

# 交流特高压半波长输电线路电气不平衡度及换位方式研究

交流特高压半波长输电是一种远距离、大容量的输电形式，在我国具有广阔的应用前景。主要研究交流特高压半波长输电线路不平衡及换位方式。首先，应用PSCAD软件模拟得到线路在不同输送功率和功率因数情况下沿线的电压分布情况；仿真结果表明，线路沿线电压受输送功率和功率因数影响很大。然后，研究线路不平衡，发现线路在不换位情况下，不平衡度大；当线路输送自然功率时，不平衡度最大值出现在距离线路首端1 500 km的位置。最后，对线路换位；研究结果表明，线路换位可以有效地降低线路不平衡度，使其满足运行的要求。

彭 谦/国核电力规划设计研究院 王小宁/国网北京朝阳供电公司  
张友泉/国网山东省电力公司 王 晔/中国电力科学研究院

## 0 引言

交流特高压半波长输电技术是一种超远距离、大容量的特高压输电技术，其输送距离达到3 000 km (50 Hz) 或2 500 km (60 Hz)。与直流特高压输电相比，交流特高压半波长输电的经济性好、年费用低且损耗费用小，具有良好的社会效益。

20世纪40年代，苏联专家首次进行了半波输电方面的研究<sup>[1]</sup>。1965年，美国专家在半波长输电的调谐方案方面进行了研究<sup>[2]</sup>。1969年，印度专家在传输线方面进行了研究<sup>[3]</sup>。到了20世纪80年代末90年代初，意大利的科学家使用EMTP对半波输电进行了模拟仿真计算<sup>[4]</sup>。

近年来，多个国家的学者对半波长输电技术进行了实用性研究。例如：韩国研究使用半波输电技术，将西伯利亚的电源送至本国<sup>[5]</sup>；巴西科学家研究应用半波长输电技术，把亚马逊流域的水电

送到本国负荷中心<sup>[6]</sup>。2011年，中国电力科学研究院、国网经济技术研究院和华北电力大学等单位共同在半波长输电领域展开研究，取得了大量研究成果<sup>[7-11]</sup>。

输电线路各相架空导线自身参数不平衡，会导致线路正常运行时每相导线的阻抗和导纳参数不等，造成系统中产生不对称电压和电流。在我国，通常采用导线换位的方式，降低线路上的不平衡。对于常规的输电线路，国内外学者通常采用电磁暂态程序仿真计算，研究线路的不平衡，并推荐相应的换位方式<sup>[12-13]</sup>。但是对交流特高压半波长输电，相关研究很少。研究特高压半波长输电线路的不平衡，并推荐相应的换位方式，对于特高压半波长输电网建设而言，至关重要。

本文将应用PSCAD软件模拟半波长线路，研究其不平衡度，并研究相应的换位方式。

## 1 半波输电线路参数模型

当线路长度接近电磁波波长时，不能使用集中参数，而应采用分布参数模型加以描述。假设输电线路沿线参数相等，线路末端的电压和电流为已知，可得距末端 $l$ 处的电压、电流，即

$$\begin{cases} U = U_2 \operatorname{ch}(\gamma l) + I_2 Z_C \operatorname{sh}(\gamma l) \\ I = I_2 \operatorname{ch}(\gamma l) + \frac{U_2}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma l) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $U_2$ 、 $I_2$ 为线路末端电压与电流；传播常数 $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z_0 Y_0}$ ， $\beta = 2\pi/6\ 000$  rad/km；波阻抗 $Z_C = \sqrt{Z_0 Y_0}$ ， $Z_0$ 、 $Y_0$ 分别



彭 谦/高级工程师

### 关键词/Keywords

特高压·  
半波长交流输电·  
输电线路·  
不平衡·

为线路等效阻抗和导纳。

传输线可看成如图1所示的二端口网络。

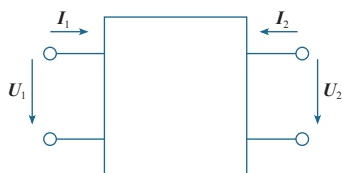


图1 传输线二端口网络

由式(1)可建立二端口网络方程为

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{ch}(\gamma l) & Z_C \operatorname{sh}(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma l) & \operatorname{ch}(\gamma l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据电路二端口理论，将二端口网络等效为Π形，如图2所示。图2中， $Z_{eq}$ 、 $Y_{eq}$ 分别为等效阻抗和等效导纳。

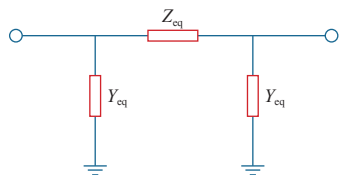


图2 传输线二端口网络等效Π形电路

由式(2)可得

$$\begin{cases} Z_{eq} = Z_C [\operatorname{sh}(\alpha l) \cos(\beta l) + j \operatorname{ch}(\alpha l) \sin(\beta l)] \\ Y_{eq} = \frac{\operatorname{ch}(\alpha l) \cos(\beta l) + j \operatorname{sh}(\alpha l) \sin(\beta l) - 1}{Z_C [\operatorname{sh}(\alpha l) \cos(\beta l) + j \operatorname{ch}(\alpha l) \sin(\beta l)]} \end{cases} \quad (3)$$

若传输线为无损，则 $\alpha = 0$ ， $\operatorname{ch}(\alpha l) = 1$ ， $\operatorname{sh}(\alpha l) = 0$ ，网络方程可简化为

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta l) & j Z_C \sin(\beta l) \\ j \frac{1}{Z_C} \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

且等效阻抗分别为

$$\begin{cases} Z_{eq} = j Z_C \sin(\beta l) \\ Y_{eq} = \frac{\cos(\beta l) - 1}{j Z_C \sin(\beta l)} \end{cases} \quad (5)$$

计算模型采用榆横—潍坊1 000 kV输电线路工程中的典型塔。导、地线挂点对杆塔中心及对地距离如表1所示。

导线选用8分裂LGJ-630/45，分裂间距为400 mm，地线选用双OPGW185。

表1 导、地线挂点位置

|     | 挂点距杆塔中心距离/m | 挂点距地面距离/m |
|-----|-------------|-----------|
| 挂点1 | -16.8       | 90.4      |
| 挂点2 | -18         | 69        |
| 挂点3 | -17         | 48        |
| 挂点4 | 16.8        | 90.4      |
| 挂点5 | 18          | 69        |
| 挂点6 | 17          | 48        |
| 挂点7 | -20.6       | 105.4     |
| 挂点8 | 20.6        | 105.4     |

应用PSCAD软件，按照每段300 km建立半波长输电线路的仿真模型，线路空载时，计算结果如表2所示。比较仿真结果和理论计算结果如图3所示。

表2 仿真结果和理论计算结果对比表

| 距线路首端/km | 仿真计算(pu) | 理论计算(pu) |
|----------|----------|----------|
| 0        | 1.0      | 1.0      |
| 300      | 1.0      | 1.0      |
| 600      | 0.8      | 0.8      |
| 900      | 0.6      | 0.6      |
| 1 200    | 0.3      | 0.3      |
| 1 500    | 0.0      | 0.0      |
| 1 800    | -0.3     | -0.3     |
| 2 100    | -0.6     | -0.6     |
| 2 400    | -0.8     | -0.8     |
| 2 700    | -0.9     | -0.9     |
| 3 000    | -1.0     | -1.0     |

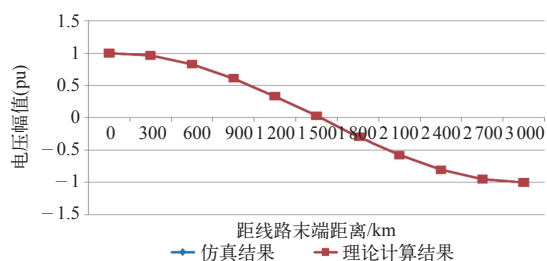


图3 仿真结果和理论计算结果对比曲线

由图3可见，仿真结果和理论计算结果吻合，因此，后续的仿真计算均建立在线路分10段建模的基础上得出。

半波长输电线路沿线电压随功率变化曲线如图4所示，图4中， $S$ 表示自然功率， $S = 4\,500\text{ MW}$ ，功率因数为1。

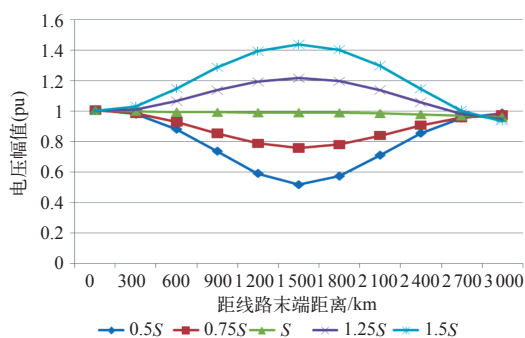


图4 半波长输电线路沿线电压与输送功率的关系

由图4可见,当线路输送4 500 MW功率时,线路沿线的电压值变化不大。当线路输送功率大于自然功率时,电压分布呈中间高、两端低的情况,电压最高点出现在距离首端1 500 km附近,输送功率越大,各点电压幅值越大。

当线路输送功率小于自然功率时,电压分布呈中间低、两端高的情况,电压最低点出现在距离首端1 500 km附近,输送功率越小,各点电压幅值越小。

当线路输送自然功率时,功率因数对线路沿线电压的影响曲线如图5所示。

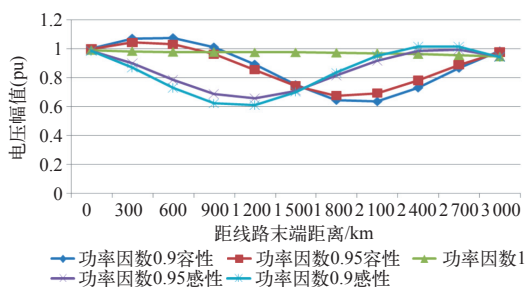


图5 半波长输电线路输送自然功率时沿线电压与输送功率因数的关系

由图5可见,当线路传输自然功率时,半波长交流输电线路沿线电压分布曲线近似三角函数的整周期曲线。当功率因数为容性时,沿线电压幅值呈先上升后下降的趋势;当功率因数为感性时,沿线电压呈现先下降后上升的趋势。电压变化幅度受功率因数的影响很大。功率因数与1差别越大,电压变化幅度越大。

当线路输送0.5倍的自然功率时,功率因数对线路沿线电压的影响曲线如图6所示。

当线路传输0.5倍自然功率时,半波输电线

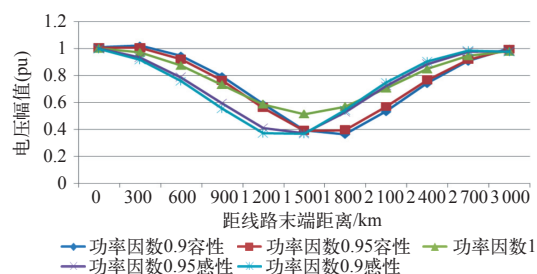


图6 半波长输电线路输送0.5倍自然功率时沿线电压与输送功率因数的关系

路沿线电压分布曲线近似三角函数半周期波谷曲线。当输送功率因数为容性时,线路电压的最低点靠近受端,当输送功率因数为感性时,线路电压的最低点靠近送端。

当线路输送1.5倍的自然功率时,功率因数对线路沿线电压的影响曲线如图7所示。

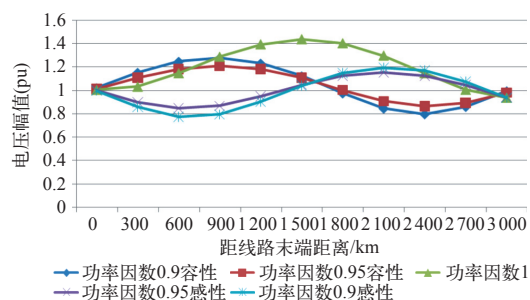


图7 半波长输电线路输送1.5倍自然功率时沿线电压与输送功率因数的关系

当线路输送1.5倍自然功率时,沿线电压值变化与传输自然功率时规律相同。

根据上面的计算分析,特高压半波长输电线路沿线的电压变化幅度很大,因此,有必要研究线路沿线的三相不平衡度。

## 2 半波长输电不平衡度分析

对于特高压输电,通过无功补偿,可以将功率因数调整至1附近。因此,功率因数不是不平衡度研究的主要因素。本文仅研究功率因数为1的情况下,输送功率对于线路不平衡度的影响。

当线路输送自然功率、1.25倍自然功率和1.5倍自然功率时,三相电压幅值曲线如图8所示。

由图8可见,当线路输送自然功率时,沿线电压的分布曲线沿首末节点电压连线近似为三角函

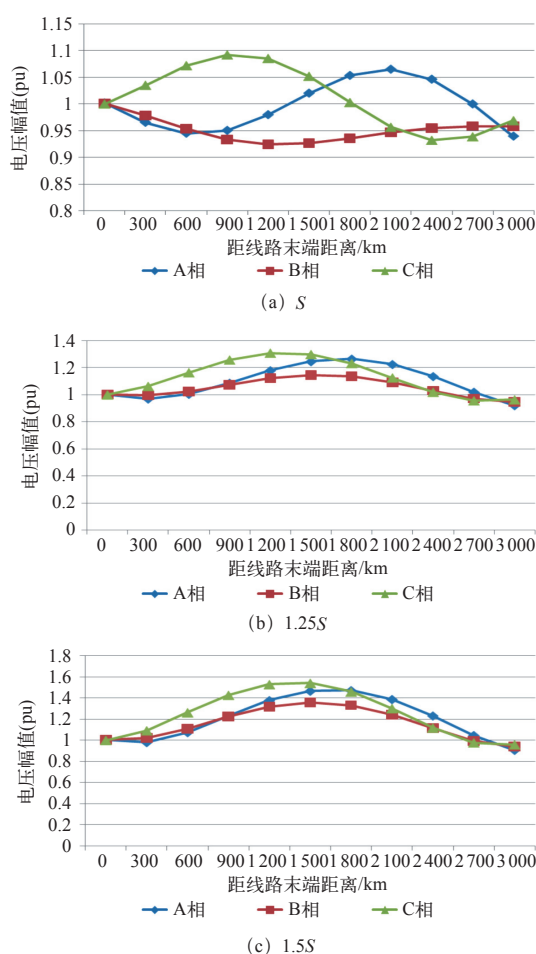


图8 半波长输电线路沿线三相电压与输送功率的关系

数的整周期曲线；当线路输送1.25倍和1.5倍功率时，电压分布呈中间高、两端低的情况，A相电压峰值出现在距线路首端1 800 km附近，B相电压峰值出现在距线路首端1 500 km附近，C相电压峰值出现在距线路首端1 200 km附近。三相电压峰值出现在不同的范围，线路不对称度大。

绘制3种情况下相角曲线，如图9所示。

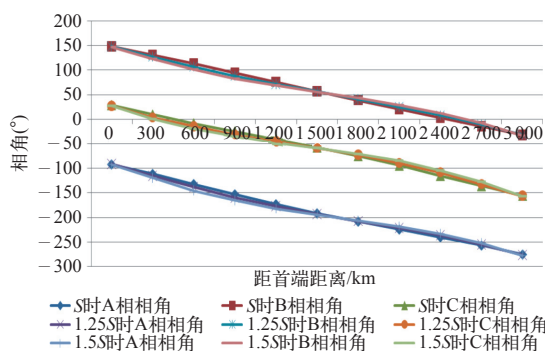


图9 半波长输电线路沿线三相电压相角与输送功率的关系

由图9可见，各相相角随线路长度的增加，沿直线方向变化，其大小受输送功率影响很小。

应用对称分量法，对相电压变换，变换公式为

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中， $a = e^{j120^\circ}$ ；下标1、下标2和下标0分别对应正序、负序和零序。

负序电压不平衡度计算公式为

$$\varepsilon_{u2} = |U_2 - U_1| \quad (7)$$

零序电压不平衡度计算公式为

$$\varepsilon_{u0} = |U_0 - U_1| \quad (8)$$

计算线路沿线的电气不平衡，绘制曲线图如图10所示。

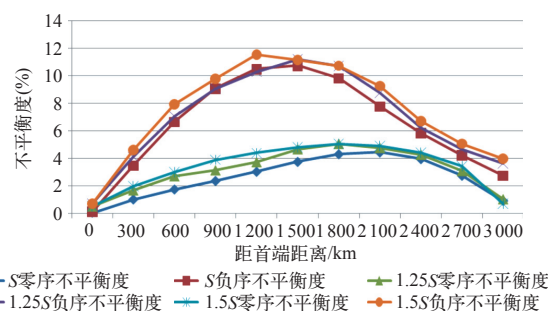


图10 半波长输电线路沿线三相电压不平衡度与输送功率的关系

由图10可见，3种工况的负序电气不平衡度均大于零序。对于负序，不平衡度分布呈中间高、两端低的情况，在距离线路首端1 500 km附近，不平衡度最高，超过10%，远大于规程的要求。

### 3 半波长输电换位方式研究

按照每100 km换位一次，全线配置30次换位的方式，计算线路沿线电压不平衡如图11所示。

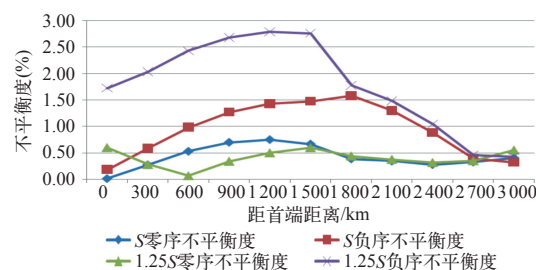


图11 换位后沿线三相电压不平衡度与输送功率的关系

由图11可见,当线路输送自然功率时,换位以后,全线负序、零序电压不平衡度均低于2%,满足规程要求。

当线路输送1.25倍自然功率时,换位以后,全线零序电压不平衡度均低于2%,但是负序电压不平衡度在距离首端300~1 800 km范围内超过2%,需要增加线路循环换位次数。

## 4 结束语

线路沿线电压受输送功率影响很大。当线路输送自然功率时,线路沿线的电压值变化不大。当线路输送功率大于自然功率时,电压分布呈中间高、两端低的情况,输送功率越小,各点电压幅值越小。当线路输送功率小于自然功率时,电压分布呈中间低、两端高的情况,输送功率越小,各点电压幅值越小。

线路沿线电压功率因数影响很大。当线路输送功率大于等于自然功率且功率因数为1时,半波长交流输电线路沿线电压分布曲线近似三角函数的整周期曲线。功率因数与1差别越大,电压变化幅度越大。当线路输送功率小于自然功率时,半波输电线路沿线电压分布曲线近似三角函数半周期波谷曲线。当输送功率因数为容性时,线路电压的最低点靠近受端,当输送功率因数为感性时,线路电压的最低点靠近送端。

当线路不换位时,线路三相不平衡度高。且负序不平衡度大于零序。不平衡度最大值出现在距线路首端1 500 km附近。研究100 km换位一次的运行方式,对于线路输送自然功率时,全线不平衡度满足规程要求。对于输送1.25倍自然功率情况,需增加循环换位次数。

## 参考文献

- [1] Wolf A A, Shcherbachev O V. On normal working conditions of compensated lines with half-wave characteristics [J]. Elektrichstvo, 1940 (1): 147-158.
- [2] Hubert F J, Gent M R. Half-wavelength power transmission lines [J]. IEEE Transactions 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 Transactions 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 (2): 69-76.
- [5] Iliceto F, Cinirei E. Analysis of half-wave-length transmission lines with simulation of corona losses [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3 (4): 2081-2091.
- [6] Tavares I M C, Portela C M. Half-wave length line energization case test—proposition of a real test [C]. 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, IEEE, 2008: 261-264.
- [7] 张志强, 秦晓辉, 王皓怀, 等. 特高压半波长交流输电线路稳态电压特性 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 33-36.
- [8] 周静姝, 马进, 徐昊, 等. 特高压半波长交流输电系统稳态及暂态运行特性 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 28-32.
- [9] 韩彬, 林集明, 班连庚, 等. 特高压半波长交流输电系统电磁暂态特性分析 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 22-26.
- [10] 宋云亭, 周霄, 李碧辉, 等. 特高压半波长交流输电系统经济性与可靠性评估 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 1-6.
- [11] 孙珂. 特高压半波长交流输电经济性分析 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 51-54.
- [12] 李军. 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, 26 (9): 31-35.
- [13] 王晔. 1 000 kV特高压输电线路不平衡度分析及换位方式的研究 [J]. 华北电力大学学报, 2010, 37 (5): 38-42.

(收稿日期: 2015-07-14) EA