Π模型电容电流补偿的同塔四回线电流差动保护

邰能灵[1]，郭培育[1]，于仲安[1]，范春菊[2]

(1. 江西理工大学电气工程与自动化学院，江西 赣州 341000；2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240)

摘要：分析了超高压同塔四回线长距离输电线路分布电容对传统电流差动保护的影响。在此基础上，考虑同塔四回线相间及线间的电磁耦合，建立对应频域及时域下的同塔四回线 12 序(模)分量 Π 型等值电路模型，并基于各序(模)量等值电路分别提出频域及时域电容电流补偿方法。对无电容电流补偿，频域相量电容电流补偿及时域电容电流补偿等不同电流差动保护方案动作性能进行对比，结果表明在不同运行条件下采用时域补偿具有更佳的保护性能。

关键词：同塔四回线；电流差动保护；电容电流补偿；时域补偿

Current differential protection using capacitive current compensating algorithm on Pi-model for four-parallel lines on same towers

TAI Nengling[1], GUO Peiyu[1], YU Zhongan[1], FAN Chunju[2]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the study about the influence of the distributed capacitance current of long-distance four-parallel lines on same tower on differential current protection, the Pi-mode circuit for the twelve-sequence (mode) networks is established. On this basis, the paper presents a novel time-domain capacitive current compensating algorithm and phasor capacitive current compensation method. Both of two capacitive current compensating algorithms take account of the electromagnetic coupling between the lines. It comparatively analyzes the characteristics of current differential protection schemes such as non-capacitance current compensating, phasor-domain capacitance current compensating and time-domain capacitance current compensating. Simulation results verify that the setting value of differential protection and selectivity and sensitivity of differential protection have been obviously improved by using the time-domain capacitive current compensating algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177066 and No. 51377104).

Key words: four-parallel transmission lines on the same tower; current differential protection; capacitive current compensating; time-domain compensating

中图分类号： TM77 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0034-09

0 引言

同塔四回输电线路能够有效提高单位走廊的输电容量，降低建设成本及节约建设用地，在电力系统中的应用越来越广泛[1-3]。与传统单回线相比，同塔四回输电线导线数目更多，线间距离更近，因此，要求同塔四回线继电保护装置具有可靠的选相跳闸能力。分相电流差动保护无疑是其首选[4-8]。

对于超高压长距离输电线路，分布电容电流较大，尤其在故障暂态过程中导致线路中电流、电压的大小及相位都可能发生严重的畸变，从而影响电流差动保护可靠性和灵敏度[9]。目前大量文献主要集中于对单回线电流差动保护的电容电流补偿问题的研究[10-15]。文献[10]利用电压相量及导纳计算出电容电流然后对电流相量进行补偿，对故障后稳态阶段的电容电流补偿效果有较好的效果。文献[11-12]提出了基于贝瑞隆模型的差动保护方案，该方法能够克服电容电流的影响，但现有保护装置的采样频率无法满足原

基金项目：国家自然科学基金项目(51177066，51377104)

理要求，难以实用化。文献[14-15]提出了基于Π型等值线路的电容电流时域补偿方法，从原理上来看能够有效补偿暂态和稳态电容电流。但该方法对同塔多回线线间的电容电流补偿未作分析。

本文分析超高压同塔四回线长距离输电线路(500 kV)分布电容电流对电流差动保护动作特性的影响。考虑到同塔四回线相间及线间存在的电磁耦合，分别建立对应相量及时域下的同塔四回线 12 序(模)量Π型等值电路模型，并提出基于频域相量及时域状态下各序(模)分量Π型等值电路的两种不同的电容电流补偿方法。

1　传统电流差动保护判据动作特性分析

传统的数字式电流差动保护判据为[5]

$$|\dot{I}_{\mathrm{m}}+\dot{I}_{\mathrm{n}}|>\dot{I}_{\mathrm{set}} \tag{1}$$

$$|\dot{I}_{\mathrm{m}}+\dot{I}_{\mathrm{n}}|>k|\dot{I}_{\mathrm{m}}-\dot{I}_{\mathrm{n}}| \tag{2}$$

式中：$\dot{I}_{\mathrm{m}}$、$\dot{I}_{\mathrm{n}}$分别为 m 和 n 侧电流相量；$\dot{I}_{\mathrm{set}}$为设定值；k 表示制动系数，一般取 $0<k<1$；式(1)为辅助判据，式(2)为主判据，当两式同时成立时，保护动作并跳闸。

电流差动保护应用于同塔四回线时动作特性分析如下：

(1) 当同塔四回线路处于空载运行或空载合闸状态时，此时线路负荷电流为零，计及线路分布电容时，流经两侧母线的均为电容电流，则式(2)总是成立。当线路电压等级较高(500 kV)以上，线路长度增加时，单回输电线路的差动电流逐渐上升，则判据(1)的设定值应按照躲过最大制动电流门槛值设定，保护的灵敏度将受到影响。如对本文讨论的同塔四回线路，当线路长度达到 300 km 时，差动电流将达到 600 A 以上，保护灵敏度将大大降低。图 1 所示为单回线与四回线空载运行时的电流[16]。

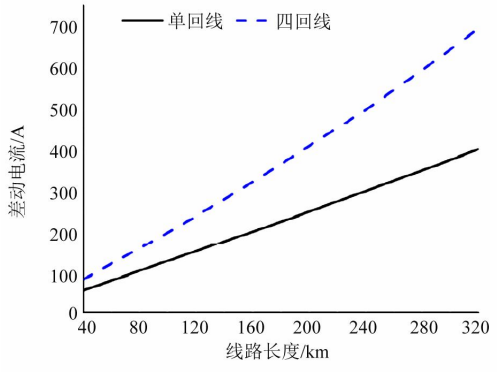


图 1 单回线与四回线空载运行时的差动电流

Fig. 1 Differential current of single line and quadruple-lines on the same tower

(2) 超高压线路如果经过山区，单相接地故障时的接地电阻一般比较高，在区内发生故障时两端电流之和的绝对值可能小于设定值，从而导致保护拒动。

大多数超高压(500 kV)等级的同塔四回输电线多使用四分裂导线构成相线，并且一般线路均较长，因此线路中产生的电容电流幅值很大，对电流差动保护动作的准确性及灵敏度有严重影响。

2　基于频域电容电流的补偿分析

2.1 同塔四回线频域各序分量Π型等效电路线路模型

典型的四回线路阻抗模型、导纳模型分别如图 2、图 3 所示，参数对称同塔四回线的自阻抗均为 Z_{s}，各回线相间阻抗为 Z_{m}，线间阻抗为 Z_{m}。在考虑分布电容影响的情况下(由于线路漏电导很小，通常忽略电导)。假设每一回路的 A、B、C 三相对称，且每一回路的各相对地导纳(或称自导纳)都为 Y_{s}，每一回路的各相间互导纳为 Y_{m}，任意两回路的线间互导纳为 Y_{x}。

由图 2、图 3 所示的同塔四回线阻抗及导纳模

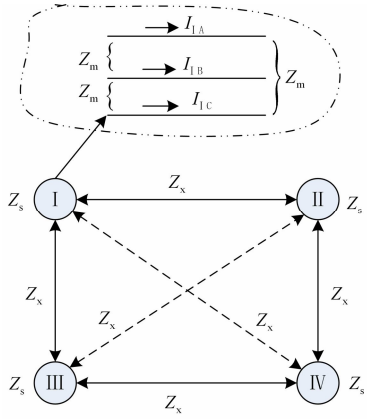


图 2 同塔四回线阻抗模型

Fig. 2 Impedance model of quadruple-lines on the same tower

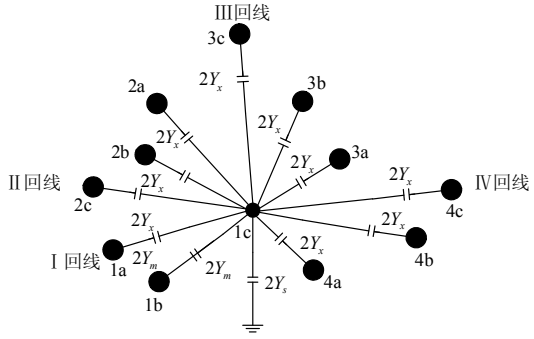


图 3 同塔四回线导纳模型

Fig. 3 Admittance model of quadruple-lines on the same tower

型可知，同塔四回线线间及相间均存在复杂的电磁耦合。为了方便对同塔四回线不对称故障的计算，需要对四回线电气量进行解耦。利用 12 序分量法[17]消除网络方程中的互感耦合，将相电压及相电流分解为 e_1、f_1、g_1、h_1、e_2、f_2、g_2、h_2、e_0、f_0、g_0、h_0 分量。各序分量电压、电流由式(3)求得：

$$\begin{cases} \dot{U}_{efgh012} = M^{-1}\dot{U}_{\mathrm{ABC}} \\ \dot{I}_{efgh012} = M^{-1}\dot{I}_{\mathrm{ABC}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\dot{U}_{\mathrm{ABC}}$ 表示各回线相电压组成的列向量；$\dot{I}_{\mathrm{ABC}}$ 表示各回线相电流组成的列向量；$\dot{U}_{efgh012}$ 表示 12 序电压分量组成的列向量；$\dot{I}_{efgh012}$ 表示 12 序电流分量组成的列向量。

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}
1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
1 & 1 & 0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & 0 & 0 & \alpha & \alpha & 0 & 0 \\
1 & 1 & 0 & 0 & \alpha & \alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & 0 & 0 \\
1 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\
1 & -1 & 1 & 0 & \alpha^2 & -\alpha^2 & \alpha^2 & 0 & \alpha & -\alpha & \alpha & 0 \\
1 & -1 & 1 & 0 & \alpha & -\alpha & \alpha & 0 & \alpha^2 & -\alpha^2 & \alpha^2 & 0 \\
1 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\
1 & 0 & -1 & 1 & \alpha^2 & 0 & -\alpha^2 & \alpha^2 & \alpha & 0 & -\alpha & \alpha \\
1 & 0 & -1 & 1 & \alpha & 0 & -\alpha & \alpha & \alpha^2 & 0 & -\alpha^2 & \alpha^2 \\
1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\
1 & 0 & 0 & -1 & \alpha^2 & 0 & 0 & -\alpha^2 & \alpha & 0 & 0 & -\alpha \\
1 & 0 & 0 & -1 & \alpha & 0 & 0 & -\alpha & \alpha^2 & 0 & 0 & -\alpha^2
\end{bmatrix}$$

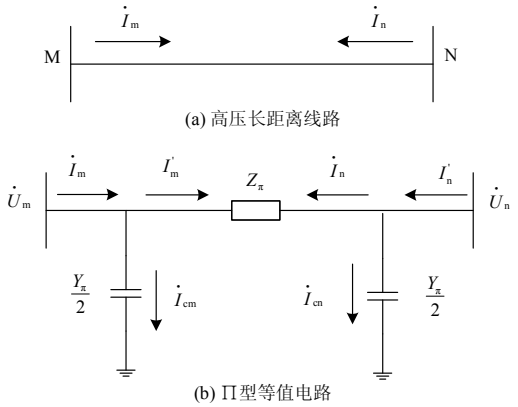
矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中：α=−0.5+j0.866。利用 12 序分量法解耦后得到的阻抗及导纳序分量如表 1 所示。

表 1 12 序分量法阻抗及导纳参数

Table 1 Impedance and admittance of 12-sequence components

序分量	阻抗			导纳		
	零序分量	正序分量	负序分量	零序分量	正序分量	负序分量
e 序分量	$Z_s+2Z_m+9Z_x$	Z_s-Z_m	Z_s-Z_m	Y_s	$Y_s+3Y_m+9Y_x$	$Y_s+3Y_m+9Y_x$
f 序分量	$Z_s+2Z_m-3Z_x$	Z_s-Z_m	Z_s-Z_m	Y_s+12Y_x	$Y_s+3Y_m+9Y_x$	$Y_s+3Y_m+9Y_x$
g 序分量	$Z_s+2Z_m-3Z_x$	Z_s-Z_m	Z_s-Z_m	Y_s+12Y_x	$Y_s+3Y_m+9Y_x$	$Y_s+3Y_m+9Y_x$
h 序分量	$Z_s+2Z_m-3Z_x$	Z_s-Z_m	Z_s-Z_m	Y_s+12Y_x	$Y_s+3Y_m+9Y_x$	$Y_s+3Y_m+9Y_x$

Π 型等值电路是典型的集中参数线路模型电路。由于它的幅频特性更接近于实际的分布参数线路，在分析高压长距离输电线路的继电保护动作行为时比较常用。图 4 所示为高压长线等值接线和等效网络图。



(a) 高压长距离线路

(b) Π型等值电路

图 4 高压长线等值接线及Π型等值电路

Fig. 4 Pi equivalent connection and circuit of transmission line

图 4 中等效阻抗与等效导纳满足式(4)。

$$\begin{cases} Z_\pi = Z_{c\pi} sh\gamma_\pi l \\ Y_\pi = \dfrac{2(ch\gamma_\pi l - 1)}{Z_{c\pi} sh\gamma_\pi l} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$Z_{c\pi} = \sqrt{Z/Y}$ 表示等值电路的线路波阻抗；$\gamma_\pi = \sqrt{ZY}$ 为等值电路的线路传输系数；Z、Y 为线路单位长度阻抗及导纳；l 为线路全长。

在分析同塔四回路输电线不对称短路状态时，可把四回线各相系统分解为 12 序分量，由表 1 可知经 12 序分量法解耦得到阻抗与导纳序分量满足

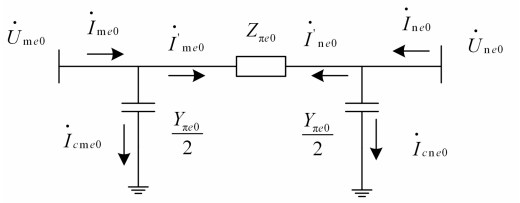
$$\begin{cases} Z_{e1} = Z_{e2} = Z_{f1} = Z_{f2} = Z_{g1} = Z_{g2} = Z_{h1} = Z_{h2} \\ Z_{f0} = Z_{g0} = Z_{h0} \\ Y_{e1} = Y_{e2} = Y_{f1} = Y_{f2} = Y_{g1} = Y_{g2} = Y_{h1} = Y_{h2} \\ Y_{f0} = Y_{g0} = Y_{h0} \end{cases} \tag{5}$$

此时各序分量仍然满足长线路基本方程，图 5 给出了同塔四回线长线路各序网络的Π型等效电路。

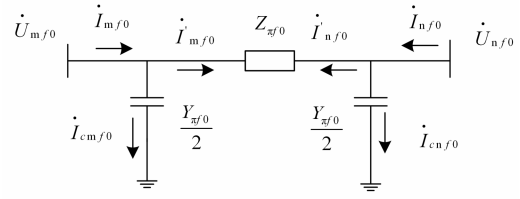
此时各模分量等值参数的表达式为

$$\begin{cases} Z_{\pi ij} = Z_{cij} sh\gamma_{ij} l \\ Y_{\pi ij} = \dfrac{2(ch\gamma_{ij} l - 1)}{Z_{cij} sh\gamma_{ij} l} \\ Z_{cij} = \sqrt{\dfrac{Z_{ij}}{Y_{ij}}} \\ \gamma_{ij} = \sqrt{Z_{ij} Y_{ij}} \end{cases} \quad (i = e, f, g, h.\ j = 0,1,2) \tag{6}$$

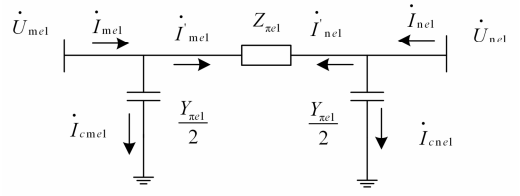
当线路正常运行或区外发生故障时，由基尔霍夫电流定律可知，两端电流向量和为零，对于高电压长距离输电线路，线路分布电容电流不能忽略。



(a) e_0序分量Π型等效电路



(b) $f_0(g_0,h_0)$序分量Π型等效电路



(c) $e_1(e_2,f_1,f_2,g_1,g_2,h_1,h_2)$序分量Π型等效电路

图 5 同塔四回线相量下各分量Π型等效电路

Fig. 5 Pi equivalent circuit of 12-sequence components

由图 4 所示Π型等效电路可知 $\dot{I}_{\mathrm{m}}+\dot{I}_{\mathrm{n}}=\dot{I}_{\mathrm{cm}}+\dot{I}_{\mathrm{cn}}\neq 0$。从而可能导致保护误动，因此必须对电容电流进行补偿。考虑到若采用全补偿方式，当线路在无补偿的一侧空载合闸，线路电容电流将无法得到补偿。因此本文讨论半补偿方式。

2.2 同塔四回线电容电流相量补偿

当同塔四回线发生不对称故障时，在如图 5 所示的各分量Π型等效电路中，通过 M、N 两端母线各序分量电压 $\dot{U}_{\mathrm{m}ij}$、$\dot{U}_{\mathrm{n}ij}$。在导纳 $Y_{\Pi ij}/2$ 上的压降来获得各序分量补偿电流，分别记为 $\dot{I}_{\mathrm{bm}ij}$、$\dot{I}_{\mathrm{bn}ij}$：

$$\begin{cases}\dot{I}_{\mathrm{bm}ij}=\dot{U}_{\mathrm{m}ij}\dfrac{Y_{\pi ij}}{2}\\ \dot{I}_{\mathrm{bn}ij}=\dot{U}_{\mathrm{n}ij}\dfrac{Y_{\pi ij}}{2}\end{cases}(i=e,f,g,h.j=0,1,2)\qquad(7)$$

将式(7)获得各序分量补偿电流按照式(8)进行反变换得到各相补偿电流。

$$\begin{cases}\dot{I}_{\mathrm{bmABC}}=M\dot{I}_{\mathrm{bm}efgh012}\\ \dot{I}_{\mathrm{bnABC}}=M\dot{I}_{\mathrm{bn}efgh012}\end{cases}\qquad(8)$$

式中：$\dot{I}_{\mathrm{bmABC}}$表示流经同塔四回线 *m* 端母线各相补偿电流组成的列向量；$\dot{I}_{\mathrm{bnABC}}$表示流经同塔四回线 *n* 端母线各相补偿电流组成的列向量；$\dot{I}_{\mathrm{bm}efgh012}$表示流经 *m* 端母线处的各相电流经解耦后所得各序补偿电流分量组成的列向量；$\dot{I}_{\mathrm{bn}efgh012}$表示流经 *n* 端母线处的各相电流经解耦后所得各序补偿电流分量组成的列向量。

将式(8)所得的各相补偿电流代入式(9)，即可得到频域补偿法补偿后各相的电流。

$$\begin{cases}\dot{I}'_{\mathrm{mABC1}}=\dot{I}_{\mathrm{mABC}}-\dot{I}_{\mathrm{bmABC}}\\ \dot{I}'_{\mathrm{nABC1}}=\dot{I}_{\mathrm{nABC}}-\dot{I}_{\mathrm{bnABC}}\end{cases}\qquad(9)$$

将补偿后各相电流 $\dot{I}'_{\mathrm{mABC1}}$、$\dot{I}'_{\mathrm{nABC1}}$直接代入电流差动保护判据式(1)和式(2)。

3 同塔四回线的时域电容电流补偿

3.1 同塔四回线时域各模量Π型等效电路

在短路故障后的暂态过程中，电容电流为高频分量与工频分量的叠加，比稳态阶段电容电流的值大，上文提出的基于相量的电容电流补偿算法只能对故障后的稳态阶段进行补偿，补偿效果一般。一般说来，利用微分方程模型能够补偿时域下的暂态及稳态过程的电容电流，因此这里进一步讨论适用于同塔四回输电线路时域下的电容电流补偿方法。

同塔四回输电线路的时域电容电流补偿算法步骤如下：

(1) 推导适用于同塔四回线时域解耦矩阵，对采样得到的相电流进行变换，分别得到 12 个独立的模分量及对应模分量的Π型等效电路。

(2) 求解各模分量Π型等效序网中各时刻的待补偿电容电流。

(3) 代入相应公式求取各模分量Π型等效电路补偿后的各时刻线路电流。

(4) 利用推导出的相模反变换矩阵，将补偿后的不同时刻模量电流反变换为相电流。

(5) 求取补偿后各相电流相量值。

由图 3 可知同塔四回线线间及相间均存在复杂的互阻抗及互导纳。因此，有必要在时域状态下对线间电磁耦合进行解耦。以导纳为例，推导时域下同塔四回线解耦矩阵。遵循先相间解耦，后线间解耦的顺序。

式(10)中：$Y_{\mathrm{s}}+2Y_{\mathrm{m}}+9Y_{\mathrm{x}}$；利用 karenbauer 相模变换(矩阵[1 1 1;1 -2 1;1 1 -2]记为 ***M1***)对导纳矩阵先进行相间解耦，运用矩阵 $\boldsymbol{P}_1$($\boldsymbol{P}_1$=diag[$\boldsymbol{M}_1$ $\boldsymbol{M}_1$ $\boldsymbol{M}_1$ $\boldsymbol{M}_1$])将式(10)的导纳矩阵转化为

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_{\mathrm{I\,A}}\\ \dot{I}_{\mathrm{I\,B}}\\ \dot{I}_{\mathrm{I\,C}}\\ \dot{I}_{\mathrm{II\,A}}\\ \dot{I}_{\mathrm{II\,B}}\\ \dot{I}_{\mathrm{II\,C}}\\ \dot{I}_{\mathrm{III\,A}}\\ \dot{I}_{\mathrm{III\,B}}\\ \dot{I}_{\mathrm{III\,C}}\\ \dot{I}_{\mathrm{IV\,A}}\\ \dot{I}_{\mathrm{IV\,B}}\\ \dot{I}_{\mathrm{IV\,C}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{m}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{m}} & -Y_m & Y_P & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{m}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}} & Y_P & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{m}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}} & Y_P & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{m}} & Y_P & -Y_{\mathrm{m}}\\ -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{x}} & -Y_{\mathrm{m}} & -Y_{\mathrm{m}} & Y_P \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_{\mathrm{I\,A}}\\ \dot{U}_{\mathrm{I\,B}}\\ \dot{U}_{\mathrm{I\,C}}\\ \dot{U}_{\mathrm{II\,A}}\\ \dot{U}_{\mathrm{II\,B}}\\ \dot{U}_{\mathrm{II\,C}}\\ \dot{U}_{\mathrm{III\,A}}\\ \dot{U}_{\mathrm{III\,B}}\\ \dot{U}_{\mathrm{III\,C}}\\ \dot{U}_{\mathrm{IV\,A}}\\ \dot{U}_{\mathrm{IV\,B}}\\ \dot{U}_{\mathrm{IV\,C}}\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$Y_{11}=P_2YP_1=\begin{bmatrix} Y_1 & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & \\ & Y_2 & & & & & & & & & & \\ & & Y_2 & & & & & & & & & \\ -3Y_{\mathrm{x}} & & & Y_1 & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & \\ & & & & Y_2 & & & & & & & \\ & & & & & Y_2 & & & & & & \\ -3Y_{\mathrm{x}} & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & & Y_1 & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & \\ & & & & & & & Y_2 & & & & \\ & & & & & & & & Y_2 & & & \\ -3Y_{\mathrm{x}} & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & & -3Y_{\mathrm{x}} & & & Y_1 & & \\ & & & & & & & & & & Y_2 & \\ & & & & & & & & & & & Y_2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中：$\boldsymbol{P}_2=inv(\boldsymbol{P}_2)$ 为 $\boldsymbol{P}_1$ 逆矩阵；$\boldsymbol{Y}_1=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{s}}+12\boldsymbol{Y}_{\mathrm{x}}$；$\boldsymbol{Y}_2=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{s}}+3\boldsymbol{Y}_{\mathrm{m}}+9\boldsymbol{Y}_{\mathrm{x}}$。

观察导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_{11}$ 可知，可对每回线路分别进行线路内的相模变换后，分解出Ⅰα，Ⅰβ，Ⅱα，Ⅱβ，Ⅲα，Ⅲβ，Ⅳα，Ⅳβ 为独立序分量。四回线间的互感只存在于四回线路的零模分量中。

在零模分量中引入 e、f、g、h 分量，而各回线 α、β 序分量保持不变，整理得如下 $\boldsymbol{Q}_1$ 矩阵。

$$\boldsymbol{Q}_1=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{22}=Q_2Y_{11}Q_1=\begin{bmatrix} Y_s & & & & & & & & & & & \\ & Y_2 & & & & & & & & & & \\ & & Y_2 & & & & & & & & & \\ & & & Y_3 & & & & & & & & \\ & & & & Y_2 & & & & & & & \\ & & & & & Y_2 & & & & & & \\ & & & & & & Y_3 & & & & & \\ & & & & & & & Y_2 & & & & \\ & & & & & & & & Y_2 & & & \\ & & & & & & & & & Y_3 & & \\ & & & & & & & & & & Y_2 & \\ & & & & & & & & & & & Y_2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{Q}_2=inv(\boldsymbol{Q}_2)$ 为 $\boldsymbol{P}_1$ 逆矩阵；$Y_3=Y_{\mathrm{s}}+12Y_{\mathrm{x}}$；$Y_2=Y_{\mathrm{s}}+3Y_{\mathrm{m}}+9Y_{\mathrm{x}}$。

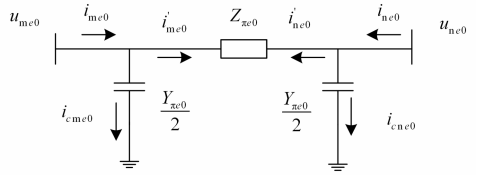
由式(12)可以看出，导纳矩阵为完全对角阵，亦即通过分解序分量的方法，完成对同塔四回线的解耦。将矩阵 $\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{Q}_1$ 综合起来，可以得到矩阵 $\boldsymbol{M}$：

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{Q}_1 \tag{13}$$

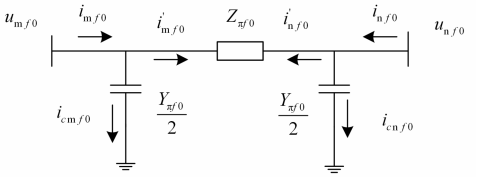
同理，利用矩阵 $\boldsymbol{M}$ 可以实现阻抗矩阵的对角化，且完成了时域下 ABC 相电流和 12 序分量之间的互换：

$$\begin{cases} i_{\mathrm{ABC}}=M\left[i_{e0},i_{\mathrm{I}\,\alpha},i_{\mathrm{I}\,\beta},i_{f0},i_{\mathrm{II}\,\alpha},i_{\mathrm{II}\,\beta},i_{g0},i_{\mathrm{III}\alpha},i_{\mathrm{III}\beta},i_{h0},i_{\mathrm{IV}\alpha},i_{\mathrm{IV}\beta}\right]^{\mathrm{T}}\\ u_{\mathrm{ABC}}=M\left[u_{e0},u_{\mathrm{I}\,\alpha},u_{\mathrm{I}\,\beta},u_{f0},u_{\mathrm{II}\,\alpha},u_{\mathrm{II}\,\beta},u_{g0},u_{\mathrm{III}\alpha},u_{\mathrm{III}\beta},u_{h0},u_{\mathrm{IV}\alpha},u_{\mathrm{IV}\beta}\right]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{14}$$

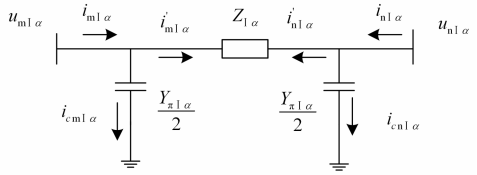
绘制出解耦得到的各模量Π型等效电路如图 6(*a*)~图 6(c)所示。



(a) e_0序分量Π型等效电路



(b) $f_0(g_0,h_0)$序分量Π型等效电路



(c) Iα(Iβ,IIα,IIβ,IIIα,IIIβ,IVα,IVβ)序分量II型等效电路

图 6 同塔四回线时域下各模量Π型等效电路

Fig. 6 Pi equivalent circuit of 12-sequence modulus

3.2 同塔四回线电容电流时域补偿

以图 6(b)所示Ⅰα 模量Π型等效电路为例说明时域半补偿计算过程。

$$\begin{cases} Z_{\pi \mathrm{I}\alpha} = Z_{c\mathrm{I}\alpha} shr_{\mathrm{I}\alpha} l \\ Y_{\pi \mathrm{I}\alpha} = 2(chr_{\mathrm{I}\alpha} l - 1) \Big/ Z_{c\mathrm{I}\alpha} shr_{\mathrm{I}\alpha} l \end{cases} \tag{15}$$

式中：$Z_{\Pi \mathrm{I}\alpha}$表示同塔四回线Ⅰα模量Π型等效电路总阻抗；$Y_{\Pi \mathrm{I}\alpha}$表示同塔四回线Ⅰα模量Π型等效电路总导纳；

$$Z_{c\mathrm{I}\alpha}=\sqrt{\frac{Z_{\mathrm{I}\alpha}}{Y_{\mathrm{I}\alpha}}}\ ;\quad r_{\mathrm{I}\alpha}=\sqrt{Z_{\mathrm{I}\alpha}Y_{\mathrm{I}\alpha}}\ ;\quad Z_{\Pi \mathrm{I}\alpha}=Z_{s1}-Z_{m1};$$

$Y_{\mathrm{I}\alpha}=Y_{\mathrm{s}}+3Y_{\mathrm{m}}+9Y_{\mathrm{x}}$，由于略去电导，故仅有容性电纳，即 $Y_{\mathrm{I}\alpha}=\mathrm{j}wc_{\mathrm{I}\alpha}$。

在时域下分别求取 M、N 两端半补偿电容电流的Ⅰα模量瞬时值$i_{c\mathrm{mI}\alpha}(t)$及$i_{c\mathrm{nI}\alpha}(t)$。

$$\begin{cases} i_{c\mathrm{mI}\alpha}(t)=\dfrac{c_{\pi \mathrm{I}\alpha}}{2}\left[\dfrac{\mathrm{d}(u_{\mathrm{mI}\alpha}(t))}{\mathrm{d}t}\right] \\ i_{c\mathrm{nI}\alpha}(t)=\dfrac{c_{\pi \mathrm{I}\alpha}}{2}\left[\dfrac{\mathrm{d}(u_{\mathrm{nI}\alpha}(t))}{\mathrm{d}t}\right] \end{cases} \tag{16}$$

式中：$c_{\Pi \mathrm{I}\alpha}$表示Ⅰα模量Π型等效电路电容；$c_{\pi \mathrm{I}\alpha}=Y_{\pi \mathrm{I}\alpha}\Big/\mathrm{j}w$。

对于 M、N 端，由基尔霍夫电流定律可知：

$$\begin{cases} i_{\mathrm{mI}\alpha}=i'_{\mathrm{mI}\alpha}+i_{c\mathrm{mI}\alpha} \\ i_{\mathrm{nI}\alpha}=i'_{\mathrm{nI}\alpha}+i_{c\mathrm{nI}\alpha} \end{cases} \tag{17}$$

将式(16)代入式(17)可得：

$$\begin{cases} i'_{\mathrm{mI}\alpha}=i_{\mathrm{mI}\alpha}-\dfrac{c_{\pi \mathrm{I}\alpha}}{2}\left[\dfrac{\mathrm{d}(u_{\mathrm{mI}\alpha}(t))}{\mathrm{d}t}\right] \\ i'_{\mathrm{nI}\alpha}=i_{\mathrm{nI}\alpha}-\dfrac{c_{\pi \mathrm{I}\alpha}}{2}\left[\dfrac{\mathrm{d}(u_{\mathrm{nI}\alpha}(t))}{\mathrm{d}t}\right] \end{cases} \tag{18}$$

在工程求解时，利用数值微分近似求解导数，

$$\frac{\mathrm{d}(u(t))}{\mathrm{d}t}=\frac{u(t+\Delta t)-u(t-\Delta t)}{2\Delta t} \tag{19}$$

则式(18)可写成

$$\begin{cases} i'_{\mathrm{mI}\alpha}=i_{\mathrm{mI}\alpha}-\dfrac{c_{\pi \mathrm{I}\alpha}}{2}\dfrac{(u_{\mathrm{mI}\alpha}(t+\Delta t)-u_{\mathrm{mI}\alpha}(t-\Delta t))}{2\Delta t} \\ i'_{\mathrm{nI}\alpha}=i_{\mathrm{nI}\alpha}-\dfrac{c_{\pi \mathrm{I}\alpha}}{2}\dfrac{(u_{\mathrm{nI}\alpha}(t+\Delta t)-u_{\mathrm{nI}\alpha}(t-\Delta t))}{2\Delta t} \end{cases} \tag{20}$$

同理：参照式(20)可写出 M、N 两侧时域半补偿后的Ⅰα，Ⅰβ，Ⅱα，Ⅱβ，Ⅲα，Ⅲβ，Ⅳα，Ⅳβ，e_0，f_0，g_0，h_0 模量线路电流瞬时值表达式。限于篇幅，此处不一一列出。

将各模量Π型等效电路求出的对应模量的 M、N 端电流代入式(21)进行反变换，求得同塔四回线时域下各相电流。

$$\begin{bmatrix} i_{\mathrm{IA}} \\ i_{\mathrm{IB}} \\ i_{\mathrm{IC}} \\ i_{\mathrm{IIA}} \\ i_{\mathrm{IIB}} \\ i_{\mathrm{IIC}} \\ i_{\mathrm{IIIA}} \\ i_{\mathrm{IIIB}} \\ i_{\mathrm{IIIC}} \\ i_{\mathrm{IVA}} \\ i_{\mathrm{IVB}} \\ i_{\mathrm{IVC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & -1 & 2 & -1 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & -1 & -1 & 2 & 1 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 & 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{e0} \\ i_{\mathrm{I}\alpha} \\ i_{\mathrm{I}\beta} \\ i_{f0} \\ i_{\mathrm{II}\alpha} \\ i_{\mathrm{II}\beta} \\ i_{g0} \\ i_{\mathrm{III}\alpha} \\ i_{\mathrm{III}\beta} \\ i_{h0} \\ i_{\mathrm{IV}\alpha} \\ i_{\mathrm{IV}\beta} \end{bmatrix} \tag{21}$$

利用傅氏算法对得到的瞬时值进行滤波，得到各相电流的相量值，代入式(1)、式(2)电流差动保护判据。

4　仿真验证

4.1 仿真建模

为了验证本文提出的同塔四回线新选线方法的正确性，利用 ATP-EMTP 对线路发生各种类型故障进行仿真分析。线路结构如图 7 所示。线路模型电压等级为 500 kV，线路全长为 300 km。表 2 为仿真模型参数(系统阻抗单位为 Ω)。

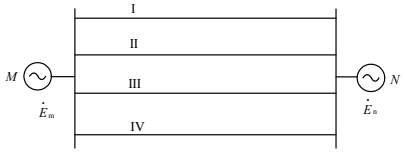


图 7 系统接线图

Fig. 7 Line structure

表 2 同塔四回线线路模型参数

Table 2 Parameters of two transmission line model

电源				线路					
				阻抗/(Ω/km)			导纳/(s/km)		
Z_{SM1}	Z_{SN1}	Z_{SM0}	Z_{SN0}	自阻抗	相间阻抗	线间阻抗	自导纳	相间导纳	线间导纳
1.85+j54	j90	1.85+j54	j90	0.13+j0.56	0.11+j0.29	0.11+j0.27	j3.79E-6	j1.11E-6	j4.81E-7

4.2 仿真结果及分析

考虑篇幅限制，这里仅给出同塔四回线发生区外故障及典型区内故障时，分别采用不补偿、相量补偿方式及时域补偿方式时，各回线中差动电流幅值结果，如表 3 所示。区内故障模拟了距 M 端母线 120 km 处经 500 Ω 电阻发生接地故障。

当区外发生故障时，由于电容电流的存在导致各回线差动电流均很大。从仿真结果可看出，利用相量补偿方式对其进行补偿后，差动电流较未补偿之前有所降低，但由于该补偿方法主要适用于线路处于故障后稳态阶段，因此补偿效果不太理想。而时域电容电流补偿方法是对暂态过程(故障发生后的 0~0.02 s 内)与稳态过程中(故障发生后的 0.08~0.1 s 内)的所有采样值直接计算，效果比较理想。差动电流经过时域补偿后，其幅值较补偿前有大幅度降低，差动保护的灵敏度得到有效提高。

当故障发生于保护范围内部时，如ⅣAG 故障：未补偿电容电流时，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ回线中差动电流幅值均大于Ⅳ回线差动电流幅值，导致保护无法正确动作；采用相量补偿方法后，尽管保护不误动，但是非故障线路差动电流依然较大，达到 3000 A 以上，保护灵敏度低；时域补偿后非故障回线差动电流的幅值降低至 200 A 以下，且故障线与非故障线差动电流的幅值区别明显，保护判据的灵敏度较高。

表 3 不同运行状态下各判据各回线差动电流幅值

Table 3 Differential current amplitude of all kinds of criteria for different operating conditions

线路运行状态	补偿方案	Ⅰ回线	Ⅱ回线	Ⅲ回线	Ⅳ回线
区外故障	不补偿	5 473.72	5 473.72	5 473.72	5 473.72
	相量补偿	3 646.41	3 646.41	3 646.41	3 646.41
	时域补偿	96.88	96.88	96.88	96.88
空载合闸	不补偿	17 329.42	17 329.42	17 329.42	17 329.42
	相量补偿	9 627.49	9 627.49	9 627.49	9 627.49
	时域补偿	384.12	384.12	384.12	384.12
ⅣAG	不补偿	5 353.29	5 353.29	5 356.35	5 283.67
	相量补偿	3 603.91	3 603.91	3 602.11	3 990.34
	时域补偿	95.91	92.76	124.05	608.01
ⅣBCG	不补偿	5 170.24	5 170.24	5 166.03	5 106.92
	相量补偿	3 471.03	3 471.03	3 472.06	3 517.51
	时域补偿	172.03	77.85	107.22	839.56
ⅣABCG	不补偿	4 878.14	4 878.14	4 878.14	5 265.05
	相量补偿	3 457.13	3 457.13	3457.13	3 891.07
	时域补偿	175.85	47.40	83.35	1 349.15
ⅢAⅣAG	不补偿	5 284.56	5 284.56	5 664.78	5 664.78
	相量补偿	3 611.96	3 611.96	4 163.75	4 163.75
	时域补偿	121.11	86.99	4 90.64	490.64
ⅢBⅣCG	不补偿	5 185.72	5 185.72	4724.46	5 583.50
	相量补偿	3 475.28	3 475.28	3786.22	4 181.07
	时域补偿	168.91	75.73	682.45	639.35
ⅢAⅣBCG	不补偿	4 891.17	4 891.17	5 301.47	4 844.56
	相量补偿	3 458.75	3 458.75	4 001.00	4 307.07
	时域补偿	176.19	48.75	609.30	879.93
ⅢBCⅣBCG	不补偿	4 732.17	4 732.17	4 565.98	4 565.98
	相量补偿	3 282.64	3 282.64	3 343.40	3 343.40
	时域补偿	237.62	131.91	736.18	736.18
ⅡAⅢBⅣCG	不补偿	4 908.34	5 318.57	4 455.15	5 300.99
	相量补偿	3 463.05	4 012.5	3 975.68	4 129.71
	时域补偿	185.15	570.94	704.92	329.87
ⅠAⅡBⅢCⅣABCG	不补偿	4 445.29	3 769.34	4 543.25	4 317.75
	相量补偿	3 655.83	2 653.51	3 871.40	3 517.60
	时域补偿	684.59	718.80	404.95	1 261.44

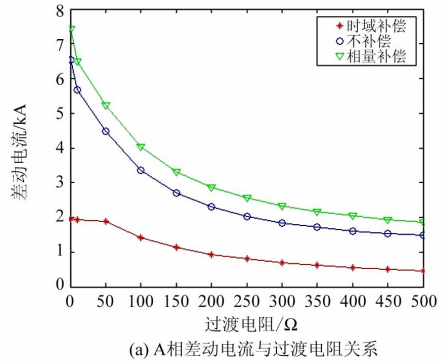
为研究运行方式对电容电流补偿方案的影响，令线路两端的电源功角差从-60°～60°以 30°为间隔进行变化，Ⅳ回线 A 相线路位于距 *M* 端母线 120 km 处经高阻接地短路。分别计算出两种不同的电容电流补偿方案时各回线差动电流幅值，结果见表 4(这里给出 30° 和 60°的结果)。可见，采用相量补偿方案时无论是故障线路还是非故障线路，其差动电流的幅值均相差 300 A 左右，而经时域电容电流方案补偿后两种情况下差动电流幅值变化非常小(在 20 A 以内)。

表 4 功角差变化时故障仿真计算结果

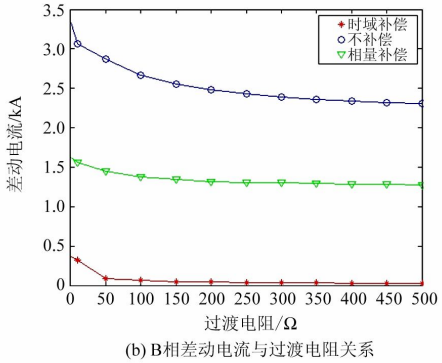
Table 4 Simulation results of fault with different power angle difference

功角差	补偿方案	Ⅰ回线	Ⅱ回线	Ⅲ回线	Ⅳ回线
-60°	相量补偿	3 248.81	3 248.81	3 248.81	3 507.57
	时域补偿	86.29	86.72	111.67	598.62
-30°	相量补偿	3 578.67	3 578.67	3 578.30	4 136.53
	时域补偿	95.91	92.76	124.05	608.01
0°	相量补偿	3 653.14	3 653.14	3 651.21	4 293.66
	时域补偿	97.16	85.55	121.50	549.73
30°	相量补偿	3 592.94	3 592.94	3 591.69	3 792.94
	时域补偿	94.37	93.97	122.24	640.04
60°	相量补偿	3 307.21	3 307.21	3 306.30	3 419.14
	时域补偿	85.41	83.70	104.11	620.78

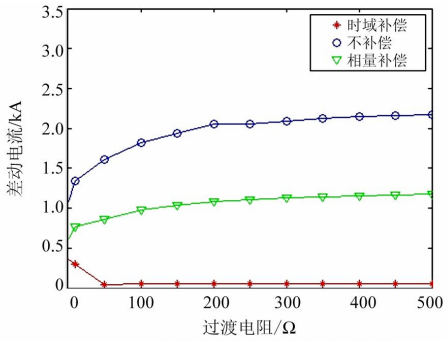
图 8 所示为同塔四回线发生ⅣAG 故障时各相差动电流与过渡电阻间关系，图 8(a)所示采用不补偿及相量补偿方案时，故障相差动电流随着过渡电阻的增大而下降的较快，两个非故障相的差动电流均达到 1 000 A 以上。而经时域电流补偿后故障相差动电流随着过渡电阻的增大而下降的较缓慢，非故障相的差动电流随着过渡电阻增大基本没有变化，且差动电流维持在 100 A 以下。因此可得出，采用时域电容电流补偿方案时，其抗过渡电阻的能力比采用不补偿及相量补偿方案时更强。



(a) A相差动电流与过渡电阻关系



(b) B相差动电流与过渡电阻关系



(c) C相差动电流与过渡电阻间关系

图 8 同塔四回线发生ⅣAG 故障时各相差动电流与过渡电阻间关系

Fig. 8 Differential current and different transition resistances with fault IAG

5 结语

针对同塔四回线线间存在复杂的互阻抗及互导纳，本文借鉴传统 12 序分量法解耦思路，推导了时域下同塔四回线相模变换矩阵，并将Π型等值电路模型引入对应相量及时域下 12 序模量序网中，分别计算出各模量等值电路中各模量电容电流。经过相模反变换即可实现对电容电流进行补偿。分析 ATP 仿真结果可知，相对于无电容电流补偿及频域相量电容电流补偿，时域电容电流补偿不仅能够有效补偿暂态及稳态过程电容电流，且保护的灵敏度亦不受负荷电流，过渡电阻，电源功角差因素等影响。

参考文献

[1] 韦钢, 薛敏. 同杆并架 4 回输电线路的探讨[J]. 电力建设, 1999(3): 4-7.
WEI Gang, XUE Min. Investigating the four-circuit

transmission lines erected on the same pole[J]. Electric Power Construction, 1999(3): 4-7.

[2] 张嘉, 葛荣良. 同塔多回输电技术特点及其应用分析[J]. 华东电力, 2005, 33(7): 23-26.
ZHANG Jia, GE Rongliang. Features and application of power transmission technology of multi-circuit lines on the same tower[J]. East China Electric Power, 2005, 33(7): 23-26.

[3] 贾振宏, 林致添. 同塔多回输电线路的设计[J]. 电力建设, 2005, 26(1): 43-46.
JIA Zhenhong, LIN Zhitian. Design of multiple circuit transmission line on one tower[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(1): 43-46.

[4] 廖泽友, 鲍伟廉, 杨维那, 等. 高压线路电流差动保护的现状及其前景展望[J]. 继电器, 1999, 27(1): 4-7.
LIAO Zeyou, BAO Weilian, YANG Weina, et al. Current state and prospect of HV line current differential protection[J]. Relay, 1999, 27(1): 4-7.

[5] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 输电线路新型电流差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 49-53.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Study on new type of current differential protection for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53.

[6] 陈金熠, 范春菊, 刘玲. 不同电压等级的四回线的纵联差动保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 72-79.
CHEN Jinyi, FAN Chunju, LIU Ling. New longitudinal differential protection scheme for four-circuit transmission line with different voltage grades[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 72-79.

[7] 夏经德, 索南加乐, 王莉, 等. 基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 43-51.
XIA Jingde, SUONAN Jiale, WANG Li, et al. A transmission line pilot protection based on the amplitude of the pilot impedance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 43-51.

[8] 张琦兵, 邰能灵. 同塔四回输电线路的模量电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 33-37, 43.
ZHANG Qibing, TAI Nengling. Mode-current differential protection of quadruple-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 33-37, 43.

[9] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 超高压长线相量差动保护的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 37-40.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Study of current phasor differential protection for long UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 37-40.

[10] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器, 2001, 29(6): 6-9.
LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of UHV transmission line on differential current protection and compensation counter measure[J]. Relay, 2001, 29(6): 6-9.

[11] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.
WU Yekai, ZOU Dongxia. The influence of capacitance current to differential protection and its compensation scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8.

[12] 郑玉平, 吴通华, 丁琰, 等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(32): 55.
ZHENG Yuping, WU Tonghua, DING Yan, et al. Applied criterion of current differential protection based on Bergeron model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 50-55.

[13] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版杜, 1996.

[14] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. Π模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on pi-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.

[15] 丁蕾, 房鑫炎. 基于电容电流半补偿的高压电力电缆分相电流差动保护研究[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 45-49.
DING Lei, FANG Xinyan. Research on capacitance current compensation based differential current protection for high voltage power cable[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 45-49.

[16] 张琦兵, 邰能灵, 袁成, 等. 同塔四回线差动保护的电容电流补偿分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 46-50.
ZHANG Qibing, TAI Nengling, YUAN Cheng, et al. Analysis of capacitance current compensation of current differential protection on four-parallel lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 46-50.

[17] 田羽, 范春菊, 龚振东. 同杆4回线12序分量法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 35-39.
TIAN Yu, FAN Chunju, GONG Zhendong. Twelve-sequence component method of four-parallel lines on same towers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 35-39.

收稿日期：2014-08-26； 修回日期：2014-12-30

作者简介：

邰能灵(1972-)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事电力系统保护与控制及电力市场方向的教学与研究；

郭培育(1986-)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究方向为电力系统继电保护与控制；E-mail: guopeiyu2011@163.com

于仲安(1973-)，男，硕士，副教授，硕士生导师，主要从事电力系统分析、计算机监控技术及应用的研究。

(编辑 张爱琴)