

考虑避雷线影响同塔多回输电线路不平衡度衡量新方法

王育飞, 徐 兴, 薛 花

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对同塔多回输电线路的优化设计与运行, 计算了考虑避雷线影响同塔多回输电线路阻抗参数, 提出了表征同塔多回输电线路不平衡物理本质的新衡量方法。基于 PSCAD 软件仿真计算了同塔 6 回输电线路的不平衡度, 对比分析了不同线路长度、不同相序布置情况下避雷线连接方式对线路不平衡度的影响。结果表明, 所提出的衡量方法具有实用性、便捷性, 能够准确地反映线路不平衡特性, 选择线路最优相序布置方式; 避雷线的连接方式是线路零序不平衡度的主要影响因素。

关键词: 输电; 同塔多回输电线路; 避雷线; 不平衡度; 相序布置; 仿真

中图分类号: TM 726

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.017

0 引言

同塔多回输电技术能充分合理利用线路走廊, 降低电力工程建设成本, 是一种新型输电方式, 已在全国范围内广泛采用。同塔多回输电线路由于紧凑的输电建构, 难以通过线路换位消除线路之间由于耦合产生的参数不对称。输电线路参数不对称对整个电力系统乃至用户造成的不利影响不再赘述, 目前许多同塔多回输电线路的运行情况也表明存在一定的不平衡问题。同塔多回输电线路的不平衡问题日益受到专家学者关注, 如何计算、衡量、抑制同塔多回输电线路不平衡等问题也逐渐被提上议程。因此, 提出一种准确、实用的输电线路不平衡度衡量方法, 对于同塔多回输电线路的运行与发展有着重要的理论价值与现实意义。

对于同塔多回输电线路不平衡的研究, 国外由于缺少工程实例, 研究成果甚少, 而国内科研人员已经做了一些有意义的工作^[1-12]。文献[1]分析了同塔双回输电线路并联电抗器补偿度及中性点小电抗大小的取值范围及选择方法; 文献[2]利用 MATLAB 对 110 kV 同塔 6 回输电线路的不平衡度做了计算, 并推出了最优相序布置方式; 文献[3]对同塔双回、单回并列形式的 3 回输电线路不平衡度进行了研究; 文献[4-15]分别对不同电压等级同塔双回、4 回输电线路的不平衡度以及导线布置方式进行研究; 文献[16-17]利用戴维南等效的方法对同塔多回输电线路的不平衡度进行了计算。但以上研究主要局限在同塔 4 回或者 4 回以内输电线路, 未考虑避雷线不同连接方式对线路不平衡度的影响, 在对线路

三相不平衡衡量指标的计算方法上, 未能体现不平衡的物理本质, 表征指数繁多, 缺乏实用性与便捷性。

在深入分析上述问题的基础上, 本文考虑了避雷线对输电线路电气参数的影响, 提出了实用、便捷、准确的不平衡衡量方法, 并以广东某 110 kV 同塔 6 回输电线路为实例, 利用 PSCAD 软件搭建精确的线路模型, 仿真分析了不同线路长度、相序布置方式下避雷线 2 种连接方式时的不平衡度。

1 表征输电线路不平衡度的新衡量方法

目前许多文献研究对于同塔多回输电线路不平衡度的定义已经非常明确, 分为电磁不平衡和静电不平衡, 分别表征串联阻抗的不平衡与并联导纳的不平衡^[2-13]。电磁不平衡包括穿越型电磁不平衡和环流型电磁不平衡, 其中穿越型不平衡体现的不平衡基本与单回线路的不平衡相同, 为每回线路单独的不平衡; 环流型不平衡体现的是 2 回线路之间感应电动势不相同而在回路间产生的环流^[17], 在每 2 回线路之间会产生环流。静电不平衡度是衡量线路对地电容参数的不平衡系数。

对于同塔多回输电线路不平衡度的衡量, 目前研究广泛采用的方法是: 以水平 2 回线路为一组, 负序电流总和、零序电流总和分别与正序电流总和比值作为该 2 回线路的负序、零序穿越型电磁不平衡度, 负序电流之差、零序电流之差分别与正序电流总和和比值作为该 2 回路的负序、零序环流型电磁不平衡度, 静电不平衡度同样以每水平 2 回为一组计算。根据以上对同塔多回输电线路不平衡度的定义, 穿越型不平衡度体现的是每回线路单独的不平衡度, 应该每回线路单独计算, 取每回不平衡度的最大值作为衡量该线路的穿越型不平衡度; 环流型不平衡度体现的是 2 回之间的环流, 每 2 回之间都应存在

收稿日期: 2013-12-15; 修回日期: 2014-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177098, 51207086); 上海市教委科研创新基金资助项目(12YZ136, 12YZ138)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177098, 51207086) and Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(12YZ136, 12YZ138)

该环流,应该每 2 回计算不平衡环流,取最大值作为衡量该线路的环流型不平衡度。因此,目前采用的衡量方法,未能准确体现同塔多回输电线路不平衡的物理本质,并且以每 2 回为一组计算,衡量指标繁多,在实际工程中缺乏实用性。对此本文提出表征输电线路不平衡度的新衡量方法。

当输电线路末端短路时,在线路首端施加正序电压,则负序、零序穿越型电磁不平衡度 M_{2n} 、 M_{0n} , 负序、零序环流型电磁不平衡度 M_{2c} 、 M_{0c} 可采用下列定义。

第 m 回线路负序电磁穿越型不平衡度 M_{2m} 和第 m 回与第 n 回之间负序电磁环流型不平衡度 M_{2cm} 如式(1)所示。

$$\begin{cases} M_{2m} = \left| \frac{I_{dm2}}{I_{dm1}} \right| \times 100\% \\ M_{2cm} = \left| \frac{I_{dm2} - I_{dn2}}{I_{dm1} + I_{dn1}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_{dm1} 为第 m 回路末端短路正序电流; I_{dm2} 为第 m 回路末端短路负序电流; I_{dn1} 为第 n 回路末端短路正序电流; I_{dn2} 为第 n 回路末端短路负序电流。

取各回线路的负序电磁穿越型不平衡度和各回之间负序电磁环流型不平衡度的最大值表征同塔多回输电线路的负序电磁穿越不平衡度 M_{2i} 和负序电磁环流不平衡度 M_{2c} , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} M_{2i} = \max \{M_{2i1}, M_{2i2}, \dots, M_{2ii}\} \\ M_{2c} = \max \{M_{2c12}, M_{2c13}, \dots, M_{2c(i-1)i}\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, M_{2ii} 为第 i 回路负序电磁穿越不平衡度; $M_{2c(i-1)i}$ 为第 $i-1$ 回路与第 i 回路之间的负序电磁环流不平衡度; i 为总回路数。

同理,第 m 回线路零序电磁穿越型不平衡度 M_{0m} 和第 m 回与第 n 回之间零序电磁环流型不平衡度 M_{0cm} 如式(3)所示。

$$\begin{cases} M_{0m} = \left| \frac{I_{dm0}}{I_{dm1}} \right| \times 100\% \\ M_{0cm} = \left| \frac{I_{dm0} - I_{dn0}}{I_{dm1} + I_{dn1}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

其中, I_{dm1} 为第 m 回路末端短路正序电流; I_{dm0} 为第 m 回路末端短路零序电流; I_{dn1} 为第 n 回路末端短路正序电流; I_{dn0} 为第 n 回路末端短路零序电流。

取各回线路的零序电磁穿越型不平衡度和各回之间零序电磁环流型不平衡度的最大值表征同塔多回输电线路的电磁穿越不平衡度 M_{0i} 和电磁环流不平衡度 M_{0c} , 如式(4)所示。

$$\begin{cases} M_{0i} = \max \{M_{0i1}, M_{0i2}, \dots, M_{0ii}\} \\ M_{0c} = \max \{M_{0c12}, M_{0c13}, \dots, M_{0c(i-1)i}\} \end{cases} \quad (4)$$

其中, M_{0ii} 为第 i 回路零序电磁穿越不平衡度; $M_{0c(i-1)i}$ 为第 $i-1$ 回路与第 i 回路之间的零序电磁环流不平

衡度; i 为总回路数。

当输电线路末端开路时,在线路首端施加正序电压,则第 m 条回路的负序静电不平衡度 D_{2m} 和第 m 回路的零序静电不平衡度 D_{0m} 可定义如式(5)所示。

$$D_{2m} = \left| \frac{I_{om2}}{I_{om1}} \right| \times 100\%, \quad D_{0m} = \left| \frac{I_{om0}}{I_{om1}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

其中, I_{om1} 、 I_{om2} 、 I_{om0} 分别为第 m 回路末端开路正、负、零序电流。取各回路的负序、零序静电不平衡的最大值表征同塔多回输电线路的负序、零序静电不平衡度 D_2 、 D_0 , 如式(6)所示。

$$\begin{cases} D_2 = \max \{D_{21}, D_{22}, \dots, D_{2i}\} \\ D_0 = \max \{D_{01}, D_{02}, \dots, D_{0i}\} \end{cases} \quad (6)$$

其中, D_{2i} 为第 i 回路负序静电不平衡度; D_{0i} 为第 i 回路零序静电不平衡度; i 为总回路数。

2 考虑避雷线影响的输电线路参数计算方法

目前在同塔多回输电线路敷设时,一般都加装有避雷线以保护线路免遭直接雷击。避雷线一般有 2 种连接方式:绝缘连接和直接接地连接。避雷线绝缘连接时,由于两端未形成回路,不会产生感应电流,因此不会对输电线路产生电磁影响(以下称无避雷线影响);避雷线直接接地连接时,则会对输电线路产生电磁影响(以下称有避雷线影响)。避雷线直接接地连接时,具有 2 根避雷线的单回输电线路示意图如图 1 所示。

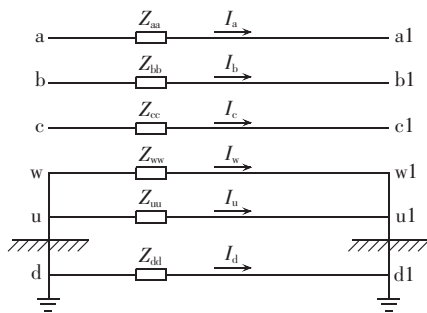


图 1 具有 2 根避雷线的单回输电线路示意图
Fig.1 Single-circuit transmission lines with two lightning conductors

图 1 中, a、b、c 为三相线路, w、u 为避雷线, d 为大地等值线路。考虑避雷线的影响,得到线路的初始电压方程如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{aa1} \\ U_{bb1} \\ U_{cc1} \\ U_{ww1} \\ U_{uu1} \\ U_{dd1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a - U_{a1} \\ U_b - U_{b1} \\ U_c - U_{c1} \\ 0 - U_{w1} \\ 0 - U_{u1} \\ 0 - U_{d1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{aw} & Z_{au} & Z_{ad} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bw} & Z_{bu} & Z_{bd} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cw} & Z_{cu} & Z_{cd} \\ Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} & Z_{ww} & Z_{wu} & Z_{wd} \\ Z_{ua} & Z_{ub} & Z_{uc} & Z_{uw} & Z_{uu} & Z_{ud} \\ Z_{da} & Z_{db} & Z_{dc} & Z_{dw} & Z_{du} & Z_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_w \\ I_u \\ I_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, U_{aa1} 、 U_{bb1} 、 U_{cc1} 为三相线路两端电压; I_a 、 I_b 、 I_c 为

三相线路电流; U_{ww1} 、 U_{uu1} 为避雷线上的感应电压; I_w 、 I_u 为避雷线上的感应电流; U_{dl1} 、 I_d 分别为大地等值电压与电流; 线路阻抗矩阵中, 线路 x 自阻抗 Z_{xx} 、线路 x 与 y 间互阻抗 Z_{xy} 由式(8)计算得到^[14]。

$$\begin{cases} Z_{xx} = R + 0.05 + j0.145 \left(\lg \frac{2l}{r_e} - 1 \right) \\ Z_{xy} = 0.05 + j0.145 \left(\lg \frac{2l}{d_{xy}} - 1 \right) \end{cases} \quad (8)$$

其中, l 为导线长度; R 为导线或避雷线的电阻; r_e 为导线或避雷线的有效半径; d_{xy} 为导线 x 至导线 y 几何中心间距。

由于三相线路零序电流通过 d 、 u 和 w 线路形成回路^[17], 因而存在如式(9)所示的电流关系式。

$$I_a + I_b + I_c = -(I_d + I_u + I_w) \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)中, 消去 I_d , 化简得到式(10)。

$$\begin{bmatrix} U_{aa1} \\ U_{bb1} \\ U_{cc1} \\ U_{ww1} \\ U_{uu1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{aw} & Z_{au} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bw} & Z_{bu} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cw} & Z_{cu} \\ Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} & Z_{ww} & Z_{wu} \\ Z_{ua} & Z_{ub} & Z_{uc} & Z_{uw} & Z_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_w \\ I_u \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $U_{ww1} = 0$, $U_{uu1} = 0$ 。对式(10)进行降阶变换, 消除 I_w 、 I_u 的作用。最终, 得到三相线路阻抗参数变换矩阵 Z'_{abc} , 如式(11)所示。

$$Z'_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aw} & Z_{au} \\ Z_{bw} & Z_{bu} \\ Z_{cw} & Z_{cu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{ww} & Z_{wu} \\ Z_{uw} & Z_{uu} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} \\ Z_{ua} & Z_{ub} & Z_{uc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中, 若定义:

$$\begin{aligned} Z_{abc} &= \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \\ Z_t &= \begin{bmatrix} Z_{aw} & Z_{au} \\ Z_{bw} & Z_{bu} \\ Z_{cw} & Z_{cu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{ww} & Z_{wu} \\ Z_{uw} & Z_{uu} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} \\ Z_{ua} & Z_{ub} & Z_{uc} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

则式(11)可变换为式(12):

$$Z'_{abc} = Z_{abc} - Z_t \quad (12)$$

由式(12)可见, 避雷线对线路阻抗的影响可以等效地用初始阻抗矩阵中每一个元素减去一个修正量表示。将该结论推广到同塔多回输电线路, 对于同塔 n 回输电线路考虑避雷线影响的阻抗参数矩阵 Z' 如式(13)所示。

$$Z' = \begin{bmatrix} Z_{a1a1} & Z_{a1b1} & Z_{a1c1} & \cdots & Z_{a1an} & Z_{a1bn} & Z_{a1cn} \\ Z_{b1a1} & Z_{b1b1} & & & & & Z_{b1cn} \\ Z_{c1a1} & & Z_{c1c1} & & & & Z_{c1cn} \\ \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ Z_{ana1} & & & & Z_{anan} & & Z_{ancn} \\ Z_{bna1} & & & & & Z_{bnbn} & Z_{bncn} \\ Z_{cna1} & Z_{cnb1} & Z_{cnc1} & \cdots & Z_{cnan} & Z_{cnbn} & Z_{cncn} \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} Z_{a1w} & Z_{a1u} \\ Z_{b1w} & Z_{b1u} \\ Z_{c1w} & Z_{c1u} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{anw} & Z_{anu} \\ Z_{bnw} & Z_{bnu} \\ Z_{cnw} & Z_{cnu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{ww} & Z_{wu} \\ Z_{uw} & Z_{uu} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{wa1} & Z_{ua1} \\ Z_{wb1} & Z_{ub1} \\ Z_{wc1} & Z_{uc1} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{wan} & Z_{uan} \\ Z_{wbn} & Z_{ubn} \\ Z_{wcn} & Z_{ucn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)表明, 避雷线对同塔多回输电线路阻抗的影响, 体现在初始阻抗矩阵中每一个元素减去一个修正量, 这个修正量包括线路与避雷线之间的互阻抗和避雷线的自阻抗。由于每条线路与避雷线互感不同, 因此即使线路参数是平衡的, 每个元素减去的修正量也不相等。

3 同塔 6 回输电线路不平衡仿真分析

3.1 线路模型

以广东某实际工程为例, 输电杆塔为垂直型杆塔, 6 回线路采用垂直排列方式, 总高度为 51 m, 呼称高度为 18 m。导线型号为 LGJ-630/45, 总直径为 33.6 mm (总直径包含钢芯和绞线的直径, 下同), 直流电阻为 0.04633 Ω/km; 地线型号为 LBGJ-75-40AC, 总直径为 11.25 mm, 直流电阻为 0.5627 Ω/km。

依据线路初始数据, 计算得到线路初始阻抗、导纳矩阵, 按照考虑避雷线影响的输电线路阻抗参数计算方法进行降阶变换消除避雷线作用, 并创建线路参数矩阵文件(.txt), 在 PSCAD 软件环境下对线路进行建模仿真, 流程如图 2 所示, 其中, 电源为 110 kV 三相固定电源, 取 110 kV 电压等级的标配电源容量为 750 MV·A。

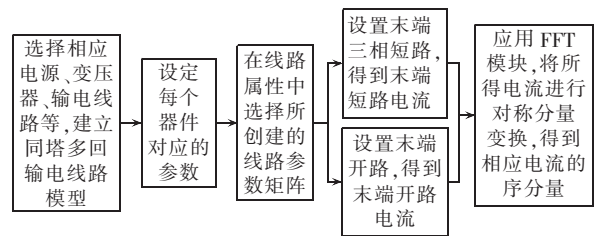


图 2 建模仿真流程图

Fig.2 Flowchart of modeling and simulation

3.2 仿真分析

仿真计算不平衡度的具体方法为: 首端施加三相对称电压, 在线路末端三相短路的情况下, 得到线路三相短路电流, 利用 FFT 模块将三相短路电流量转换成序分量, 根据式(2)和式(4)电磁不平衡度计算方法, 求得零序和负序电磁不平衡度; 在首端施加三相对称电压, 在线路末端开路的情况下, 得到线路末端开路电流, 利用 FFT 模块将末端开路电流量转换成序分量, 根据式(6)静电不平衡计算方法得到零序和负序静电不平衡度。以下基于 PSCAD 软件仿真计

算同塔 6 回输电线路的不平衡度,对比分析不同线路长度、不同相序布置情况下避雷线连接方式对线路不平衡度的影响。

3.2.1 所提出的新衡量方法与目前衡量方法比较

针对该 110 kV 同塔 6 回输电线路工程,取线路长度 60 km,相序布置为顺序布置,其他条件相同,分别使用目前使用的衡量方法以及本文提出的新衡量方法进行仿真计算,仿真结果如表 1 所示。

表 1 2 种衡量方法对比
Table 1 Comparison between two methods

不平衡类型	目前方法	新方法
穿越型不平衡度	$M_{212}=3.29$	
	负序 $M_{234}=1.16$	$M_2=3.19$
	$M_{256}=3.29$	
	零序 $M_{012}=8.69$	
	$M_{034}=0.32$	$M_0=8.95$
	$M_{056}=9.21$	
环流型不平衡度	$M_{212}=0$	
	负序 $M_{234}=0$	$M_2=1.75$
	$M_{256}=0$	
	零序 $M_{012}=0$	
	$M_{034}=0$	$M_0=3.24$
	$M_{056}=0$	

通过分析对比以上仿真结果,得到以下结论。

a. 目前的不平衡度衡量方法衡量指标繁多,对于每种不平衡度都有 3 个衡量指标,6 回线路就有 12 个不同的指标,缺乏实用性;提出的新衡量方法对于线路不平衡度能够给出便捷的衡量指标,在实际工程应用中更具有实用性。

b. 对于仿真得到的环流不平衡度,目前的衡量方法将水平 2 回作为一组计算,由于顺相序排列,水平每 2 回线路相序、位置对称,因此仿真得到的不平衡度为零,而实际情况 6 回线路每 2 回之间都应有环流,目前的衡量方法无法体现该环流不平衡;提出的新衡量方法能够计算出该环流不平衡度,相比目前的衡量方法,提出的新衡量方法能更准确地体现同塔多回输电线路的不平衡度。

3.2.2 线路长度对不平衡度的影响

在线路不换位、其他条件均相同的情况下,只通过改变线路长度,仿真计算不同线路长度的净穿越不平衡度和净环流不平衡度,得出不同线路长度下避雷线连接方式对不平衡度的影响结果如图 3 所示,考虑到实际 110 kV 线路长度一般在几 km 到 100 km 之间,所以在此区间选取几个典型线路长度进行分析。

通过分析对比仿真结果得出以下结论。

a. 随着线路长度的增长,负序穿越不平衡度与环流不平衡度都增大,零序穿越不平衡度与环流不平衡度减小,线路静电不平衡度则基本不受影响,说

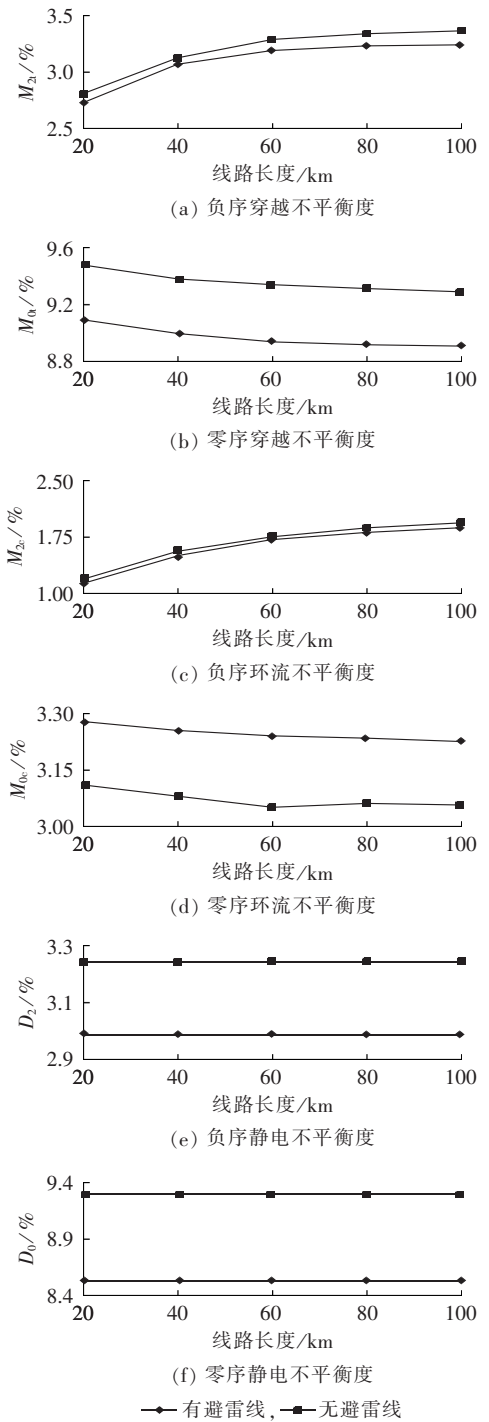


图 3 不同线路长度下输电线路不平衡度
Fig.3 Unbalance degrees of transmission line for different line lengths

明随着线路长度的增加,线路之间耦合增强,不平衡度增大。该结论表明,提出的输电线路不平衡度衡量方法具有实用、便捷的特点,能够准确反映长度对不换位同塔多回输电线路不平衡度的影响。

b. 避雷线的不同运行方式对不平衡度有一定的影响,零序不平衡度尤为明显,有避雷线影响时的不平衡度比无避雷线时要小,而且愈是靠近避雷线的回路影响愈是明显,负序不平衡度的影响相对小得

多,表明线路避雷线接地运行时,有使线路零序分量之间耦合减弱的作用。

3.2.3 相序布置对不平衡度的影响

同塔 6 回输电线路,相序布置一共有 $6^6=46\,656$ 种相序布置方式,在仿真分析中不可能一一计算,在线路设计中考虑到其他因素的影响,实际可行相序布置只有少数几种典型方式。因此本文选择最典型的 8 种相序布置方式来分析计算不同相序布置避雷线连接方式对不平衡度的影响,取线路长度为 60 km,8 种相序布置方式与仿真分析结果分别如表 2 和图 4 所示。

仿真结果表明,在线路其他条件相同的情况下,相序布置方式的不同会影响线路不平衡度,通过对比分析所得到的数据,得出以下结论。

a. 8 种典型相序中,相序布置方式 7 即逆相序布置时,总体线路不平衡度最小,相序布置方式 4 的总

表 2 8 种典型相序布置方式
Table 2 Eight typical phase-sequence layouts

回路	典型相序布置方式							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc
2	abc	abc	abc	abc	cba	cba	cba	cba
3	abc	cba	cba	cba	abc	abc	abc	abc
4	abc	cba	cba	cba	abc	cba	cba	cba
5	abc	abc	abc	cba	abc	abc	abc	cba
6	abc	abc	cba	cba	abc	abc	cba	cba

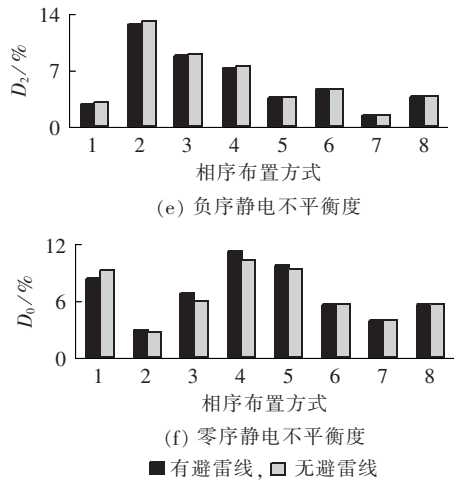
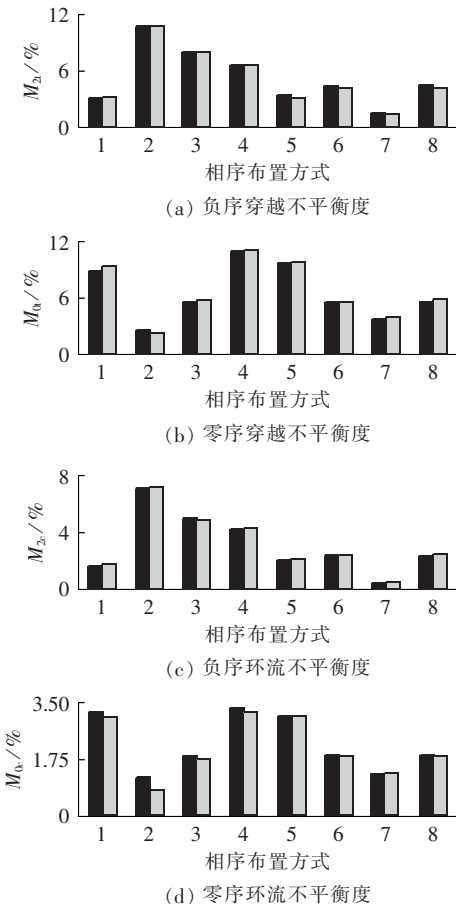


图 4 不同相序布置下输电线路不平衡度
Fig.4 Unbalance degrees of transmission line for different phase-sequence layouts

体线路不平衡度最大,该结论表明,提出的三相不平衡度衡量方法具有实用、便捷的特点,能够正确选择出线路最优与最劣相序布置方式。

b. 在不同相序布置方式下避雷线对线路不平衡度的影响与线路长度对不平衡度影响的结论相同,表明避雷线的运行方式不影响最优相序的选择。

4 结论

提出了表征不平衡度物理本质的衡量指标计算方法,计算了考虑避雷线影响同塔多回输电线路电气参数,并基于 PSCAD 软件,仿真分析了不同长度、不同相序以及避雷线连接方式对 110 kV 同塔 6 回输电线路不平衡度的影响,并对 2 种方法进行对比。结果表明,提出的输电线路不平衡度衡量方法,有着实用、便捷、准确的特点,能够体现输电线路三相不平衡的物理本质;在线路其他条件相同情况下,负序不平衡度随着长度增长而增大,相互耦合增强,而零序不平衡度则减小,相互耦合减弱;线路相序布置方式不同时不平衡度也不相同,线路逆相序排列时,线路总体不平衡度最小,因此线路设计时应当优先考虑;避雷线接地连接时不平衡度有所改善,主要体现在对零序不平衡度的影响,避雷线接地运行时对零序耦合有减弱的作用,且愈靠近避雷线影响愈大。在实际工程设计中,要结合电磁场强度、无线电干扰、避雷线损耗等特性进行综合考虑。

参考文献:

[1] 李博通,李永丽,景雷,等. 同塔双回线的并联电抗器补偿方式研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):23-27.
LI Botong,LI Yongli,JING Lei,et al. Shunt reactor compensation scheme for dual parallel lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):23-27.
[2] 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.
- [3] 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.
- [4] 施春华, 卢洵, 邹军, 等. 采用传输矩阵方法的多回超/特高压交流输电线路的电气不平衡度计算[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 39-44.
- SHI Chunhua, LU Xun, ZOU Jun, et al. Calculation on electrical unbalance of multi-circuit EHV/UHV transmission lines by transmission matrix[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 39-44.
- [5] 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.
- [6] SIMA Wenxia, ZHOU Yuan, YUAN Tao, et al. Analysis on phase arrangement and transposition modes for UHV DC and double-circuit EHV AC transmission line built on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3133-3139.
- [7] 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): 1-5.
- ZHANG Yaoqiang, ZHANG Tianguang, WANG Yuping, 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): 1-5.
- [8] 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.
- [9] 王晓彤, 林集明, 班连庚, 等. 广东 500 kV 同塔四回线路相序排列的选择[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 87-91.
- WANG Xiaotong, LIN Jiming, BAN Liangeng, et al. Selection of phase sequence arrangement for Guangdong 500 kV Power transmission line adopting structure of four circuits on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 87-91.
- [10] 张广洲, 张业茂, 万保权, 等. 特高压同塔双回线路导线布置的优化[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1839-1843.
- ZHANG Guangzhou, ZHANG Yemao, WANG Baoquan, et al. Optimization of conductor configuration for UHV double-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1839-1843.
- [11] 张龙伟, 吴广宁, 朱军, 等. 耦合因素对特高压交流同塔双回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.
- [12] 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 Jinquan, LUO Longbo, et al. Analysis of secondary arc current on un-transposed high voltage transmission line in regional power grid[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1501-1508.
- [13] 常文华. 特高压长距离输电线路换位问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- CHANG Wenhua. Study on transposition of UHV long distance transmission line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [14] 周冠波, 李晓华, 蔡泽祥, 等. 同杆多回输电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.
- [15] 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.
- [16] 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): 7-11.
- JIN Xi, WU Wenhui, WU Shimin. 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): 7-11.
- [17] 吴文辉. 同塔多回输电线路不平衡度分析及相序布置优化研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2011.
- WU Wenhui. Research on electric unbalanced degree of multi-circuit transmission line on the same tower and the optimization of the phase sequence arrangements[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011.

作者简介:



王育飞

王育飞(1974—),男,安徽肥东人,副教授,博士,主要研究方向为同塔多回输电技术、电能质量分析与控制等(E-mail:wangyufei@shiep.edu.cn);

徐兴(1990—),男,江西乐平人,硕士研究生,通讯作者,主要研究方向为同塔多回输电技术、电能质量分析与控制等(E-mail:super_xuxing@163.com);

薛花(1979—),女,江苏无锡人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:xuehua@shiep.edu.cn)。

(下转第 121 页 continued on page 121)

Optimal FEVR configuration of generation units in multi-machine power system

ZHOU Yun¹, YAN Zheng¹, LI Naihu^{1,2}, CAO Lu³

- (1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Alstom Grid China Technology Center, Shanghai 201114, China;
3. East China Grid Company Limited, Shanghai 200120, China)

Abstract: Since the increase of unit FEVR (Force Excitation Voltage Ratio) may improve the transient stability of multi-machine power system, an algorithm for the optimal unit FEVR configuration of multi-machine power system is studied. An OMIB (One-Machine-Infinite-Bus) model of multi-machine power system is built to calculate quantitatively its transient stability margin. The influence of FEVR on the transient stability margin is modeled respectively in brushless excitation and static excitation modes, based on which, an algorithm for the optimal unit FEVR configuration of multi-machine power system is proposed, which preferentially increases the FEVRs of the units with low transient stability marginal cost during single system fault while increases the FEVRs of the units with low probabilistic transient stability marginal cost during multiple system faults. The FEVRs of IEEE 3-machine 9-bus system and New England system are optimized with the proposed algorithm and the simulative results show that the system with the proposed optimal FEVR configuration has better transient stability.

Key words: electric generators; force excitation voltage ratio; electric excitation; optimization; transients; stability; models

.....
(上接第 112 页 continued from page 112)

Measuring unbalance degree of multi-circuit transmission lines on same tower with consideration of lightning conductor

WANG Yufei, XU Xing, XUE Hua

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: For the optimal design and operation of multi-circuit transmission lines on same tower, their impedance parameters are calculated with the influences of lightning conductors considered and a method of measuring the line unbalance degree is proposed, which characterizes its physical nature. The unbalance degree of six-circuit transmission lines on same tower is simulated and calculated with PSCAD software and the influence of lightning conductor connection pattern on the line unbalance degree is analyzed for different line lengths and different phase sequence layouts. Results show that, being practical and convenient, the proposed method can precisely reflect the property of line unbalance and select the optimal phase sequence layouts; the lightning conductor connection pattern is the main influencing factor of line zero-sequence unbalance degree.

Key words: electric power transmission; multi-circuit transmission lines on same tower; lightning conductor; unbalance degree; phase sequence layout; computer simulation