

1000 kV 长距离交流输电线路工频过电压仿真研究

黄佳, 王钢, 李海锋, 韩冯雪
(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 我国能源资源和生产力发展呈逆向分布, 西部能源基地与东部负荷中心距离在 1 000~3 000 km 左右, 使得建立长距离、大容量的特高压输电系统成为必然。短距离特高压输电线路的过电压问题已有研究, 而当传输距离进一步增加时, 工频过电压情况更为严重, 抑制方法更为复杂。结合超高压输电线路工频过电压抑制方法, 针对特高压线路的具体实例, 对远距离特高压输电线路的工频过电压进行了较全面的仿真研究, 研究了带有串联电容补偿和并联电抗补偿的特高压输电线路的特性, 为特高压远距离输电工程的建设提供了理论依据。

关键词: 特高压; 输电线路; 工频过电压; 仿真

Study on simulation of fundamental frequency overvoltages for UHV AC transmission lines

HUANG Jia, WANG Gang, LI Hai-feng, HAN Feng-xue

(College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In China, the energy resources distribution is against the productive forces development, the energy base in the west is about 1000~3000km away from the load center in the east. Therefore, the UHV transmission system with long distance and large capacity should be established. The overvoltage of short-distance transmission line has already been studied. With the transmission distance increasing, the fundamental frequency overvoltage becomes more severely and the retraining methods more complicated. In this paper, based on the design example of UHV AC transmission system, the study of comprehensive simulation is carried out about the overvoltage of fundamental frequency component of long-distance lines. The characteristics of UHV transmission lines with the compensation of shunt reactor and series capacitor is studied. Theoretical support is supplied to the construction of long-distance UHV transmission system project.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No. 05300167) and National Natural Science of South China University of Technology(No.B05E5050370).

Key words: UHV; AC transmission line; fundamental frequency overvoltage; simulation

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)04-0032-04

0 引言

能源问题是关系经济社会发展全局的重大战略问题。我国能源资源具有总量多、人均量少和区域分布不平衡三大特点, 对我国电力资源开发提出相应的要求。能源资源和生产力发展呈逆向分布, 能源蕴藏丰富地区远离经济发达地区, 西部能源基地与东部负荷中心距离在 1 000~3 000 km 左右, 建设长距离、大容量的输电系统成为必然。特高压输电具备超远距离、超大容量、低损耗的送电能力, 能够提高资源的开发和利用效率, 缓解环保压力, 节约宝贵土地资源, 具有显著的经济效益和社会效

益, 符合我国国情和国家能源发展战略。

特高压输电系统中的电磁暂态和过电压问题与超高压系统有相似之处, 但由于特高压系统输送容量大, 距离长, 自身无功功率大, 每 100 km 的 1 000 kV 线路无功功率可达 530 Mvar 左右, 这使得在甩负荷时可能导致严重的暂时过电压, 在正常运行负荷变化时将给无功调节、电压控制以及单相重合闸潜供电流熄灭等造成一系列问题。因此, 电力系统过电压是发展特高压电网必须研究的课题, 也是特高压电网绝缘水平的决定因素^[1]。电力系统内部过电压包括暂时过电压(又分为工频过电压和谐振过电压)和操作过电压。在特高压系统的绝缘选择上, 谐振过电压基本不予考虑。国内外对特高压输电系统内部过电压的研究主要集中在工频过电压和操

基金项目: 广东省自然科学基金项目(05300167), 华南理工大学自然科学基金项目(B05E5050370)

作过电压。工频过电压在特高压系统中有重要影响,它的大小直接影响操作过电压的幅值,它是决定避雷器额定电压的重要依据,进而也影响了系统的过电压保护水平,可能危及设备及系统的安全运行。

对于短距离特高压线路的过电压问题,有关文献已有过分析^[2-4],因此本文主要是针对长距离特高压线路的工频过电压问题,基于特高压输电线路的几何参数,采用 ATP-EMTP 中的 LCC 模型建立特高压线路仿真模型,对远距离特高压输电线路的工频过电压进行了较全面的仿真研究,研究了带有串联电容补偿和并联电抗补偿的特高压输电线路的特性,为特高压远距离输电工程的建设提供了有益的理论依据。

1 1000 kV 特高压交流输电线路

1.1 特高压输电线路仿真模型参考参数

本文参考南方电网 2005 年 3 月关于特高压输电工程论证设计的特高压系统输电线路参数。导线杆塔高为 50 m,三相水平排列,导线平均对地高度为 22 m,导线相间距为 24 m,双避雷线平均对地高度为 45.5 m,双避雷线间距为 34.6 m,保护角为正 24°~28°。导线由 8 个分裂子导线构成,每个子导线直径为 35 mm,分裂间距 400 mm,整条导线大约直径为 1 000 mm。

1.2 特高压输电线路需要解决的两个问题

远距离交流输电线路的输送容量问题是特高压输电需要解决的第一个问题,交流线路的输送容量受线路电抗限制,线路电抗大小取决于线路的电感和线路长度。这个问题反映在对线路串补的需求和稳定性的考虑上。大量采用串联电容可以提高线路的输电容量到达线路自然功率的 150%~200%。第二个问题是来自线路电容产生的导纳,需要无功功率补偿。因此,解决以上两个问题,需要同时加入串联电容器和并联电抗器补偿。线路中同时采用串联电容补偿和并联电抗补偿可改善线路的电气特性,特别可改善沿线电压的分布及线路的效率。设计远距离输电工程时,必须确定串联补偿和并联补偿各种方案的技术经济性,同时确定给定输电能力时的最佳补偿度^[5]。

2 特高压输电线路工频过电压

影响工频过电压的主要因素有:①空载长线路的电容效应及系统阻抗的影响;②线路甩负荷效应;③线路单相接地故障影响等等^[6]。工频过电压的大小直接影响操作过电压的数值,且随着系统额定电压的提高而升高。

限制工频过电压的主要措施包括

- 1) 使用高压电抗器补偿高压线路的充电电容;
- 2) 使用可调节高抗(可控高抗、分组投切等);
- 3) 使用良导体地线;
- 4) 使用氧化锌避雷器限制过电压幅值;
- 5) 采用继电保护方案限制工频过电压的持续时间;
- 6) 选择合理的运行方式。

我国 1 000 kV 特高压输电系统的工频过电压要求限制在 1.3 p.u.(0.5~1 s) 和 1.4 p.u.(0.2 s) 以下

$$(1 \text{ p.u.} = \frac{1100\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ kV}).$$

2.1 线路电容效应引起的工频过电压

长距离输电线路,当末端空载时,线路入口阻抗为容性。当计及电源内阻抗的影响时,电容效应不仅使线路末端电压高于首端,而且使线路首末端电压高于电源电动势。这就是空载长线路的工频过电压产生的原因之一。

双端电源输电线路沿线电压与传输功率大小的关系如图 1 所示,线路的传输功率为自然功率的 K_g 倍。

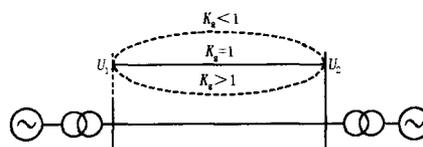
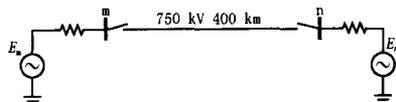


图 1 双端电源供电的线路沿线电压分布

Fig.1 Voltage distribution of transmission line with two-terminal power supply

2.1.1 工频过电压的 ATP-EMTP 仿真

将特高压长距离输电系统等效为双端电源系统输送功率,用 ATP-EMTP 仿真稳态工频电压升高情况。750 kV 输电线路采用分布参数模型,如图 2 所示;1 000 kV 输电线路采用 LCC 模型,如图 3 所示。



$$R_1=0.013\ 332\ 6\ \Omega/\text{km}, L_1=0.847\ \text{mH}/\text{km}, C_1=0.013\ 877\ \mu\text{F}/\text{km}$$

$$R_0=0.321\ 64\ \Omega/\text{km}, L_0=2.65\ \text{mH}/\text{km}, C_0=0.009\ 778\ 75\ \mu\text{F}/\text{km}$$

图 2 750 kV 输电系统

Fig.2 750 kV transmission system

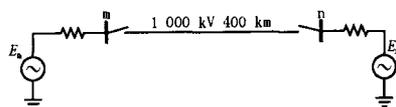


图 3 1 000 kV 输电系统

Fig.3 1 000 kV transmission system

为验证线路在传输不同功率情况下电压分布的差别,当两端电源电压摆开角 δ 为 0° 、 20° 、

40°、60°时线路沿线电压分布如图4所示,横坐标表示线路上任一点到线路首端的距离,纵坐标表示线路上任一点电压幅值的大小。由图4可见,当传输距离为400 km时,1 000 kV工频过电压情况比750 kV的严重。当线路传输距离进一步增加时,工频过电压情况将更为严重,以至于无法满足线路运行要求。图5为2 000 km、1 000 kV长线路的仿真结果,可见1 000 kV的2 000 km线路稳态工频过电压情况已不能满足线路运行要求,需要对线路进行补偿以限制线路的稳态工频过电压。

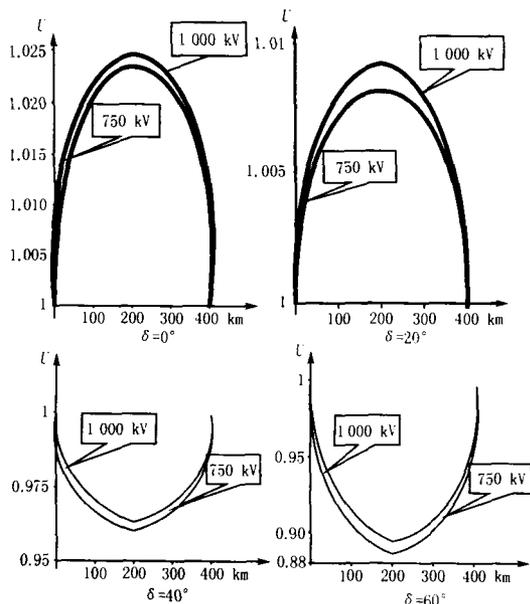


图4 400 km、750 kV线路和1 000 kV线路沿线电压分布比较
Fig.4 Comparison of voltage distribution between 400 km 750 kV and 1 000 kV transmission line

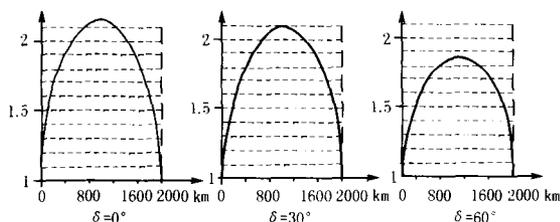


图5 2 000 km、1 000 kV线路的工频过电压
Fig.5 Fundamental frequency overvoltage of 2 000 km 1 000 kV transmission line

2.1.2 抑制措施

采用并联电抗器抑制工频电压升高,是减少线路输送无功功率的根本措施,也是降低轻负荷运行方式时电能损耗的根本措施,它能有效改善远距离输电线路沿线的电压分布。对于超长线路仅在两端进行并联电抗器补偿不能满足要求,必须将线路分成若干段,在每一段的两端进行并联电抗补偿,以满足运行要求。如果不考虑稳定性和无功功率的约

束,一条1 000 kV交流输电线路,其长度超过1 000 km,输送容量大约为3 000 MW,为了保证输电线路沿线电压分布均匀,建议线路的分段长度为400 km,中间建立开关站^[1]。

对于1 000 km的750 kV输电线路每输送1 000 kW有功功率,要装设1 000~1 250 kvar的并联电抗器^[5]。而对于2 000 km的1 000 kV输电线路,要保持沿线电压满足系统过电压的要求,并联电抗补偿度应为85%~100%,且采用每400 km分段补偿。

在加入并联电抗器补偿的同时,为了满足线路输送容量的要求,线路中需要同时加入串联补偿电容器。同时采用串联电容补偿和并联电抗补偿时,需要考虑串联补偿和并联补偿的技术经济性。2 000 km、1 000 kV输电线路采用的串联电容的补偿度约为70%~80%。串联补偿电容的布置地点对输电效率的影响较小,而并联补偿电抗器的容量和布置地点则影响较大。串联补偿电容器可以布置在开关站或中间变电所,也可以布置在接近开关站的线路上或布置在两开关站间的线路中部。布置在线路上时,当一段线路跳开,平行线路中的电流几乎增加一倍,电容器的额定容量必须增加三倍,因此正常运行方式下不能充分利用电容器的通过容量,而且还会使继电保护更复杂,但是当切除故障线段的同时可以自动切除串联电容,从而提高串联补偿度,改善事故后的稳定性条件。一般考虑到故障情况下不能一端过补偿,需要远离两端的变电站安装。对于2 000 km线路可以装设在开关站。

对于2 000 km、1 000 kV输电线路,当传输容量为3 000 MW时,并联电抗补偿约为7 600 Mvar,串联电容补偿约为4 500 Mvar,按以上标准装设补偿后,各补偿点电压能控制在接近额定运行电压。

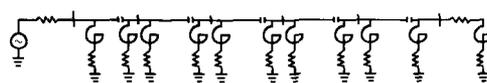


图6 2 000 km、1 000 kV线路分段补偿后模型
Fig.6 Model of 2 000 km, 1 000 kV transmission lines after subsection compensation

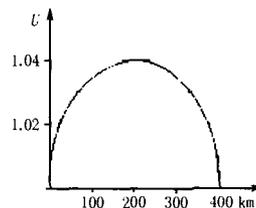


图7 分段线路内部工频过电压
Fig.7 Fundamental frequency overvoltage of every section

图6为2 000 km、1 000 kV分段补偿的输电线路模型,且各补偿点为400 km、800 km、1 200 km和1 600 km。应用ATP-EMTP进行工频过电压仿

真计算, 各 400 km 分段线路的内部稳态工频过电压如图 7 所示, 且各补偿点电压接近额定电压, 可见分段补偿后的线路稳态工频过电压与图 5 相比有了很大改善, 空载线路电容效应引起的工频电压升高最大值为 1.04 p.u.

2.2 输电线路甩负荷工频过电压

当输电线路重负荷运行时, 由于某种原因线路末端断路器忽然跳闸甩掉负荷, 此时也会引起严重的工频过电压。

甩负荷前, 若线路上输送相当大的有功及感性无功功率, 电源电动势必然高于母线电压。甩负荷后, 根据磁链不变的原理, 可简单认为电源暂态电动势维持原来数值。由于线路末端断路器分闸, 形成了电源带空载长线的运行方式。当计及长线的电容效应对工频电压升高的影响, 则线路首端电压将高于电源电动势, 且末端电压升高将更为严重。实际上甩负荷过程包含了操作过电压, 对于 1000 kV 交流系统操作过电压允许水平为 1.7 p.u. 相对地。

对图 6 所示的 5×400 km 1000 kV 分段输电线路模型进行稳态运行时线路末端甩负荷过电压仿真, 如图 8 所示, 甩负荷时刻为 0.01 s, 最大过电压倍数为 1.31 p.u.

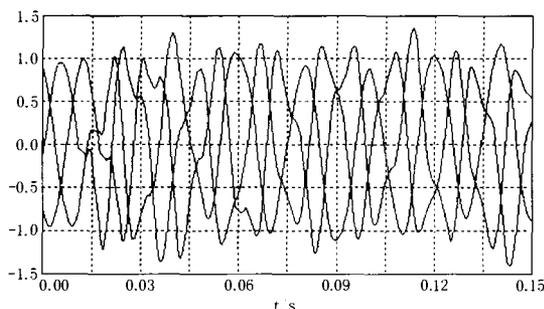


图 8 甩负荷过电压
Fig.8 Load throw-off overvoltage

2.3 线路单相接地故障甩负荷工频过电压

系统中发生不对称短路故障, 当线路一端跳闸甩负荷后, 由于故障仍然存在, 可能进一步增加工频过电压。这类工频过电压与单相接地点向电源侧的零序电抗和正序电抗的比值有关。

用 ATP-EMTP 仿真图 6 所示的输电线路单相接地故障时三相甩负荷过电压情况, 故障发生时刻为故障点单相电压峰值时 (此时过电压情况最严重), 且故障后 45 ms 三相甩负荷。故障点分别为线路首端、中点、末端, 最大过电压倍数如表 2 所示。

表 2 单相故障甩负荷过电压

Tab.2 Load throw-off overvoltage with one-phase fault

故障位置	首端	中点	末端
最大过电压倍数	1.31 p. u.	1.55 p. u.	1.58 p. u.

3 小结

1) 对于 2000 km、1000 kV 输电线路, 由于线路分布电容大, 输送距离远, 工频过电压情况比 750 kV 更加严重。如果不采取措施, 稳态工频过电压可达到 2 p.u. 以上。因此对于远距离特高压输电线路需要同时采用并联电抗器抑制工频过电压和串联电容器提高输送容量。并联电抗补偿和串联电容补偿的补偿度, 应考虑两者配合的技术经济性。

2) 抑制远距离特高压输电线路工频过电压采用分段并联电抗补偿和分段串联电容补偿是一有效可行的方法。

3) 对于分段补偿后的 2000 km 线路, 空载电容效应引起的工频电压升高最大值为 1.04 p.u.; 甩负荷最大过电压倍数为 1.31 p.u.; 单相接地故障甩负荷最大过电压倍数为 1.58 p.u.。各种工频过电压均可以限制在允许过电压范围内。

4) 在抑制工频过电压的措施中, 还可以同时采用良导体地线、使用线路两端联动跳闸或过电压继电保护 (缩短高幅值无故障甩负荷过电压持续时间) 和选择合理的运行方式。使用 MOA 限制短时高幅值工频过电压不作为限制工频过电压的主要手段。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑 (2005 年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
LIU Zhen-ya. Ultra-high Voltage (UHV) AC Transmission Technology Research Achievements (2005)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [2] 陈水明, 许伟, 何金良. 1000kV 交流输电线路的工频暂态过电压研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19):1-5.
CHEN Shui-ming, XU Wei, HE Jin-liang. Research on Power Frequency Transient Overvoltage in 1000kV UHVAC Transmission Line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19):1-5.
- [3] 许伟, 陈水明, 何金良. 1000kV 交流输电线路的操作过电压研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5):214-219.
XU Wei, CHEN Shui-ming, HE Jin-liang. Research on Switching Overvoltage in 1000kV UHVAC Transmission Line[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5):214-219.
- [4] 许伟, 陈水明, 何金良. 1000kV 交流输电线路的故障激发过电压研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19):10-13.
XU Wei, CHEN Shui-ming, HE Jin-liang. Research on Switching Overvoltage Caused by Faults in 1000kV UHVAC Transmission Line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19):10-13.

(下转第 39 页 continued on page 39)

机输入机械功率、发电机的转子惯性常数以及仿真计算的初值的不确定性对仿真结果的影响。尽管发电机采用的是简单模型,但在原理上与采用复杂模型并无大的区别。作为一项尝试性工作,希望本文能对电力系统动态仿真的不确定性处理或准确度研究起到抛砖引玉的作用。

参考文献

- [1] Kosterev D N, Tylor C W, Mittelstadt W A. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [2] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究 [J]. 电网技术, 2000, 24 (12): 1-4.
HE Ren-mu. Research into Veracity of Power System Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24 (12): 1-4.
- [3] 崔凯, 房大中, 钟德成. 电力系统暂态稳定性概率评估方法研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(1): 44-49.
CUI Kai, FANG Da-zhong, ZHONG De-cheng. Study on Probabilistic Assessment Method for Power System Transient Stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 44-49.
- [4] 王守相, 王成山. 基于区间算法的配电网三相潮流计算模型 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 52-58.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Distribution Three-phase Power Flow Models Based on Interval Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2): 52-58.
- [5] 王成山, 王守相. 基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 58-62.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Distribution Three-phase Power Flow Based on Interval Algorithm and Test Results[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (3): 58-62.
- [6] 张鹏, 王守相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (2): 71-77.
ZHANG Peng, WANG Shou-xiang. Novel Interval Methods in Power System Reliability Economics[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 71-77.
- [7] 王守相, 张伯明, 郭琦. 在线动态安全评估中事故扫描的综合性能指标法 [J]. 电网技术, 2005, 29(1): 60-64.
WANG Shou-xiang, ZHANG Bo-ming, GUO Qi. Integrated Performance Index Method of Contingency Screening in Online Dynamic Security Assessment[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 60-64.
- [8] 郭志忠, 柳焯. 快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算 [J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(3): 8-16.
GUO Zhi-zhong, LIU Zhuo. Fast Transient Stability Simulation by Higher Order Taylor Series Expansions[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(3): 8-16.
- [9] Pai M A. Energy Function Analysis for Power System Stability [M]. Norwell(MA): Kluwer Academic Publishers, 1989.

收稿日期: 2006-10-10; 修回日期: 2006-11-26

作者简介:

王守相 (1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为配电网分析、分布式发电系统分析与仿真、电力系统安全性与可靠性评估; E-mail: sxwang@tju.edu.cn

郑志杰 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统不确定性分析。

(上接第 35 页 continued from page 35)

- [5] Мельников Н А, 等. 330~500 千伏架空输电线路电气部分的设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1977.
Н.А.Мельников, et al. Design of 330 ~ 500 kV Overhead Transmission Lines Electrical Part[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1977.
- [6] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhen-ya. Ultra-high Voltage Grid[M]. Beijing: China Economy Press, 2005.
- [7] 盛鹁, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路过电压的研究和仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 13-18.
SHENG Kun, LI Yong-li, LI Bin, et al. Research and Simulation of Overvoltage in UHV Transmission Lines [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(6): 13-18.
- [8] 贺家李, 李永丽, 郭征, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案: (一) 特高压输电线路的结构和运行特点 [J].

电力系统自动化, 2002, 26 (23): 1-6.

HE Jia-li, LI Yong-li, GUO Zheng, et al. Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part One Construction and Operation Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (23): 1-6.

收稿日期: 2006-05-15; 修回日期: 2006-11-28

作者简介:

黄佳 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事特高压交流输电系统继电保护与过电压的研究; E-mail: huangjiaxue@126.com

王钢 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、自动化与信息化;

李海锋 (1976-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护。