

特高压半波长输电系统绝缘配合研究

张刘春, 张翠霞, 焦飞, 苏宁, 张博宇

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Insulation Coordination of UHV Half-wavelength Power Transmission System

ZHANG Liuchun, ZHANG Cuixia, JIAO Fei, SU Ning, ZHANG Boyu

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: One of outstanding advantages of ultra-high voltage half-wavelength AC transmission (UHV HWACT) technique is that the intermediate switching station does not need to be built under long transmission distance. However, its operation voltage along transmission line, power frequency overvoltage and characteristic of switching surge as well as the measures to suppress overvoltage are evidently different from those of traditional UHV power transmission, thus it is necessary to research steady state voltage along the line, power frequency overvoltage, switching surge and insulation coordination of UHV HWACT. The researches on its insulation coordination include following items: to determine insulation level of power equipments in substations and the distances of air gaps, to determine insulation configuration for transmission line and related distances of air gaps to offer reference for equipment manufacture and engineering design. Comparing the insulation coordination scheme for UHV HWACT with the insulation design for 1 000 kV AC power transmission pilot project from Southeast Shanxi via Jingmen to Nanyang, comparison results show that the equipments and insulation configuration for 1 000 kV AC power transmission pilot project can be directly applied to UHV HWACT.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); half-wavelength AC power transmission; substations; transmission lines; insulation coordination

摘要: 特高压半波长输电技术具有输送距离长而不需要建设中间开关站等优点, 但沿线路的运行电压、工频过电压和操作过电压特征以及过电压限制措施与传统的特高压输电技术有明显不同之处, 因此需要对半波长输电线路的沿线稳态运行电压、工频过电压、操作过电压、绝缘配合等进行研究。绝缘配合研究主要包括: 确定变电站电气设备绝缘水平和空气间隙距离、确定线路绝缘子配置和空气间隙距离, 为设备制造和工程设计提供参考。将特高压半波长线路的绝缘配合方案与晋东南—荆门—南阳 1 000 kV 特高压试验示范工程的绝缘设计进行比较。结果表明, 特高压半波长输电工程设备和线路的绝缘配置基本上可以直接沿用特高压示范工程。

关键词: 特高压; 半波长交流输电; 变电站; 输电线路; 绝缘配合

0 引言

半波长交流输电技术(half wave-length AC transmission, HWACT)(简称半波长输电)是指输电的电气距离接近 1 个工频半波, 即约 3 000 km(50 Hz)或 2 500 km(60 Hz)的超远距离三相交流输电技术。由于半波长输电不需线路无功补偿装置(如高压电抗器)、不需中间加设开关站、经济性和可靠性较好、可以实现远距离同步联网, 因而具有较强的吸引力, 一些国家对此展开了积极的研究^[1-4]。例如, 巴西为将亚马逊流域的大水电送到负荷中心, 将半波长输电作为十分有竞争力的备选方案进行研究; 韩国也研究通过使用半波长输电将西伯利亚的水电送至本国, 但由于需求方面原因目前均未实现^[5-7]。

在我国“一特四大”的电力发展战略中, 远距离、大容量的输电方式不可避免。我国新疆煤电基地和西藏水电基地到东部负荷中心的距离有 3 000 km 之遥, 满足半波长输电的应用条件。根据《国家电网总体规划设计》(2008 年版), 规划中的准东(新疆)—江西、西藏—浙江输电项目的送电距离为 3 000 km, 准东—河南、哈密—山东、西藏—福建输电项目的送电距离约为 2 800 km, 哈萨克斯坦—四川、伊犁—重庆、伊犁—湖北输电项目的送电距离均超过 3 300 km^[8-15]。因此可以考虑将半波长输电技术作为这些大容量电力送出的一种方案进行工程可行性研究。

采用特高压半波长输电技术时, 沿线路的运行电压、工频过电压和操作过电压特征以及过电压限制措施与传统的特高压输电技术有明显不同, 因此需要对半波长输电线路的沿线稳态运行电压、工频过电压、操作过电压、绝缘配合等进行研究。

半波长绝缘配合研究内容主要包括：确定变电站电气设备绝缘水平和空气间隙距离、确定线路绝缘子配置和空气间隙距离，为设备制造和工程设计提供参考。

1 运行特性

1.1 运行电压

半波长输电线路运行电压的分布与常规系统不同。变电站和线路两端的最高运行电压是按特高压系统最高工作电压进行控制的，为 1 100 kV (1.0 pu)；沿线路的运行电压分布与系统输送功率和线路功率因数有关。当功率因数为 1.0 时：1) 半波长输电线路输送自然功率(4 500 MW)时，沿线工频稳态电压均在 1 pu 左右，分布均匀；2) 半波长输电线路输送功率大于自然功率时，沿线工频稳态电压呈中部高两端低的形态^[16]，输送功率为 5 000 和 5 500 MW 时，线路中部电压最高分别为 1 163 kV (1.06 pu)和 1 262 kV(1.15 pu)^[17]。

1.2 工频过电压

系统输送功率考虑自然功率 4 500、5 000 和 5 500 MW 3 种情况，功率因数取 1.0。1) 无故障甩负荷时，线路两侧及沿线工频过电压均不高，都不超过 1.2 pu；2) 发生单相故障甩负荷时，线路两侧及沿线工频过电压非常高，沿线最高过电压超过 3.8 pu，线路两端最高过电压超过 1.7 pu。

为此，考虑在线路上安装多组避雷器进行限制。避雷器布置方案采用：沿线每 100 km 装设 2 组 876 kV 避雷器，线路两端各装设 3 组 828 kV 避雷器时，变电站母线侧、线路两端和线路中部的工频过电压分别为 1.50、1.57 和 1.66 pu，持续时间在 20~50 ms 范围。

1.3 避雷器额定电压

避雷器额定电压的选取直接关系到避雷器保护水平，并决定着变电站电气设备冲击绝缘水平的选取。避雷器的额定电压依赖于运行电压、工频过电压和持续时间。运行电压关系到避雷器参考电压的选取，即荷电率；而工频过电压和持续时间取决于避雷器的工频耐受特性^[18]。

由目前特高压避雷器制造水平可知，避雷器的电位分布不均匀系数做到小于 1.10，而避雷器的老化特性(荷电率)可满足 1.15 电位分布不均匀系数。利用这点裕度，避雷器的运行电压可以由 1 100/ $\sqrt{3}$ kV 提高到 1 155/ $\sqrt{3}$ kV。特高压避雷器的工频耐受特性见表 1。

表 1 特高压避雷器的工频耐受特性

Tab. 1 Power frequency withstand characteristics of UHV arresters

额定电压倍数	持续时间	828 kV 避雷器/pu	876 kV 避雷器/pu
1.00	20 min	1.30	1.38
1.10	10 s	1.43	1.52
1.15	1 s	1.50	1.59
1.20	0.2 s	1.56	1.66

由表 1 工频过电压计算结果可见，虽然变电站侧、线路两端和线路中部的工频过电压较高，为 1.50、1.57 和 1.66 pu，但因持续时间很短，为 20~50 ms，因此，额定电压为 828 kV 和 876 kV 的避雷器工频耐受特性是可以满足要求的。

2 变电站绝缘配合

2.1 设备绝缘水平的选取

1 000 kV 特高压变电站设备的绝缘水平选取包括：工频耐受电压、额定雷电冲击耐受电压和额定操作冲击耐受电压。

1) 工频耐受电压^[19-20]。

变电设备的工频耐受电压 U_w 与运行中设备承受的最大工频过电压 U_p 有关，并留有一定的安全系数 k_1 ，即 $U_w=k_1U_p$ 。

对于特高压半波长输电工程，由仿真计算结果可知，各种避雷器保护方案下，变电站母线侧和线路侧设备上的最大工频过电压 U_p 分别大于等于 1.50 和 1.57 pu，安全系数 k_1 取 1.15，则变电站母线侧和线路侧电气设备工频耐受电压应分别为 1 095 和 1 147 kV。

半波长 1 000 kV 变压器设备的工频耐受电压可按 1 100 kV 有效值(5 min)选取，这样不会更改设计方案，也不用增大现有变压器的尺寸。只是半波长变压器工频电压的绝缘裕度为 1.15，与常规特高压工程变压器工频电压的绝缘裕度为 1.33 相比，裕度相对较小，对变压器的制造质量要求更高。

此外，断路器线路侧设备的工频耐受电压应提高到 1 200 kV 有效值选取。断路器线路侧的设备只包括断路器、隔离刀闸、电压互感器和支柱绝缘子，其中：特高压示范工程用电压互感器的工频耐受电压已是 1 200 kV；某特高压断路器制造厂家在进行特高压断路器研发时，工频耐受电压已做到 1 210 kV，说明特高压断路器在不改变设计的前提下有希望达到 1 200 kV 工频耐受电压；而支柱绝缘子和敞开式隔离刀闸设备的绝缘设计比较简单，目前起控制作用的是操作冲击和污秽指标，比较容易做到工频耐压 1 200 kV；这些都需要做进一步的试

验证工作。

2) 额定雷电和操作冲击耐受电压。

变电站设备的额定雷电和操作冲击耐受电压,与保护设备的保护特性有关。

由于变电站避雷器的额定电压可选择与1000 kV特高压试验示范工程相同,则特高压半波长输电工程变电站设备的额定雷电和操作冲击耐受电压取1000 kV特高压试验示范工程相同值,见表2。

表2 1000 kV设备绝缘额定耐受电压

Tab. 2 Rated withstand voltages of 1000 kV equipment insulation kV

设备	雷电冲击	操作冲击
变压器、电抗器	2 250(截波 2 400)	1 800
GIS(断路器、隔离开关)	2 400	1 800
支柱绝缘子、隔离开关(敞开式)	2 550	1 800
电压互感器(CVT)	2 400	1 800
套管(变压器、电抗器)	2 400(截波 2 760)	1 950
套管(GIS)	2 400	1 800
开关设备纵绝缘	2 400+900	1 675+900

2.2 空气间隙距离的选取

变电站空气间隙距离是由工频电压下的空气间隙距离和操作过电压下的空气间隙距离确定的。

1) 工频电压下的空气间隙距离。

由于特高压半波长输电工程的工频过电压倍数为1.57,高于常规的1000 kV特高压输电工程的1.4,因此,变电站工频过电压下的空气间隙距离应做相应的提高。变电站的连接多用硬管线,工频过电压下的空气间隙距离往往不起控制作用,而是由操作过电压下的空气间隙距离起控制作用。

2) 操作过电压下的空气间隙距离。

由仿真计算结果可知,变电站和线路两端的最大操作过电压发生也是在三相接地故障时,最大为1.57 pu,小于常规特高压工程规定的1.6 pu。因此,变电站操作过电压下的空气间隙距离可采用常规特高压工程值。

3 线路绝缘配合

3.1 绝缘子的配置

线路绝缘子选型和串长的确定主要由绝缘子在运行电压下的耐污特性决定,即与输电线路所经地区的污秽水平和线路最高工作电压有关。

工作电压与系统输送功率和功率因数有关,当功率因数为1.0,输送功率5000和5500 MW 2种情况时,线路中部运行电压最高为1163和1262 kV。

若采用晋东南—南阳—荆门1000 kV特高压示范工程输电线路的绝缘子配置方案,由于示范工程线路的绝缘子配置留有一定的裕度,半波长输电线路工作电压由1100 kV提高到1262 kV,线路绝缘

子的配置仍可以采用示范工程的配置原则,不需要提高绝缘子配置。

3.2 空气间隙距离的选取

半波长1000 kV特高压架空输电线路塔头的空气间隙距离,分为工频电压下的空气间隙距离和操作过电压下的空气间隙距离。

1) 工频电压下的空气间隙距离。

I串绝缘子导线对杆塔的空气间隙距离由最高运行电压确定,从仿真计算结果可知:半波长输电线路输送自然功率(4500 MW),功率因数为1.0时,沿线工频稳态电压均在1 pu左右,分布均匀;半波长输电线路输送功率大于自然功率时,功率因数为1.0,沿线工频稳态电压呈中部高两端低的形态。输送功率为5000和5500 MW时,线路中部电压最高为1163 kV(1.06 pu)和1262 kV(1.15 pu)。

可见,若系统输送功率大于自然功率,线路中部的运行电压会高于常规1000 kV特高压系统的最高工作电压1100 kV,需要对工频电压下的空气间隙距离进行校核。

以输送功率5000和5500 MW 2种情况为例,线路中部电压最高为1163和1262 kV,工频电压下的空气间隙距离推荐值见表3。

表3 工频电压下的推荐空气间隙距离

Tab. 3 Recommended air gap distances at power frequency voltages

输送功率/MW	工频电压/kV	最小间隙距离/m		
		海拔 500 m	海拔 1 000 m	海拔 1 500 m
示范工程	1 100	2.7	2.9	3.1
5 000	1 163	2.8	3.0	3.2
5 500	1 262	3.0	3.3	3.5

这样,对于输送功率5000和5500 MW特高压半波长输电线路,线路杆塔边相I串绝缘子导线对杆塔的空气间隙距离比特高压试验示范工程略有加大^[21]。由于增大的尺寸很小,加之只是杆塔的两侧边相,可见对杆塔设计影响很小。

2) 操作过电压下的空气间隙距离。

通常,V串绝缘子导线对杆塔的空气间隙距离由操作过电压确定,由于特高压半波长输电工程的工频过电压倍数与操作过电压相近,因此,V串绝缘子导线对杆塔的空气间隙距离应同时考虑工频过电压和操作过电压。

由仿真计算结果可知,采用沿线每100 km装设1组876 kV避雷器,线路两端各装设3组828 kV避雷器的配置方案时,线路中部最大操作过电压发生在三相接地时,为1.69 pu,小于常规特高压工程规定的1.7 pu。

这样, 特高压半波长输电工程 V 串绝缘子导线对杆塔的空气间隙距离可按 1 000 kV 特高压工程选取。

4 结论

1) 对于系统输送功率为 4 500、5 000 和 5 500 MW 而言, 变电站选用额定电压 828 kV 避雷器, 线路中部选用额定电压 876 kV 避雷器是可行的。

2) 半波长 1 000 kV 特高压变电站电气设备的雷电和操作冲击绝缘水平可以采用示范工程的参数; 工频耐受电压只需提高线路侧设备到 1 200 kV, 包括线路侧的断路器、敞开式隔离刀闸和支柱绝缘子。由特高压设备研制成果可知, 半波长 1 000 kV 特高压变电站电气设备基本上可以直接选用特高压示范工程设备, 只是需要对线路侧的断路器、敞开式隔离刀闸和支柱绝缘子做进一步的试验验证工作。

3) 对于半波长 1 000 kV 特高压变电站的空气间隙距离, 虽然工频电压下的空气间隙距离有所提高, 但不起控制作用; 而起控制作用的操作过电压下的空气间隙距离可采用常规特高压工程值。

4) 对于半波长 1 000 kV 特高压架空输电线路塔头的空气间隙距离, 对于输送功率 5 000 和 5 500 MW 特高压半波长输电线路, 线路杆塔边相 I 串绝缘子导线对杆塔的空气间隙距离比特高压试验示范工程略有加大, 但中相导线对杆塔的空气间隙距离不变。可见, 由于塔头的空气间隙距离增大的尺寸很小, 加之只是杆塔的两侧边相, 因此对杆塔设计影响很小。

5) 对于半波长 1 000 kV 特高压架空输电线路的绝缘子配置, 可以采用示范工程的配置原则, 即不需要提高绝缘子配置。

致 谢

感谢国家电网公司对“特高压半波长输电技术经济可行性初步研究”项目的支持和资助, 本文为该项目的研究结果的一部分。

参考文献

- [1] lliceto F, Cinieri E. Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2081-2091.
- [2] Hubert F J, Gent M R. Half-wavelength power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(10): 965-974.
- [3] Prabhakara F S, Parthasarathy K, Ramachandra Rao H N. Analysis of natural half-wave-length power transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1787-1794.
- [4] Aredes M, Portela C, Emmerik E L, et al. Static series compensators applied to very long distance transmission lines[J]. Electrical

Engineering, 2004(86): 69-76.

- [5] Gatta F M, Lliceto F. Analysis of some operation problems of half-wave length transmission lines[C]//AFRICON '92 Proceedings. Ezulwini Valley, Swaziland, 1992: 59-64.
- [6] Tavares M C, Portela C M. Half-wave length line energization case test-proposition of a real test[C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China, 2008: 261-264.
- [7] Dias R, Santos G, Aredes Jr M. Analysis of a series tap for half-wavelength transmission lines using active filters[C]//IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife, 2005: 1894-1900.
- [8] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 25-26.
- [9] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.
- [10] Wu Jingru, Xu Yongxi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4(in Chinese).
- [11] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
- [12] Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9(in Chinese).
- [13] 郑健超. 智能电力设备与半波长交流输电[C]//中国电机工程学会第九次全国会员代表大会学术报告会. 北京, 2009: 6-8.
- [14] Prabhakara F S, Parthasarathy K, Ramachandra Rao H N. Performance of tuned half-wave-length power transmission lines [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(12): 1795-1802.
- [15] 王秀丽, 宋永华, 王海军. 新型交流输电技术现状与展望[J]. 中国电力, 2003, 36(8): 40-46.
- [16] Wang Xiuli, Song Yonghua, Wang Haijun. The current situation and outlook of new AC transmission electricity technology[J]. China Electric Power, 2003, 36(8): 40-46(in Chinese).
- [17] 郑健超. 关于我国交流输电更高一级电压的选择[J]. 电网技术, 1995, 19(1): 3-8.
- [18] Zheng Jianchao. On the alternatives for the next voltage level of AC power transmission[J]. Power System Technology, 1995, 19(1): 3-8(in Chinese).
- [19] 林集明, 郑建超. 特高压半波长交流输电技术经济可行性初步研究总结报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [20] 秦晓辉, 张志强. 特高压半波长交流输电系统稳态特性及暂态稳定研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [21] 韩彬, 林集明, 张翠霞. 特高压半波长交流输电技术电磁暂态及绝缘配合研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [18] Q/GDW 307—2009, 1 000 kV 系统用无间隙金属氧化物避雷器技术规范[S].
- [19] DL/T620—1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [20] GB 311.1—1997, 高压输电设备的绝缘配合[S].
- [21] GB/Z 24842—2009, 1 000 kV 特高压交流输电工程过电压和绝缘配合[S].



张刘春

收稿日期: 2011-07-20.

作者简介:

张刘春(1977), 女, 博士, 工程师, 研究方向为交直流电力系统绝缘配合和防雷保护以及高电压与绝缘技术, E-mail: zhangliuchun@epri.sgcc.com.cn;

张翠霞(1959), 女, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向为交直流电力系统绝缘配合和防雷保护, E-mail: zhangcx@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)