

高压并联电抗器对 750kV 线路损耗影响机理研究

卓建宗¹, 刘文颖¹, 刘福潮², 但扬清³, 夏 鹏¹, 魏泽田¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050; 3. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310007)

摘要: 750kV 线路普遍配置了大容量高压并联电抗器,但在线损分析时往往忽略高压电抗器对损耗的影响,造成 750kV 电网线损分析结果误差较大。基于此,建立了计及高压电抗器的 750kV 线路综合损耗模型,分析了高压电抗器对 750kV 线路综合损耗的影响机理。高压电抗器接入降低了 750kV 线路无功功率造成的有功损耗,但同时高压并联电抗器也产生有功损耗。随着 750kV 线路传输功率的增加,高压并联电抗器接入后的 750kV 线路综合损耗率将呈现先降低后升高的变化规律。在 750kV 线路电阻损耗和高压电抗器损耗近似相等时,线路综合线损率最低,线路运行经济性最优。

关键词: 高压并联电抗器; 750kV 线路; 线路综合损耗; 影响机理

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2017)04-0024-05

1 引言

经过近几年的发展建设,西北地区 750kV 电网已逐渐成为西北电网的主干网络,为提高区域电能外送水平和加强区域间的联系发挥着重要作用。750kV 线路具有输电距离长、电压等级高、线路充电功率大等特点。为了限制线路工频过电压和满足无功平衡的要求,750kV 线路普遍配置了大容量的高压并联电抗器,而且高压电抗器补偿度大多在 80% 以上^[1,2]。

高压电抗器接入电网后有利于电网运行网损的降低^[2,3],当前关于高压电抗器对线路运行经济性的影响机理研究较为有限,现有的相关文献还存在着以下两个不足:①分析中未充分考虑高压电抗器对线路损耗的影响;②对具体影响机理的分析还不够全面。

文献[4]指出,220kV 以上输电线路必须考虑线路充电功率对线路有功损耗的影响,并推导了线路损耗率与传输功率的变化关系,得到线路末端传输功率为线路充电功率一半时对应的损耗率最低,但未计及高压电抗器接入的情况。文献[5]在分析

两端带并联电抗器补偿的长距离输电线路的功率损耗时,仅仅分析了并联电抗器无功补偿作用对线路有功损耗的影响,未计及高压并联电抗器自身的有功损耗。文献[6]研究了 750kV 线路的电气特性,指出 750kV 电网中线路损耗本身较小,应该考虑高压电抗器损耗对 750kV 电网损耗的影响。文献[7]对 750kV 官亭-兰州输电示范工程在近 18 个月时间内的损耗电量和损耗率进行了统计,通过实测数据也可看出高压电抗器损耗电量是工程损耗的重要组成部分。文献[6,7]均未具体分析高压电抗器对线路损耗的影响机理。文献[8]提出了计及高压电抗器的 750kV 线路改进模型,在此基础上分析线路经济运行电压,但未给出 750kV 线路的经济传输功率的确定方法。

本文在已有研究的基础上,探讨高压并联电抗器对 750kV 线路损耗的影响机理,以期对 750kV 电网经济运行提供理论支撑。对于 750kV 线路损耗,本文仅考虑了线路电阻损耗,而未详细考虑线路电晕损耗、绝缘子的泄漏损耗以及谐波对线损的影响。

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAA01B04)、国家电网公司重大项目(52272214002C)

作者简介: 卓建宗(1990-),男,福建籍,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制;

刘文颖(1955-),女,北京籍,教授,研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度。

2 750kV 线路损耗构成情况

典型 750kV 线路通常在两端并联相同容量的高压电抗器, 如图 1 所示, 以达到补偿 750kV 线路容性充电功率的目的。

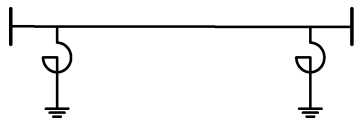


图 1 典型 750kV 线路的电气连接图

Fig. 1 Electrical connectivity diagram of typical 750kV transmission line

750kV 以下电压等级电网中, 电网损耗主要分布于线路和变压器, 并联电抗器等无功补偿装置造成的有功损耗较小。而 750kV 电网中线路多采用分裂导线, 线路分布阻抗参数小, 线路输电效率高; 而并联电抗器容量大, 承受电压高, 电抗器有功损耗大。所以高压电抗器损耗将占 750kV 电网损耗较大比重。

图 2 为 2014 年西北某省 750kV 电网在不同典型运行方式下的线路、变压器和高压电抗器损耗统计结果。

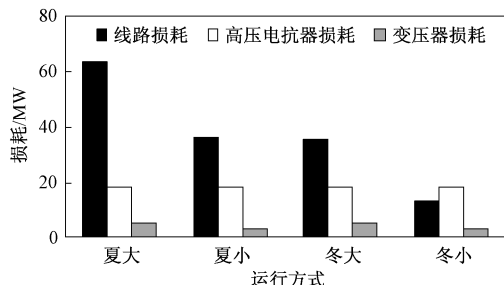


图 2 不同运行方式下 750kV 电网主要元件损耗对比

Fig. 2 Losses statistics of main components in 750kV power grid under different operating modes

从图 2 中可以看出, 750kV 变压器损耗较小, 线路和高压电抗器损耗则占主要部分。750kV 线路损耗受电网运行方式影响明显, 而高压并联电抗器损耗则几乎不变。750kV 电网夏大运行方式(大负荷)下, 高压电抗器损耗约为线路损耗的 1/3; 而 750kV 电网轻载(冬小)时, 高压电抗器损耗反而大于 750kV 线路损耗, 转为主导地位。

因此, 750kV 线路损耗分析在考虑高压并联电抗器对线路容性无功补偿作用的同时, 还必须计及高压电抗器损耗, 以免引起较大的分析误差。

3 750kV 线路损耗模型

为了反映高压电抗器对 750kV 线路损耗的影响, 考虑建立计及高压并联电抗器损耗的 750kV 线路综合损耗模型。750kV 线路综合损耗 ΔP 可表示为:

$$\Delta P = \Delta P_l + \Delta P_r \quad (1)$$

式中, ΔP_l 为 750kV 线路电阻损耗; ΔP_r 为高压并联电抗器损耗。

3.1 750kV 线路电阻损耗模型

常用的输电线路模型主要有不考虑分布参数特性的集中 Π 型等值电路(模型 1)、考虑线路分布参数特性的精确 Π 型等值模型(模型 2)和简化 Π 型等值模型(模型 3)^[9]。

图 3 为采用不同模型时 750kV 线路损耗计算结果比较。所选取的线路导线类型为 $6 \times \text{LGJK-400}$, 其电气参数为: $r_l = 0.0129 \Omega/\text{km}$, $x_l = 0.2644 \Omega/\text{km}$, $b_l = 4.358 \mu\text{S}/\text{km}$ 。

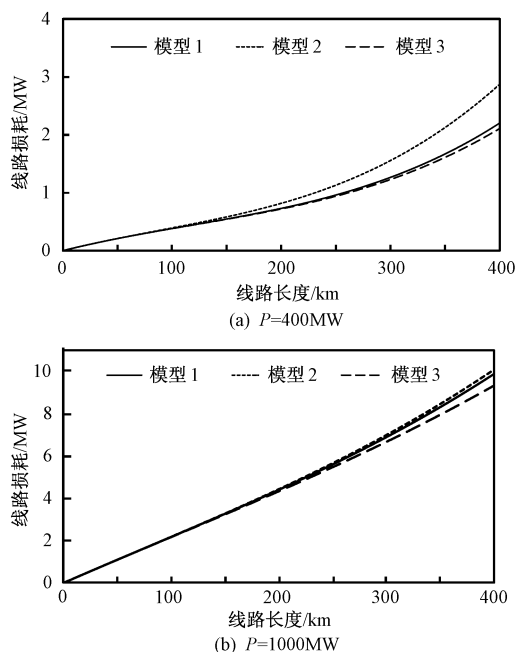


图 3 不同计算模型下 750kV 线路损耗计算结果比较

Fig. 3 Comparison of 750kV line loss calculation results using different models

由图 3 可以看出:

(1) 在 750kV 线路传输较低功率时, 线路长度超过 250km 后, 采用模型 1 和模型 3 的计算结果与准确值(模型 2)间的误差较大, 且随着线路长度的增加而增大。这主要是因为模型 1 及模型 3 难以精确地计算线路的容性分布电流所造成的线路有功损

耗。两者相比之下,模型 1 略优于模型 3。

(2)在 750kV 线路传输功率较大时,采用不考虑线路分布参数特性的模型 1 计算的线路损耗与模型 2 计算结果偏差较小,与模型 3 相比则更为准确。

通过以上比较可知,从模型的实用性和准确性来看,采用不考虑线路分布参数特性的模型 1 更适用于 750kV 线路的损耗计算。

采用模型 1 时,750kV 线路损耗计算方法为:

$$\Delta P_1 = \frac{P^2 + (Q + Q_c)^2}{U_1^2} R_L \quad (2)$$

式中, P 、 Q 为线路传输有功功率和无功率; U_1 为线路始端电压有效值; Q_c 为线路充电功率的一半; R_L 为线路的电阻参数。单一线路损耗率 η_1 为:

$$\eta_1 = \frac{\Delta P_1}{P} \times 100\% \quad (3)$$

3.2 高压并联电抗器损耗模型

高压并联电抗器有功损耗主要为无功功率流过电阻所产生的。高压并联电抗器可以等值为并联在线路两端的阻抗,其阻抗参数可根据相关标准^[10,11]提供的高压电抗器额定参数计算。容易求得高压并联电抗器损耗如式(4)所示。由于运行点电压控制范围小(750~800kV),高压并联电抗器损耗在运行中变化很小。

$$\Delta P_r = \frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2} U^2 \quad (4)$$

式中, R_r 和 X_r 分别为等值电阻和电抗; U 为接入点电压有效值。

3.3 750kV 线路综合损耗

将式(2)和式(4)代入式(1),得到 750kV 线路综合损耗计算公式:

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_r + Q_c)^2}{U_1^2} R_L + \frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2} (U_1^2 + U_2^2) \quad (5)$$

式中, P 、 Q 为线路始端流入有功功率和无功率; Q_r 为高压并联电抗器对应消耗的无功功率; U_2 为线路末端电压有效值。

由式(5)可知,高压并联电抗器的接入一方面能够通过补偿 750kV 线路的容性无功功率,减少流过 750kV 线路阻抗的无功功率,大大降低了线路的有功损耗;另一方面高压并联电抗器接入电网,作为电网中的一个运行元件也会给电网运行带来有功损耗的增加^[12]。

相应地,750kV 线路综合线损率 η 为:

$$\eta = \frac{\Delta P}{P} \times 100\% \quad (6)$$

4 高压并联电抗器对 750kV 线路损耗影响机理

通过对带高压并联电抗器线路的有功损耗模型的研究,可知高压并联电抗器的接入减少了线路自身的损耗,但高压并联电抗器自身的损耗亦不可忽略。显然,在不同的运行环境下,高压并联电抗器的接入对线路综合损耗的影响是不同的,什么工况下最为经济需要进一步研究。

由于运行环境的改变,低电压等级线路的经济运行判定依据(单一线损率)难以适用于 750kV 线路。利用线路综合损耗可以判断 750kV 线路的经济运行区间。随着线路传输功率的增加,750kV 线路上无功功率造成的有功损耗相对于线路综合损耗很小,所以线路综合损耗率可近似表示为

$$\eta = \frac{\Delta P}{P} 100\% \approx \left(\frac{R}{U_1^2} P + \frac{\Delta P_r}{P} \right) \times 100\% \quad (7)$$

为了使综合损耗率最低,令 $d\eta/dP = 0$, 由于高压电抗器损耗可近似认为恒定,得出线路最优传输功率 P_{opt} 满足式(8):

$$\frac{P_{opt}^2}{U_1^2} R = \Delta P_r \quad (8)$$

即当线路电阻损耗与高压电抗器损耗近似相等时,线路综合损耗率最低,线路运行最经济。

5 实例分析

以 750kV 实际电网某线路为例,线路长度为 220km,线路参数为实测数据。线路两侧各装设一组容量为 240Mvar 的高压电抗器。假定 750kV 线路每百公里的充电功率为 260Mvar,则线路的感性补偿度达到 84%。单相电抗器的基本参数为:额定相电压 $800/\sqrt{3}$ kV,额定电抗 3367Ω,额定损耗 170kW,等值电阻 5.67Ω。

保持 750kV 线路始端电压大小基本不变,记录该线路在不同传输功率下的线路综合损耗及综合损耗率情况,如表 1 所示。图 4 为 750kV 线路综合损耗及各部分损耗随线路传输功率的变化情况,图 5 给出了 750kV 线路综合损耗率与单一线路损耗率变化情况的比较。

表 1 不同线路传输功率下 750kV 线路综合损耗变化情况

Tab. 1 Change of 750kV transmission line comprehensive losses under different transmitted power

传输功率 /MW	线路损耗 /MW	高压电抗器 损耗/MW	线路综合 损耗/MW	综合线 损率(%)
103.401	0.062	0.967	1.029	0.995
201.767	0.207	0.966	1.173	0.581
315.910	0.492	0.964	1.456	0.461
445.098	0.959	0.964	1.923	0.432
548.921	1.443	0.965	2.408	0.439
724.623	2.498	0.965	3.463	0.478
868.845	3.585	0.964	4.549	0.524
987.220	4.611	0.965	5.576	0.564

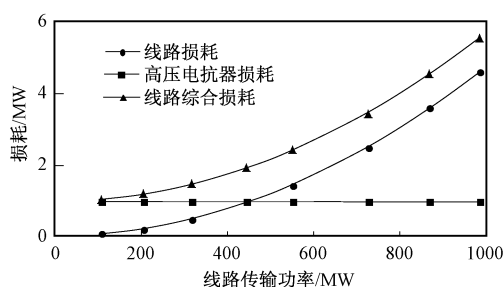


图 4 不同传输功率下 750kV 线路综合损耗变化情况

Fig. 4 Change of 750kV transmission line comprehensive losses under different transmitted power

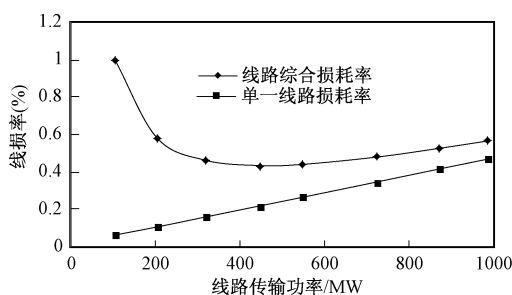


图 5 不同传输功率下 750kV 线路综合损耗率变化情况

Fig. 5 Change of 750kV transmission line comprehensive loss rate under different transmitted power

由图 4、图 5 可知,在考虑并联高压电抗器对 750kV 线路损耗的影响后,750kV 线路各部分损耗及损耗率有如下变化规律:

(1) 750kV 线路有功损耗随线路传输功率的增加近似成二次增加,并联高压电抗器有功损耗变化很小。

(2) 750kV 线路传输功率小于 445MW 时,高压电抗器损耗大于线路电阻损耗,占主导地位。此时,线路综合损耗大部分是由无功功率产生,线路运行

经济性差,综合线损率高。因此 750kV 电网应尽量避免低功率运行。线路传输功率增加后,线路有功损耗才逐渐转化为主要部分。

(3) 线路综合损耗率随着线路传输功率的增加先降低后升高。线路综合损耗率最低值出现在线路传输功率为 445MW 时,此时高压电抗器损耗与线路电阻损耗近似相等。

(4) 由于无功功率在 750kV 线路上造成的损耗小,而单一线损率随线路传输功率近似成线性增加。这说明了仅依靠线路损耗来确定线路经济运行范围具有一定的困难,因此利用综合损耗来判断线路的经济运行更加合理、实用。

6 结论

在 750kV 电网线路有功损耗计算分析时,不仅要考虑并联电抗器的无功补偿作用,还需要计及高压电抗器本身的有功损耗。本文提出了考虑高压并联电抗器有功损耗的 750kV 线路综合损耗模型,分析了高压并联电抗器对 750kV 线路损耗的影响机理。

(1) 高压并联电抗器接入能够减少无功功率在 750kV 线路上所造成的损耗,使 750kV 线路损耗主要受有功功率的影响。

(2) 在 750kV 线路低传输功率时,高压电抗器损耗占线路综合损耗的主要部分,综合损耗大部分是由无功功率产生的有功线路损耗,线路的运行经济性差。750kV 电网应尽量避免低功率运行。

(3) 利用综合线路损耗可更合理地分析 750kV 线路经济性,综合损耗率随着线路传输功率的增加先降低后升高。在 750kV 线路电阻损耗和高压电抗器损耗近似相等时,线路综合损耗率最低,线路运行最经济。

参考文献 (References):

- [1] 何世恩, 沈利平 (He Shi'en, Shen Liping). 河西 750kV 系统故障特征分析及对保护的影响 (Hexi 750kV system fault characteristic analysis and its impact on relaying protection) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (Suppl.): 88-93.
- [2] 潘雄, 丁新良, 黄明良, 等 (Pan Xiong, Ding Xinliang, Huang Mingliang, et al.). 可控高压电抗器应用于西北 750kV 电网的仿真分析 (Simulation analysis on application of controllable reactors in 750kV Northwest China Power Grid) [J]. 电力系统自动化 (Automation

- of Electrical Power System), 2007, 31 (22): 104-107.
- [3] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等 (Zhou Qinyong, Guo Qiang, Bu Guangquan, et al.). 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用 (Application of controllable reactors in China's power grid at extra and ultra voltage level) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (7): 1-6.
- [4] 杜贵和, 王正风 (Du Guihe, Wang Zhengfeng). 电力系统元件经济运行指标的统一 (Unification and application for economical operation index of power system component) [J]. 东北电力技术 (Northeast Electric Power Technology), 2013, 34 (8): 15-18.
- [5] 顾生杰, 张帆, 田铭兴, 等 (Gu Shengjie, Zhang Fan, Tian Mingxin, et al.). 带并联电抗器补偿的长距离输电线路的功率损耗 (Power losses in long distance transmission line with shunt reactor compensation) [J]. 兰州交通大学学报 (Journal of Lanzhou Jiaotong University), 2014, 33 (4): 12-15, 35.
- [6] 梁才, 刘文颖, 周喜超, 等 (Liang Cai, Liu Weny-ing, Zhou Xichao, et al.). 750kV 电网在甘肃电网中的降损作用分析 (Analysis on role of 750kV power network played in loss reduction of Gansu Power Grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (2): 100-103.
- [7] 于峥, 柯贤波, 王蒙 (Yu Zheng, Ke Xianbo, Wang Meng). 750kV 输变电示范工程网损分析 (Northwest 750kV power grid transmission lost analysis) [J]. 电网与水力发电进展 (Advances of Power System & Hydroelectric Engineering), 2007, 23 (6): 15-21.
- [8] Y Li, W Liu, J Zheng, et al. Impacts of high-voltage shunt reactor on 750kV line losses [A]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference [C]. Shanghai, China, 2012. 1-3.
- [9] 陈珩 (Chen Heng). 电力系统稳态分析 (Steady state analysis of power system) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2007. 46-53.
- [10] DLT 271-2012, 330kV ~ 750kV 油浸式并联电抗器使用技术条件 (Technical specification of 330kV ~ 750kV oil immersed shunt-reactor) [S].
- [11] JB/T10779-2007, 750kV 油浸式并联电抗器技术参数和要求 (Specification and technical requirements for 750kV oil-immersed shunt reactors) [S].
- [12] 阎秀恪, 代忠滨, 于存湛, 等 (Yan Xiuke, Dai Zhongbin, Yu Cunzhan, et al.). 基于全损耗计算的空心电力电抗器温度场研究 (Research on temperature field of air core power reactor based on all losses calculation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (4): 31-36.

Influence mechanisms of high-voltage shunt reactors on 750kV transmission line losses

ZHUO Jian-zong¹, LIU Wen-ying¹, LIU Fu-chao², DAN Yang-qing³, XIA Peng¹, WEI Ze-tian¹

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Gansu Provincial Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company Economic Research Institute, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Large-capacity high-voltage shunt reactors are generally installed in 750kV transmission lines. It will bring large error to 750kV line loss analysis when ignoring the influence of HV reactors on the line losses. On this basis this paper proposes a 750kV line comprehensive loss model considering HV reactors losses. By using this model, the influence mechanism of HV reactors on 750kV transmission line losses is analyzed. Due to the integration of HV reactors, the part of line losses caused by reactive power is lessened. However, the HV reactors can also generate active losses themselves. As the transmitted power of the line increases, the comprehensive loss rate of 750kV transmission line decreases firstly and increases subsequently after the integration of HV reactors. And the line comprehensive loss rate is lowest when the resistive losses of 750kV transmission line is approximately equal to the losses of high-voltage reactors, which means the economy of the transmission line is optimal.

Key words: high-voltage shunt reactor; 750kV transmission line; line comprehensive loss; influence mechanism