

特高压接入电网的并联电抗器补偿研究

章勇高¹, 常凯旋¹, 苏永春²

(1. 华东交通大学, 南昌 330013; 2. 江西省电力科学研究院, 南昌 33009)

摘要: 根据江西特高压输电规划,以均匀传输方程为基础,不计特高压输电线路的电导,创建包括电容电阻和电感分布参数的特高压 π 型等值电路。以鄂赣特高压为例,基于ADPSS实时仿真系统,通过机电电磁混合仿真,得出了并联电抗器补偿与特高压稳态电压和暂态电压的关系。分析了并联电抗器不同加装位置 and 不同补偿度对特高压稳态电压以及对暂态工频过电压的影响,并根据输电线路输送功率、线路损耗和电压偏差与补偿度的关系建立目标函数,寻求最优补偿。分析结果为特高压接入电网的规划及建设提供参考。

关键词: 特高压; 并联电抗器; 补偿度

Compensation of UHV Access Grid by Shunt Reactors

ZHANG Yonggao¹, CHANG Kaixuan¹, SU Yongchun²

(1. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: According to the UHV power transmission plan of Jiangxi Province, a UHV π -type equivalent circuit without conductance is derived based on the uniform transfer equation. This equivalent circuit includes the distribution parameters of capacitor, resistor and inductor. Taking Hubei-Jiangxi UHV power transmission line as an example, the relationship of compensation by shunt reactors with steady-state voltage and transient voltage is achieved via electromechanical and electromagnetic hybrid simulation based on the advanced digital power system simulator (ADPSS). The influences of shunt reactors' location and degree of compensation on steady-state voltage and transient power frequency overvoltage of the UHV power transmission line are analyzed. Moreover, an objective function is established based on the relationship of compensation degree with the power transmission line's transmission power, voltage deviation, and losses, thus the optimum compensation is obtained. This study may provide a reference for plan and construction of UHV access grids.

Key words: UHV; shunt reactor; degree of compensation

0 引言

发展特高压输电是中国电力工业发展的必然趋势。随着电压等级的升高,特高压线路将产生较高的容性无功,当线路发生故障时会产生工频过电压,而并联电抗器的安装可消除特高压输电线路的容性无功,抑制工频过电压。为保证特高压输电线路的安全稳定运行,对特高压并联电抗器补偿的研

究具有非常重要的意义^[1-5]。

在并联电抗器补偿研究方面,文[6]中提出了特高压并联电抗器调节基本原理及调节范围;文[7]中表明空线末端并联电抗器全容量投入时,可显著地抑制长线的电容效应和工频过电压;文[8]中得出了在相同的补偿度下,并联电抗器安装在线路末端对空载线路电容效应引起的工频电压升高的抑制效果最好的结论。以上文献研究了特高压并联电抗器的原理以及并联电抗器对长线路的电容效应和过

收稿日期:2015-06-11; 修回日期:2015-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51467006);江西省科技厅科技计划项目(20151BBE50118)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51467006), Science and Technology Department of Jiangxi Province(20151BBE50118).

电压的抑制作用,但未从电压偏差、线路输送功率和线路损耗方面总体考量,寻求并联电抗器的最优补偿。

文中以江西特高压输电规划为背景,从暂态及稳态方面,基于均匀传输线方程,考虑输电线路分布参数特性,得到了不计线路电导的 π 型等值电路,采用电力系统全数字实时仿真系统ADPSS,研究了并联电抗器不同安装位置和不同补偿度容量对系统稳态电压的影响,并分析了线路两端加装电抗器时,不同并联电抗器补偿容量下,单相接地故障和两相接地故障对暂态工频过电压的影响。最后根据输电线路输送功率、线路损耗和电压偏差与补偿度的关系建立目标函数,求出了最优补偿度。分析结果对未来特高压接入电网后的安全稳定运行提供了参考。

1 江西电网现状和特高压接入方案

江西电网以南昌为中心,北起九江,南接赣州,东至上饶,西抵萍乡,已基本形成以500 kV电网为骨干的主网架。截至2014年底,全省统调总装机容量为1 567.29万kW。500 kV变电站16座,主变容量1 900万kVA,500 kV线路总长3 622.67 km。220 kV公用变电站132座,主变容量3 361万kVA,220 kV线路总长10 592.47 km。2014年最高用电负荷1 550万kW,创历史新高。

随着用电负荷的不断攀升,部分末端电网缺乏电源支撑,赣州、上饶局部断面在500 kV同杆并架双回线同跳故障下,受电问题日益突出。为解决江西电网受电问题,国家电网规划建设武汉—南昌交流特高压输变电工程。鉴于特高压输送容量大,为保证江西电网的安全稳定运行,必须对特高压输变电工程建成后的江西电网进行详细的分析研究。

特高压接入江西电网的方案见图1。其中,南昌特高压站1 000 kV出线2回至武汉,500 kV出线共4回,至进贤和抚州各2回,南昌特高压站主变容量为 $2 \times 3\,000$ MVA,变压器参数参考1 000 kV特高压晋长治—豫南阳—鄂荆门示范,具体参数详见表1。

2 特高压 π 型等值电路和补偿度

2.1 特高压 π 型等值电路

特高压电力系统是三相对称系统,线路的电压、电流等电气参数之间的关系可以用单相等值电路来描述^[9]。

在建立特高压 π 型等值电路方面,大多数文献都忽略输电线的电阻和电导,进行无损传输分析^[10];

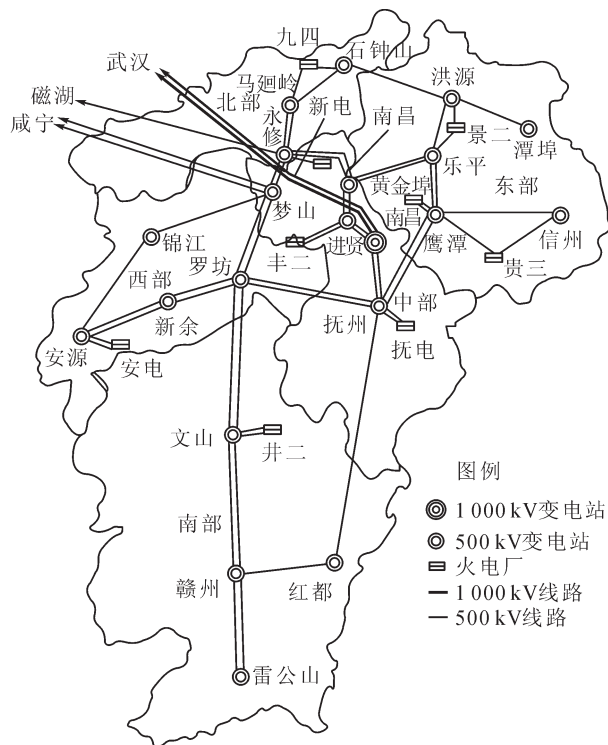


图1 江西特高压接入方案

Fig. 1 Jiangxi UHV access scheme

表1 主变参数

Table 1 UHV transformer parameters

参数	数值
高压侧额定容量/MVA	3 000
中压侧额定容量/MVA	3 000
低压侧额定容量/MVA	1 000
高、中侧短路电压百分比/%	19
中、低侧短路电压百分比/%	40
低、高侧短路电压百分比/%	63
抽头位置	中压侧
调压级差/%	1.25
调压范围/%	± 5

或者考虑线路的电阻和电导,进行计及线路损耗、电晕损耗和泄漏的研究^[11]。文中考虑特高压输电线路分布参数特性,建立计及线路电阻、电感、电容的 π 型等值电路。

图2为不考虑输电线路电导,单位长度特高压交流输电线路的分布参数等值电路,图2中 R_0 、 X_{l0} 、 B_0 分别为单位长度线路的电阻、电抗和电纳,且 $Z=R+jX_L$, $Y=jB$ (Z 为线路阻抗; Y 为线路电纳)。

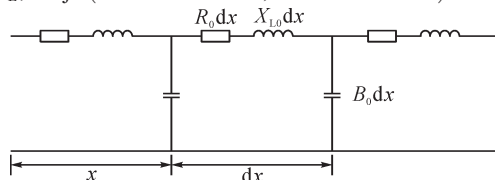


图2 特高压分布参数等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of UHV distribution parameters

特高压输电线路的特性阻抗

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}} = |Z_c|e^{j\eta} = |Z_c|(\cos\eta + j\sin\eta); \quad (1)$$

$$|Z_c| = \sqrt[4]{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)/(\omega^2 C_0^2)}; \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-R_0}{\omega L_0}\right). \quad (3)$$

线路传播常数

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega C_0(R_0 + j\omega L_0)}. \quad (4)$$

式(4)中, 衰减常数和相位常数分别为

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\sqrt{\omega^2 C_0^2(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)/2} - \omega^2 L_0 C_0} \\ \beta = \sqrt{\sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)/(\omega^2 C_0^2)} / 2 + \omega^2 L_0 C_0} \end{cases} \quad (5)$$

考虑输电线路的分布特性

$$\begin{cases} Z = Z_c \sinh \gamma l \\ Y = 2(\cosh \gamma l - 1)/(Z_c \sinh \gamma l) \end{cases} \quad (6)$$

令 $a = \alpha l, b = \beta l$, 利用双曲函数把式(1)~(5)代入式(6), 经化简后可得特高压输电线路不计电导的 π 型等值参数计算公式

$$\begin{cases} R = |Z_c|c/2 \\ X_L = |Z_c|d/2 \\ B = \frac{2(a+b)}{|Z_c|(c^2 + d^2)} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, a, b, c, d 分别为

$$\begin{cases} a = [2 - (e^a + e^{-a})\cos b][e^a \cos(b+\eta) + e^{-a} \sin(b-\eta)] \\ b = (e^a - e^{-a})[e^a \cos(b+\eta) - e^{-a} \cos(b-\eta)] \sin b \\ c = e^a \cos(b+\eta) - e^{-a} \cos(b-\eta) \\ d = e^a \sin(b+\eta) + e^{-a} \sin(b-\eta) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 并联电抗器的补偿度

长度为 l 的特高压三相交流输电线路。其电场能(容性无功功率)为

$$Q_C = 3\omega C_0 U_{ph}^2 l = \omega C_0 U^2 l. \quad (9)$$

磁场能(感性无功功率)为

$$Q_L = 3\omega L_0 I^2 l = 3\omega L_0 [p/(\sqrt{3}U)]^2 l. \quad (10)$$

电场能和磁场能大小的差异, 决定了

$$Q_{CL} = Q_C - Q_L = \omega C_0 U^2 l - 3\omega L_0 I^2 l. \quad (11)$$

补偿设备对剩余的容性无功进行补偿 Q_{CL} 。设输电线上所有并联电抗器的总容量为 Q_B , 则电抗器的补偿度为^[12]

$$K_B = Q_B / Q_C. \quad (12)$$

式(9)~(12)中: U_{ph} 为输电线路的相电压; U 为输电线路的线电压, l 为输电线路的长度。

3 补偿位置与补偿容量对稳态电压的影响

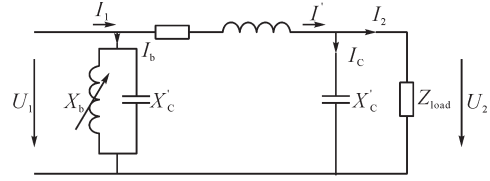
图3为特高压输电线路首端、末端和首末端加装

并联电抗器的 π 型等值电路。电抗器加装在首端或末端, 电抗器的补偿度为

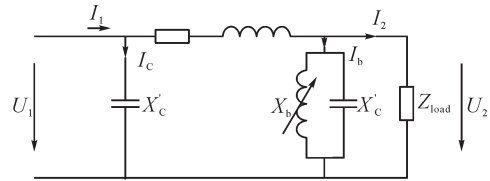
$$k_1 = \frac{Q_b}{Q_C} = \frac{2X'_c}{X_b}. \quad (13)$$

电抗器加装在首末端, 电抗器的补偿度为

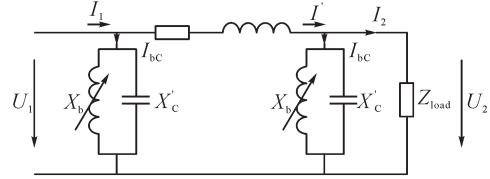
$$k_2 = \frac{Q_b}{Q_C} = \frac{X'_c(X_{b1} + X_{b2})}{2X_{b1}X_{b2}}. \quad (14)$$



(a) 首端装置并联电抗器



(b) 末端装置并联电抗器



(c) 两端装置并联电抗器

图3 特高压加装并联电抗器的 π 型模

Fig. 3 π model of UHV with shunt reactors

参考 1 000 kV 特高压晋长治—豫南阳—鄂荆门示范工程, 武汉至南昌特高压线路选线采用 LGJ-630x8 导线, 导线参数详见表 2。计算数据基于考虑特高压接入华中华北规划和方式数据。首末端两端加装电抗, 按鄂赣特高压甲线首末端各分担 40% 和 60% 的补偿容量, 特高压乙线首末端各分担 60% 和 40% 的补偿容量^[13]。

表 2 LGJ-630x8 导线参数

Table 2 LGJ-630x8 line parameters

$R/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$L/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$C/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
0.008 2	0.260 0	0.014 0

100 MW 及以上的发电机模型采用 E_q'' 变化模型(即考虑了调速系统作用), 其他发电机模型采用 E_q' 恒定模型。150 MW 以上火力发电机组均考虑了 PSS, 负荷采用感应电动机与恒定阻抗的综合负荷模型, 其中 50% 感应电动机, 50% 恒定阻抗。

运用 ADPSS 实时仿真软件对江西特高压接入江西电网进行建模仿真。为避免谐振, 通常并联电

抗器的补偿度在 0.3~0.9 之间^[4],仿真结果见图 4。

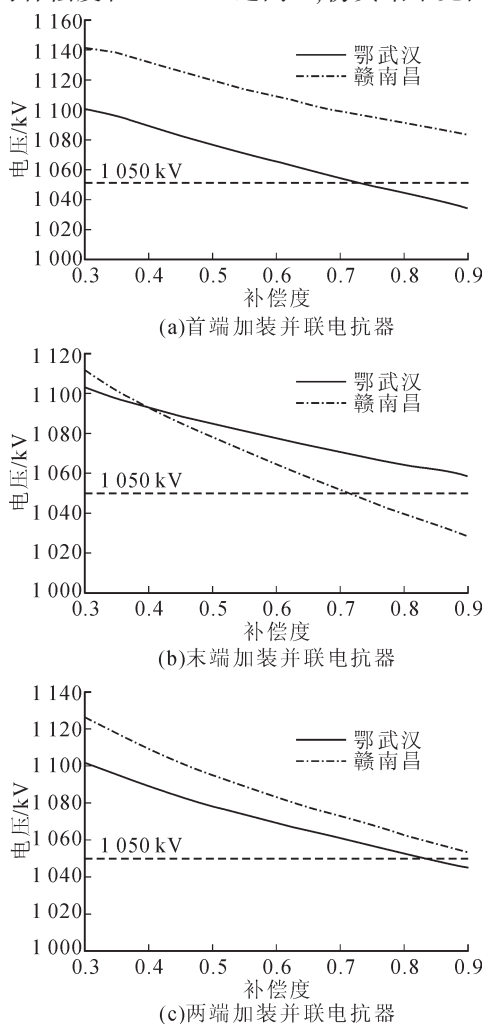


图 4 并联电抗器对稳态电压的影响

Fig. 4 The influence of shunt reactors on steady-state voltage

由图 4 可知,电抗器加装在首端,特高压南昌侧电压始终高于武汉侧,且随着补偿度的增加,并联电抗器对武汉侧的电压抑制较大,补偿度从 0.7 增加到 0.9 时,武汉端电压下降 19.71 kV,南昌端下降 15.70 kV。当补偿度为 0.7 时首端电压为 1 053.92 kV,末端电压为 1 098.84 kV,高于额定电压(1 050 kV) 48.84 kV。

电抗器加装在末端,补偿度达到 0.4 时,首末端电压相等为 1 092 kV。补偿度继续增大,则南昌侧电压低于武汉侧,且两端电压差不断增大。补偿度为 0.7 时,首末端电压差为 18.95 kV;补偿度为 0.9 时,首末端电压差为 30.18 kV,武汉端为 1 058.40 kV,南昌端电压为 1 028.22 kV。

电抗器加装在两端,南昌端电压高于武汉端,但武汉端与南昌端的电压差值较小。随着补偿度增大,电压差逐渐减小,补偿度为 0.7 时,电压差为 12.07 kV,补偿度达到 0.9 时,电压差为 8.5 kV。补

偿度为 0.8 时,武汉端电压为 1 052.87 kV,南昌端电压为 1 063.11 kV。采取这种补偿方式时,线路上的电压分布更加均衡。

可见,并联电抗器对武汉端和南昌端电压都有抑制作用;并联电抗器加装在末端时,对南昌端的电压抑制作用最大;两端加装电抗器时,武汉端和南昌端电压差最小且逐渐减小,线路上的电压分布更加均衡。

4 补偿容量对暂态过电压的影响

由第 3 节仿真结果可知,电抗器补偿容量分布在线路两端时,整条线路的电压分布与额定电压的偏差最小。该节对鄂赣特高压首末端加装电抗器不同补偿容量,进行暂态工频过电压分析。其中,甲线首末端分别分担 40%和 60%的补偿容量,乙线首末端分别分担 60%和 40%的补偿容量。

计算中考虑两种故障形式:单相接地和两相接地。故障点分别发生在鄂赣特高压线路首端、距线路首端 1/3 处、距线路首端 2/3 处和线路末端。

为了分析故障形式和故障位置对过电压的影响,表 3、4 给出了补偿度为 80%时,单相接地故障和两相接地故障不同故障位置引起的工频过电压值。

表 3 单相接地故障不同故障位置工频过电压

Table 3 Power frequency overvoltage of phase to earth fault under different degree of compensation p.u.

类型	故障点	首端	首端 1/3	首端 2/3	末端	最大值
单相 接地	首端	1.13	1.10	1.06	1.01	1.13
	距首端 1/3	1.04	1.23	1.13	1.03	1.23
	距首端 2/3	1.01	1.13	1.22	1.06	1.22
	末端	1.00	1.06	1.11	1.14	1.14

注:电压基准值为 $1\ 100\text{ kV}/\sqrt{3}=635.085\text{ kV}$ 。

表 4 两相接地故障不同故障位置工频过电压

Table 4 Power frequency overvoltage value of double earth fault under different degree of compensation p.u.

类型	故障点	首端	首端 1/3	首端 2/3	末端	最大值
两相 接地	首端	1.16	1.14	1.10	1.04	1.16
	距首端 1/3	1.05	1.23	1.15	1.06	1.23
	距首端 2/3	1.02	1.14	1.24	1.09	1.24
	末端	1.01	1.08	1.14	1.18	1.18

注:电压基准值为 $1\ 100\text{ kV}/\sqrt{3}=635.085\text{ kV}$ 。

由表 3、4 得出,工频过电压与故障位置有关。单相接地故障发生在距线路首端 1/3 处时,工频过电压最高(1.23 p.u.);两相接地故障发生在距线路首端 2/3 处时,工频过电压最高(1.24 p.u.)。

表 5、6 分别给出了不同并联电抗器补偿度下(补偿度调节范围 50%~90%)单相接地故障发生在距

首端 1/3 处和两相接地故障故障发生在距首端 2/3 处的工频过电压值。

表 5 不同补偿度下的单相接地工频
过电压故障发生在距首端 1/3 处

Table 5 Single phase grounding power frequency overvoltage under different degree of compensation when fault occurs at the first end of the 1/3 p.u.					
补偿度%	首端	距首端 1/3	距首端 2/3	末端	最大电压
50	1.06	1.25	1.16	1.06	1.25
60	1.05	1.24	1.15	1.04	1.24
70	1.04	1.23	1.13	1.03	1.23
80	1.03	1.22	1.12	1.02	1.22
90	1.01	1.21	1.11	1.00	1.21

注:电压基准值为 $1\ 100\ \text{kV}/\sqrt{3}=635.085\ \text{kV}$ 。

表 6 不同补偿度下的两相接地工频
过电压故障发生在距首端 2/3 处

Table 6 Two phase grounding power frequency overvoltage under different degree of compensation when fault occurs at the first end of the 2/3 p.u.					
补偿度%	首端	距首端 1/3	距首端 2/3	末端	最大电压
50	1.04	1.16	1.26	1.13	1.26
60	1.03	1.15	1.25	1.10	1.25
70	1.02	1.14	1.24	1.09	1.24
80	1.01	1.13	1.22	1.08	1.22
90	1.00	1.11	1.21	1.06	1.21

注:电压基准值为 $1\ 100\ \text{kV}/\sqrt{3}=635.085\ \text{kV}$ 。

由表 5、6 可知,随着并联电抗器补偿度的增加,过电压逐渐减小。线路首末端加装并联电抗器,补偿度取 50%~90%,工频过电压值均小于国家规定的特高压系统的工频过电压水平(1.30 p.u.),满足要求。

5 最优补偿度

不同的补偿度会对线路的传输功率和线路两端的电压偏差以及线路损耗产生影响。根据图 4 的仿真结果,运用 MATLAB 软件,在线路两端加装并联电抗器时,对补偿度与电压曲线进行拟合,得到武汉端和南昌端补偿度与电压曲线关系式(15)、(16),同理可得补偿度与传输功率关系式(17)。

$$A=4383\ 7x^4+42565\ 1x^3-158083\ 8x^2+293043\ 2x^{-1}+871.242\ 5; \quad (15)$$

$$B=-3466\ 7x^4+34189\ 8x^3-129223\ 2x^2+241.456\ 9x^{-1}+894.511\ 4; \quad (16)$$

$$p=30.7x^4-77.66x^3+71.22x^2-33.97x+139.52. \quad (17)$$

由式(15)~(17)可得南昌端的电压偏差绝对值为

$$\Delta u_1 = \left| \frac{A-1\ 050}{1\ 050} \right|. \quad (18)$$

武汉端电压偏差绝对值为

$$\Delta u_2 = \left| \frac{B-1\ 050}{1\ 050} \right|. \quad (19)$$

线路损耗为

$$\Delta p = \left(\frac{P}{u} \right)^2 R. \quad (20)$$

式(18)~(20)中: u 为首末端的平均电压; p 为线路的输送功率; R 为线路的电阻。

为保证系统运行在最优状态,则要保证系统的电压偏差绝对值最小,输电线路损耗最小,根据式(18)~(20)确定寻优的目标函数为

$$G = \sigma_1 \Delta u_1 + \sigma_2 \Delta u_2 + \sigma_3 z. \quad (21)$$

式(21)中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别取 0.2、0.4、0.4; $z = \frac{\Delta p}{\Delta p_{\max}}$

为线路损耗占最大线路损耗的比例; $\Delta p_{\max}$ 为线路的最大损耗。

当 G 值最小时,表明线路损耗、电压偏差都处于比较理想的状态,此时的补偿度最优,运用 MATLAB 仿真软件可得补偿度与 G 的关系图,见图 5。

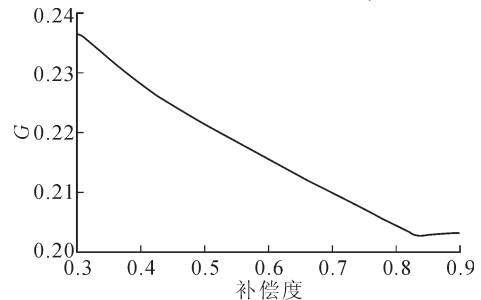


图 5 补偿度与 G 的关系

Fig. 5 Relationship between degree of compensation and G

由图 5 可得,当考虑首末端的电压偏差、线路损耗,补偿度为 0.835 时其 G 值最小为 0.202 6。在此补偿度下,武汉端电压为 1 049.9 kV,南昌端电压为 1 059.6 kV,线路的功率损耗为 7.785 4 MW。根据第 4 节的仿真结果可知,在此补偿度下,输电线路工频过电压满足要求。因此,此补偿度为最优补偿。

6 结语

文中对特高压线路的无功补偿进行了研究,结果表明:并联电抗器加装在线路末端时,对特高压末端南昌端电压抑制作用最大。并联电抗器加装在线路两端时,对特高两端电压抑制作用比较明显,且线路上的电压分布更加均衡;补偿度取 50%~90%,工频过电压值均满足要求;考虑线损和电压偏差建立了目标函数,并求出了最优补偿度^[15-22]。文中的分析结果可为特高压接入电网的规划与建设提供有意义的指导。

参考文献:

- [1] 郑涛,赵彦杰.超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J].电力系统自动化,2014,28(7):127-135.
ZHENG Tao,ZHAO Yanjie. Overview of EHV/UHV controllable shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,28(7):127-135.
- [2] 周勤勇,郭强,卜广全,等.可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(7):1-6.
ZHOU Qinyong,GUO Qiang,BU Guangquan,et al. Application of controllable reactors in China's power grid at extra and ultra voltage level[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(7):1-6.
- [3] 赵树平,安腊梅.超/特高压直流棒形支柱瓷绝缘子关键技术研究[J].电瓷避雷器,2012(5):54-58.
ZHAO Shuping,AN Lamei. Study on key techniques of ceramic long-rod insulator used in EHVDC/UHVDC transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters,2012(5):54-58.
- [4] 陈柏超.新型可控饱和电抗器理论及应用[M].武汉:水利水电大学出版社,1999.
CHEN Baichao. Theory and application of a novel controllable saturated reactor[M]. Wuhan: Water Conservancy and Hydropower University Press,1999.
- [5] 刘孝为,陈楚羽,王宏.超高压并联电抗器的结构特点和运行情况综述[J].陕西电力,2006,5(5):39-43.
LIU Xiaowei,CHEN Chuyu,WANG Hong. Overview of EHV shunt reactor's structural features and operation[J]. Shaanxi Electric Power,2006,5(5):39-43.
- [6] BELYAEV A N,SMOLOVIK S V. Steady-state and transient stability of 500 kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors[C]/2005 IEEE Conference on Power Technology.Russia:IEEE,2005:1-6.
- [7] 徐秉雁.特高压输电与超高压输电经济性比较[J].山西电力,2009(1):57.
XU Bingyan. The economic comprising between EHV transmission and UHV transmission[J]. Shanxi Electric Power,2009(1):57.
- [8] 刘涤尘,陈柏超,田翠华,等.新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析[J].电网技术,1999,23(2):54-56.
LIU Dichen,CHEN Baichao,TIAN Cuihua,et al. Application and analysis of a novel controllable reactor in power system[J]. Power System Technology,1999,23(2):54-56.
- [9] 顾生杰,田铭兴.变压器式可控电抗器的研究与发展[J].高压电器,2014,50(1):20-25.
GU Shengjie,TIAN Mingxing. Study and develop of transformer type controllable reactor[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(1):20-25.
- [10] 周佩朋,项祖涛,郑彬,等.750 kV磁控式可控高抗谐波特性仿真与实测分析[J].电网技术,2014,38(4):1059-1063.
ZHOU Peipeng,XIANG Zutao,ZHENG Bin,et al. Simulation and measurement of harmonic characteristics of 750 kV magnetic controllable high impedance[J]. Power System Technology,2014,38(4):1059-1063.
- [11] 刘新根,谭耀荣,徐静华.特高压交流变电站用磁控式动态无功补偿技术方案[J].电力电容器与无功补偿,2014,35(6):14-18.
LIU Xingen,TAN Yaoshen,XU Jinghua. Technical solution on magnetically controlled dynamic reactive power compensation for UHV AC substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2014,35(6):14-18.
- [12] 中国电力科学研究院.特高压输电技术交流输电分册[M].北京:中国电力出版社,2012.
China Electric Power Research Institute. UHV AC transmission technology[M]. Beijing:China Electric Power Press,2012.
- [13] 周腊吾,朱英浩,周之光.特高压可控并联电抗器的调节范围[J].电工技术学报,2006,21(12):116-121.
ZHOU Lawu,ZHU Yinghao,ZHOU Zhiguang. Adjustment range of UHV controllable shunt reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(12):116-121.
- [14] 陈维贤,陈禾.并联电抗器的可控调节[J].高电压技术,2000,26(5):11-13.
CHEN Weixian,CHEN He. Controllable adjustment of shunt reactor[J]. High Voltage Engineering,2000,26(5):11-13.
- [15] 周腊吾.新型特高压可控电抗器的理论及应用[D].长沙:湖南大学,2008.
ZHOU Lawu. The theory and application of a novel UHV controllable reactor[D]. Changsha: Hunan University,2008.
- [16] 汲广,谢超,石延辉.云南—广东特高压直流滤波器电抗器故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2013,34(1):65-69.
JI Guang,XIE Chao,SHI Yanhui. Fault analysis of UHVDC filtering reactor in Yunnan-Guangdong[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2013,34(1):65-69.
- [17] 范冕,万磊,戴敏,等.1 000 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):584-591.
FAN Mian,WAN Lei,DAI Min,et al. Simulation analysis on fulminous characteristics of 1 000/500 kV EHV/UHV AC quadra-circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering,2013,39(3):584-591.
- [18] 王利平,王晓茹.特高压输电线路计算功率差动保护[J].中国电机工程学报,2013,33(19):174-182.
WANG Liping,WANG Xiaoru. Differential protection based on calculated power for UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19):174-182.

(下转第14页)

- uation for measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 12-17.
- [13] 胡 灿. 超/特高压直流互感器现场校验技术及装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- HU Can. Check technology and equipment of transformer on site in UHVDC[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [14] 钱之银, 肖 嵘, 吴光亚. 华东地区 500 kV 线路绝缘子的爬距有效利用系数[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 32-36.
- QIAN Zhiyin, XIAO Rong, WU Guangya. Research on creepage distance utilization coefficients of insulators for 500 kV transmission lines in East China area[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 32-36.
- [15] 郑殿春. 绝缘结构电场分析有限元法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHENG Dianchun. The finite element method and application on analysis of electric field of insulation structure[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] 王泽忠. 简明电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- WANG Zezhong. Concise numerical calculation of electromagnetic field[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [17] SINGHASATHEIN A, PRUKSANUBAL A, TANTHANUCH N, et al. Dielectric strength of breakdown voltage of nitrogen and carbon-dioxide[C]//2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Krabi: IEEE, 2013: 1-5.
- [18] LI Fengqi, SHE Zhengqiu, LOU Dianqiang. Fault analysis for DC voltage divider in Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3244-3248.
- [19] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- GUAN Zhicheng. Insulators and power transmission equipment insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [20] 郭贤珊, 宿志一, 乐 波. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 1-6.
- GUO Xianshan, SU Zhiyi, YUE Bo. Design of post insulator for UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 1-6.
- [21] 全冰冰. 特高压直流输电线路快速保护研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- TONG Bingbing. Fast protection study of UHVDC power transmission system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [22] 邓 旭. 特高压直流及柔性直流输电系统换流站绝缘配合研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- DENG Xu. Research on insulation coordination for converter stations of UHVDC and VSC-HVDC transmission project[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- 汪本进(1971—), 男, 工程硕士, 工程师, 主要从事传统电力互感器、电子式互感器和直流互感器的性能和试验技术研究。
- 吴细秀(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为高电压技术(通信作者)。

(上接第6页)

- [19] 陈水明, 许 伟, 何金良. 1 000 kV 交流输电线路的工频暂态过电压研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 31-35.
- CHEN Shuiming, XU Wei, HE Jinliang. Study on fundamental frequency transient overvoltage for UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 31-35.
- [20] 张友鹏, 杜斌祥, 田铭兴. 计及损耗的特高压输电线路中可控电抗器补偿度研究[J]. 高电压技术, 2011, 46(9): 2096-2101.
- ZHANG Youpeng, DU Binxiang, TIAN Mingxing. Study on the compensation degree of controllable shunt during UHV transmission[J]. High Voltage Engineering, 2011, 46(9): 2096-2101.
- [21] 熊 宇, 高 潮, 李玉玲, 等. 电流源光伏逆变器与电压源光伏逆变器的比较研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(1): 46-47.
- XIONG Yu, GAO Chao, LI Yuling, et al. Comparison of current source inverter and voltage source inverter for PV grid-connected system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(1): 46-47.
- [22] 谢忠夫. 万能式断路器控制回路接线端子爬电距离设计[J]. 电器与能效管理技术, 2015(16): 38-39.
- XIE Zhongfu. Creepage distance design of ACB control circuit terminals[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(16): 38-39.
- 章勇高(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向电力电子在电力系统中的应用。