

DOI: 10.7667/PSPC161074

基于环型电网的输电线路相序排列方法研究

高岩^{1,2}, 尹建华³, 陈晓科⁴, 赵进全¹, 王雪敏¹

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065;
3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 4. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 同塔多回输电线路之间存在着复杂的电磁耦合关系, 当其合环后, 各段线路本身的不平衡相互叠加, 加剧了环型电网的三相不平衡性。为了减小环型电网的三相不平衡性, 结合线路相序排列方式进行研究。通过分析环型电网中的线路电流与线路阻抗之间的关系, 提出了环型电网中各段线路采用同一相序排列方式, 能够大幅度降低环型电网中的线路不平衡度。通过对双回线路组成的环型电网进行 PSCAD/EMTDC 建模分析, 并对不同相序排列下的不平衡度进行对比。结果证明了两回线路均采用同相序或逆相序排列时, 线路不平衡度较小, 为环型电网的最优相序排列提供了理论依据。

关键词: 同塔双回输电线路; 环型电网; 三相不平衡; 相序排列; PSCAD/EMTDC

Research of phase sequence arrangement of transmission lines in the loop network

GAO Yan^{1,2}, YIN Jianhua³, CHEN Xiaoke⁴, ZHAO Jinquan¹, WANG Xuemin¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China;
4. Electrical Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The complex electromagnetic coupling between transmission lines exists in multi-circuit transmission line on the same tower. When the radial network forms loop network, the imbalance of each part of transmission lines will be superimposed, which will aggravate the problem of three-phase imbalance of loop network. In order to decrease the three-phase imbalance of transmission lines, this paper analyzes the relation between current and impedance of transmission lines in loop network under different phase sequence arrangements, and it also proposes that if each part of it applies the same phase sequence arrangement, the unbalanced degree of transmission lines in loop network can be greatly reduced. Through analyzing the model of loop network consists of double-circuit transmission lines by PSCAD/EMTDC, and comparing the unbalanced degree under different phase sequence arrangements, the results verify that if both of the transmission lines use the same phase sequence arrangement or inverse phase sequence arrangement, the imbalance degree of transmission lines is smaller, which provides theoretical basis to the optimal phase sequence arrangement of loop network.

Key words: double-circuit transmission line on the same tower; looped network; three-phase imbalance; phase sequence arrangement; PSCAD/EMTDC

0 引言

环型电网作为电力系统的一种输电方式, 具有供电可靠和电压质量高的优点。环型电网内同塔多回输电线路进行均匀换位在理论上可以消除线路不平衡, 但是所需要的换位杆塔数量多、经济成本高; 线路换位会使其在机械和电气上的强度降低, 导致线路发生故障^[1-6]。故同塔多回输电线路一般不进行

换位, 这必将导致线路参数的不对称性。由于线路参数不对称而产生的线路不平衡电流除了增大电网损耗和导致继电保护装置的误动作外, 还可能引起发电机跳闸或阻止发电机并网运行而造成大面积停电^[7-10]。因此研究如何减小线路三相不平衡性对电网安全稳定运行有着至关重要的意义。

针对辐射网的三相不平衡问题, 国内外科研人员做了大量研究, 提出了通过改变线路相序排列方

式减小三相不平衡电流,降低线路不平衡度的方法^[11-13]。然而,由于环型电网中的三相不平衡电流相互叠加,使得三相不平衡度问题更为突出,分析也异常困难,目前针对同塔多回环型电网的三相不平衡问题的研究仍在进行之中。

本文针对环型电网各节点间的线路相序排列方式进行了研究。通过建立环型电网等效电路模型,研究各段线路上的电流与线路阻抗、注入电流之间的关系,得出了线路电流不平衡度与相序排列方式的关系,通过 PSCAD/EMTDC 建模仿真,并对环型电网各段线路的静电不平衡度、穿越不平衡度和环流不平衡度进行分析,筛选出环型电网不平衡度较小的相序排列方式,为减小线路三相不平衡提供了理论依据。

1 线路不平衡度

输电线路的不平衡度包括静电不平衡度、穿越不平衡度和环流不平衡度^[14-18]。零序、负序静电不平衡度为

$$\begin{cases} d_{0i} = \left| \frac{\dot{I}_{0i}}{\dot{I}_{1i}} \right| \times 100\% \\ d_{2i} = \left| \frac{\dot{I}_{2i}}{\dot{I}_{1i}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中, \dot{I}_{0i} , \dot{I}_{2i} , \dot{I}_{1i} 为第 i 回输电线路的零序、负序和正序电流; d_{0i} , d_{2i} 为第 i 回输电线路的零序静电不平衡度和负序静电不平衡度。

零序、负序穿越不平衡度为

$$\begin{cases} m_{t0} = \left| \frac{\dot{I}_{0i} + \dot{I}_{0j}}{\dot{I}_{1i} + \dot{I}_{1j}} \right| \times 100\% \\ m_{t2} = \left| \frac{\dot{I}_{2i} + \dot{I}_{2j}}{\dot{I}_{1i} + \dot{I}_{1j}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

零序、负序环流不平衡度为

$$\begin{cases} m_{c0} = \left| \frac{\dot{I}_{0i} - \dot{I}_{0j}}{\dot{I}_{1i} + \dot{I}_{1j}} \right| \times 100\% \\ m_{c2} = \left| \frac{\dot{I}_{2i} - \dot{I}_{2j}}{\dot{I}_{1i} + \dot{I}_{1j}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中, m_{c0} , m_{c2} 为第 i 回输电线路的零序环流不平衡度和负序环流不平衡度。

2 环型电网各段线路电流计算

N 节点环形电网的结构如图 1 所示。

在节点 1 的运行状态和各节点的注入电流保持不变的前提下,将节点 1 断开,如图 2 所示。

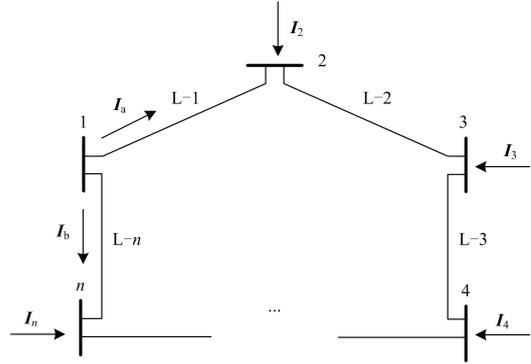


图 1 n 节点环型电网

Fig. 1 n node loop network

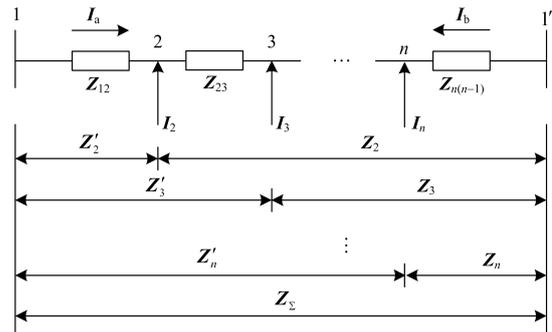


图 2 n 节点环式供电网等效图

Fig. 2 Equivalent graph of n node loop network

根据基尔霍夫定律,在图 2 所示的电路中,有

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{12}\mathbf{I}_a + \mathbf{Z}_{23}(\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_2) + \dots + \mathbf{Z}_{n1}(\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_2 + \dots + \mathbf{I}_n) = 0 \\ \mathbf{Z}_{n1}\mathbf{I}_b + \mathbf{Z}_{(n-1)n}(\mathbf{I}_b + \mathbf{I}_n) + \dots + \mathbf{Z}_{12}(\mathbf{I}_b + \mathbf{I}_n + \dots + \mathbf{I}_2) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{I}_a , \mathbf{I}_b 为流经线路 L-1、L- n 上的电流矩阵; \mathbf{I}_2 , \mathbf{I}_3 , \dots , \mathbf{I}_n 为节点 2、3 \dots n 注入电流矩阵; \mathbf{Z}_{12} , \mathbf{Z}_{23} , \dots , \mathbf{Z}_{n1} (为了方便表达,以下 \mathbf{Z}_{n1} 均用 $\mathbf{Z}_{n(n+1)}$ 代替)为线路 L-1, L-2, \dots , L- n 的阻抗矩阵。

由式(4)得

$$\begin{cases} \mathbf{I}_a = -\mathbf{Z}_{\Sigma}^{-1} \sum_{m=2}^n \mathbf{Z}_m \mathbf{I}_m \\ \mathbf{I}_b = -\mathbf{Z}'_{\Sigma}^{-1} \sum_{m=2}^n \mathbf{Z}'_m \mathbf{I}_m \end{cases} \quad m = (2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中: \mathbf{Z}_{Σ} 为线路总阻抗矩阵,即 $\mathbf{Z}_{\Sigma} = \sum_{m=1}^n \mathbf{Z}_{m(m+1)}$;

\mathbf{Z}_2 , \mathbf{Z}_3 , \dots , \mathbf{Z}_m 为节点 1 节点 m 之间的阻抗矩阵,

$\mathbf{Z}_m = \sum_{i=2}^m \mathbf{Z}_{(i-1)i}$; \mathbf{Z}'_2 , \mathbf{Z}'_3 , \dots , \mathbf{Z}'_m 为节点 m 节点 1' 之

间的阻抗矩阵, $\mathbf{Z}'_m = \sum_{i=m}^n \mathbf{Z}_{i(i+1)}$ 。

流经各段线路的电流为

$$\begin{cases} I_{12} = I_a \\ I_{m(m+1)} = I_a + \sum_{g=2}^m I_g \quad m = (2, 3, \dots, n-1) \\ I_{n1} = I_b \end{cases} \quad (6)$$

式中： g 为节点 1 与节点 m 之间的节点； I_g 为该节点的注入电流。

由式(5)和式(6)可知，流经各段线路的电流不仅受注入电流的影响，而且受线路本身阻抗矩阵的制约。不同的线路相序排列方式下，线路的阻抗矩阵 Z_Σ ， Z_m ， Z'_m 也不相同，其与各节点注入的电流共同决定各段线路的不平衡度。

3 环型电网各段线路的相序排列方式研究

如果环型电网中同时包含同塔多回输电线路和单回输电线路，则需要使用线路参数归一化的方法将各段线路参数矩阵转化到同一维度的基准下，归一化的方法详见文献[19]。假设环型电网中线路单位长度的阻抗参数相同，各段线路的阻抗矩阵与线路长度的关系为

$$Z_{m(m+1)} = l_{m(m+1)} Z \quad m = (1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

则有

$$\begin{cases} Z_m = (l_{n1} + l_{(n-1)n} + \dots + l_{(m+1)m}) Z = k_m Z \\ Z'_m = (l_{12} + l_{23} + \dots + l_{(m-1)m}) Z = k'_m Z \end{cases} \quad (8)$$

式中： Z 为单位长度线路阻抗矩阵； l_{12} ， l_{23} ， \dots ， l_{n1} 为环型电网各段线路的长度； k_m 为节点 m 节点 1 之间的线路长度， k'_m 为节点 1 节点 m 之间的线路长度，其中 $m = (2, 3, \dots, n)$ 。

将式(8)代入式(5)有

$$\begin{cases} I_a = - \left(\sum_{m=2}^n l_m Z \right)^{-1} \sum_{m=2}^n (k_m Z I_m) \\ I_b = - \left(\sum_{m=2}^n l_m Z \right)^{-1} \sum_{m=2}^n (k'_m Z I_m) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)得：

$$\begin{cases} I_a = - \frac{\sum_{m=2}^n k_m I_m}{\sum_{m=2}^n l_m} \\ I_b = - \frac{\sum_{m=2}^n k'_m I_m}{\sum_{m=2}^n l_m} \end{cases} \quad m = (2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)，可得流经环型电网各段线路的电流为

$$\begin{cases} I_{12} = I_a \\ I_{m(m+1)} = I_a + \sum_{g=2}^m I_g = - \frac{\sum_{m=2}^n k_m I_m}{\sum_{m=2}^n l_m} + \sum_{g=2}^m I_g \\ I_{n1} = I_b \end{cases} \quad (11)$$

各段线路单位长度阻抗矩阵相同时，即环型电网采用同一的相序排列方式，由式(11)可知，流经线路的电流与环型电网线路的自身阻抗矩阵无关，仅与各节点的注入电流相关，此时可以消除线路阻抗矩阵的影响。

为了便于分析注入电流 I_m 对环形电网电流的影响，假设各节点注入电流 I_m 均对称，由式(11)可知，流经各段线路上的电流是对称的，故环型电网各段线路使用同一的相序排列方式，能消除线路三相不平衡。当线路正常运行时，各节点注入的电流不对称度较高，环型电网采用同一的相序排列方式仍能在一定程度上改善三相不平衡问题。

4 PSCAD/EMTDC 建模及结果分析

本文选取 4 节点 220 kV 同塔双回输电线路环型电网为例，使用 PSCAD/EMTDC 建立的系统模型如图 3 所示。

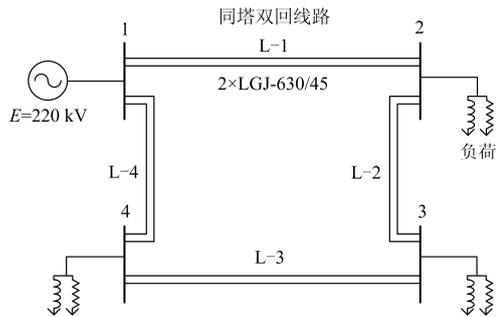


图 3 4 节点系统

Fig. 3 4 node system

图 3 中，1 侧母线电压为 220 kV，2、3 和 4 侧的有功负荷 180 MW，无功感性负荷 26.922 Mvar，功率因数 0.989，负荷的接线方式为星型。

杆塔参数、导线、地线位置如图 4 所示。

图 4 中，输电线路使用贝瑞隆模型，线路型号 2×LGJ-630/45，分裂间距分别为 600 mm，地线型号为 LGJ95/55，大地电阻率 100 Ω·m，参数如表 1 所示。

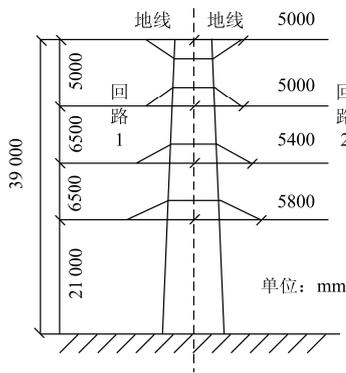


图 4 输电杆塔尺寸及导线挂点位置

Fig. 4 Tower size and wire hanging point position

表 1 输电线路导线参数

Table 1 Conductor parameter of transmission line table

导线型号	铝截面/ mm ²	钢芯/ mm ²	总截面/ mm ²	总直径/ mm	20℃直流 电阻不大 于/ $\Omega \cdot m$
LGJ-630/45	623.45	43.10	666.55	33.60	0.046 33
LGJ95/55	96.51	56.30	152.81	16.0	0.2992

针对环型电网各段线路使用同一相序和不同的相序排列方式进行仿真, 以 I 回线路为参考, II 回线路变化, 则同塔双回输电线路的相序排列方式共有 6 种, 如表 2 所示。

表 2 环型电网同一相序排列方式

Table 2 Loop network unified phase sequence

双回线路 相序排列	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

对于表 2 所示的 6 种同一相序排列方式, 经 PSCAD/EMTDC 建模仿真得到: 采用异相序时, 流入各节点的电流对称度较低; 而采用同相序或逆相序时, 流入节点的电流对称度较高。故以同相序和逆相序为例进行分析。

当环型电网各段线路相序排列方式不同时, 相序排列方式繁多, 但当采用循环相序时, 不平衡度相对较低, 故以循环相序为例进行分析, 图 5 是环型电网循环相序排列方式。

采用同相序、逆相序和循环相序 3 种排列方式对线路进行仿真, 线路各段的电流静电不平衡度结果如表 3、表 4 所示。

由表 3 和表 4 可以看出: 同相序和逆相序的 I、II 回线路的静电不平衡度相差不大; 循环相序的 I、II 回线路的零序静电不平衡度平均值相差 83.02%,

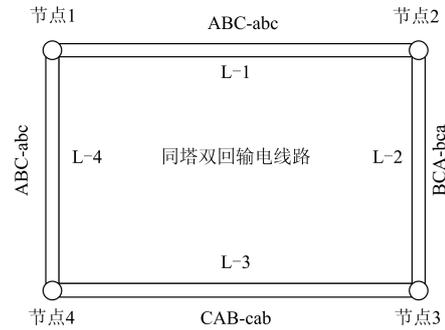


图 5 环型电网循环相序排列方式

Fig. 5 Loop network cycle phase sequence

表 3 环型电网各段线路零序静电不平衡度

Table 3 Zero sequence unbalance degree of loop network

双回线路 相序排列	线路 回数	零序静电不平衡度/%				平均值
		L-1	L-2	L-3	L-4	
同相序	I 回	0.31	0.58	0.58	0.43	0.48
	II 回	0.31	0.57	0.25	0.43	0.39
逆相序	I 回	0.17	0.41	0.41	0.29	0.32
	II 回	0.55	1.24	1.24	0.87	0.98
循环相序	I 回	0.37	0.37	0.90	0.90	0.64
	II 回	1.91	1.91	5.65	5.60	3.77

表 4 环型电网各段线路负序静电不平衡度

Table 4 Negative sequence unbalance degree of loop network

双回线路 相序排列	线路 回数	负序静电不平衡度/%				平均值
		L-1	L-2	L-3	L-4	
同相序	I 回	0.56	1.26	1.26	0.89	0.99
	II 回	0.56	1.25	0.31	0.89	0.75
逆相序	I 回	0.17	0.41	0.06	0.29	0.23
	II 回	0.55	1.23	0.31	0.87	0.74
循环相序	I 回	0.93	0.93	0.15	0.15	0.54
	II 回	5.65	5.87	2.34	2.34	4.05

而负序静电不平衡度平均值相差 86.67%。

同相序和逆相序的零序静电不平衡度明显低于循环相序排列下的不平衡度, 至少减小 74.01%; 同相序和逆相序的负序静电不平衡度仍旧明显低于循环相序的不平衡度, 至少减小 75.56%。

采用同相序、逆相序和循环相序 3 种排列方式对线路进行仿真, 线路各段的电流穿越不平衡度结果如表 5、表 6 所示。

由表 5、表 6 可以看出: 同相序和逆相序的零序穿越不平衡度稍低于负序穿越不平衡度; 循环相序的零序穿越不平衡度明显低于负序穿越不平衡度, 平均值低于 84.91%。

表 5 环型电网各段线路零序穿越不平衡度

Table 5 Zero sequence through unbalance degree of loop network

双回线路 相序排列	零序穿越不平衡度/%				
	L-1	L-2	L-3	L-4	平均值
同相序	0.31	0.58	0.41	0.42	0.43
逆相序	0.17	0.41	0.24	0.29	0.28
循环相序	0.37	0.90	0.92	0.15	0.59

表 6 环型电网各段线路负序穿越不平衡度

Table 6 Negative sequence through unbalance degree of loop network

双回线路 相序排列	负序穿越不平衡度/%				
	L-1	L-2	L-3	L-4	平均值
同相序	0.56	1.25	0.78	0.89	0.87
逆相序	0.55	1.24	0.77	0.87	0.86
循环相序	1.91	5.62	5.76	2.34	3.91

相同相序排列下与循环相序排列下的零序穿越不平衡度相差不大；而相同相序下的负序穿越不平衡度明显低于循环相序的负序穿越不平衡度，平均值至少减少 77.75%。

同相序、逆相序和循环相序的零序、负序环流不平衡度较小，低于静电不平衡度、穿越不平衡度的量级，近似接近于零，对线路的不平衡度影响较小，故不予考虑。

5 结论

本文主要针对环型电网的三相不平衡问题进行研究，以环型电网各段线路的静电不平衡度、穿越不平衡度和环流不平衡度作为评价指标，对不同相序排列方式下的线路不平衡性进行分析。通过对环型电网等效模型进行理论分析，得出环型电网各段线路的电流与自身阻抗、各节点注入电流的关系，结合线路相序排列方式，提出了环型电网采用同一相序排列的方案，可以显著减小电流不平衡度。通过对 220 kV 同塔双回输电线路组成的环型电网进行仿真，验证了本文方法的有效性，为研究环型电网的最优相序排列提供了理论依据。

参考文献

[1] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.
MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.

[2] 田书, 刘芳芳, 任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 50-54.
TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 50-54.

[3] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.

[4] 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.

[5] 金立军, 刘世杰, 苏庆. 国外环网供电及环网柜的发展趋势[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 301-303.
JIN Lijun, LIU Shijie, SU Qing. The development of ring network power supply and ring main unit abroad[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 301-303.

[6] 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 Yongjian, HUANG Shaoping, XU Zhiwei, 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.

[7] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[8] 刘前进, 朱庆钢, 罗龙波. 750 kV 同塔双回不换位线路电流不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 105-110.
LIU Qianjin, ZHU Qinggang, LUO Longbo. Analysis on current imbalance of un-transposed 750 kV double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 105-110.

- Control, 2013, 41(18): 105-110.
- [9] 唐震, 武中, 张悦, 等. 环状供电系统不平衡电流分析研究[J]. 华东电力, 2014, 42(5): 957-961.
TANG Zhen, WU Zhong, ZHANG Yue, et al. Research and analysis on unbalanced current of annular power supply system[J]. East China Electric Power, 2014, 42(5): 957-961.
- [10] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [11] 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.
- [12] 张晓, 周浩, 赵斌财, 等. 500 kV 同塔四回输电线路最优相序布置[J]. 中国电力, 2010, 43(2): 44-47.
ZHANG Xiao, ZHOU Hao, ZHAO Bincai, et al. Research on optimized phase sequence arrangements for 500 kV quadruple-circuit transmission lines on the same tower[J]. Electric Power, 2010, 43(2): 44-47.
- [13] 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 Fei, 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.
- [14] 何溪, 尹建华, 夏建生, 等. 同塔多回输电线路最优相序排列方式[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 65-67.
HE Xi, YIN Jianhua, XIA Jiansheng, et al. Study on optimal phase sequence of multi-circuit transmission lines on same tower[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 65-67.
- [15] 颜天佑, 黄业同, 杨长辉. 110 kV 同塔六回输电线路不平衡性分析[J]. 广东电力, 2012, 25(2): 67-71.
YAN Tianyou, HUANG Yetong, YANG Changhui. Analysis on unbalance of 110 kV six-circuit transmission lines on the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(2): 67-71.
- [16] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [17] 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 Shaogui, HUANG Yongning, et al. Calculation and analysis of unbalanced currents in Ningxia Northern 220 kV Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 488-494.
- [18] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [19] 赵艳军, 陈晓科, 尹建华, 等. 采用参数归一化方法的多回输电线路稳态分析与其应用[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1746-1752.
ZHAO Yanjun, CHEN Xiaoke, YIN Jianhua, et al. Parameter normalization based steady-state analysis of multi-circuit transmission lines and its application[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1746-1752.

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-09-30

作者简介:

高岩(1990—), 男, 在读研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: astonishgy@163.com

尹建华(1966—), 男, 工学博士, 高级工程师, 从事系统计算分析与电力系统仿真分析计算平台的研发工作; E-mail: thinkerwise@163.com

陈晓科(1978—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事电力系统分析与电网规划研究。E-mail: chen_xk1016@sina.com

(编辑 姜新丽)