

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

王育飞, 徐 兴, 薛 花

(上海电力学院电气工程学院, 上海市 200090)

摘要: 为了解决同塔六回输电线路存在的三相不平衡问题, 首先对线路阻抗矩阵进行解耦计算, 推导出负序、零序电流表达式, 然后提出基于线路不对称参数补偿的不平衡抑制方法, 理论计算了补偿电容参数, 最后以广东某同塔六回输电线路为例, 在 PSCAD 环境下进行仿真分析。结果表明, 对于同塔六回输电线路, 优化导线间距、优化相序布置等方法仍无法使不平衡度达到要求时, 考虑合理配置补偿电容补偿线路不对称参数能够进一步减小线路不平衡度, 该结论对同塔六回或更高回输电线路的不平衡抑制问题有实际指导意义。

关键词: 同塔六回输电线路; 不平衡度; 抑制方法

0 引言

同塔多回输电技术具有节约土地资源、优化输电网结构、增大输电容量、节约电力建设成本等优势, 是一种新型输电技术, 在全国各地已广泛运用并取得了显著的经济效益^[1]。同塔多回输电线路由于线与线之间、线与地之间的位置不对称, 造成线路电气参数的三相不对称, 从而导致电力系统三相不平衡, 过大的负序、零序电流和电压对电力系统继电保护装置、发电机、变压器等设备造成不利影响^[2]。因此, 研究相应的抑制措施对同塔多回输电线路的优化设计与运行有着重要的现实意义。

目前同塔双、四回输电线路不平衡抑制方法, 主要有优化导线间距、选择最优相序布置、选择最优换位方式等。优化导线间距是较有效的抑制方法, 导线间距增大, 导线间电磁耦合将大幅下降, 但受到杆塔本身限制, 效果有限。改变线路相序布置能够改变线路间耦合程度, 众多研究结果表明, 导线逆相序布置时相间耦合相互抵消的分量达到最大, 能够有效地抑制不平衡问题, 并且逆相序布置可行性高, 是目前同塔双、四回输电线路最主要抑制不平衡问题的措施, 文献^[3-11]使用最优相序布置即逆相序布置来抑制同塔多回线路的不平衡问题。线路采用最优换位方式能够很好地抑制单回以及同塔双回线路的不平衡问题, 文献^[12-14]研究了同塔双回输电

路不同换位方式对不平衡度的影响, 并提出了最优换位方式, 但对于同塔四回或更高回输电线路, 难以通过线路换位达到完全平衡, 而且结构复杂、可行性低, 因此该方法应用范围非常有限。合理配置无功补偿装置对线路参数进行补偿能够从根本上抑制不平衡问题, 文献^[15]通过合理配置补偿电容, 解决了单回不换位线路的不平衡问题, 但对同塔多回线路未做深入分析。

对于同塔六回输电线路, 目前已有省份投入运行。由于输电结构更加紧凑, 难以通过线路换位、优化导线间距来减小线路不平衡度, 不平衡问题的抑制措施研究很少, 已有相关研究与运行数据表明, 对于同塔六回输电线路, 相序采用逆相序布置时仍存在较大三相不平衡^[16-17]。本文在深入研究不平衡问题本质的基础上, 以广东某同塔六回输电线路实际工程为例, 分析了同塔六回输电线路不平衡问题的抑制方法, 并基于 PSCAD 软件进行了仿真实验。

1 不平衡度衡量方法

目前众多文献对同塔多回输电线路不平衡度的定义已非常明确: 同塔多回输电线路不平衡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^[17-20]。

当输电线路末端短路时, 在线路首端施加正序电压, 则负序、零序电磁穿越型不平衡度 M_{2t} 和 M_{0t} , 负序、零序电磁环流型不平衡度 M_{2c} 和 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_{2tm} 和第 m 回与第 n 回线路之间负序电磁环流型不平衡度 M_{2cm} 如式(1)所示。

收稿日期: 2014-07-07; 修回日期: 2014-10-11。

国家自然科学基金资助项目(51177098); 上海市教委科研创新基金资助项目(12YZ138); 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1418000, 15ZR1418200)。

$$\begin{cases} M_{2tm} = \left| \frac{\dot{I}_{dm2}}{\dot{I}_{dm1}} \right| \times 100\% \\ M_{2cmn} = \left| \frac{\dot{I}_{dm2} - \dot{I}_{dn2}}{\dot{I}_{dm1} + \dot{I}_{dn1}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{I}_{dm1} 为第 m 回线路末端短路正序电流; \dot{I}_{dm2} 为第 m 回线路末端短路负序电流; \dot{I}_{dn1} 为第 n 回线路末端短路正序电流; \dot{I}_{dn2} 为第 n 回线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线路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型不平衡度 M_{2t} 和负序电磁环流不平衡度 M_{2c} , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} M_{2t} = \max\{M_{2t1}, M_{2t2}, \dots, M_{2ti}\} \\ M_{2c} = \max\{M_{2c12}, M_{2c13}, \dots, M_{2c(i-1)i}\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_{2ti} 为第 i 回线路负序电磁穿越型不平衡度; $M_{2c(i-1)i}$ 为第 $i-1$ 回线路与第 i 回线路之间的负序电磁环流型不平衡度; 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_{0tm} 和第 m 回与第 n 回线路之间零序电磁环流型不平衡度 M_{0cmn} 分别为:

$$\begin{cases} M_{0tm} = \left| \frac{\dot{I}_{dm0}}{\dot{I}_{dn0}} \right| \times 100\% \\ M_{0cmn} = \left| \frac{\dot{I}_{dm0} - \dot{I}_{dn0}}{\dot{I}_{dm1} + \dot{I}_{dn1}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_{dm0} 为第 m 回线路末端短路零序电流; \dot{I}_{dn0} 为第 n 回线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零序电磁穿越型不平衡度 M_{0t} 和电磁环流型不平衡度 M_{0c} , 如式(4)所示。

$$\begin{cases} M_{0t} = \max\{M_{0t1}, M_{0t2}, \dots, M_{0ti}\} \\ M_{0c} = \max\{M_{0c12}, M_{0c13}, \dots, M_{0c(i-1)i}\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_{0ti} 为第 i 回线路零序电磁穿越型不平衡度; $M_{0c(i-1)i}$ 为第 $i-1$ 回线路与第 i 回线路之间的零序电磁环流型不平衡度。

当输电线路末端开路时, 在线路首端施加正序电压, 则第 m 回线路的负序静电不平衡度 D_{2m} 和第 m 回线路的零序静电不平衡度 D_{0m} 可分别定义为:

$$\begin{cases} D_{2m} = \left| \frac{\dot{I}_{om2}}{\dot{I}_{om1}} \right| \times 100\% \\ D_{0m} = \left| \frac{\dot{I}_{om0}}{\dot{I}_{om1}} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\dot{I}_{om1}, \dot{I}_{om2}, \dot{I}_{om0}$ 分别为第 m 回线路正、负、零序末端开路电流。

取各回路的负序、零序静电不平衡度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 和 D_0 , 如式(6)所示。

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

式中: D_{2i} 为第 i 回线路负序静电不平衡度; D_{0i} 为第 i 回线路零序静电不平衡度。

2 基于线路不对称参数补偿的不平衡抑制方法

2.1 最优相序布置法的局限性

由卡森公式可知^[7], 当输电线路所在地区、线路型号、分裂方式等条件确定以后, 自阻抗系数为固定值, 互阻抗系数与导线间距有关, 线路相序排列不同, 每相之间相互耦合增强、抵消的程度也不同, 最优相序布置法的局限性在于, 采用最优相序布置的方法, 只能使得多回线路间互相耦合抵消的分量最大, 无法使得耦合完全抵消而消除不平衡。

对于同塔六回输电线路, 其与四回结构有所不同, 不平衡程度更大, 目前研究较少, 并且实际运行的同塔六回输电线路若只简单地采用逆相序布置法, 不平衡度仍然难以达到要求, 因此在最优相序布置法的基础上, 提出基于线路参数补偿的不平衡抑制方法。

2.2 不对称参数补偿法

文献[15]指出, 对于单回输电线路, 当线路互阻抗系数为零时, 线路三相完全对称; 当线路互感系数均相等时, 线路只存在零序耦合, 负序不平衡度为零。基于该思路, 提出的同塔多回输电线路补偿方法分析如下。

同塔六回线路参数补偿示意图如图 1 所示。

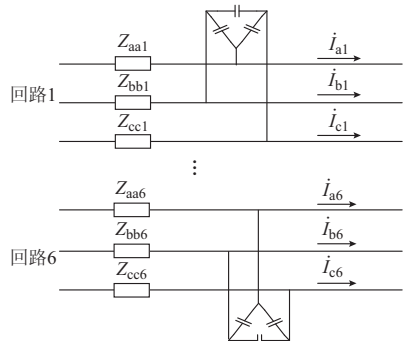


图 1 同塔六回线路参数补偿法示意图
Fig.1 Parameters compensation diagram for six-circuit transmission lines on the same tower

由于补偿电容装置附加在每回线路内,只能补偿相间阻抗矩阵参数,对于回路间阻抗无法补偿。因此为简化计算,选择以单回输电线路为例,根据可行条件,未采取补偿措施时,单回线路电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ 分别为单回线路电压、电流; Z_{AA}, Z_{BB}, Z_{CC} 为线路自阻抗; $Z_{BA}, Z_{CA}, Z_{CB}, Z_{AC}, Z_{BC}, Z_{AB}$ 为线路互阻抗。

将阻抗矩阵求逆得到导纳矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} X & P & Q \\ P & Y & R \\ Q & R & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta = Z_{AA}^3 - Z_{AA}(Z_{BC}^2 + Z_{AC}^2 + Z_{AB}^2) + 2Z_{AB}Z_{AC}Z_{BC} \\ X = Z_{AA}^2 - Z_{BC}^2 \\ Y = Z_{BB}^2 - Z_{AC}^2 \\ Z = Z_{CC}^2 - Z_{AB}^2 \\ P = Z_{BC}Z_{AC} - Z_{AA}Z_{AB} \\ Q = Z_{AB}Z_{BC} - Z_{AA}Z_{AC} \\ R = Z_{AB}Z_{AC} - Z_{AA}Z_{BC} \end{cases} \quad (9)$$

相电流通过对称分量变换得到序电流表达式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \mathbf{S} \begin{bmatrix} X & P & Q \\ P & Y & R \\ Q & R & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ 为线路正序、负序、零序电流分量; \mathbf{S} 为 3 阶对称分量变换矩阵; $a = e^{j120^\circ}$ 。

化简后得到电流正、负、零序表达式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 & \dot{I}_2 & \dot{I}_0 \end{bmatrix}^T = \frac{1}{3\Delta} \begin{bmatrix} (X+Y+Z)+2(P+Q+R) \\ (X+2R)+(Y+2Q)a+(Z+2P)a^2 \\ (X+P+Q)+(Z+Q+R)a+(Y+P+R)a^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据线路不平衡度衡量方法,由式(12)可得线路正序、负序、零序电流模量表达式为:

$$\begin{cases} |\dot{I}_1| = X+Y+Z+2(P+Q+R) \\ |\dot{I}_2| = \left\{ \frac{1}{3} [(X-Y+2(R-Q))^2 + (Y-Z+2(Q-P))^2 + (X-Z+2(R-P))^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ |\dot{I}_0| = \left\{ \frac{1}{4} [(P-R)+(Q-R)+2X-2Y-Z]^2 + \frac{3}{4} [(Q-P)+(Z-Y)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)可得,对于线路负序电流,当线路导纳矩阵元素 X, Y, Z 之间, P, Q, R 之间差值越小,则线路负序电流越小,当 X, Y, Z 之间, P, Q, R 之间差值为零时,线路负序电流理论值为零。可见,线路不平衡度大小对 X, Y, Z 之间, P, Q, R 之间差值具有敏感性。

不同线路情况下导纳矩阵元素之间差值大小不同,差值越大则线路负序、零序电流越大,表明线路耦合程度较高,不平衡度较大。因此,采用添加补偿电容的方法,调节线路导纳矩阵参数,单回线路参数补偿示意图如图 2 所示。

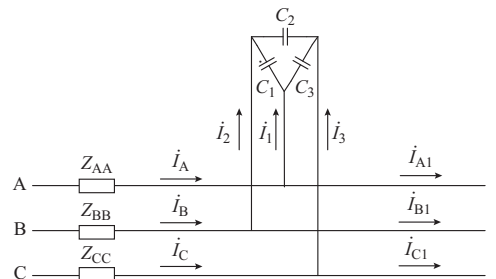


图 2 单回线路参数补偿示意图
Fig.2 Parameters compensation diagram for single-circuit transmission line

根据电路原理,可以得到补偿电容端口电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} C_1+C_2 & -C_1 & -C_2 \\ -C_1 & C_1+C_3 & -C_3 \\ -C_2 & -C_3 & C_2+C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (14)$$

则添加补偿电容设备后,线路的端口电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_A - \dot{I}_1 \\ \dot{I}_B - \dot{I}_2 \\ \dot{I}_C - \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - j\omega(C_1 + C_2) & P + j\omega C_1 & Q + j\omega C_2 \\ P + j\omega C_1 & Y - j\omega(C_1 + C_3) & R + j\omega C_3 \\ Q + j\omega C_2 & R + j\omega C_3 & Z - j\omega(C_2 + C_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' & P' & Q' \\ P' & Y' & R' \\ Q' & R' & Z' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (15)$$

由式(13)可得,对于添加补偿设备后的新导纳矩阵中,当 $P'=Q'=R', X'=Y'=Z'$ 时,负序、零序电流将达到最小。按照补偿后使 P', Q', R' 间及 X', Y', Z' 间配置相等的思路,完全满足式(16)对线路进行补偿时,线路不平衡度达到最小。

$$\begin{cases} X - j\omega(C_1 + C_2) = Y - j\omega(C_1 + C_3) = \\ Z - j\omega(C_2 + C_3) \\ P + j\omega C_1 = Q + j\omega C_2 = R + j\omega C_3 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中能够调节的参数值只有 C_1, C_2, C_3 ,因此式(16)中两个条件无法同时满足,根据式(13)所得负序电流模量表达式,子项 $R-Q, Q-P, R-P$ 均带有系数2,而其他子项系数为1,因此负序电流大小对 P, Q, R 之间差值更为敏感,配置补偿电容参数时可优先考虑满足等式 $P + j\omega C_1 = Q + j\omega C_2 = R + j\omega C_3$ 。补偿线路参数使得负序分量减小的同时也会造成正序分量的减小,因此补偿电容值不宜过大。

同理,式(16)能够推广到任意回同塔输电线路,限于篇幅,推导过程在此不做重复。

3 不平衡抑制方法仿真分析

3.1 背景资料

以广东某实际110 kV同塔六回输电线路工程为例,杆塔模型见附录A图A1。六回线路采用垂直排列方式,总高度51 m,呼称高度18 m。导线型号为LGGJ-630/45,总直径为33.6 mm(总直径包含钢芯和绞线的直径,下同),单位直流电阻为0.046 33 Ω /km;地线型号为LBGJ-75-40AC,总直径为11.25 mm,单位直流电阻为0.562 7 Ω /km。

在PSCAD中建立同塔六回输电系统模型,如附录A图A2所示,设置首端电压110 $\angle 0^\circ$ kV,电源正、负、零序阻抗均相等,短路容量为750 MVA。

3.2 最优相序布置仿真

同塔六回输电线路相序布置有 $6^6 = 46\ 656$ 种相序布置方式,但实际可行的布置方式一般只有典型的8种,布置方式如表1所示,针对该8种典型布置方式进行仿真分析,仿真结果如表2所示。

分析对比仿真结果可得到以下结论。

1)对于负序不平衡度,在8种典型的布置方式中,方式7即逆相序布置为最优布置;对于零序不平衡度,方式2为最优相序布置。

表1 8种典型相序布置方式
Table 1 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

表2 8种典型相序布置方式不平衡度
Table 2 Unbalanced degree of eight typical phase sequence layouts

布置方式	M_{2t}	M_{0t}	M_{2c}	M_{0c}	D_2	D_0
方式1	5.151	11.923	1.673	5.241	4.913	11.271
方式2	10.813	2.386	7.112	1.227	12.974	2.934
方式3	8.014	5.887	5.021	1.738	8.989	6.793
方式4	6.851	10.921	4.173	3.387	7.613	11.387
方式5	3.732	9.892	2.019	3.101	3.938	9.713
方式6	4.245	5.812	2.357	1.836	4.763	5.887
方式7	3.186	5.953	1.817	4.314	2.756	6.013
方式8	4.316	5.721	2.438	1.843	4.013	5.916

2)即使采用最优相序布置即逆相序布置时,零序最大不平衡度仍有6.013%,负序为3.186%,这与线路回路数多、结构较同塔四回更加紧凑是相关联的,说明对于同塔六回以及更高回输电线路,选择最优相序布置不平衡度仍有可能过高,因此应考虑合理配置补偿电容补偿线路不对称参数以进一步减小不平衡度。

3.3 补偿线路不对称参数仿真

根据2.2节讨论得知,通过补偿电容设备的配合,对线路参数进行调整,使得每回线路内的 P, Q, R 间及 X, Y, Z 间尽可能相近,能够有效抑制线路负序、零序电流,从而减小线路的不平衡度。针对3.2节负序不平衡度最优相序布置方式即方式7,通过3.1节所提供的系统资料可以得到线路的阻抗参数矩阵,并通过计算得到各回路理论补偿参数。考虑到实际情况中补偿电容的不连续性,在仿真时采用工程中电容实际值,补偿电容参数以及仿真结果如表3、表4所示。

分析对比仿真结果可以得到,配置补偿电容以后,线路负序不平衡度得到了很好的抑制,零序不平衡度也有所减小。因此,通过合理配置补偿电容的

参数,能够对线路参数进行合理的调整,达到减小线路参数不平衡的目的,从而在根本上减小了同塔六回输电线路的不平衡度,对于同塔六回以及更高回输电线路的不平衡抑制有着现实指导意义。

表 3 补偿参数
Table 3 The compensating parameter

回路	理论值/ μF			实际值/ μF		
	AB 相间	BC 相间	AC 相间	AB 相间	BC 相间	AC 相间
1	11.349	11.349	0	10	10	0
2	12.054	12.054	0	10	10	0
3	15.248	15.248	0	16	16	0
4	15.765	15.765	0	16	16	0
5	17.639	17.639	0	16	16	0
6	17.084	17.084	0	16	16	0

表 4 仿真结果对比
Table 4 Comparison of simulation results

配置电容前后	M_{2t}	M_{0t}	M_{2c}	M_{0c}	D_2	D_0
配置电容前	3.186	5.953	1.817	4.314	2.756	6.013
配置电容后	1.843	5.035	1.097	4.037	2.714	6.473

4 结论

针对同塔六回输电线路的不平衡问题,提出了基于线路不对称参数补偿的不平衡抑制方法,并根据实例进行了仿真验证,得到以下结论。

1) 线路按方式 7 逆相序布置能很好地抑制线路负序不平衡度,按方式 2 布置能很好地抑制线路零序不平衡度;在进行线路优化设计时应根据具体线路情况选择最优相序布置。

2) 对于同塔六回或更高回输电线路,若相序布置、导线间距已最优的情况下不平衡度仍无法满足需要,则应考虑合理配置补偿电容,补偿线路参数来减小线路不平衡度。

对于同塔多回输电线路不平衡问题的抑制措施,还应该结合建设成本、电磁干扰等因素进行综合考虑。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 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.

[2] 朱忠烈,李建华,祝瑞金,等.同塔 4 回线故障和暂态仿真分析方法[J].电力系统自动化,2008,32(8):49-54.

ZHU Zhonglie, LI Jianhua, ZHU Ruijing, et al. Common tower quadruple circuits fault and transient simulation analysis method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 49-54.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] YANG Changhui, WANG Luyang, WANG Yufei. Computation of unbalance factors for six-circuit transmission line on the same tower [C]// IEEE Power Engineering and Automation Conference, September 8-9, 2011, Wuhan, China: 217-220.

[7] 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.

[8] 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, WAN Baoquan, et al. Optimization of conductor configuration for UHV double-circuits transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1839-1843.

[9] 汲亚飞,邹军.同塔多回线路垂直排列最优相序布置方式[J].高电压技术,2008,34(1):172-175.
JI Yafei, ZOU Jun. Optimized phase sequence arrangements for multiple-loop power lines with vertical arrangements[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 172-175.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 张要强,张天光,王子平,等.1 000 kV 同塔双回输电线路电气

- 不平衡度以及换位问题研究[J].电网技术,2009,33(1):1-4.
ZHANG Yaoqiang, ZHANG Tianguang, WANG Yuping, et al. Research on electric unbalance degree and conductor transposition of 1 000 kV double-circuit transmission line on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 1-4.
- [13] 王晓彤,班连庚,林集明,等.金昌—酒泉 750 kV 同塔双回紧凑型线路换位方式分析[J].电力系统自动化,2009,33(16):102-107.
WANG Xiaotong, BAN Liangeng, LIN Jiming, et al. Comparative analysis on transposing modes for 750 kV compact double-circuit overhead transmission lines on same tower from Jinchang to Jiuquan[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 102-107.
- [14] 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 (in Chinese), 2012, 38(12): 3133-3139.
- [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] 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.
- [17] 赵艳军,陈晓科,杨汾艳,等.一起同塔四回线路三相不平衡引起的母联断路器零序保护告警事件分析[J].广东电力,2014,27(7):73-77.
ZHAO Yanjun, CHEN Xiaoke, YANG Fenyan, et al. Analysis on an alarm event of bus coupler breaker zero-sequence protection caused by three-phase imbalance of quadruple-circuit transmission line on the same tower [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(7): 73-77.
- [18] 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.
- [19] IEEE standards report on state of the art of measuring unbalanced transmission-line impedance[S]. 1971.
- [20] ANDERSON P M.电力系统故障分析[M].北京:电力工业出版社,1980.

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

徐兴(1990—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:同塔多回输电技术、电能质量分析与控制。E-mail: super_xuxing@163.com

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

(编辑 万志超)

Unbalance Suppression of Six-circuit Transmission Lines on Same Tower Based on Asymmetrical Parameters Compensation

WANG Yufei, XU Xing, XUE Hua

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

Abstract: In order to solve the problem of three-phase unbalance of six-circuit transmission lines on the same tower, firstly decoupling calculation of the line impedance matrix is carried out and the expressions of the sequence currents are deduced. Then a method of eliminating unbalance based on compensation of asymmetrical line parameters is proposed, with the parameters of compensation capacitors calculated in theory. Finally, based on an actual project of six-circuit transmission lines on the same tower in Guangdong Province, corresponding simulation is done using the software of PSCAD. Results show that unbalance of six-circuit transmission lines on the same tower are still not able to meet the requirements with the methods of optimizing wire spacing, optimal layout of line phase sequences, etc. So the method of allocating compensation capacitors appropriately should be considered to further reduce the line unbalance. This conclusion has a certain practical significance for eliminating the unbalance of six or more circuit transmission lines on the same tower.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177098), Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (No. 12YZ138) and Shanghai Natural Science Foundation (No. 15ZR1418000, No. 15ZR1418200).

Key words: six-circuit transmission lines on same tower; unbalance degree; suppression method