

# 特高压交流输电线路电气不平衡度及换位研究

陈麒任 罗楚军 李 健 刘文勋 张 瑚 但京民

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 架空输电线路各相导线参数的不一致,导致了系统中电流和电压的不对称,必须结合导线换位来减小线路不平衡度。基于电磁暂态软件 ATP-EMTP,搭建了适用于 1000 kV 特高压交流输电线路的仿真模型,并结合 Matlab 软件进行编程计算,研究了双回输电线路的电气不平衡度及其影响因素。提出了 1000 kV 输电线路电压不平衡度满足要求值的换位方式,对于武汉—南京—长沙 1000 kV 特高压交流输变电工程线路,在武南段进行一次全换位,南长段进行一次全换位,即可满足不平衡度限制的要求,换位后电压不平衡度低于 0.66%。

**关键词:** 电气不平衡度; 换位; 输电线路; 逆相序

中图分类号: TM751 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0017-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.004

## Research on Electrical Unbalance and Transposition of UHVAC Transmission Lines

Chen Qiren, Luo Chujun, Li Jian, Liu Wenxun, Zhang Hu, Dan Jinmin

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power  
Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** The inconsistent parameters of three-phase overhead transmission line lead to the asymmetrical current and the asymmetrical voltage in power system, so it is necessary to change the position of the wire to reduce the unbalance. Based on ATP-EMTP, a 1000 kV UHVAC transmission line model is established, and combined with Matlab software for programming calculation, the factors affecting the electrical unbalance of double-circuit transmission lines are studied. The transposition method for voltage unbalance of 1000 kV transmission line which meets the required value is proposed. For Wuhan-Nanjing-Changsha 1000 kV UHVAC transmission and transformation engineering line, the Wuhan-Nanchang section will be fully transposed as well as the Nanchang-Changsha section, which can meet the requirements of unbalance limit. After transposition, the voltage unbalance is less than 0.66%.

**Key words:** electrical unbalance; transposition; transmission line; reverse phase sequence

## 0 引言

输电线路的不平衡度是衡量电力质量的重要参数。架空输电线路在线路正常运行时,各相导线都具有不同的线路参数,比如导纳、阻抗。这种参数上的不对等引起了输电线路中电流和电压的不对称,通常用电压、电流的不平衡度来衡量。当系统不平衡度超过限值时,回路中连接的电气设备就会受到影响,甚至影响线路正常运行<sup>[1]</sup>。

输电线路中,不平衡度的大小主要取决于导线相间的耦合程度,即导线电压、导线电流的负序、零

序、正序分量之间的耦合程度。这个耦合程度与导线的空间相对方位有着直接的关系。进行导线不同相之间的换位,改变相间的空间相对方位,使三相导线在整个线路长度上的空间位置趋于对称,是当前解决长距离特高压输电线路电力系统不平衡度的常用方法。在超高压输电线路中,可以通过调整导线的换位方式和换位点,来保证线路长度较长时输电线路电力质量的稳定<sup>[2]</sup>。

武汉—南昌—长沙 1000 kV 特高压交流输电线路工程全线路总长度为 750.5 km,武汉—南昌段长 405.3 km,南昌—长沙段长 345.2 km。采用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP,对该线路不平衡度进行

仿真计算,对不平衡度的影响因素进行讨论分析,并对换位方式进行研究,推荐合理的换位方式。

## 1 计算模型

所建电力线路模型采用三相电压源供电,另一端采用三相等效负载,保持模型输送的功率、电压以及功率因数与额定值相当。

### 1.1 架空线路模型

架空线路用 $\pi$ 型等值电路来模拟,其结构如图1所示。采用EMTP的LINE CONSTANT子程序,根据架空线路空间方位及参数,采用Carson模型进行仿真计算。

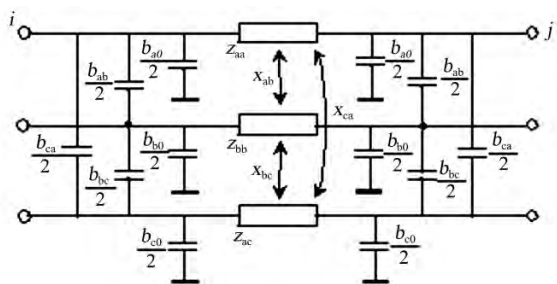


图1 三相输电线路 $\pi$ 型等值电路

按照1000 kV输电线路杆塔结构,在ATP中建立三相架空线路模型,其结构如图2所示。

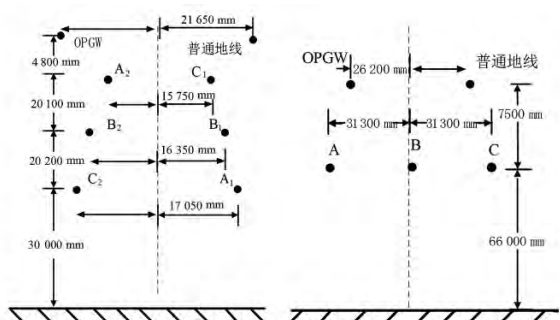


图2 线路模型

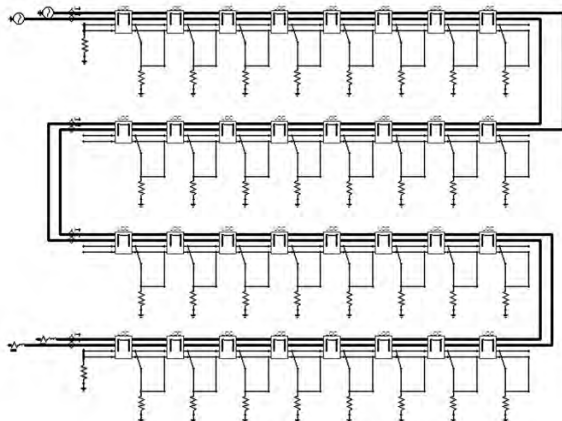


图3 线路分析模型

### 1.2 线路分析模型及计算方法

基于架空线路模型,在ATP-EMPT中建立三相架空线路不平衡度分析模型。

线路模型三相电源电压为1000 kV,架空线路模型分为多个小节,每节采用 $\pi$ 型等值电路进行仿真计算。得到线路模型负载端的电压电流波形,利用相-序变换矩阵求解正、负序分量<sup>[3]</sup>,对于电压有:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

式中 $\mu = e^{120^\circ}$ 。根据标准规定公式计算 $\varepsilon_U$ 及电流不平衡度 $\varepsilon_I$ ,由于分析中采用对称负载,因此只需计算 $\varepsilon_U$ <sup>[4]</sup>。

### 1.3 其他计算参数

武汉—南昌—长沙1000 kV特高压交流输电线路工程最高运行电压是1100 kV;输送功率是5000 MW;功率因数为0.95。工程所用到的导地线参数如表1所示。

表1 导地线参数

导地线	型号	分裂间距 /mm	直流电阻 /( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	外径 /mm
导线	JL1/G1A-630/45	400	0.045 5	33.8
	JL1/G1A-630/55	400	0.045 2	34.3
	JL1/G1A-500/45	400	0.058 6	30.0
	JLHA2/G3A-500/45	400	0.058 6	30.0
	JL1/G1A-500/65	400	0.057 6	30.9
	地线	JLB20A-185		0.470 4

## 2 线路不平衡度分析

### 2.1 线路长度对不平衡度的影响分析

使用线路分析模型在ATP-EMPT软件进行仿真计算,线路三相电压与电流波形如图4、图5所示,不平衡度计算结果如表2所示。

由表2可知,线路不平衡度随着线路长度的增加而增大。武汉—南昌段与南昌—长沙段的不平衡度差距较大的原因是两段线路的单回路比例不一

样,武汉—南昌段单回长度占2.1%,南昌—长沙段单回长度占19.7%。同时也可以看出武汉—南昌段在长度为220 km时不平衡度就超过了2%的限值要求;南昌—长沙段在长度为140 km时不平衡度就超过了2%的限值要求。

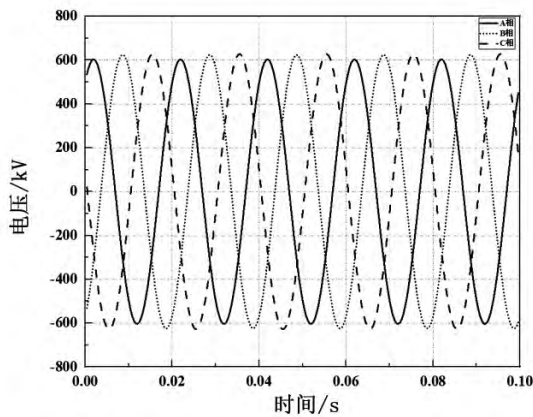


图4 电压波形

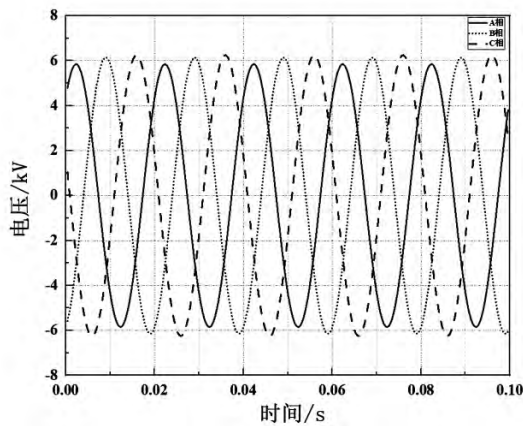


图5 电流波形

表2 线路不平衡度

线路长度 /km	不平衡度/%	
	武汉—南昌	南昌—长沙
100	0.85	1.68
140		2.03
200	1.87	2.48
220	2.05	
300	2.99	4.05
345		4.41
400	4.06	

## 2.2 导线对地高度

采用工程给定的系统参数以及杆塔数据,对武汉段400 km不同杆塔呼高下的不平衡度进行仿真

计算,结果如表3所示。

表3 导线对地高度对不平衡度的影响

杆塔呼高/m	不平衡度/%
22	4.05
26	4.05
30	4.06
34	4.06
38	4.06

从表3可知,输电线路不平衡度受到导线对地高度的影响微小,在实际工程中可以不计。

## 2.3 相序对不平衡度的影响

武汉—南昌—长沙工程中同塔双回全部采用逆相序,为研究相序对不平衡度的影响,用相同的系统参数计算同塔双回线路不同相序情况下,线路的不平衡度,计算结果如表4所示。

表4 不同相序下线路不平衡度

线路长度 /km	不平衡度/%		
	同相序	逆相序	异相序
100	2.02	0.85	1.41
200	5.08	1.87	3.28
300	8.26	2.99	5.24
400	11.40	4.06	7.10

上述结果表明,导线同相序排列时,双回输电线路的不平衡度最高,导线异相序排列时线路的不平衡度较低,逆相序排列时不平衡度最低。

对同相序排列线路,超过100 km需要换位;对于采用异相序排列方式的线路,超过160 km需要换位;对于逆相序排列方式的线路,超过220 km需要换位。

同塔双回线路间存在电场和磁场耦合,两回路间相互干扰,同相序运行方式下,两回路间的干扰是相互加强的,由此引起不平衡度增加;而在逆相序和异相序排列方式下,两回间的干扰是相互削弱的,双回线路的不平衡度减小。

## 2.4 土壤电阻率对不平衡度的影响

武汉—南昌—长沙1000 kV特高压交流输电线路工程跨越3省9市,地理位置跨度大,地质不同,需研究土壤电阻率对不平衡度的影响。

针对400 km长的同塔双回及单回线路,建立仿真模型,计算了不同土壤电阻率的情况下线路的不

平衡度,计算结果见表5。

表5 不同土壤电阻率下线路不平衡度

土壤电阻率 $/( \Omega \cdot m )$	不平衡度 / %	
	同塔双回	单回
100	0.12	0.22
200	0.12	0.22
300	0.12	0.22
400	0.12	0.22
500	0.12	0.22
600	0.12	0.22
700	0.12	0.22
800	0.12	0.22
900	0.12	0.22
1000	0.12	0.22

由表5可知,土壤电阻率对输电线路不平衡度的影响很小,可以忽略不计。

### 3 全换位后线路不平衡度分析

#### 3.1 全换位后线路不平衡度

图6为线路换位示意图,换位后达到首端和末端相序一致,每种相序排列各占1/3的线路长度,构成一个整循环,称为一个全换位<sup>[5-6]</sup>。

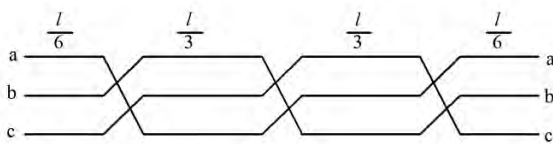


图6 线路一个全换位

利用EMTP的换位元件,在EMTP电磁暂态计算程序中,一个输电线路全换位的模型示于图7。

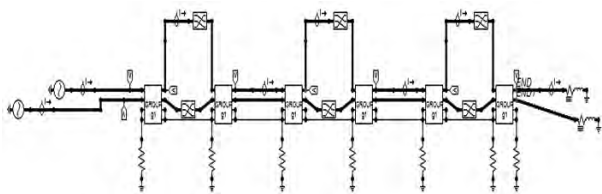


图7 EMTP中一个全换位计算

使用此模型计算线路不平衡度,图8、图9为一

个全换位后线路负载的电压、电流波形,表6为不平衡度的计算结果。

表6 一次全换位后线路各段不平衡度

线路长度 /km	不平衡度 / %	
	武汉—南昌	南昌—长沙
100	0.560	1.69
200	1.320	1.46
300	0.680	1.02
345		0.66
400	0.077	

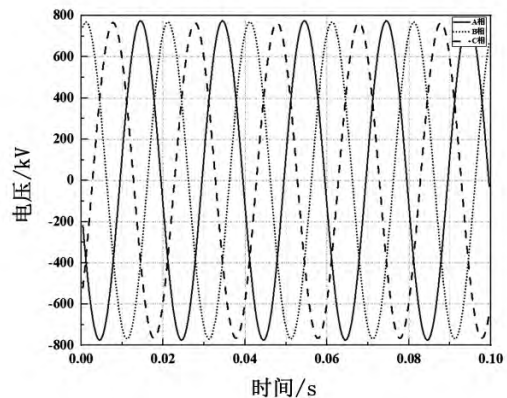


图8 一次全换位后线路电压波形

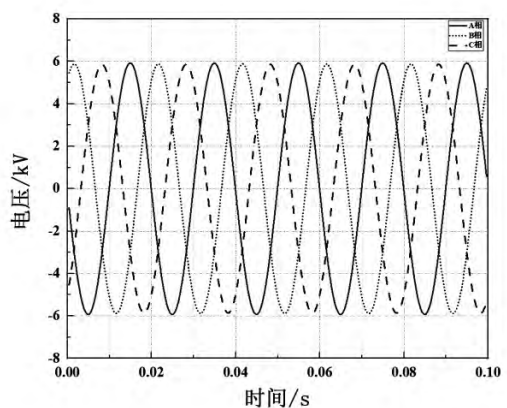


图9 一次全换位后线路电流波形

从表6中可以看出,经过一次全换位后,线路电压不平衡度显著减小。按照国家标准GB/T 15543-2008《电能质量三相电压允许不平衡度》的要求<sup>[7]</sup>,对垂直排列线路,一次全换位能满足电压不平衡度要求的长度远大于400 km。

按照武汉—南昌和南昌—长沙两段分别进行一次和两次全换位后线路不平衡度如表7所示。

表 7 全换位后不平衡度

线路	线路长度 /km	不平衡度 / %	
		一次全换位	两次全换位
武汉—南昌	405	0.077	0.05
南昌—长沙	345	0.31	0.10

从表 7 可看出武汉—南昌—长沙 1000 kV 线路进行一次全循环换位后,线路不平衡度小于 2% 的限值,满足要求。

### 3.2 不同长度线路全换位后不平衡度

为研究一次全换位后线路长度对不平衡度的影响,保持计算用系统参数和塔头尺寸不变,分别针对同塔双回及单回线路,按照图 7 所示换位方式,建立仿真模型,计算了不同线路长度的情况下线路的不平衡度,计算结果见表 8。

表 8 换位后线路长度对不平衡度的影响

线路长度 /km	不平衡度 / %	
	同塔双回	单回
100	0.01	0.02
200	0.04	0.07
300	0.08	0.14
400	0.12	0.22
500	0.18	0.29
600	0.24	0.43
700	0.30	0.59
800	0.36	0.73
900	0.42	0.83
1000	0.47	1.25

由表 8 可知,按照实际工程的塔头及系统参数,一次全换位后线路不平衡度能满足限值要求的长度大于 1000 km。使用多项式拟合可知,同塔双回路不平衡度达到 2% 限值时的长度约为 2700 km,单回线路达到 2% 限值时的长度约为 1600 km。

## 4 结 语

综合前面的计算、分析和研究,主要结论如下:

1) 导线对地距离对线路不平衡度几乎没有影响。随着水平线间距离的减小,不平衡度有所减小,随着垂直线间距离增大,不平衡度有所减小。

2) 运行电压、输送功率和线路不平衡度的关系:在运行电压一定的情况下,不平衡度随输送功率的增大而增大;在输送功率一定的情况下,不平衡度随运行电压的升高而减小。

3) 同塔双回路的不平衡度高于单回路。

4) 导线同相序排列时,双回输电线路的不平衡度最高,导线异相序排列时线路的不平衡度较低,逆相序排列时不平衡度最低。对同相序排列线路,超过 100 km 需要换位;对于采用异相序排列方式的线路,超过 160 km 需要换位;对于逆相序排列方式的线路,超过 220 km 需要换位。

5) 按照所研究的实际工程的塔头及系统参数,一次全换位后线路不平衡度能满足限值要求的长度大于 1000 km。使用多项式拟合可知,同塔双回路不平衡度达到 2% 限值时的长度约为 2700 km,单回线路达到 2% 限值时的长度约为 1600 km。

### 参考文献

- [1] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 1000 kV 架空输电线路设计规范: GB 50665 - 2011 [S] 2011.
- [3] 李军, 彭谦, 卞鹏, 等. 特高压输电线不平衡度分析及换位方式研究 [J]. 电力科学与工程, 2010(9): 35 - 39.
- [4] H. W. Dommel. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 地永庄等, 译. 北京: 水利水电出版社, 1991.
- [5] 孙玉堂. 1000 kV 特高压输电线路换位塔 [J]. 电力建设, 2005(26): 34 - 38.
- [6] 程慕尧. 架空输电线路导线换位及绝缘地线运行方式的优化方案. 中国电力, 2000, 33(1): 57 - 58.
- [7] 电能质量三相电压允许不平衡度: GB/T 15543 - 2008 [S] 2008.

作者简介:

陈麒任(1992), 硕士, 主要从事高压输电线路研究与设计工作。

(收稿日期: 2019 - 11 - 26)