-9.
SHU Hongchun, CAO Pulin, ZHANG Guangbin, et al. Electromagnetic transient analysis of back flashover in ± 800 kV DC transmission line to acquire lightning parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 1-9.
- [6] 杨振国, 杨振喜, 黄凯, 等. 特高压直流与 500 kV 交流线路同塔并架防雷特性研究[J]. 吉林电力, 2012, 40(4): 12-14.
YANG Zhenguo, YANG Zhenxi, HUANG Kai, et al. Lightning protection characteristic analysis of UHVDC and 500 kV AC transmission lines in the same tower[J]. Jilin Electric Power, 2012, 40(4): 12-14.
- [7] 王东举. 500/220 kV 同塔混压四回线路防雷研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
WANG Dongju. Lightning research for quadruple-circuit transmission line with dual voltage 500 kV/220 kV on the same tower [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [8] 范冕, 万磊, 戴敏, 等. 1000 kV/500 kV 特、超高压同塔 4 回交流输电线路雷电性能仿真分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 584-590.
FAN Mian, WAN Lei, DAI Min, et al. Lightning performance simulation of quadruple-circuit transmission line with dual voltage 1000 kV/500 kV on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 584-590.
- [9] 谷定燮, 戴敏, 李志军, 等. 1000 kV 同塔双回线路双回故障跳闸概率分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 441-444.
GU Dingxie, DAI Min, LI Zhijun, et al. Analysis of failure trip rate of 1000 kV double circuits on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 441-444.
- [10] 杨庆, 司马文霞, 孙义豪, 等. 1000 kV/500 kV 同塔混压四回输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 132-138.
YANG Qing, SIMA Wenxia, SUN Yihao, et al. Lightning protection performance of back-flashover for quadruple-circuit transmission line with dual voltage 1000 kV/500 kV on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 132-138.
- [11] 孙义豪, 司马文霞, 杨庆, 等. 1000 kV/500 kV 同塔混压 4 回输电线路的防雷性能[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2102-2110.
SUN Yihao, SIMA Wenxia, YANG Qing, et al. Lightning performance of quadruple-circuit transmission line with dual voltage 1000 kV/500 kV on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2102-2110.
- [12] 李俊, 张伟, 刘渝根, 等. 220 kV 同塔四回输电线路反击耐雷性能影响因素[J]. 电力建设, 2010, 31(9): 55-59.
LI Jun, ZHANG Wei, LIU Yugen, et al. Influence factors of lightning performance of back flashover of 220 kV transmission lines with quadruple-circuit on single tower[J]. Power Construction, 2010, 31(9): 55-59.
- [13] 柴雅静, 周文俊, 李雪, 等. 500 kV 同塔四回输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 59-62.
CHAI Yajing, ZHOU Wenjun, LI Xue, et al. Lightning performance of back flashover for 500 kV AC transmission lines with quadruple-circuits on single tower[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 59-62.
- [14] 谭进, 张焕青, 刘玉君, 等. ± 500 kV 三沪 II 回同塔双回直流输电线路防雷分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2173-2179.
TAN Jin, ZHANG Huanqing, LIU Yujun, et al. Analysis on lightning withstand performance of the Sanhu ± 500 kV double circuit HVDC power transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2173-2179.
- [15] 尚涛, 杜忠东, 张成巍, 等. 云广 ± 800 kV 特高压直流输电线路耐雷性能研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2086-2089.
SHANG Tao, DU Zhongdong, ZHANG Chengwei, et al. Lightning withstand performance of the Yunguang ± 800 kV UHVDC power transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2086-2089.
- [16] HARA T, YAMAMOTO O. Modeling of a transmission tower for lightning surge analysis[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 1996, 14(3): 283-289.
- [17] 张永记, 司马文霞, 张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 93-97.
ZHANG Yongji, SIMA Wenxia, ZHANG Zhijin. Summary of the study of tower models for lightning protection analysis[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 93-97.

作者简介:



李瑞芳

李瑞芳(1980—), 女, 山西原平人, 讲师, 博士, 主要从事超/特高压输电线路防雷接地、铁路防雷接地技术的应用与研究(E-mail: 99530531@qq.com);

曹晓斌(1974—), 男, 湖南衡阳人, 副教授, 博士, 主要从事特高压输电、防雷与接地、过电压及接地技术方面的研究。

(下转第 114 页 continued on page 114)

JIANG Xianguo, WANG Zengping, LI Chen, et al. Zoning scheme of regional autonomy backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 234-241.

[19] 钱诚, 王增平, 张晋芳. 基于同步相量测量的厂站内网络拓扑新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 80-86.

QIAN Cheng, WANG Zengping, ZHANG Jinfang. A novel substation topology analysis algorithm based on synchronized phasor measurement[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 80-86.

[20] 王增平, 张晋芳, 钱诚. 基于同步测量信息的电网拓扑错误辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 1-6.

WANG Zengping, ZHANG Jinfang, QIAN Cheng. Topology error identification based on synchronized measurements for power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 1-6.

作者简介:



马 静

马 静(1981—),男,山西阳泉人,副教授,博士后,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: hdmajing@aliyun.com);

裴 迅(1989—),男,河北保定人,硕士,从事电力系统继电保护方面的研究(E-mail: ncepupx@163.com);

马 伟(1989—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护、供电恢复等方面的研究(E-mail: jnyz-mawei@163.com);

王增平(1964—),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化(E-mail: wangzp1103@aliyun.com)。

Tripping strategy based on directional weight for wide-area backup protection

MA Jing¹, PEI Xun², MA Wei¹, WANG Zengping¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Fangshan Power Supply Bureau, State Grid Beijing Electric Power Grid, Beijing 102401, China)

Abstract: With the prerequisite that the faulty element has been identified by the limited wide-area centralized backup protection, a tripping strategy based on directional weight is proposed for the wide-area backup protection. A node-branch correlation matrix is formed based on the directional weight according to the network topology and the positive-sequence current phasor information within the area. A component-breaker relevance vector is constructed according to the results of fault identification and circuit breaker failure detection, based on which, the relevant circuit breaker is recognized and tripped. The simulative results demonstrate that, the proposed method simplifies the cooperation relationship of backup protection; the fault is cut off with the minimum blackout zone; the requirement for information synchronization is not strict; and it has better reliability and applicability even when partial circuit breaker information is lost.

Key words: relay protection; wide-area protection; tripping strategy; electric circuit breakers; directional weight; component-breaker relevance vector

(上接第 106 页 continued from page 106)

Back-flashover resistance level of ± 800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines

LI Ruifang¹, CAO Xiaobin¹, ZHANG Xianyi², CHEN Kui¹, SHEN Jiajie³

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

3. Texas Instruments Semiconductor Technology Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: A simulation model of back-flashover resistance level is built based on PSCAD/EMTDC for ± 800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines and the effect of tower grounding resistance, insulator piece quantity, lightning waveform, tower height and lightning arrester on the back-flashover resistance level is discussed. The effect of grounding resistance on the level is emphatically analyzed from the aspect of shunt coefficient. The back-flashover resistance level of ± 800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines is compared with that of 500 kV dual-loop lines on same tower and that of ± 800 kV DC line respectively. The theoretical analysis shows that: as the ± 800 kV/500 kV AC-DC hybrid transmission lines, the back-flashover resistance level of its ± 800 kV line is above two times higher than that of its AC 500 kV line, while the back-flashover resistance level of its AC and DC line is higher than that of stand-alone ± 800 kV DC line and 500 kV dual-loop lines respectively; the back-flashover resistance level drops abruptly when the grounding resistance reaches a certain value.

Key words: AC-DC hybrid; back flashover; lightning resistance level; shunt coefficient; PSCAD/EMTDC; AC power transmission; DC power transmission