

同塔双回输电线路电流不平衡机理分析

唐明¹ 张纯¹ 丁理杰¹ 张华¹ 李旻² 滕予非¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司电力调度控制中心 四川 成都 610041)

摘要: 针对日益增多的同塔双回输电线路在不换位条件下出现的电流不平衡问题进行了机理研究和建模仿真。给出了同塔双回输电线路各导体之间的电感矩阵,列出了各相导体之间的电磁方程,并采用 MATLAB 数值计算方法对该电磁方程进行求解。采用 PSCAD/EMTDC 对同塔双回输电线路进行仿真建模,仿真结果与理论计算均表明,逆序排列能够有效降低线路参数的不平衡度。

关键词: 同塔双回; 电感矩阵; 逆序排列; PSCAD

Abstract: Unbalanced phase current appears in double-circuit transmission lines on the same tower without transposition, so mechanism research and modeling simulation are carried out to study this phenomenon. Inductor model of each conductor is established to obtain the inductance matrix of the electromagnetic equation. Numerical calculation by MATLAB is done to solve the electromagnetic equation and PSCAD model of double-circuit transmission lines on the same tower is established for simulation. Simulation result and theoretical calculation show that the inverse arrangement of transmission lines can obviously decrease the unbalance degree.

Key words: double circuit lines on the same tower; inductance matrix; inverse arrangement; PSCAD

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)05-0029-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.007

0 引言

随着中国社会经济的快速发展,电力负荷不断增长,电力系统需要将大容量的电力输送到负荷中心,迫切需提高电网的输送能力。然而,电网规模的扩大需要增加电力传输线的数量,大容量、高电压线路需要占用更多的输电走廊,并且经过人口居住区和森林地区时还需花费大量人力物力进行人口搬迁、砍伐森林等,建设成本高昂。而同塔双回(甚至多回)线路能够充分利用有限的走廊资源,节约土地资源,同时还具有建设周期短、输送能力强、节省投资等优点,有很高的应用性价比,这些优点使得同塔双回线路输电方案得以广泛应用于电网之中,并成为目前 220 kV 以上主干网架的重要选择。

但是,输电线路采用同塔多回架设之后,其各条线路之间的位置不对称以及各条线路对地的位置不对称将会使得输电线路的电气参数呈现出较为明显的不对称性^[1-2],从而造成线路运行时产生显著的不平衡电流和不平衡电压^[3-5]。当输电线路的不平

衡度较大时,会对电力系统中发电机、电动机、并联电抗器和继电保护装置等设备的运行性能造成恶劣的影响^[6-7]。

在电力系统中,通常采用轮换位的方法来降低单回输电线路中的不平衡度。所谓轮换位即变换输电线路三相导线的空间位置排列顺序^[8],以达到降低线路参数不平衡度的目的^[9-12]。根据国家电网规定“在中性点直接接地的电力网中,长度超过 100 km 的输电线路均应换位,换位循环长度不宜大于 200 km。但其总长度超过 200 km,可采用换位或变换各回输电线路相序排列的措施来平衡不对称电流。对于中性点非直接接地的电力网,为降低长期运行中中性点的电位,可采用换位或者变换输电线路相序排列的方法来平衡不对称电容电流”。

但对于同塔架设的多回高压输电线路,因为线路数量太多,实现完全对称的轮换位将耗费大量资金,而且换位的地点极有可能是电网发生故障的薄弱环节。输电线路的参数不对称,使各回各相之间的互感不相等,不换位或不完全换位,会产生相当大的不平衡电压和不平衡电流。这将直接导致系统

内存在零序和负序分量,尤其是负序分量将对系统内的发电机和变压器带来很大影响,使发电机和变

表1 同塔双回输电线路杆塔各挂线点之间的距离

挂线点	I回A相 /mm	I回B相 /mm	I回C相 /mm	II回A相 /mm	II回B相 /mm	II回C相 /mm
I回A相	0	13 748.1	26 012.3	18 600	25 133.4	32 440.1
I回B相	13 748.1	0	12 628.9	25 133.4	23 800	25 303.2
I回C相	26 012.3	12 628.9	0	26 012.3	25 303.2	20 200
II回A相	18 600	25 133.4	26 012.3	0	13 748.1	26 012.3
II回B相	25 133.4	23 800	25 303.2	13 748.1	0	12 628.9
II回C相	32 440.1	25 303.2	20 200	26 012.3	12 628.9	0

表2 同塔双回输电线路杆塔各挂线点之间的电感

挂线点	I回A相 /(mH·km ⁻¹)	I回B相 /(mH·km ⁻¹)	I回C相 /(mH·km ⁻¹)	II回A相 /(mH·km ⁻¹)	II回B相 /(mH·km ⁻¹)	II回C相 /(mH·km ⁻¹)
I回A相	1.235	0.479	0.353	0.419	0.361	0.311
I回B相	0.479	1.235	0.496	0.361	0.372	0.359
I回C相	0.353	0.496	1.235	0.312	0.359	0.403
II回A相	0.419	0.361	0.312	1.235	0.479	0.353
II回B相	0.361	0.372	0.359	0.479	1.235	0.496
II回C相	0.311	0.359	0.403	0.353	0.496	1.235

压器严重发热和振动,使用寿命减少,引起附加铁耗和附加铜耗,变压器漏磁增加和局部过热、电网线损增大;产生的负序磁场还会令电气设备输出功率和效率降低,并导致电机发热增大。过大的负序和零序分量还将对系统中原来已整定的继电保护整定值带来影响,可能造成保护设备的误动作,给继电保护装置的调试和配置带来更大挑战。

因此,如何从输电线路长度、杆塔相间距离和导线相序布置等影响因素中,寻求解决同塔多回线路不平衡问题的解决方案并对其进行相关综合研究,使其各项指标均能保持在相关规定的范围之内,确保同塔多回输电线路安全、经济、可靠运行,对同塔多回输电技术的推广和应用具有现实意义。

1 月锦线同塔双回输电线路的电感模型

特高压锦屏换流站通过500kV同塔双回输电线路与月城站相连,由于距离较近,全程未采用轮转换位。运行中,频现月锦I、II线三相最大不平衡电流超过120A报警阈值,引起测控系统频繁切换。月锦线所用杆塔及其尺寸如图1所示。

由电磁感应的相关原理可知,两根平行导线之间的互感是其距离的函数。对于月锦线所用杆塔,可以由其几何尺寸求出6根导体之间的互感矩阵,即

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{D_{ij}} - 1 \right) \quad (1)$$

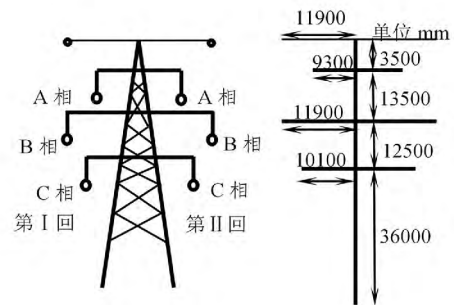


图1 月锦线同塔双回示意图

式中 D_{ij} 为杆塔上面第 i 个挂线点和第 j 个挂线点之间的几何距离。

图2给了月锦线同塔双回输电线路中,6个挂线点之间的所有距离组合。

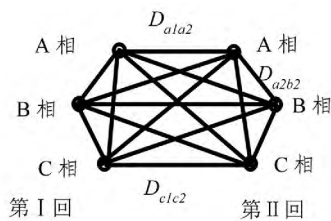


图2 所有挂线点之间的几何距离

各导体之间的几何距离及其互感的计算结果如表1、表2所示。

在得到杆塔导体的互感矩阵之后,可以进一步列写其电磁方程,如式(2)所示。

为了方便单独讨论线路参数的不平衡度,将负载侧的三相阻抗认为是对称平衡的,即有: $Z_{La} = Z_{Lb} = Z_{Lc}$

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{b1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{c1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{a2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{c2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} \psi_{a1} \\ \psi_{b1} \\ \psi_{c1} \\ \psi_{a2} \\ \psi_{b2} \\ \psi_{c2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{La} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{Lb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{Lc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{La} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{Lb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{Lc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中各导体所匝链的总磁链为

$$\begin{pmatrix} \psi_{a1} \\ \psi_{b1} \\ \psi_{c1} \\ \psi_{a2} \\ \psi_{b2} \\ \psi_{c2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{a1a1} & L_{b1a1} & L_{c1a1} & L_{a2a1} & L_{b2a1} & L_{c2a1} \\ L_{a1b1} & L_{b1b1} & L_{c1b1} & L_{a2b1} & L_{b2b1} & L_{c2b1} \\ L_{a1c1} & L_{b1c1} & L_{c1c1} & L_{a2c1} & L_{b2c1} & L_{c2c1} \\ L_{a1a2} & L_{b1a2} & L_{c1a2} & L_{a2a2} & L_{b2a2} & L_{c2a2} \\ L_{a1b2} & L_{b1b2} & L_{c1b2} & L_{a2b2} & L_{b2b2} & L_{c2b2} \\ L_{a1c2} & L_{b1c2} & L_{c1c2} & L_{a2c2} & L_{b2c2} & L_{c2c2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$= Z_L$ 。线路参数中,一般同塔双回线路采用相同型号的输电线路,每公里电阻一样,总长度也一致,因此可以认为两回输电线路的总电阻是一样的,即: $R_{a1} = R_{b1} = R_{c1} = R_{a2} = R_{b2} = R_{c2} = R$ 。磁链的求导公式为

$$d\psi(t) = d[L(t) \cdot I(t)] = L(t) \frac{dI(t)}{dt} + I(t) \frac{dL(t)}{dt} \quad (4)$$

对于已经架设好的同塔双回输电线路,可以认为互感矩阵中各元素是非时变的,即 $dL/dt = 0$ 。可

得电磁方程的最终表达式为

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = (R + Z_L) \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{a1a1} & L_{b1a1} & L_{c1a1} & L_{a2a1} & L_{b2a1} & L_{c2a1} \\ L_{a1b1} & L_{b1b1} & L_{c1b1} & L_{a2b1} & L_{b2b1} & L_{c2b1} \\ L_{a1c1} & L_{b1c1} & L_{c1c1} & L_{a2c1} & L_{b2c1} & L_{c2c1} \\ L_{a1a2} & L_{b1a2} & L_{c1a2} & L_{a2a2} & L_{b2a2} & L_{c2a2} \\ L_{a1b2} & L_{b1b2} & L_{c1b2} & L_{a2b2} & L_{b2b2} & L_{c2b2} \\ L_{a1c2} & L_{b1c2} & L_{c1c2} & L_{a2c2} & L_{b2c2} & L_{c2c2} \end{pmatrix} \cdot d \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)为包含各相电流一阶导数的一阶微分方程组,同塔双回输电线路的电阻 R 和负载阻抗 Z_L 均可以获得,如果电感矩阵中的各元素可以计算出来,则该一阶微分方程组可以使用 MATLAB 等数值计算软件进行求解。

2 几种典型挂线方式下的 PSCAD 建模计算

PSCAD/EMTDC 采用时域分析求解完整的电力系统及微分方程(包括电磁和机电两个系统),结果非常精确,是电力系统最常用最有效的计算软件之一。使用 PSCAD 软件所建立的同塔双回输电线路模型如图 3 所示。

同塔双回输电线路的排列组合方式有很多种,对其归类为 3 种排列方式:顺序、逆序、乱序,并分别对这 3 种排列进行仿真计算和对比研究。

2.1 顺序排列

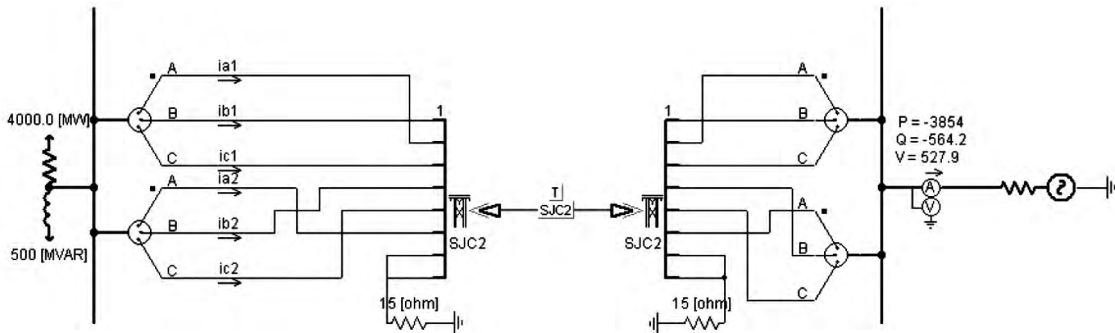


图 3 同塔双回输电线路的 PSCAD 模型

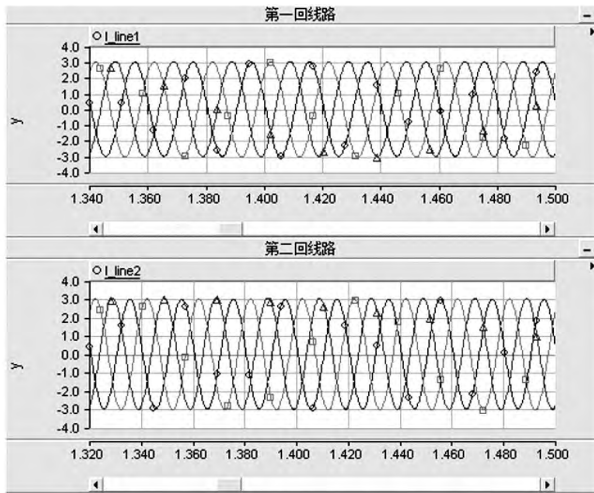


图4 ABC-ABC模式下PSCAD仿真结果

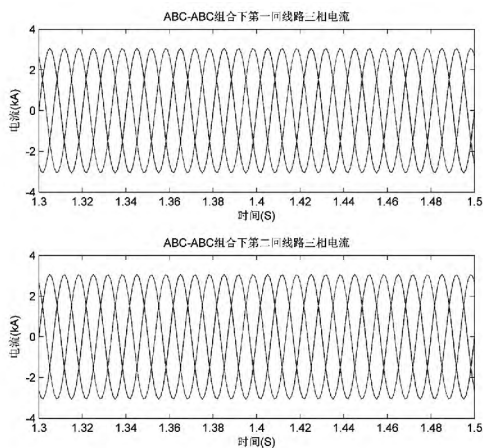


图5 ABC-ABC模式下MATLAB计算结果

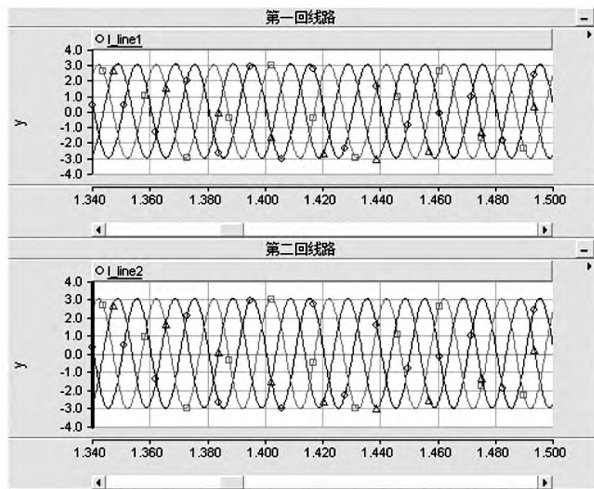


图6 ABC-CBA模式下PSCAD仿真结果

表3 顺序模式的各相电流

顺序	IA1 /A	IB1 /A	IC1 /A	IA2 /A	IB2 /A	IC2 /A
PSCAD	2 124	2 124	2 150	2 124	2 124	2 151
MATLAB	2 165	2 166	2 165	2 165	2 166	2 165

2.2 逆序排列

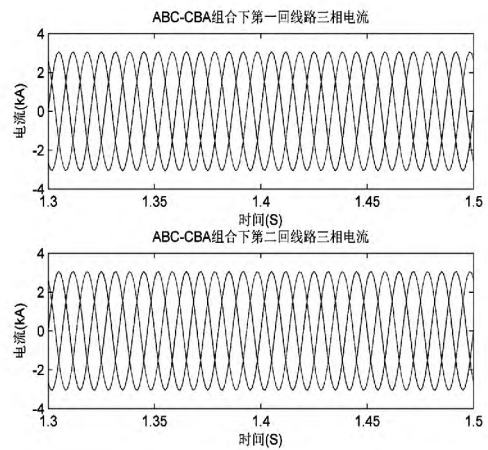


图7 ABC-CBA模式下MATLAB计算结果

表4 逆序模式的各相电流

顺序	IA1 /A	IB1 /A	IC1 /A	IA2 /A	IB2 /A	IC2 /A
PSCAD	2 138	2 123	2 144	2 125	2 132	2 144
MATLAB	2 170	2 166	2 162	2 162	2 166	2 170

2.3 乱序排列

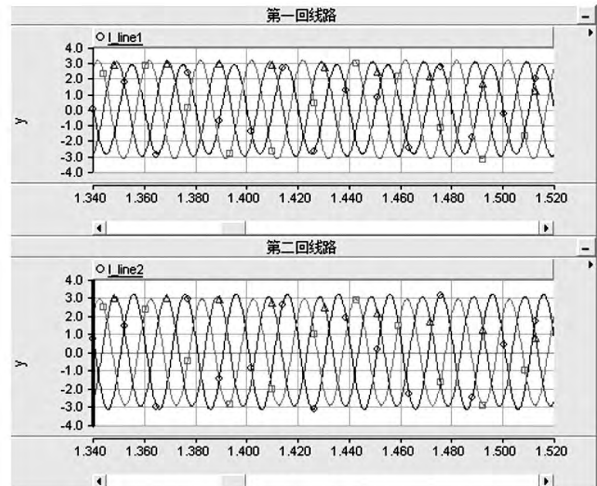


图8 ABC-BAC模式下PSCAD仿真结果

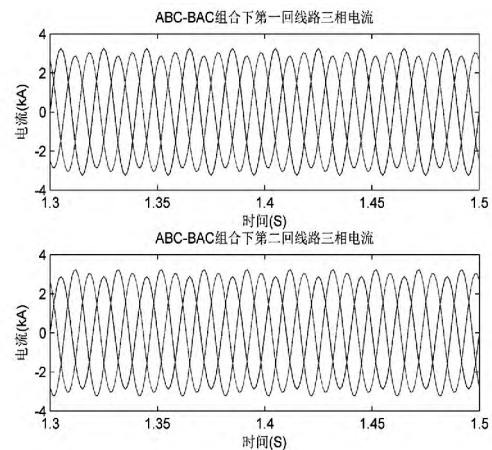


图9 ABC-BAC模式下MATLAB计算结果

(下转第80页)

路电流问题最根本的措施是分散区域电源接入,将五彩湾区域自备电厂转由 750 kV 将军庙变电站接带,合理分配接入 750 kV 变电站的 220 kV 电源。

参考文献

[1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.

[2] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144.

[3] 陆建忠, 张啸虎. 加强电网规划, 优化电网结构, 限制短路电流[J]. 华东电力, 2005, 33(5): 292-295.

[4] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制

措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.

[5] 潘思安, 何善谨. 上海 220 kV 电网短路电流控制研究[J]. 华东电力, 2005, 33(5): 30-33.

[6] 祁万春, 奚巍民, 张谦, 等. 应用 500 kV 高阻抗主变压器提高 220 kV 片区供电能力[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 96-98.

[7] 周吉安, 靳丹, 王维洲, 等. 大电源接入方式对短路电流的影响分析[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 48-51.

作者简介:

关洪浩(1986), 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网分析与规划。

(收稿日期: 2015-07-14)

(上接第 32 页)

表 5 乱序模式的各相电流

顺序	IA1 /A	IB1 /A	IC1 /A	IA2 /A	IB2 /A	IC2 /A
PSCAD	2 245	2 145	2 034	2 063	2 125	2 159
MATLAB	2 297	2 165	2 035	2 035	2 165	2 296

由上述 3 种典型排列可以看出, 逆序排列情况下的电流不平衡度最小, 这与理论推导及 MATLAB 数值计算的结论均保持一致。

3 结 论

同塔双回甚至多回输电线路是节省线路走廊的重要方式之一, 在线路长度较短而未进行轮换位的情况下, 多根导体之间通过电磁场耦合所造成的线路参数不平衡严重影响了继电保护及二次测控系统。

通过对同塔双回输电线路的深入研究, 建立了导体的电感模型, 得到其电感矩阵并进一步求解了电磁方程, 从理论上给出了电流不平衡的形成机理, 并最终提出了逆序排列是降低参数不平衡的最优选择, MATLAB 数值求解以及 PSCAD 电磁暂态仿真结果都证明了该方案的正确性, 为今后短距离不换位同塔双回输电线路最优相序排列提供了强有力的理论支撑。

参考文献

[1] 张嘉旻, 葛荣良. 同塔多回输电技术特点及其应用分析[J]. 华北电力, 2005, 33(7): 23-26.

[2] 肖立群, 顾顺炎, 张克宝. 同塔多回输电线路塔形结构研究[J]. 上海电力, 2009(2): 91-95.

[3] 刘建华. 六相输电线路的不平衡度评估[J]. 长沙电力学院学报, 2003, 18(3): 45-48.

[4] 戴雨剑. 基于 EMTF 的高压输电线路换位研究[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 133-135.

[5] 汲亚飞, 邹军. 同塔多回线路垂直排列最优相序布置方式[J]. 2008, 34(1): 172-175.

[6] 张海. 同杆双回线路故障稳态分析及其单端量选相的研究[D]. 保定: 华北电力大学博士学位论文, 2013.

[7] 孙秋芹, 王冠, 李庆民, 等. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 737-742.

[8] 刘桂峰, 高戟, 郎需军, 等. 对高压架空送电线路一种优化换位方式的探讨[J]. 山东电力, 2001(5): 6-8.

[9] 韦刚, 张子阳, 房正良. 多回输电线路并架的不平衡性分析[J]. 高电压技术, 2004(10): 9-11.

[10] 韦刚, 黄金生. 同塔并架多回线路序参数及不平衡度计算[J]. 电网技术, 1998, 22(10): 811.

[11] Gross, E. T. B., and Hesse M. H. Electromagnetic Unbalance of Untransposed Transmission Lines [J]. IEEE Power Apparatus and Systems, 1995, 72(2): 1323-1336.

[12] Hesse M. H. Circulating Currents in Parallel Untransposed Multi Circuit Transmission Line: II—Methods for Estimating Current Unbalanced [J]. IEEE Trans. on PAS, 1996, 85(3): 812-820.

作者简介:

唐 明(1986), 博士, 工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2015-07-08)