

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.015

# 同杆并架平行双回线不平衡电流产生机理的研究

杨金东<sup>1</sup>, 陶 晔<sup>1</sup>, 李周龙<sup>1</sup>, 吴思奇<sup>2</sup>, 郭鹏程<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司临沧供电局, 云南 临沧 677000;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 同杆并架平行双回线路并列运行存在三相不平衡电流, 而解列运行时不存在。通过直接去耦法分析了三相不平衡电流的产生机理。利用直接去耦法分别建立了双回线路解列运行和并列运行时的正序等值电路和零序等值电路。分析发现双回线并列运行时, 两回线的正序电流和零序电流分别相互并联, 但由于线路三相参数不对称, 正序电流分布系数与零序电流分布系数不同, 导致双回线间出现环流, 进而使得双回线三相电流不平衡。以云南临沧电网 110kV 新云 I II 回线为例, 建立了仿真模型, 利用 ATP-EMTP 进行了双回线并列运行和解列运行的仿真, 结果表明分析结论正确。

**关键词:** 同杆并架平行双回线路; 三相不平衡电流; 环流; 并列运行; 解列运行

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0368-05

## Research on the generation mechanism of unbalanced current in parallel operation of double-circuit lines

YANG Jindong<sup>1</sup>, TAO Ye<sup>1</sup>, LI Zhoulong<sup>1</sup>, WU Siqi<sup>2</sup>, GUO Pengcheng<sup>2</sup>

(1. Lincang Power Supply Bureau, Lincang 677000, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Parallel operation of parallel double circuit lines on the same tower has three-phase unbalanced currents, but does not exist in disconnection operation. The generation mechanism for the three-phase unbalanced current is analyzed by a direct decoupling method. The direct decoupling method is used to establish the positive sequence equivalent circuit and zero sequence equivalent circuit for double circuit line when it is in disconnection and parallel operation. It is found that the positive sequence current and zero sequence current of the double lines are paralleling in parallel operation. However, the positive sequence current distribution coefficient and the zero sequence current distribution coefficient are different due to the unbalance three-phase parameters, leading to the circulation between the double lines and making the three phase current of the unbalanced double line. Taking the 110kV Xinyun I - II double line of the Yunnan Lincang power grid as an example, the simulation model is set up. The simulation of the parallel and disconnection operation of the double line is carried out by ATP-EMTP. Results show that the conclusion is correct.

**Key words:** double-circuit transmission lines on same tower; three phase unbalanced current; circulating current; parallel operation; disconnection operation

同杆并架双回线输电方式具有安装走廊较窄的优点, 能适应复杂地形, 因此在我国得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。然而, 这种布置方式由于各导线之间的距离

较短, 易引起线间互感, 从而诱导不平衡电流, 引发稳定性问题<sup>[3-4]</sup>。而且, 对于一些距离相对较短的高压输电线路, 导线之间不经过换位, 双回线之间的三

收稿日期: 2018-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479166)

作者简介: 杨金东, 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统分析性、配电网运行控制、设备状态评估和无功电压治理等。

E-mail: 1440771598@qq.com

相参数不对称会引起负荷电流的不对称<sup>[5]</sup>。而潜供电流的大小在不对称三相线路参数的作用下对受故障类型更加敏感,极易引起线路重合失败<sup>[6]</sup>。由此可见,不平衡电流受导线排列方式的影响较大,近年来有关学者对此开展了部分研究<sup>[7-13]</sup>。

一般而言,双回线不平衡电流可以分为两种,第一是穿越性不平衡电流,第二是环流不平衡电流。按照文献[10]的研究,环流不平衡电流受输电线路距离的影响比较大,而导线排列方式的影响则更加复杂。文献[11-12]的研究结果表明,零序环流对电力二次系统有严重不利影响,并给出了对应的解决方案。

三相电流不对称性最直接的影响为降低电力系统运行的可靠性。这种不对称性会增大线路的损耗,同时放大负序和零序电流,进而对保护装置、发电机和变压器等造成不利影响,严重时会造成线路零序保护误动<sup>[2,13-16]</sup>。因此,深入研究以及分析同杆并架双回线诱发的电流不平衡产生机理,可为不平衡电流的减小或消除奠定基础。

本文利用直接去耦法分别建立了双回线路解列运行和并列运行时的正序等值电路和零序等值电路。分析了双回线并列运行时的正序等值电流和零序等值电路中电流分布系数之间的关系。分析得到,由于正序电流分布系数与零序电流分布系数不同,导致双回线间出现环流,进而使得双回线三相电流不平衡。以云南临沧电网 110kV 新云 I II 回线为例,建立了仿真模型,利用 ATP-EMTP 进行了并列运行和解列运行的仿真,结果表明分析结论正确。

## 1 同杆并架平行双回线路模型

不换位输电线路必然存在不平衡电流,并且线路保护和通信等方面受零序不平衡电流影响较为明显,因此不可忽视<sup>[2]</sup>。文献[17]结果表明,输电线路越短,环流不平衡性越大。

对双回线而言,其运行方式可以分为两种:一是解列运行,二是并列运行。图 1 为两种运行方式的示意图。图 1 中 DL 断开与闭合分别表示解列运行和并列运行。

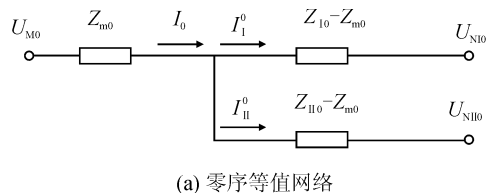


图 1 双回线示意图

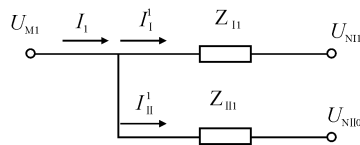
Fig. 1 Double line schematic diagram

## 2 解列运行分析

见图 2,本文利用“直接去耦法”建立双回线解列运行条件下的零序和正序等值电路。图中  $Z_{10}$  和  $Z_{110}$  分别表示两回线的零序阻抗;而  $Z_{11}$  和  $Z_{111}$  表示两回线的正序阻抗; $Z_{m0}$  为两回线间的零序互感。



(a) 零序等值网络



(b) 正序等值网络

图 2 双回线解列运行等值网络  
Fig. 2 Equivalent network of double line in disconnection operation

以图 2(a)为基础,按照式(1)可分别求出回线 I 和回线 II 的零序电流  $I_1^0$  和  $I_{II}^0$ 。

$$\begin{cases} I_1^0 = \frac{U_{M0} - I_0 Z_{m0} - U_{N10}}{Z_{10} - Z_{m0}} \\ I_{II}^0 = \frac{U_{M0} - I_0 Z_{m0} - U_{N110}}{Z_{110} - Z_{m0}} \end{cases} \quad (1)$$

同理,按照图 2(b)和式(2)可以求出 I 回线和 II 回线的正序电流  $I_1^1$  和  $I_{II}^1$ 。

$$\begin{cases} I_1^1 = \frac{U_{M1} - U_{N11}}{Z_{11}} \\ I_{II}^1 = \frac{U_{M1} - U_{N111}}{Z_{111}} \end{cases} \quad (2)$$

分析式(1)~(2)可知,同杆并架双回线解列运行条件下两回线之间的电流不发生耦合,I 回线与 II 回线之间的电流彼此不影响,因此有效避免了三相不对称现象。

## 3 并列运行分析

与解列运行相似,见图 3,本文采用“直接去耦法”建立零序等值电路和正序等值电路之间的关系。图中符号含义同图 2。按照图 3(a)和式(3)可求出 I 回线和 II 回线的零序电流  $I_1^0$  和  $I_{II}^0$ 。

$$\begin{cases} I_1^0 = I_0 \frac{Z_{110} - Z_{m0}}{(Z_{10} - Z_{m0}) + (Z_{110} - Z_{m0})} \\ I_{II}^0 = I_0 \frac{Z_{10} - Z_{m0}}{(Z_{10} - Z_{m0}) + (Z_{110} - Z_{m0})} \end{cases} \quad (3)$$

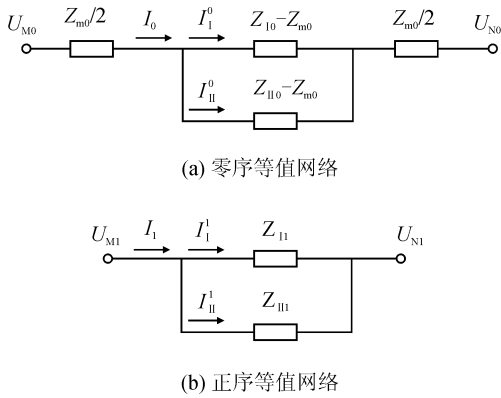


图 3 双回线并列运行等值网络图

Fig. 3 Equivalent network of double line in parallel operation

同理,按照图 3(b)和式(4)可求出 I 回线和 II 回线的正序电流  $I_1^1$  和  $I_2^1$ 。

$$\begin{cases} I_1^1 = I_1 \frac{Z_{21}}{Z_{11} + Z_{21}} \\ I_2^1 = I_1 \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{21}} \end{cases} \quad (4)$$

由图 3、式(3)~(4)可知,并列运行时电流  $I_0$  或  $I_1$  会分别分流到两回线中。I 回线电流受到 II 回线的耦合影响,且两回线间的参数不对称,最终导致三相电流不对称的出现。

### 4 仿真验证

本文基于 ATP-EMTP 建立了云南临沧电网 110kV 新云 I II 回线的双回线模型。图中 I 回线与 II 回线的线路长度分别为 808 m 和 908 m。线路采用图 4 中的垂直、异相序布置方式。线路的电阻 0.154 2  $\Omega$ /km,电抗 0.402  $\Omega$ /km,线径 1.89 cm。

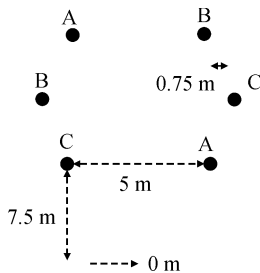


图 4 仿真模型导线排列方式

Fig. 4 Phase conductors configuration of simulation model

本文分别在解列运行以及并列运行下进行仿真验证。图 5 为解列运行和三相负荷对称条件下 I 回线的三相电流波形。由于解列运行线间无零序环流,故不存在不平衡电流。II 回线下的三相电流波形与图 5 类似,不再赘述。表 1 中给出了解列运行时 I 回线三相电流的幅值和相位,可以看出解列运

行时,I 回线的三相电流几乎是对称的。

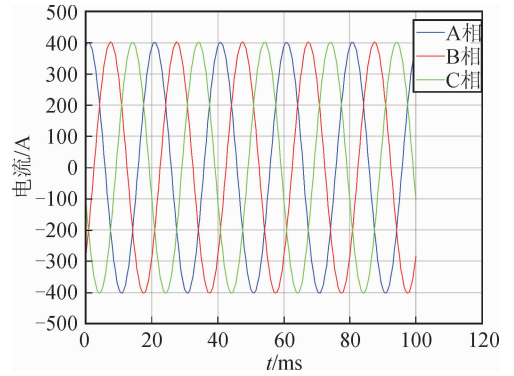


图 5 解列运行时三相电流

Fig. 5 Three-phase current in disconnection operation

表 1 解列运行时三相电流幅值相位  
Tab. 1 Amplitude and phase of three phase current in disconnection operation

参数	相别	I 回线
幅值/A	A	401.72
	B	401.74
	C	401.68
相角/(°)	A	-14.96
	B	-134.98
	C	105.01

图 6 为并列运行条件下 I 回线的三相电流波形。I 回线与 II 回线间在线路三相参数不对称作用下,存在三相电流不平衡量,图 6 中的电流幅值大小和相位均不相等。II 回线的三相电流波形也与 I 回线类似。

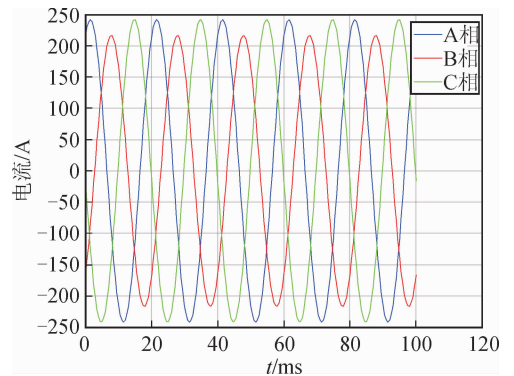


图 6 并列运行时三相电流

Fig. 6 Three-phase current in parallel operation

表 2 列出了并列运行时两回线的三相电流幅值和相位,可更加明显看出两回线三相电流幅值大小不等,相位不对称。

表2 并列运行时三相电流幅值相位

Tab.2 Amplitude and phase of three phase current in parallel operation

参数	相别	I回线	II回线
幅值/A	A	241.68	173.41
	B	216.59	187.67
	C	241.7	172.13
相角/°	A	-27.05	1.98
	B	-140.27	-128.92
	C	93.56	121.2

本文采用 MATLAB 在并列运行条件下计算得到两回线的零序电流及零序环流,分别见图 7 和图 8。分析图中曲线可知,两回线之间零序电流的幅值相当,相位存在明显差异,而零序环流不为零。

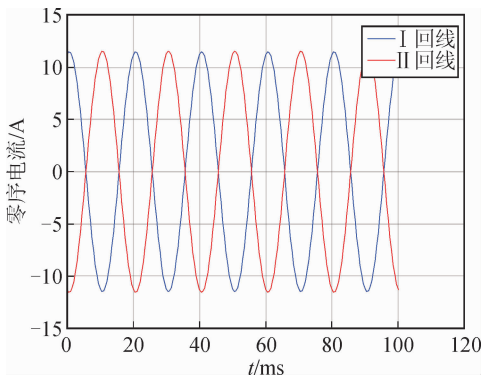


图7 两回线零序电流

Fig.7 Zero sequence current in double line

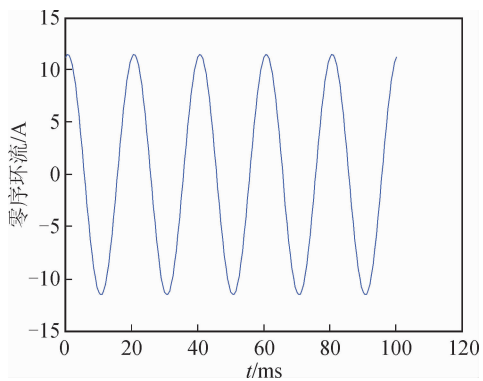


图8 零序环流

Fig.8 Zero sequence circulating current

表3中给出了并列运行时I回线、II回线零序电流的幅值和相位,可以看出并列运行时,两回线的零序电流相位不同,并存在幅值为11.49的零序环流。

表3 并列运行时两回线零序电流幅值相位

Tab.3 Amplitude and phase of zero sequence current in double line in parallel operation

类型	幅值/A	相角/(°)
I回线零序电流	11.46	-11.93
II回线零序电流	11.51	167.94
零序环流	11.49	-12

## 5 结论

本文通过直接去耦法分析了同杆并架平行双回线路并列运行三相不平衡电流的产生机理,利用直接去耦法分别建立了双回线路解列运行和并列运行时的正序等值电路和零序等值电路。研究表明,两回线解列运行,线间无零序环流,因此不存在不平衡电流;而并列运行双回线间出现环流,使得双回线三相电流不平衡,造成电流幅值大小、相位均不相等。

### 参考文献:

[1] 朱忆洋, 都洪基, 赵青春. 不对称参数同杆双回线选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 133-139.  
 ZHU Yiyang, DU Hongji, ZHAO Qingchun. Research on phase selection for double-circuit lines on the same tower with asymmetrical parameters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 133-139.

[2] 杨金东, 陶晔. 双回线并列运行三相不平衡的分析研究[J]. 云南电力技术, 2019, (3):82-84.  
 YANG Jindong, TAO Ye. Analysis and research on unbalanced three phases in parallel operation of double-circuit lines[J]. Yunnan electric power, 2019, (3): 82-84.

[3] 周冠波, 李晓华, 蔡泽祥, 等. 同杆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):58-63.  
 ZHOU Guanbo, LI Xiaohua, CAI Zexiang, 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): 58-63.

[4] 高岩, 尹建华, 陈晓科, 等. 基于环型电网的输电线路相序排列方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14):92-97.  
 GAO Yan, YIN Jianhua, CHEN Xiaoke, et al. Research of phase sequence arrangement of transmission lines in the loop network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 92-97.

[5] 徐敏, 吴成, 罗燎, 等. 江西 220kV 同塔双回不换位线路不平衡度研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(3): 231-235.  
 XU Min, WU Cheng, LUO Liao, et al. Research for un-

- transposed 220 kV double-circuit lines on the same tower in Jiangxi[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(3): 231-235.
- [6] 李晓华, 谢金泉, 罗龙波, 等. 地区电网采用不换位架设方式的高压输电线路潜供电流分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1501-1508.  
LI Xiaohua, XIE Jinqun, LUO Longbo, et al. Analysis of secondary arc current on un-transposed high voltage transmission lines in regional power grid[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1501-1508.
- [7] 孟恒信, 梁建伟, 薛磊, 等. 山西 500 kV 长久三回线路电流不平衡原因分析及改造研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 641-646.  
MENG Hengxin, LIANG Jianwei, XUE Lei, et al. Analysis on three-phase current unbalance in triple-circuits of 500 kV transmission lines from Changzhi to Jiu'an in Shanxi province[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 641-646.
- [8] 张龙伟, 吴广宁, 朱军, 等. 耦合因素对特高压交流同塔双回线路不平衡度的影响分析及相序优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 124-128.  
ZHANG Longwei, WU Guangning, ZHU Jun, et al. Influences of coupling factors on imbalance of dual UHVAC transmission lines installed on same tower and optimization of phase sequence arrangement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 124-128.
- [9] 陈兆雁, 徐昊亮, 田云飞, 等. 同塔双回线路不平衡电流及相序优化布置的研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 45-48.  
CHEN Zhaoyan, XU Haoliang, TIAN Yunfei, et al. Study on unbalanced current and optimization of phase sequence for double-circuit line on same tower[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 45-48.
- [10] 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 Xuebin, DING Maosheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2012, 27(4): 202-208.
- [11] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 同杆双回线环流对方向纵联保护的影响及改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 103-107.  
LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Influence of circulating current in same-pole double-circuit transmission lines on directional pilot protection and its improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 103-107.
- [12] 刘涛, 房金彦, 程朝磊, 等. 1 000kV 特高压南阳站 3/2 主接线不平衡环流分析[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 92-97.  
LIU Tao, FANG Jinyan, CHENG Chaolei, et al. Analysis on the unbalanced circuit current of the 3/2 wiring system of 1 000 kV UHV Nanyang substation[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 92-97.
- [13] 朱庆刚, 刘前进, 陈海涛, 等. 同塔双回不换位线路电压不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 73-79.  
ZHU Qinggang, LIU Qianjin, CHEN Haitao, et al. Study on voltage imbalance of un-transposed double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 73-79.
- [14] 张斌, 陈水明, 庄池杰, 等. 同塔双回输电线路电气不平衡度的改善措施[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3484-3489.  
ZHANG Bin, CHEN Shuiming, ZHUANG Chijie, et al. Improvement measures for electric unbalance of double-circuit transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3484-3489.
- [15] 张悦, 唐震, 杨林也, 等. 同塔双回线路导线相序排列影响因素研究[J]. 华东电力, 2014, 42(10): 2119-2122.  
ZHANG Yue, TANG Zhen, YANG Linye, et al. Research on the influences of different phase sequence arrangement of common-tower double-circuit transmission lines[J]. East China Electric Power, 2014, 42(10): 2119-2122.
- [16] 王育飞, 徐兴, 薛花. 基于不对称参数补偿的同塔六回输电线路不平衡问题抑制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 160-165.  
WANG Yufei, XU Xing, XUE Hua. Unbalance suppression of six-circuit transmission line on same tower based on asymmetrical parameters compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 160-165.
- [17] HESSE M H. Circulating currents in paralleled un-transposed multicircuit lines: II methods for estimating current unbalance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, PAS-85(7): 812-820.

(责任编辑 王绪迪)