

输电线路不换位引起的不对称问题及其改进方法

陶凯, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 当前短距离(通常输电距离在100 km以内)同杆并架输电线路面临的最大问题是由于不换位引起的三相参数不对称问题, 进而导致三相电流不对称。以某实际220 kV环网系统作为算例, 采用三相潮流计算和电磁暂态计算进行了三相不平衡现象模拟, 验证了三相电流注入潮流计算方法在不平衡分析中的有效性。对不换位输电环网三相不平衡现象进行分析, 提出采用逆相序反向换位方法可以改善三相参数不对称问题。

关键词: 同杆双回线路; 不换位; 三相潮流; 电磁暂态; 逆相序反向换位

Asymmetric issues caused by un-transposed transmission lines and its solution

TAO Kai, LIU Ming-bo

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The major obstacle nowadays in short-distanced (generally refers to distance less than 100 km) transmission line with two circuits on the same tower is the asymmetry of 3-phase current caused by the untransposition of transmission line. This paper simulates the 3-phase asymmetrical phenomenon in a 220 kV ring transmission system, using electromagnetic transient status and 3-phase power flow calculation method based on current injection, to demonstrate the validity of the 3-phase current injection method. The result indicates that the asymmetrical phenomenon can be improved by the inverse transposition of each circuit with inverse order of the phase arrangement.

Key words: double-circuit on the same tower; untransposition; 3-phase power flow; electromagnetic transient; inverse transposition with inverse phase arrangement

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0039-05

0 引言

电力系统的负荷随着区域经济的发展呈现出趋于集中的特点。一些经济发达地区负荷密集, 供电走廊日趋紧张, 并广泛采用同杆并架技术, 同时也出现了在某一特定区域内220 kV及以上变电站林立的现象, 短距离输电线路不换位会导致系统三相线路参数不对称, 进而引发正常运行时三相电流和电压不对称的现象。三相电量的不对称往往会影响系统的继电保护装置及其他设备的正常运转, 因此必须尽量减少系统的三相不平衡现象。

对于三相潮流计算, 文献[1-2]提出了基于电流注入模型的潮流计算方法。文献[3]在电流注入模型和牛顿法的基础上提出了用三相潮流分析系统三相不平衡的方法, 其具体做法是将一个 n 节点的网络扩展为一个 $3n$ 节点的网络, 意即每个节点的A, B,

C三相均做为潮流计算中的“独立”节点处理, 该方法可以充分考虑各相, 各线之间互感和电容的作用, 同时适用于多种负荷模型(恒电流模型, 恒阻抗模型, 恒功率模型等)的情况, 该方法也是本文计算时所采用的方法。实际输电走廊在地形上的多样性特点决定了线路杆塔的多样性, 因此计算过程中对“电流注入点”要进行特别的考虑, 为了更真实地还原实际输电网络, 本文对两个变电站间的线路根据架设方式的不同采取了多段分节的办法。文献[4]在电流注入模型的基础上提出了多平衡节点条件下潮流计算的方法, 该方法同样适用于三相潮流计算中由一个(或多个)物理上的平衡节点衍生出三个(或多个)实际平衡节点的现象。

文献[5]指出通过调整可控串联补偿器(Thyristor-Controlled Series Compensator, TCSC)可以从结构上改变节点间的电气距离并直接影响节

点导纳矩阵内相关元素的值，因此是调整线路结构最直接的方法。但其因为涉及到整个系统的安全裕度等关键指标，解决不对称问题通常优先考虑采用使线路完全换位或在变电站出线处调整相序的方法来实现。前者适用于长距离输电的情况，后者的改善效果受运行方式和电网架设环境等因素的影响较大。文献[6]对于变电站出线长度小于 100 km 且总长小于 200 km 的环网架设线路没有明确的规定。为此，本文首先通过三相潮流计算方法将不对称现象还原，进而尝试对输电网络进行换位及串联补偿操作使其恢复平衡。通过对实际环网算例的分析，为工程设计提供一定的参考。

1 某 220 kV 环网计算条件

根据当前运行方式，罗洞—文华—平胜—雷岗—丹桂—罗洞为合环运行，其中罗洞为 500 kV 变电站，在系统等值中将其做为无穷大电源且为平衡节点，其余均为 220 kV 变电站，整个环网中同杆并架线路占 70%左右，环网长度约 70 km。网络接线如图 1 所示。

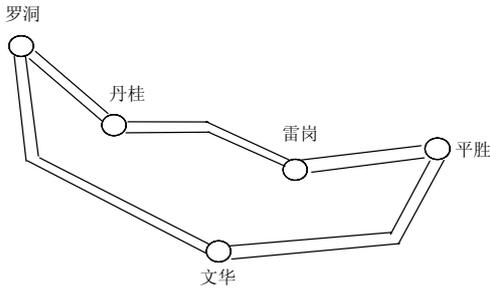


图 1 某实际 220 kV 电网线路图

Fig.1 Sketch map of a real 220 kV transmission line

全网绝大部分采用 2xLGJQ-300 或同级别导线，文华变电站罗文甲乙线前 5 km 左右为地下电缆架构。所有线路均为不完全换位或不换位。各变电站负荷在计算中采用恒功率模型，且认为三相负荷相等，负荷分布情况如表 1 所示，其中负号表示发出功率。

表 1 各变电站负荷数据

Tab.1 Data of load in the substations

	罗洞	丹桂	雷岗	平胜	文华
有功/MW	平衡节点	297	218.4	148.38	196.08
无功/MVar	平衡节点	27.18	42.3	3.18	-30.96

线路杆塔采用典型设计，取塔基型号为 SnJ2-24，其几何结构如图 2 所示。

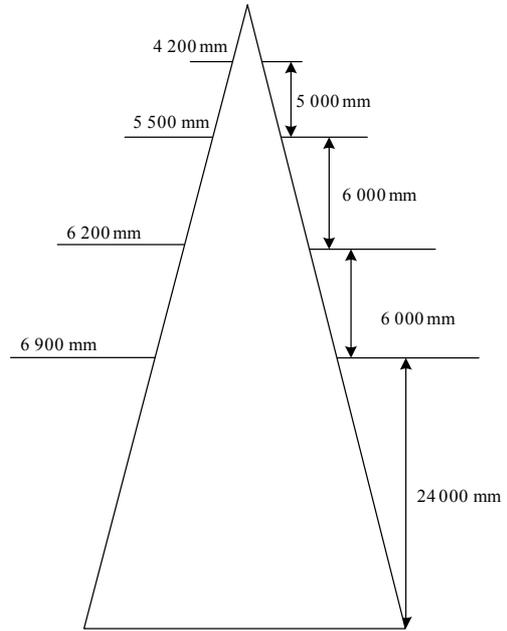


图 2 典型杆塔几何尺寸

Fig.2 Typical tower structure

2 220 kV 环网三相潮流计算方法

本文的计算思路是假定送端电源，功率及负载均对称，以线路架设方式发生变化（相序排列变化，同杆变单回架设等）的位置和变电站所在位置为分段点，对电网进行分段处理。变电站做为实体分段点，在计算中即为实际电流注入点，注入电流的大小可由该变电站的有功和无功计算得到。线路中的分段点在计算中形式上是注入电流点，实际注入电流为 0，迭代时同样赋予电压初值，参与整个潮流计算的所有迭代过程。

根据文献[3]，对每个节点 abc 三相分实虚部并分别采用节点注入电流法，以节点 k 的 a 相为例，以注入电流形式表示的潮流方程如下：

$$\begin{cases} \Delta I_{rk}^a = \frac{(P_k^{sp})^a V_{rk}^a + (Q_k^{sp})^a V_{mk}^a}{(V_{rk}^a)^2 + (V_{mk}^a)^2} - \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{at} V_{ri}^t - B_{ki}^{at} V_{mi}^t) = 0 \\ \Delta I_{mk}^a = \frac{(P_k^{sp})^a V_{mk}^a - (Q_k^{sp})^a V_{rk}^a}{(V_{rk}^a)^2 + (V_{mk}^a)^2} - \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{at} V_{mi}^t + B_{ki}^{at} V_{ri}^t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中： $p_k^{sp} = p_{gk}^a - p_{lk}^a$ ，下标 g 代表该节点发出的有功，下标 l 代表该节点的有功负荷； V_{mk}^a, V_{rk}^a 分别为 k 节点 a 相的电压虚部和实部； G_{ki}^{at} 表示 k 节点的 a 相和 i 节点的 t 相之间的电导；公式中其他符号的含义类推。

以文献[5]为基础，双回线路共有 6 根导线，将

每段线路的节点导纳矩阵扩展至 6×6 矩阵。分段线路示意图如图 3 所示。

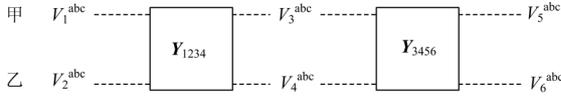


图 3 双回线路分段示意图

Fig.3 Dividing diagram of double-circuit line

$$Y_{1234} = \begin{bmatrix} z_{13}^{aa} & z_{13}^{ab} & z_{13}^{ac} & z_{14}^{aa} & z_{14}^{ab} & z_{14}^{ac} \\ z_{13}^{ba} & z_{13}^{bb} & z_{13}^{bc} & z_{14}^{ba} & z_{14}^{bb} & z_{14}^{bc} \\ z_{13}^{ca} & z_{13}^{cb} & z_{13}^{cc} & z_{14}^{ca} & z_{14}^{cb} & z_{14}^{cc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{23}^{ca} & z_{23}^{cb} & z_{23}^{cc} & z_{24}^{ca} & z_{24}^{cb} & z_{24}^{cc} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

由式(2)知, Y_{1234} 为 6×6 矩阵, 对角线上元素为对应甲乙线 abc 三相的相阻抗, 非对角线元素为互感抗 jZ_m , 如 z_{13}^{ab} 表示甲线 ab 相间的互感抗, z_{14}^{ba} 表示甲线 b 相和乙线 a 相间的互感抗。每增加一段双回线路就相当于同时增加了 6 个节点, 此时式(2)需修改为:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{1234} & -Y_{1234} & 0 \\ -Y_{1234} & Y_{1234} + Y_{3456} & -Y_{3456} \\ 0 & -Y_{3456} & Y_{3456} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果是在两个已有节点之间增加线路, 则在两个节点的自导纳位置增加一个 Y_{ij} 值, 在两点间的互导纳位置增加 $-Y_{ij}$ 。

因为多条线路相互耦合, 输电线路相阻抗的计算显得异常复杂。文献[7]指出采用 Carson 公式计算导线的自阻抗和互阻抗可以克服导线排列无规律、地线影响以及不换位的影响。对于任意导线, 其自阻抗 Z_{ii} 可以表示为:

$$Z_{ii} = R_i + R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{r_{si}} \Omega/\text{km} \quad (4)$$

其中: R_i 为导线单位长度电阻; R_g 为大地等值回路电阻, 在系统频率 $f=50$ Hz 下一般取 $0.05 \Omega/\text{km}$; D_g 为地中虚拟导线的等值深度, 一般取 $D_g = 1000$ m; r_{si} 为导线 i 的等值半径; 两条任意导线间的互阻抗可以表示为:

$$Z_{ij} = R_g + j0.145 \lg \frac{D_g}{D_{ij}} \Omega/\text{km} \quad (5)$$

其中, D_{ij} 为两导线间的距离。

3 220 kV 环网不平衡现象模拟

表 2 列出了采用电流注入法和 EMTP 程序仿真

得到的典型线路电流值。其中采用三相电流注入法计算时罗洞站作为平衡节点按甲乙线分别编号为 1 和 2, 平衡节点的 P 、 Q 未知, 电压实虚部给定。因此该系统可以看作是有 6 个平衡节点(参考节点)的系统。其余各节点均以相同的三相相电压为迭代初值(平直启动), 计算迭代的次数在 5 次以内, 收敛精度为 10^{-4} 。在输电线路不换位或不完全换位的情况下, 线路三相电流的不平衡情况是非常明显的。其中不平衡度 = (最大电流 - 最小电流) / 最小电流。

表 2 三条典型线路的电流

Tab.2 Currents of three typical circuits

电流(有效值)/A	实测值	不平衡度/%	三相潮流计算值	不平衡度/%	EMTP 仿真值	不平衡度/%
丹雷甲线 A 相	241	11.6	209.6	21.8	232.6	12.3
丹雷甲线 B 相	268	-	255.4	-	258.4	-
丹雷甲线 C 相	269	-	232.5	-	230	-
罗文甲线 A 相	566	6.6	505.6	11.2	660	18.7
罗文甲线 B 相	544	-	455	-	556	-
罗文甲线 C 相	531	-	483.6	-	586	-
文平甲线 A 相	244	18.4	266.1	22.6	340	10.9
文平甲线 B 相	220	-	216.9	-	324.9	-
文平甲线 C 相	206	-	236	-	306.6	-

由表 2 数据可知, 三相潮流计算值基本上反应了该环网中的三相电流不平衡特性, 不平衡度的大小分布特性与实测一致。EMTP 仿真中为了突出短距离线路不换位对整个系统的影响而采用了以 PI 模型为基础的 LCC 元件, 而电网中其他元件则做了一定的简化处理, 因此部分线路的电流值与实际相差较大且 Δ 的分布特性受到了影响。从三相潮流计算值和 EMTP 仿真值可以看出短距离不换位输电网中的不平衡现象非常明显。由图 2 所示杆塔结构上不难发现, 各回线路各相间的距离均处于同一水平, 每一相线路同时受到另外 5 相线路的磁场影响, 不同回路间的相互影响不能忽略。

4 环网线路换位研究

相关文献表明^[8-12]，逆相序反向换位为同杆双回线路的最佳换位方式。换位如图 4 所示。

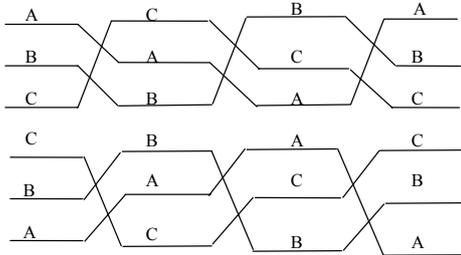


图 4 某实际 220 kV 环网线路换位图

Fig.4 Transposition diagram of a real 220 kV transmission lines

在本例中，同杆并架部分为：罗丹线出线处 1.869 km 及最后 11.525 km；丹雷线全线 8.515 km；雷平线平胜侧 2.341 km；文平线全线 5.167 km；罗文线中部 22.386 km。因此本文将罗文线中部罗洞侧 5.167 km 和罗丹线同杆部分算为同一相序，罗文线剩余部分作为同一相序，其余作为同一相序，这样基本保证每一种相序的距离相等。调整相序后的各线路电流数据如表 3 所示。

表 3 换位后三条典型线路的电流

Tab.3 Currents of three typical circuits after transposition

电流(有效值)/A	换位后三相潮流计算结果	不平衡度/%	换位后 EMTP 仿真结果	不平衡度/%
丹雷甲线 A 相	226.8	4.49	259.6	1.1
丹雷甲线 B 相	236.6	-	258.1	-
丹雷甲线 C 相	237.0	-	256.7	-
罗文甲线 A 相	486.4	2.48	650.8	5.05
罗文甲线 B 相	474.6	-	637	-
罗文甲线 C 相	485.5	-	619.5	-
文平甲线 A 相	244.7	4.88	340.2	3.96
文平甲线 B 相	233.3	-	349.1	-
文平甲线 C 相	241.6	-	335.8	-

从计算得到的数据来看，该换位方式对电网不平衡现象的改善是比较明显的，每条线路的不平衡

度都有明显的下降。从方案实施的角度来看，除了罗文线中部 22.386 km 需要进行一次换位处理外，其余同杆部分均为与变电站连接的出线或者进线段，因此调整相序的部分操作可以在变电站出口处完成，同时在每段同杆并架线路的末尾也进行相应的调整即可。若将罗文甲乙线全线同杆部分相序保持一致，则计算结果如表 4。

表 4 不完全换位后三条典型线路的电流

Tab.4 Currents of three typical circuits after un-completely transposition

电流(有效值)/A	EMTP 仿真结果	不平衡度/%
丹雷甲线 A 相	253	4.27
丹雷甲线 B 相	264.3	-
丹雷甲线 C 相	260.7	-
罗文甲线 A 相	649.5	5.38
罗文甲线 B 相	636.9	-
罗文甲线 C 相	616.3	-
文平甲线 A 相	344.1	9.26
文平甲线 B 相	356.6	-
文平甲线 C 相	326.37	-

由表 4 数据可看到 Δ 的值介于全换位与未换位之间，其原因在于不均分的距离导致了同杆结构对各回路各相线的干扰强度不同，从而加大了电流的不平衡度。

5 结论

(1) 某实际 220 kV 环网作为一个典型的短距离不换位环网，其线路架设距离短，结构复杂，通过三相电流注入法潮流计算以及对线路的合理分段可以很好地模拟其不平衡现象。

(2) 三相潮流法在实际工程计算中有良好的收敛性，在精度为 10^{-4} 条件下迭代的次数在 5 次以内，计算速度较快。

(3) 对于短距离不换位电网的不平衡问题，采用逆相序反向换位对线路相序进行调整。考虑到实际工程中的换位困难，线路相序的修改位置一般选在变电站的出线点或者是杆塔架设方式发生变化的位置，换位应尽量使每一种相序所占的距离相等。

参考文献

[1] da Costa Vander Menengoy, Martins Nelson, Pereira José Luiz R. Developments in the Newton Raphson power flow formulation based on current injections[J].IEEE Trans on Power Systems, 1999, 4 (14): 1320-1326.
 [2] 牛辉, 郭志忠. 电流注入模型的电力系统潮流计算[J].

- 电网技术, 1998, 22 (11): 39-41.
- NIU Hui, GUO Zhi-zhong. Power flow algorithm based on current influx model[J]. Power System Technology, 1998, 22 (11): 39-41.
- [3] Garcia P A N, Pereira Jose Luiz R. Three-phase power flow calculations using the current injection method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (2): 508-514.
- [4] 杭乃善, 姚元玺, 窦婷婷, 等. 基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究[J]. 继电器, 2005, 33 (4): 9-11.
- HANG Nai-shan, YAO Yuan-xi, DOU Ting-ting, et al. An algorithm of multi-balance bus based on rectangular coordinate current influx[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33 (4): 9-11.
- [5] 丁洪发, 段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 24-28.
- DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong. Unbalance issue caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Technology, 2004, 28 (19): 24-28.
- [6] DL/T-5092 110-500 kV架空送电线路设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- DL/T-5092 the design regulations for 110-500 kV overhead line[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [7] 刘振波. 输电线路工频参数理论计算软件的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- LIU Zhen-bo. Manufacture of a software used in the academic calculation of the parameter of the transmission line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [8] 陈国庆, 张志劲, 孙才新, 等. 500 kV同塔双回路导线排列方式对电气特性的影响. 重庆大学学报, 2003, 26 (6): 60-62.
- CHEN Guo-qing, ZHANG Zhi-jin, SUN Cai-xin, et al. Influence of arrangement manner of lead to the electric characteristic for 500 kV double circuit transmission line[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26 (6): 60-62.
- [9] 张要强, 张天光, 王予平, 等. 1000 kV同塔双回输电线路电气不平衡度及换位问题研究[J]. 电网技术, 2009, 33 (1): 8-13.
- ZHANG Yao-qiang, ZHANG Tian-guang, WANG Yu-ping, et al. Research on electric unbalance degree and conductor transposition of 1000 kV double-circuit transmission line on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33 (1): 8-13.
- [10] 胡丹晖, 蔡汉生, 涂彩琪, 等. 500 kV同杆并架双回路线路电气特性研究[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.
- [11] 戴雨剑. 基于EMTP的高压输电线路换位研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (增刊): 133-135.
- DAI Yu-jian. Discussion on transposition of the overhead transmission line based on EMTP[J]. Power System Technology, 2006, 30 (S): 133-135.
- [12] 邹林, 林福昌, 龙兆芝. 输电线路不平衡度影响因素分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (增刊): 283-286.
- ZOU Lin, LIN Fu-chang, LONG Zhao-zhi. Influence factors analysis of unbalance parameter for overhead lines[J]. Power System Technology, 2008, 32 (S): 283-286.

收稿日期: 2009-09-06; 修回日期: 2009-11-11

作者简介:

陶凯(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: taokai2000@tom.com

刘明波(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。

(上接第 38 页 continued from page 38)

- [8] 罗小春, 李华强, 程超, 等. 基于非线性灵敏度与曲线拟合法的负荷裕度快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (15): 50-55.
- LUO Xiao-chun, LI Hua-qiang, CHENG Chao, et al. Fast algorithm based on non-linear sensitivity method combining generalized curved fitting method for loading margin[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (15): 50-55.
- [9] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于预防支路型失稳故障的灵敏度方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (12): 69-73.
- ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A sensitivity method for prevention of branch type insecure contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (12): 69-73.
- [10] Yorino N, Li H Q, Harada S. A method of voltage stability evaluation for branch and generator outage contingencies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (1): 252-259.

收稿日期: 2009-09-21; 修回日期: 2009-12-24

作者简介:

赵周芳(1983-), 女, 硕士, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: zhaozhoufang@163.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 长期从事电压稳定及优化问题研究;

叶晓峻(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电压稳定评估。