

特高压线路地线布置方式 对地线电能损耗及潜供电流的影响

李振强, 戴敏, 娄颖, 李志军

(国网电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430074)

Effect of UHV Ground Wire Disposition on Its Electric Energy Loss and Second Arc Current

LI Zhen-qiang, DAI Min, LOU Ying, LI Zhi-jun

(State Grid Electric Power Research Institution, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Owing to electromagnetic coupling of conductors, as well as incomplete balanceable transposition of transmission lines and asymmetry of three phase load, it forms a circuit of inductive current between the two ground wires or ground wires and the earth, so it produces electric energy loss. The inductive currents are different because of different ground wire disposition, hence the electric energy loss has great disparity. Ground wire disposition has some impacts on second arc current of transmission lines, and it also can influence simulation model while analog computating. Combining the UHV same tower double circuit transmission, using electromagnetic transients program EMTP to calculate inductive current of ground wire and second arc current of transmission lines. In this paper, it gives the preferable ground wire disposition mode based on the calculation results, which gives attention to reducing ground wire electric energy loss and second arc current of transmission lines. In addition, it can select the ground wire disposition mode which is easy to modeling while guaranteeing calculation accuracy of second arc current.

KEY WORDS: UHV; ground wire; induced voltage; induced current; electric energy loss; second arc current

摘要: 由于导线的电磁耦合作用、线路的不完全平衡换位和三相负荷的不对称性, 2根架空地线之间或地线与大地之间会形成感应电流回路, 从而在地线上产生电能损耗。不同的地线布置方式感应电流不同, 电能损耗差别很大; 架空地线的布置方式对线路潜供电流会产生一定的影响, 这也决定了在模拟计算时建立仿真模型的难易。文中利用 EMTP 软件对特高压同塔双回输电线路不同布置方式下地线的感应电压、电流及线路潜供电流进行了仿真计算, 根据计算结果, 从减小电能损耗和潜供电流的角度考虑, 可选出较佳的地线布置方式; 在保证潜供电流计算精度的前提下, 可选择易于建模的地线布置方式。

关键词: 特高压; 架空地线; 感应电压; 感应电流; 电能损

耗; 潜供电流

0 引言

架设架空地线是高压和超高压输电线路最基本的防雷措施, 它可以防止雷直击输电线路, 还可通过对导线的屏蔽作用减小导线上的感应电压等^[1], 有时为减小输电线路上的感应电压, 还在输电线路下方架设地线。随着电力系统运行管理水平的不断提高和自动、远动、遥测、遥控、遥调系统的不断完善, 地线资源综合利用的概念被提出, 其主要包括开设地线高频载波通道、光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW)等光纤数字通道, 兼顾地线融冰、抽能等内容^[2-5]。

地线起着保护输电线路不易遭受雷击的重要作用, 但同时它又增加了电能损耗, 如 750 kV 线路负载电流为 1 kA 时, 其避雷线上所通过的电流约为 85 A, 1 km 长的避雷线上产生的有功损耗约为 4.62 kW, 若线路长度为 1 000 km, 则年电能损耗约 4×10^7 kW·h。对于特高压输电线路, 其输送潮流更大, 线路对架空地线的感应电流就越大, 电能损耗也越大。架空地线除了防雷这个重要功能以外, 还有降低工频过电压^[6]、减小输电线路的潜供电流^[7]的功能。

本文利用电磁暂态仿真软件 EMTP, 计算分析特高压同塔双回输电线路架空地线不同的接线方式对其感应电压、电流及电能损耗、潜供电流的影响。

1 架空地线感应电量及对潜供电流的影响

1.1 地线的感应电量

架空地线与输电线路之间存在电磁耦合和静

电耦合，在正常情况下三相导线上的负荷电流是不完全平衡的，且地线至各相导线的距离不相等，因此地线上会有 2 种电量：电磁感应分量和静电感应分量。如果地线逐塔直接接地，则 2 根地线之间可通过大地形成回路，形成 2 地线的线间环流，此外，每根地线又分别以大地为回路，形成感应电流回路。2 种电流的产生，将使输电线路的附加电能损耗增加，如果将地线绝缘，电流无法形成回路，可以将输电线路的附加电能损耗大大减小。

特高压架空地线悬挂方式通常有 3 种：1) 普通地线和 OPGW 均逐基接地；2) 普通地线分段绝缘，OPGW 逐基接地；3) 普通地线和 OPGW 均分段绝缘、一点接地。

如果地线分段绝缘，即一端接地另一端对地绝缘，则地线上的感应电量为电磁感应电压和电容耦合电流。由于静电感应电流为电容性耦合电流，其值很小，一般可忽略，因此，主要是电磁感应电压，地线绝缘端的电磁感应电压最大，其值可由下式得到

$$U_m = \omega l_L (M_{IIA} I_{IIA} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IIC} I_{IIC} + M_{IIA} I_{IIA} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IC} I_{IC} + M_2 I_2) \quad (1)$$

式中： U_m 为地线绝缘端最大的电磁感应电压； l_L 为该段地线长度； M_I 、 M_{II} 为单位长度输电线路对该地线的耦合电感； M_2 为另一地线对该地线的耦合电感； I_I 、 I_{II} 为 2 回输电线路上的电流； ω 为角频率。

如果地线逐基接地，则每 2 基杆塔间地线上的感应电量主要为电磁感应电流 I_L ，其值可由下式计算

$$I_L = (M_{IIA} I_{IIA} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IIC} I_{IIC} + M_{IIA} I_{IIA} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IC} I_{IC} + M_2 I_2) / L \quad (2)$$

式中： I_L 为地线电流； L 为地线的电感。

架空地线的静电感应分量是由线路和地线之间的耦合电容引起的，因此，对于常见的 3 种地线悬挂方式，地线上的感应电量主要是电磁感应分量，而电磁感应电流是引起地线损耗的主要原因。由式(2)可知，地线电磁感应电流与输电线路的负荷电流、耦合电感和线路的总长度有关。

特高压输电线路的输送功率较 500 kV 线路大大提高，线路负荷电流明显增大，线路工作电压大，导线之间的电磁耦合作用较强，线路长度大，这些特点都会导致特高压线路总的地线损耗增大。

1.2 地线感应电量对潜供电流的影响

当线路发生单相接地故障时，故障相两侧断路

器断开，非故障相仍连接电源继续运行。非故障相的工作电压和负载电流通过相间互电容和互感使被切除的故障相产生静电感应和电磁感应，从而使故障相仍能维持一定的接地电流，该电流称为潜供电流^[8]。潜供电流和电弧熄灭后弧道两端恢复电压的幅值是潜供电弧熄灭时间的决定性因素^[9]，潜供电弧的自灭时间决定着单相重合闸的重合时间和成功率^[10-12]，因此从提高系统稳定性和供电可靠性的角度来说潜供电流越小越好。由潜供电流的产生原理可知，要消除或减小潜供电流主要需要补偿线间互电容和互电感^[13]。

潜供电流由静电感应电流(横分量)和电磁感应电流(纵分量)组成，由非故障相负载电流经互感在故障相线路上感应出来的电势以故障相导线对地电容为回路供给部分接地电流，这部分电流是潜供电流的纵分量；由非故障相通过相间电容供给故障点的那部分接地电流称为潜供电流的横分量，其中静电感应分量(横分量)占较大比重^[14-15]。地线对潜供电流的影响如图 1 所示，图中： M_I 、 M_{II} 为非故障相和地线对故障相的耦合电感； C_I 、 C_{II} 为非故障相和地线对故障相的耦合电容； C_0 为故障相的对地电容。

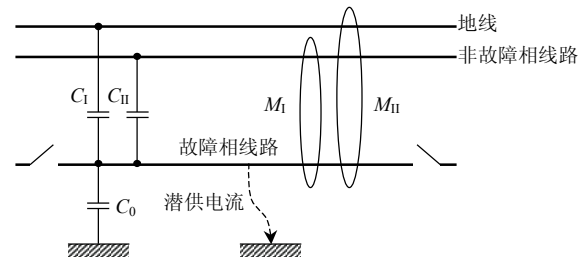


图 1 地线对潜供电流的影响

Fig. 1 Influence of ground wire on second arc current

若长度为 l 的同塔双回输电线路，其 I 回线 A 相单相接地，该相线路两端断路器跳开，根据潜供电流的定义，其静电感应电流 I_j 、最大电磁感应电势 E_{gm} 及最大电磁感应电流 I_{hm} 数值可分别由下式计算得到

$$I_j = j\omega l (C_{IB} U_{IB} + C_{IC} U_{IC} + C_{IIA} U_{IIA} + C_{IIB} U_{IIB} + C_{IIC} U_{IIC} + C_1 U_1 + C_2 U_2) \quad (3)$$

$$E_{gm} = j\omega \frac{l}{2} (M_{IIA} I_{IIA} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IIC} I_{IIC} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IC} I_{IC} + M_1 I_1 + M_2 I_2) \quad (4)$$

$$I_{hm} = \frac{2E_{gm}}{j\omega Ll + 1/(j\omega C_0 l)} = \frac{\omega l}{\omega Ll - 1/(\omega C_0 l)} \cdot (M_{IIB} I_{IIB} + M_{IC} I_{IC} + M_{IIA} I_{IIA} + M_{IIB} I_{IIB} + M_{IIC} I_{IIC} + M_1 I_1 + M_2 I_2) \quad (5)$$

式中： I_j 为静电感应电流； C_1 、 C_2 为两地线对故障相的耦合电容； E_{gm} 为最大电磁感应电势； C_1 、 C_{II} 为线路非故障相对故障相的耦合电容； M_1 、 M_2 为两地线对故障相的耦合电感； M_I 、 M_{II} 为线路非故障相对故障相的耦合电感； I_{hm} 为最大电磁感应电流。线路最大的潜供电流 $I_m = I_j + I_{hm}$ 。

架空地线上有感应的电压、电流，其通过对故障相的耦合电容、电感来影响潜供电流的大小。地线悬挂方式不同其感应电压、电流值也不同，且互电容、互电感不等对故障相的耦合作用也不一样，因此对潜供电流的影响亦不相同。由于潜供电流的静电分量是占主要部分的，因此，2根地线均为分段绝缘的方式对潜供电流的影响最大，2根地线均为逐塔接地的方式影响最小，但是与输电线路的电压、电流相比，地线的感应电压、电流数值甚小，总体上地线对潜供电流的影响不会太大。

特高压输电线路工作电压高、线间电容大，线路的潜供电流也较大。在潜供电流的模拟计算时，地线悬挂方式的不同会影响仿真模型的建立，为兼顾模拟计算的准确性和仿真模型的简易性，需要知道不同的地线悬挂方式对潜供电流大小的影响程度，此外，也可以从减小潜供电流的角度选择合适的地线悬挂方式。

2 仿真模型及计算结果

2.1 仿真模型

模型中的线路为同塔双回线路，最高运行电压1100kV，导线型号8×LGJ-630/45，普通地线型号LBGJ-150020AC，OPGW-175，土壤电阻率为260.6Ω·m，塔型为伞形，档距450m，导线和地线排列方式如图2所示，图中单位为m。

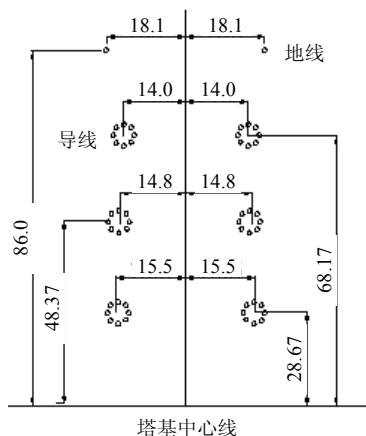


图2 导线和地线排列方式

Fig. 2 The disposition of conductors and ground wire

普通地线和OPGW均逐基接地，称为“方式一”；普通地线分段绝缘、OPGW逐基接地，称为“方式二”；普通地线和OPGW均分段绝缘，一点接地，称为“方式三”。

2.2 地线电能损耗的计算

线路正常运行时，输电线路不同的输送潮流、不同悬挂方式下架空地线上的感应电流如表1所示。

表1 线路正常运行时架空地线上的感应电流
Tab. 1 Inductive current on ground wire when transmission lines run normally

潮流/(MW+jMvar)	方式一—地线电流/A		方式二—地线电流/A		方式三—地线电流/A	
	OPGW	普通地线	OPGW	普通地线	OPGW	普通地线
2053-j73	29.04	27.93	30.41	0.74	0.74	0.74
3030-j100	42.85	41.25	44.86	0.74	0.74	0.74
4018-j127	56.66	54.57	59.31	0.74	0.74	0.74
5034-j133	71.16	68.55	74.48	0.74	0.74	0.74
6012-j179	84.86	81.87	88.93	0.74	0.74	0.74

注：分段绝缘地线的感应电流为接地端的电流。

方式一中2根地线均有较大的感应电流；方式二的OPGW感应电流较大，而普通地线感应电流很小。方式二的普通地线、方式三的2种地线电流均很小，这是由于地线一端绝缘、一端接地，地线电流为电容性感应电流，绝缘端电流为零，接地端最大。表1中所列的是接地端电流。

OPGW的交流电阻为0.533Ω/km，普通地线交流电阻为0.625Ω/km，地线电能损失功率与线路输送潮流的关系见表2和图3。

表2 线路正常运行时架空地线上的电能损耗
Tab. 2 Electric energy loss on ground wire when transmission lines run normally

潮流/(MW+jMvar)	地线电能损耗/(kW/km)		
	方式一	方式二	方式三
2053-j73	0.937	0.493	0.0006
3030-j100	2.042	1.073	0.0006
4018-j127	3.572	1.875	0.0006
5034-j133	5.636	2.957	0.0006
6012-j179	8.027	4.215	0.0006

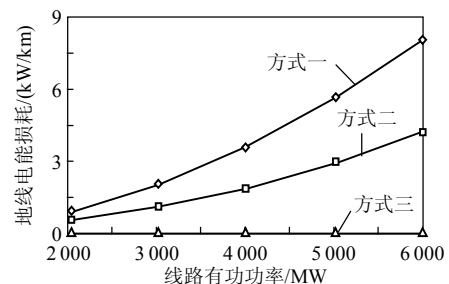


图3 地线电能损耗与线路潮流的关系

Fig. 3 The relationship between electric energy loss on ground wire and transmission flow

由表2和图3可知,方式一地线电能损耗最大,方式二次之,约为方式一的1/2,方式三地线电能损耗最小。方式一和方式二地线电能损耗随线路潮流(负荷电流)的平方成正比关系,方式三地线电能损耗与线路负荷电流无关,因此,从减小地线电能损耗的角度考虑,选用方式二的地线布置方式为佳。

2.3 潜供电流的计算

由1.2的分析可知,限制潜供电流的措施主要是补偿相间互电容和互感,在我国特高压输电线路常采用的措施是并联电抗器中性点接小电抗。单回线路采用完全补偿相间电容的原则来选择高抗中性点小电抗,而同塔双回线路需要用试探法来选择高抗中性点小电抗。仿真中线路长322 km,输送潮流 $3230\text{ MW} + j125\text{ Mvar}$,全线3个换位段,3种地线布置方式下潜供电流随中性点小电抗的变化关系如表3所示。

表3 潜供电流随中性点小电抗值变化的关系
Tab.3 The relationship between second arc current and neutral reactor

运行方式	中性点小电抗/ Ω	潜供电流/A		
		方式一	方式二	方式三
大方式	650	19.41	19.15	18.99
	750	13.58	13.52	13.75
	850	11.48	12.06	12.97
	950	13.39	13.78	14.65
	1050	19.30	19.51	19.65

表3表明,3种地线布置方式下潜供电流均是在中性点小电抗为 850Ω 时最小;在最佳小电抗值(850Ω)时,3种地线布置方式的潜供电流有所不同,其中方式一的潜供电流最小,方式三的潜供电流最大,方式二的值介于二者之间。2根地线逐基接地和一根地线逐基接地、另一根地线分段接地的潜供电流相比较,相差约4.8%,差异并不大。因此,在满足计算精度的要求下,进行仿真建模时可选择易于建模的地线布置方式。

3 结论

1) 架空地线的电能损耗主要是由电磁感应电流引起的,不同的地线布置方式对其电能损耗影响很大。方式一的电能损耗最大,方式二地线电能损耗约为方式一的1/2,方式三的地线电能损耗最小。

2) 线路的潜供电流主要决定于其静电感应电

流的大小,该电流与线路非故障相及地线电压的大小有关。方式一的潜供电流最小,方式三的潜供电流最大,方式二潜供电流的大小介于二者之间。总体上地线对潜供电流的大小影响不大,因此在仿真计算时,可选择易于建模的地线布置方式。

3) 综合考虑3种地线布置方式对电能损耗和潜供电流的影响,选用方式二的地线布置方式为佳。我国500 kV输电线路的地线绝大部分采用这种布置方式,特高压输电工程也可采用该方式。

参考文献

- [1] 张纬钺,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,2002:104-105.
- [2] 胡毅,叶廷路,王力农,等. 光纤复合架空地线的雷击断股机理与防治措施[J]. 电网技术,2006,30(16):70-76.
Hu Yi, Ye Tinglu, Wang Linong, et al. Strands breaking mechanisms of optical fiber composite overhead ground wire caused by lightning stroke and corresponding preventive measures[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 70-76(in Chinese).
- [3] 孙业成,赵大平,陈希. 电力系统信息产业的发展方向[J]. 电网技术,2000,24(12):37-40.
Sun Yecheng, Zhao Daping, Chen Xi. Development direction of information branch in power industry[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 37-40(in Chinese).
- [4] 李杰,陈希,林卫铭. 光纤复合架空地线(OPGW)热性能的研究[J]. 电网技术,2006,30(1):89-93.
Li Jie, Chen Xi, Lin Weiming. Study on heat properties of optical fiber composite overhead ground wires[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 89-93(in Chinese).
- [5] 邹军,刘元庆,袁建生,等. 光缆复合地线系统故障电流分布的计算与讨论[J]. 电网技术,2005,29(10):61-64.
Zou Jun, Liu Yuanqing, Yuan Jiansheng, et al. Calculation and analysis of fault current distribution for compound optical ground wire system[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 61-64(in Chinese).
- [6] 吴康平. 500 kV线路绝缘地线设计[J]. 电力建设,2001,22(11):11-13.
Wu Kangping. 500 kV transmission line insulated ground wire design[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(11): 11-13(in Chinese).
- [7] 东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2002:156-157.
- [8] 曹荣江,顾霓鸿,盛勇. 电力系统潜供电弧自灭特性的模拟研究[J]. 中国电机工程学报,1996,15(2):73-78.
Cao Rongjiang, Gu Nihong, Sheng Yong. Test study oil self-extinction behavior of secondary arc on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 15(2): 73-78(in Chinese).
- [9] Laszlo Prikler, Mustafa Kizilcay, Gabor Ban, et al. Improved secondary arc model based on identification of arc parameters from staged fault test records[C]. 14th PSCC, Sevilla, Spain, 2002.
- [10] 蒋卫平,朱艺颖,吴雅妮,等. 750 kV 输变电示范工程单相人工

- 接地故障试验现场实测和计算分析[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 43-47.
- Jiang Weiping, Zhu Yiyang, Wu Yani, et al. Analysis on measured and calculated results of artificial single phase grounding test in 750 kV transmission pilot project[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 43-47(in Chinese).
- [11] 谷定燮, 周沛洪. 特高压输电系统过电压潜供电流和无功补偿[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 21-25.
- Gu Dingxie, Zhou Peihong. Overvoltage second arc current and reactive-load compensation of UHV transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 21-25(in Chinese).
- [12] 和彦淼, 宋杲, 曹荣江. 特高压同塔双回输电线路潜供电弧模拟试验等价性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 4-7.
- He Yanmiao, Song Gao, Cao Rongjiang. The Equivalence research for secondary arc simulation test of UHV with double circuit transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 4-7(in Chinese).
- [13] 舒印彪. 1000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T2-T6.
- [14] 商立群, 施围. 同杆双回输电线路的潜供电流和恢复电压[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 22-23.
- Shang Liqun, Shi Wei. Secondary arc current and recovery voltage on double-circuit lines on the same pole[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 22-23(in Chinese).
- [15] 林莘, 何柏娜, 徐建源. 潜供电弧的仿真分析[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 8-10.
- Lin Xin, He Baina, Xu Jianyuan. Simulation and analysis of secondary arc[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 8-10(in Chinese).



李振强

收稿日期: 2009-07-29。

作者简介:

李振强(1982—), 男, 工程师, 主要从事电力系统过电压与绝缘配合的研究工作, E-mail: lizhenqiang@sgepri.com。

(编辑 褚晓杰)