

同塔双回不换位线路电压不平衡度研究

朱庆钢¹, 刘前进¹, 陈海涛¹, 罗龙波¹, 何德龙¹, 韦胜旋¹, 曾繁源¹, 花欢欢²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

2. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410004)

摘要: 在线路走廊特别紧张的地区, 部分线路可能没有条件采用完全换位, 而同塔多回输电线路中采用不换位架设将导致电力系统三相参数不对称。针对这个问题, 以某地区一条 750 kV 同塔双回线路为例, 对该线路不平衡度计算进行了理论推导, 并应用 PSCAD/EMTDC 软件从杆塔类型、相序排列方式、回间距离、线路长度几个方面对线路不平衡度进行了仿真分析。仿真结果表明, 输电线路较短时采用同塔同窗逆相序方式架设并适当调整回间距离, 能将电压不平衡度控制在一定范围内。输电线路过长时则需采取换位措施, 避免对系统造成不良影响。

关键词: 同塔双回; 不换位; 输电走廊; 不换位线路; 电压不平衡度; 相序排列

Study on voltage imbalance of un-transposed double-circuit lines on the same tower

ZHU Qing-gang¹, LIU Qian-jin¹, CHEN Hai-tao¹, LUO Long-bo¹, HE De-long¹, WEI Sheng-xuan¹,
ZENG Fan-yuan¹, HUA Huan-huan²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control (Changsha University of Science & Technology),
Changsha 410004, China)

Abstract: Transmission lines in some areas may have no condition to transposition completely, because of a shortage of line corridor. And un-transposed multi-circuit transmission lines will cause electrical three-phase parameters asymmetry. To solve this problem, this paper takes a 750 kV double circuit lines without transposition for an example, and the formulas of calculating the voltage imbalance on double-circuit lines are presented. Using PSCAD/EMTDC, the zero-sequence voltage unbalance and negative sequence voltage unbalance are calculated in different types of towers, different phase sequence arrangement, different distance between the two loops and different line length. According to the simulation results, when the transmission line is short, the voltage imbalance can be controlled within a certain range by adopting with the reverse phase sequence in the same tower window, which loops distance is adjusted properly. To avoid bad effect on the power system, transmission line must be transposed when the line is long.

Key words: double-circuit transmission lines; un-transposed; transmission corridors; un-transposed line; voltage imbalance; phase sequence arrangement

中图分类号: TM726.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0073-07

0 引言

为了解决输电走廊紧张问题, 同塔双回、多回高压输电线路应运而生。高压输电线路原则上应采用换位措施, 以减小电力系统正常运行时电流与电压的不对称性。但设计和运行经验表明, 高压线路完全换位会减弱线路的电气和机械强度, 增加建设和运行维护的费用^[1]。并且在某些线路走廊特别紧张的地区, 部分线路可能没有条件采用完全换位的架设方式。

由于线路不换位导致电气三相参数不对称所引起三相电压、电流不对称, 会增大电网输电元件的损耗, 并且在线路负荷较轻的情况下及系统黑启动的初始阶段, 过大的负序电流可能导致发电机负序保护动作, 从而引发发电机跳闸或阻止发电机并网运行, 甚至会造成大面积停电^[2-5]。目前, 对高压输电线路的电气参数不平衡问题研究比较常见。文献[6-8]通过参数解耦、分相建模等方法对多回线路不平衡度的计算进行了理论研究, 但不能针对不同

塔形情况进行分析且计算精度较低。文献[9-11]分析了单回不换位线路的不平衡度的影响因素，并且指出了输电线路不换位长度与相序变换等是影响其不平衡度的主要因素，但并未涉及到双回或多回线路。文献[12-13]分析了换位方式对同塔双回线路不平衡度的影响，研究表明逆相序反向换位时对应的线路不平衡度较小。但是对同塔双回不换位输电线路，尤其是对 750 kV 不同塔型、不同相序排列、不同回间距离以及不同线路长度情况下的同塔双回不换位线路研究更少。

本文对同塔双回不换位线路的电压不平衡度计算进行了理论推导，并以某地区一条 750 kV 同塔双回线路为例，应用 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真程序，采用目前比较常见的 750 kV 同塔双回常规型与同塔同窗紧凑型两种典型杆塔类型^[14-15]，对影响同塔双回线路电压不平衡度的杆塔塔型、相序排列方式、回间距离以及线路长度等主要因素进行仿真研究。最后结合实际情况对杆塔塔型的选择与线路的相序排列提出了相应的建议。

1 同塔双回不换位线路的不平衡度计算

同塔双回线路为强电磁耦合，回路之间的距离可以和回路内的相间距离相比较，并且从一回的任一相到另一回三相间的距离都不相等。设 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 、 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 为各相的感应电压， \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 、 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 为各相的注入电流， Z_{AA} 、 Z_{BB} 、 Z_{CC} 、 Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} 表示各相的自阻抗， Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{bc} 、 Z_{AB} 、 Z_{AC} 、 Z_{BC} 表示本回路的相间互阻抗， Z_{Aa} 、 Z_{Ba} 、 Z_{Ca} 、 Z_{Ab} 、 Z_{Bb} 、 Z_{Cb} 、 Z_{Ac} 、 Z_{Bc} 、 Z_{Cc} 表示两回路之间的互阻抗。则同塔双回线路自感、互感示意图如图 1 所示。

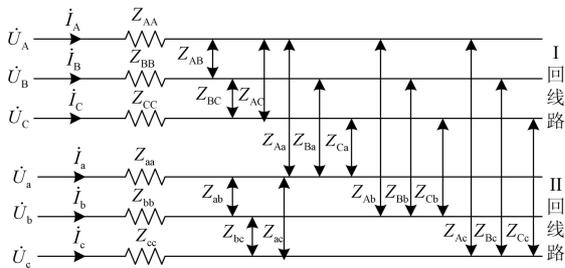


图 1 双回线路自感、互感示意图

Fig. 1 Self-inductance and mutual inductance schematic diagram of double-circuit transmission line

根据图 1 可以写出系统的电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \\ \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{BA} & Z_{CA} & Z_{aA} & Z_{bA} & Z_{cA} \\ Z_{AB} & Z_{BB} & Z_{CB} & Z_{aB} & Z_{bB} & Z_{cB} \\ Z_{AC} & Z_{BC} & Z_{CC} & Z_{aC} & Z_{bC} & Z_{cC} \\ Z_{Aa} & Z_{Ba} & Z_{Ca} & Z_{aa} & Z_{ba} & Z_{ca} \\ Z_{Ab} & Z_{Bb} & Z_{Cb} & Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{cb} \\ Z_{Ac} & Z_{Bc} & Z_{Cc} & Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \\ \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

记式 (1) 为 $\dot{U}_{abc} = \dot{Z} \dot{I}_{abc}$ ，并进行序分解，得到解耦后的序阻抗矩阵为 $\dot{U}_{120} = \mathbf{S} \dot{Z} \mathbf{S}^{-1} \dot{I}_{120} = \mathbf{Z}_{120} \dot{I}_{120}$ 。其中 \mathbf{S} 、 \mathbf{S}^{-1} 分别为对称分量的变换矩阵和反变换矩阵，设 I 回线路的各序电流、电压分别为 I_1^I 、 I_2^I 、 I_0^I 和 U_1^I 、 U_2^I 、 U_0^I ；II 回线路的各序电流、电压分别为 I_1^{II} 、 I_2^{II} 、 I_0^{II} 和 U_1^{II} 、 U_2^{II} 、 U_0^{II} 。则线路序参量方程为

$$\begin{bmatrix} U_1^I \\ U_2^I \\ U_0^I \\ U_1^{II} \\ U_2^{II} \\ U_0^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{II} & Z_{12}^{II} & Z_{10}^{II} & Z_{11}^{II-I} & Z_{12}^{II-I} & Z_{10}^{II-I} \\ Z_{21}^{II} & Z_{22}^{II} & Z_{20}^{II} & Z_{21}^{II-I} & Z_{22}^{II-I} & Z_{20}^{II-I} \\ Z_{01}^{II} & Z_{02}^{II} & Z_{00}^{II} & Z_{01}^{II-I} & Z_{02}^{II-I} & Z_{00}^{II-I} \\ Z_{11}^{II-I} & Z_{12}^{II-I} & Z_{10}^{II-I} & Z_{11}^{II-II} & Z_{12}^{II-II} & Z_{10}^{II-II} \\ Z_{21}^{II-I} & Z_{22}^{II-I} & Z_{20}^{II-I} & Z_{21}^{II-II} & Z_{22}^{II-II} & Z_{20}^{II-II} \\ Z_{01}^{II-I} & Z_{02}^{II-I} & Z_{00}^{II-I} & Z_{01}^{II-II} & Z_{02}^{II-II} & Z_{00}^{II-II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^I \\ I_2^I \\ I_0^I \\ I_1^{II} \\ I_2^{II} \\ I_0^{II} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中，阻抗矩阵 \mathbf{Z} 中 Z_{ij}^{p-q} 表示 p 回线路 i 序电流与 q 回线路的 j 序电压之间的耦合序阻抗，当 $p=q$ 时， Z_{ij}^{p-q} 为本回路内部 i 序电压与 j 序电流之间的耦合互阻抗；当 $p \neq q$ 时， Z_{ij}^{p-q} 为两回路之间的 i 序电流与 j 序电压之间的耦合互阻抗。

如果对双回线路施加正序电压 U_1^I 、 U_1^{II} ，假设线路的电源端参数对称，再由线路自身参数可得出流过双回线路各回电流，最后借助电力系统相-序变换原理可得到各回线路上各序电流分量，则两回路中各序电压分量可分别表示为

$$\begin{bmatrix} U_1^I \\ U_2^I \\ U_0^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{I-I} \\ Z_{21}^{I-I} \\ Z_{01}^{I-I} \end{bmatrix} I_1^I + \begin{bmatrix} Z_{11}^{II-I} \\ Z_{21}^{II-I} \\ Z_{01}^{II-I} \end{bmatrix} I_1^{II} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} U_1^{II} \\ U_2^{II} \\ U_0^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{II-II} \\ Z_{21}^{II-II} \\ Z_{01}^{II-II} \end{bmatrix} I_1^{II} + \begin{bmatrix} Z_{11}^{I-II} \\ Z_{21}^{I-II} \\ Z_{01}^{I-II} \end{bmatrix} I_1^I \quad (4)$$

定义双回线路各回的零序、负序电压不平衡度为

$$u_{im0}^I = \frac{U_0^I}{U_1^I} = \frac{Z_{01}^{I-I} I_1^I + Z_{01}^{II-I} I_1^{II}}{Z_{11}^{I-I} I_1^I + Z_{11}^{II-I} I_1^{II}} \quad (5)$$

$$u_{im2}^I = \frac{U_2^I}{U_1^I} = \frac{Z_{21}^{I-I} I_1^I + Z_{21}^{II-I} I_1^{II}}{Z_{11}^{I-I} I_1^I + Z_{11}^{II-I} I_1^{II}} \quad (6)$$

$$u_{im0}^{II} = \frac{U_0^{II}}{U_1^{II}} = \frac{Z_{01}^{I-II} I_1^I + Z_{01}^{II-II} I_1^{II}}{Z_{11}^{I-II} I_1^I + Z_{11}^{II-II} I_1^{II}} \quad (7)$$

$$u_{im2}^{II} = \frac{U_2^{II}}{U_1^{II}} = \frac{Z_{21}^{I-II} I_1^I + Z_{21}^{II-II} I_1^{II}}{Z_{11}^{I-II} I_1^I + Z_{11}^{II-II} I_1^{II}} \quad (8)$$

由上述公式可以看出, 同塔双回不换位线路 I、II 回的零序、负序电压不平衡度不相等并且与线路的自阻抗、相间的互阻抗、双回线路之间的互阻抗密切相关。由于同塔双回不换位线路没有进行换位, 空间上并不对称, 线路阻抗矩阵中的各对角线元素和非对角元素都不相等。因此易知影响同塔双回线路参数不平衡度的因素主要有: 导线的自身属性、杆塔类型、回间距离、相序排列等。

2 EMTDC 仿真建模

2.1 系统模型

设首端电源电压为 $\dot{E}_S = 787 \angle 0^\circ$, 电源的正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗相等为 $Z_{S1} = Z_{S2} = Z_{S0} = j5 \Omega$; 末端电源电压为 $\dot{E}_M = 750 \angle -5^\circ$, 电源正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗相等为 $Z_{M1} = Z_{M2} = Z_{M0} = j5 \Omega$ 。系统接线见图 2。



图 2 双回线路仿真计算简化模型接线图

Fig. 2 Simplified connection diagram for simulative calculation of double circuit transmission system

2.2 线路模型

取典型线路参数如下: 线路全长 50 km 且不换位。导线型号为 6*LGJ-400/35, 分裂间距为 400 mm, 导线弧垂取 10 m, 两根地线全线采用 JLB40-120 型号, 大地电阻率取 $300 \Omega \cdot m$ 。线路采用贝瑞隆模型 (the Bergeron model), 杆塔参数及布置如图 3 所示, 工程用导、地线型号和参数如表 1 所示。

表 1 导、地线参数

Table 1 Parameters of conductor and lightning shield conductor

导地线	型号	分裂间距/ mm	直流电阻/ (Ω/km)	外径/mm
导线	LGJ-400/35	400	0.073 89	26.82
地线	JLB40-120	-	0.360 6	14.25

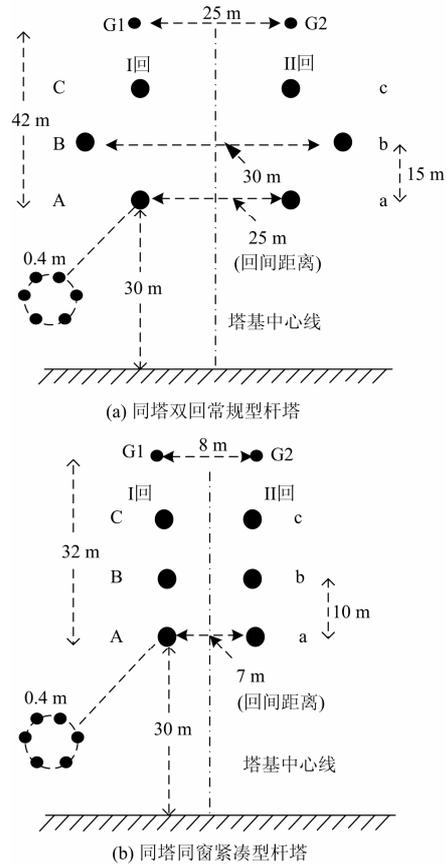


图 3 双回输电线路塔型布置图

Fig. 3 Block diagram of the tower for the double circuit transmission line

由于双回路导线相序排列方式组合形式多变, 使得不换位线路电气参数不对称性更加明显。如果以 I 回线路为参考, 双回线路相序排列方式可以分为六种, 如表 2 所示。

表 2 双回线路相序排列方式

Table 2 Phase sequences of double circuit transmission line

相序排列方式	同相序	逆相序	异相序 1	异相序 2	异相序 3	异相序 4
I 回线路	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
II 回线路	abc	cba	acb	bac	bca	cab

工程经验表明, 同塔双回不换位线路, 由于导线之间存在着复杂的电磁、静电耦合分量关系, 在不同相序排列情况下线路不平衡度相差较大。

3 仿真结果及其分析

3.1 相序排列对同塔双回线路电压不平衡度的影响

采用不同的相序排列方式, 以同塔双回常规型塔和同塔同窗双回紧凑型塔两种塔形 (以下简称常规型塔、紧凑型塔), 对 750 kV 双回不换位线路进

行仿真，其电压不平衡度如表 3 所示。

表 3 不同相序排列下的电压不平衡度

Table 3 Voltage imbalance of different phase sequence arrangement

杆塔类型		常规型		紧凑型	
相序排列	线路回数	首末端零序/%	首末端负序/%	首末端零序/%	首末端负序/%
同相序	I 回	0.12/0.15	0.10/0.17	0.13/0.17	0.12/0.22
	II 回	0.12/0.15	0.10/0.17	0.13/0.17	0.12/0.22
逆相序	I 回	0.04/0.05	0.17/0.21	0.05/0.08	0.06/0.11
	II 回	0.04/0.05	0.17/0.21	0.05/0.08	0.06/0.11
异相序 1	I 回	0.07/0.07	0.27/0.42	0.06/0.06	0.16/0.28
	II 回	0.07/0.07	0.27/0.42	0.06/0.06	0.16/0.28
异相序 2	I 回	0.08/0.11	0.30/0.42	0.08/0.12	0.16/0.29
	II 回	0.08/0.11	0.30/0.42	0.08/0.12	0.16/0.29
异相序 3	I 回	0.04/0.05	0.14/0.22	0.05/0.06	0.006/0.02
	II 回	0.04/0.05	0.14/0.22	0.05/0.06	0.6/0.02
异相序 4	I 回	0.04/0.05	0.14/0.22	0.05/0.07	0.006/0.02
	II 回	0.04/0.05	0.14/0.22	0.05/0.07	0.006/0.02

考虑 I、II 回线路的零序、负序电压不平衡度最严重的情况，常规型塔与紧凑型塔在不同相序排列情况下的电压不平衡度如图 4 所示。

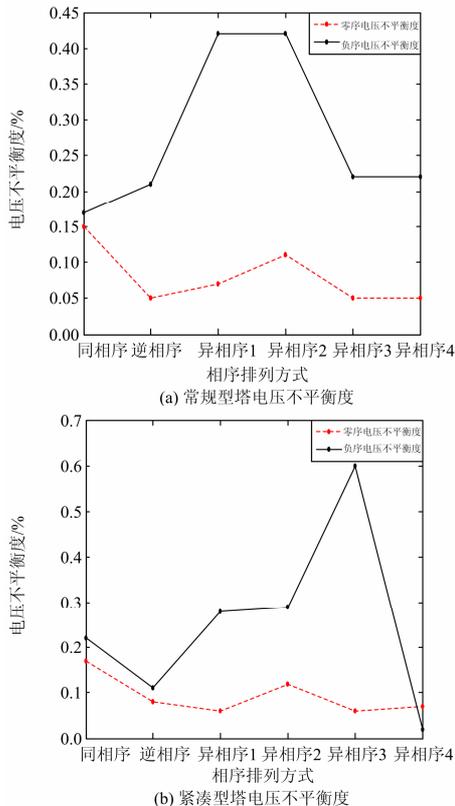


图 4 不同相序排列下的电压不平衡度
Fig. 4 Voltage imbalance of different phase sequence arrangement

由表 3 和图 4 可以看出：

1) 线路首端与末端电压不平衡度不同但相差不大，多数相序排列方式下的 I、II 两回线路电压不平衡度相等，而在紧凑型异相序 3 排列时，II 回线首端负序电压不平衡度为 0.6%，I 回线路末端负序不平衡度为 0.006%，两回线路相差最大，约为 0.594%。

2) 不同相序排列情况下，常规型塔的零序电压不平衡度相差较小，而负序电压不平衡度相差最大，其中负序电压不平衡度由小到大排序为：同相序 < 逆相序 < 异相序 3 = 异相序 4 < 异相序 1 = 异相序 2。综合考虑零序与负序电压不平衡度，常规型塔为同相序最优，逆相序次之。

3) 不同相序排列情况下，紧凑型塔的零序电压不平衡度在不同相序排列的情况下相差较小；而负序电压不平衡度相差较大，其由小到大排序为：逆相序 ≈ 异相序 4 < 同相序 < 异相序 1 < 异相序 2 < 异相序 3。综合考虑零序与负序电压不平衡度，紧凑型塔为逆相序最优，同相序次之。

4) 由图 4 同样可以看出，相序排列对输电线路电压不平衡度影响较大，并且还可以通过对电压不平衡度进行评估来选择合理的相序排列方式，进而可以有效减少输电线路不平衡运行状态。

3.2 回间距离对同塔双回线路电压不平衡度的影响

采用同相序、逆相序，常规型塔和紧凑型塔回间距离分别由 22~28 m、4~10 m 间隔 1 m 均匀变化，考虑 I、II 回线路零序与负序电压不平衡度最严重的情况，仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知：

1) 常规型塔回间距离由 22 m 变化至 28 m 时，同相序负序、零序电压不平衡度变化幅度都非常小，二者均减小 0.01%。而在逆相序排列情况下，零序电压不平衡度均随着回间距离的增大而不发生任何改变，但是回间距离在 22~28 m 均匀变化时，负序电压不平衡度由 0.19% 增加至 0.28%，增加了 0.09%，变化幅度较小。

2) 紧凑型塔回间距离由 4 m 变化至 10 m 时，同相序负序、零序电压不平衡度变化幅度都非常小，二者均减小了 0.01%。逆相序排列情况下，回间距离在 4~10 m 均匀变化时对应的零序电压不平衡度变化幅度较小，减小了 0.01%；而负序电压不平衡度由 0.27% 降至 0.04%，减小了 0.23%。因此对于紧凑型杆塔在逆相序排列时，确保零序电压不平衡度在允许范围内前提下，适当增大回间距离能有效减小负序电压不平衡度。

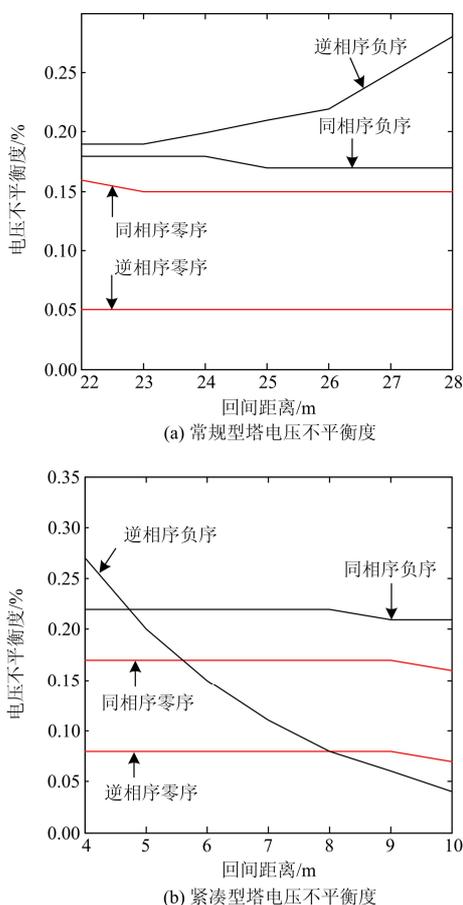


图 5 不同回间距离下的电压不平衡度

Fig. 5 Voltage imbalance of different loops distance

3.3 线路长度对同塔双回线路电压不平衡度的影响

采用常规型塔和紧凑型塔, 分别在同相序排列、逆相序排列的情况下, 线路长度在 20~100 km 每隔 10 km 均匀变化, 考虑 I、II 回零序与负序电压不平衡度最严重的情况, 仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出:

1) 线路长度变化对零序电压不平衡度影响较大。当线路长度由 20 km 变化至 100 km 时, 逆相序排列方式下常规型与紧凑型的零序电压不平衡度基本不变, 而同相序排列方式下的常规型与紧凑型零序电压不平衡度分别由 0.11%、0.12% 增加至 0.14%、0.16%, 分别增加了 0.03%、0.04%。

2) 当线路长度由 20 km 变化至 100 km 时, 紧凑型塔的负序电压不平衡度基本不变, 而常规型塔的负序电压不平衡度迅速增大。线路长度较短时, 紧凑型塔在逆相序排列的情况下负序电压不平衡度为 0.11%, 同样能看出线路走廊紧张的地区可以考虑不换位, 如 750 kV 的金昌-酒泉段只有 27.7 km 的走廊拥挤地段, 可以考虑采用同塔同窗紧凑型逆

相序排列不换位线路并选择合适的并补度限制潜供电流^[14]。当线路长度在 20~100 km 均匀变化时, 同相序常规型、同相序紧凑型、逆相序常规型的负序电压不平衡度分别由 0.11%、0.12%、0.11% 增加至 0.22%、0.28%、0.26%, 增幅分别为 0.11%、0.16%、0.15%。因此当线路长度较长时, 应该考虑对输电线路进行换位措施以限制负序电压不平衡度在允许范围之内。

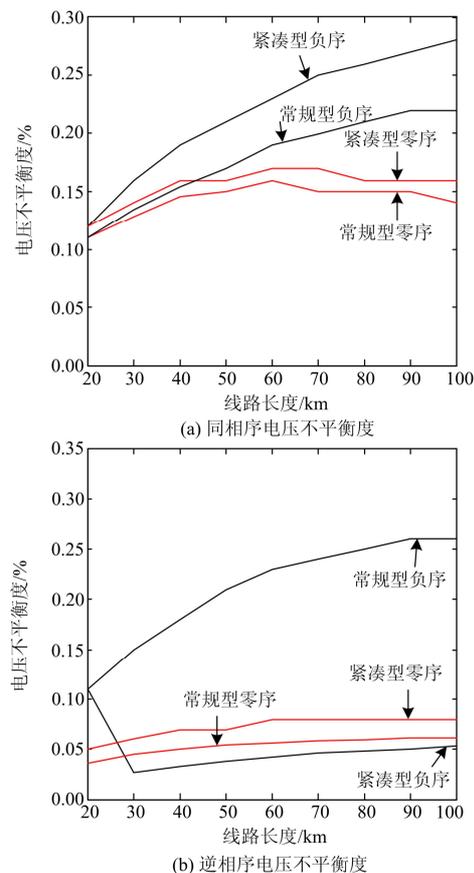


图 6 不同线路长度的电压不平衡度

Fig. 6 Voltage imbalance of different line length

4 结论

本文建立了同塔双回不换位输电线路电压不平衡度计算模型, 并且在此基础上以某地区 750 kV 同塔双回线路为例, 通过运用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对杆塔类型、相序排列方式、回间距离、线路长度对电压不平衡度的影响进行研究分析, 进而得出如下结论:

1) 综合考虑线路的零序与负序电压不平衡度, 常规塔型在同相序排列情况下最优, 逆相序次之; 而紧凑型塔则为逆相序排列情况下最优, 同相序次之; 因此在实际工程设计中, 可优先考虑同相序或逆相序排列方式。

2) 同相序排列时, 无论是常规型塔还是紧凑型塔, 调节线路回间距离对线路的电压不平衡度影响都较小。而线路在逆相序排列时, 在一定合适范围内调节回间距离能有效地减小电压不平衡度, 如同塔同窗紧凑型塔在逆相序排列的情况下, 适当增加回间距离可在保证零序电压不平衡度在一定范围的情况下, 大幅度减小负序电压不平衡度。

3) 线路长度对线路的零序电压不平衡度影响较大, 而当线路较短时对应的线路负序电压不平衡度亦较小, 但随着线路长度的增大而迅速增大。因此, 在输送距离较短并且输电走廊比较拥挤的地段, 可以考虑采用同塔同窗逆相序不换位线路以缓解线路走廊紧张问题。当输电线路较长时负序电压不平衡度较大, 此时需对输电线路进行换位, 以免较大的电压不平衡度对系统造成不良影响。

参考文献

- [1] 胡丹晖, 蔡汉生, 涂彩琪, 等. 500 kV 同杆并架双回线路电气特性研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 21-23.
HU Dan-hui, CAI Han-sheng, TU Cai-qi, et al. Study on the electrical characteristic of 500 kV common-tower double-transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 21-23.
- [2] 张五一, 张言滨, 刘华伟. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27.
ZHANG Wu-yi, ZHANG Yan-bin, LIU Hua-wei. Circuit loss analysis of three-phase unbalanced circuit in distribution network[J]. Relay, 2007, 35(7): 24-27.
- [3] 周冠波, 李晓华, 蔡泽祥, 等. 同塔多回线路不平衡问题分析与对策[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 58-62.
ZHOU Guan-bo, LI Xiao-hua, CAI Ze-xiang, et al. Analysis and countermeasures for the unbalance problem of multi-parallel line on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 58-62.
- [4] 李召兄, 文俊, 徐超, 等. 特高压同塔双回输电线路的潜供电流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 148-154.
LI Zhao-xiong, WEN Jun, XU Chao, et al. Secondary arc current of UHV double-circuit transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 148-154.
- [5] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 202-208.
LI Bin, LI Xue-bin, DING Mao-sheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 202-208.
- [6] 李博通, 李永丽, 陈莉, 等. 同塔四回线参数解耦及故障分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 1-9.
LI Bo-tong, LI Yong-li, CHEN Li, et al. Method for parameter decoupling and fault analysis of four-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 1-9.
- [7] 靳希, 吴文辉, 吴世敏. 基于戴维南等值的输电线路不平衡度分析新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 1-11.
JIN Xi, WU Wen-hui, WU Shi-min. New methods of analysis of the unbalanced degree of the transmission line based on Thevenin equivalent[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 1-11.
- [8] 李永坚, 黄绍平, 许志伟, 等. 不换位高压线路分相建模研究及其不平衡性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 75-80.
LI Yong-jian, HUANG Shao-ping, XU Zhi-wei, et al. Research of individual phase modeling of un-transposed high voltage transmission lines and analysis of its unbalanced operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 75-80.
- [9] 蓝磊, 艾绍贵, 黄永宁, 等. 宁夏北部 220 kV 电网不平衡电流的计算与分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 488-494.
LAN Lei, AI Shao-gui, HUANG Yong-ning, et al. Calculation and analysis of unbalanced currents in Ningxia Northern 220 kV power grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 488-494.
- [10] 陶凯, 刘明波. 输电线路不换位引起的不对称问题及其改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 39-43.
TAO Kai, LIU Ming-bo. Asymmetric issues caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 39-43.

- [11] 厉天威, 阮江军, 吴田. 并行计算高压输电线路周围电场[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 1-6.
LI Tian-wei, RUAN Jiang-jun, WU Tian. Parallel computation of electric field intensity nearby high voltage transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 1-6.
- [12] 邹林, 林福昌, 龙兆芝, 等. 输电线路不平衡度影响因素分析[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 283-286.
ZOU Lin, LIN Fu-chang, LONG Zhao-zhi, et al. Influence factors analysis of unbalance parameter for overhead lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 283-286.
- [13] 林军, 曾焕岩. 同杆双回线换位方式的比较[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 11-16.
LIN Jun, ZENG Huan-yan. Transposing manner comparison for doubles on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 11-16.
- [14] 王晓彤, 班连庚, 林集明, 等. 金昌—酒泉 750 kV 同塔双回紧凑型线路换位方式分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 102-107.
WANG Xiao-tong, BAN Lian-geng, LIN Ji-ming, et al. Comparative analysis on transposing modes for 750 kV compact double-circuit overhead transmission lines on same tower from Jinchang to Jiuquan[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 102-107.
- [15] 龚有军, 朱普轩, 曾嵘. 750 kV 同塔同窗同相序紧凑型输电技术的可行性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 50-54.
GONG You-jun, ZHU Pu-xuan, ZENG Rong. Feasibility study of two compact 750 kV circuits with same phase sequence in the same tower window[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 50-54.

收稿日期: 2013-06-14; 修回日期: 2013-08-14

作者简介:

朱庆钢(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: zhuqinggang001@163.com

刘前进(1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制;

陈海涛(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。