

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180709

## 基于同向量电流选相的电流平衡保护研究

梁振锋<sup>1,2</sup>, 吴思奇<sup>2</sup>, 张惠智<sup>2</sup>, 樊占峰<sup>3</sup>, 李宝伟<sup>3</sup>, 宋国兵<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;  
3. 许继集团有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 针对传统平行双回线路电流平衡保护不能反应跨线故障的问题, 提出了基于同向量电流选相的电流平衡保护方案。首先利用同向量电流突变量实现故障选相, 并给出了两相短路与三相短路的判别方法。然后利用反向量与同向量的幅值比判别故障相是否为跨线故障。对于跨线故障相, 利用单回线距离保护判别故障区域; 对于单回线故障相, 利用同名相电流的幅值大小进行选线跳闸。利用六序故障分量法分析了各种故障情况下的选相判据以及保护判据, 并给出了保护流程。最后理论分析和 ATP-EMTP 仿真结果均验证了方案的正确性和有效性。该方案能够反应跨线故障, 保护性能得到了改善。

**关键词:** 双回线; 电流平衡保护; 同向量选相; 跨线故障; 突变量

### Research on current balance protection based on same directional component current phase selection

LIANG Zhenfeng<sup>1,2</sup>, WU Siqu<sup>2</sup>, ZHANG Huizhi<sup>2</sup>, FAN Zhanfeng<sup>3</sup>, LI Baowei<sup>3</sup>, SONG Guobing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. XJ Group Corporation, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Traditional current balance protection on double-circuit transmission line can not react to the interline fault, thus a current balance protection based on the same directional component current phase selection is proposed. First, the fault phase selection is realized by using the incremental quantity of the same directional component current. The discriminant method of two-phase short circuit and three-phase short circuit is provided. Then, the ratio of the opposite direction component current to same directional component current is used to judge whether the fault phase is interline fault. For the interline fault phase, the fault location is determined by distance protection of single-circuit transmission line. For single-circuit transmission line fault phase, the fault line selection is determined by the magnitude of the same-name-phase. The six-sequence fault component is used to analyze the phase selection criterion and the protection criterion under different fault types, and a specific protection process is proposed. The correctness and effectiveness of the proposed scheme are verified by both theoretical analysis and ATP-EMTP simulation results. The scheme can react to the interline fault and the protection performance is improved.

This work is supported by Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province of China (No. 2014JM7293) and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/16-JS-198).

**Key words:** double-transmission line; current balance protection; same directional component current phase selection; interline fault; incremental quantity current

## 0 引言

同杆并架平行双回线具有出线走廊窄、输电容量大、运行可靠等优点, 因此在电力系统中得到了广泛应用。但由于存在线间零序互感以及跨线故障

等问题, 需要开展平行双回线保护的研究<sup>[1-2]</sup>。

为了简化接线, 传统同杆并架平行双回线保护按单回线配置。其中, 分相电流差动保护依赖通信通道, 通道的可靠性影响保护性能。纵联零序方向保护在线路末端单相接地故障时, 保护安装处的零序电压小, 可能会引起零序方向元件的误动<sup>[3-4]</sup>。且在弱电强磁情况下接地故障或断线故障时, 线间零序互感也会导致另一回线的纵联零序方向保护误动<sup>[5]</sup>。对于距离保护, 由于零序互感的影响, 导致

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2014JM7293); 国家电网公司总部科技项目资助 (SGTYHT/16-JS-198)

其整定复杂,且单相接地故障时,可能造成保护拒动或误动<sup>[6-7]</sup>;IBIIC类型跨线故障时,距离保护容易判定为两相故障,从而造成两回线均三相跳闸,严重影响系统的稳定性<sup>[8]</sup>。针对距离保护存在的问题,两类解决方法被提出。一类方法基于距离保护单回线配置,文献[9]提出了仅依靠单端单回线电气量的距离保护方案,用估算故障点位置的方法来计算邻线的零序电流。该方法受两侧系统参数的影响,所计算的零序电流可能存在较大误差。另一类方法是采用双回线电气量的距离保护,其方法是引入另一回线的零序电流进行补偿<sup>[10]</sup>。目前,引入另一回线零序电流补偿的方法得到较多研究,但该方法受双回线的运行方式的影响较大<sup>[11]</sup>。

用于同杆并架平行双回线路的横联保护分为横联差动方向保护和电流平衡保护,不需要通道、可靠性高、运行维护简单。文献[12]提出了一种基于阻抗比的横联差动保护原理,适用于参数不对称的双回线路。而对于传统电流平衡保护,不能反映跨线故障,加之现有的保护方案大多基于单回线配置,限制了电流平衡保护的应用<sup>[13-14]</sup>。双回线中单回线故障发生的频率虽高于跨线故障,但跨线故障一旦发生,可能会造成双回线均跳闸的严重后果<sup>[15]</sup>。因此,有必要研究反应跨线故障的保护原理和方法。

近年,我国大力发展智能变电站,其保护测量信息取自合并单元,可同时获取到双回线的电流信息,具备了实现电流平衡保护的条件<sup>[16]</sup>。智能变电站中采用电子式互感器,也使基于电流量的电流平衡保护不受互感器饱和的影响。

本文提出了基于同向量电流选相的电流平衡保护方案。首先利用同向量电流实现故障选相,进而再利用反向量幅值判断故障相是否为跨线故障。若为跨线故障,利用单回线距离保护判断故障区域;若为单回线故障,利用电流平衡保护原有判据选出故障线路。利用六序故障分量法分析了保护方案的性能,从理论上证明了保护方案的可行性,并给出了具体的保护流程。该保护方案受过渡电阻的影响很小,相继动作区也较小,并且可正确反应跨线故障。ATP-EMTP仿真结果验证了本文方案的正确性和有效性。

## 1 同杆并架平行双回线路同向量电流突变量选相方法

### 1.1 同向量电流故障特征

将双回线作为一个整体,双回线电流可以分解为同向量电流和反向量电流。同、反向量回路之间

没有互感。

同向量突变量电流和反向量突变量电流可表示为

$$\begin{cases} \Delta I_{T\phi} = (\Delta I_{I\phi} + \Delta I_{II\phi})/2 \\ \Delta I_{F\phi} = (\Delta I_{I\phi} - \Delta I_{II\phi})/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta I_{T\phi}$ 为同向电流分量; $\Delta I_{F\phi}$ 为反向电流分量; $\Delta I_{I\phi}$ 为I回线电流突变量; $\Delta I_{II\phi}$ 为II回线电流突变量。

本文将文献[17]中的突变量电流选相元件加以改进,利用同向量突变量电流实现双回线的故障选相,不受线间互感的影响<sup>[18]</sup>。根据六序故障分量法<sup>[19-20]</sup>,典型故障类型同向量电流特征分析如下。

#### (1) IA-G 故障

IA-G故障的边界条件为

$$\Delta I_{T0} = \Delta I_{T1} = \Delta I_{T2} = \Delta I_{F0} = \Delta I_{F1} = \Delta I_{F2} \quad (2)$$

式中: $\Delta I_{T0}$ 、 $\Delta I_{T1}$ 、 $\Delta I_{T2}$ 分别为同向量零序、正序、负序电流分量; $\Delta I_{F0}$ 、 $\Delta I_{F1}$ 、 $\Delta I_{F2}$ 分别为反向量零序、正序、负序电流分量。

由六序故障分量法和式(2),可得

$$\begin{cases} \Delta I_{TA} = \Delta I_{T0} + \Delta I_{T1} + \Delta I_{T2} = 3\Delta I_{T1} \\ \Delta I_{TB} = \Delta I_{T0} + \alpha^2\Delta I_{T1} + \alpha\Delta I_{T2} = (1 + \alpha^2 + \alpha)\Delta I_{T1} = 0 \\ \Delta I_{TC} = \Delta I_{T0} + \alpha\Delta I_{T1} + \alpha^2\Delta I_{T2} = (1 + \alpha + \alpha^2)\Delta I_{T1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

#### (2) IAIIA-G 故障

IAIIA-G故障的边界条件为

$$\begin{cases} \Delta I_{T1} = \Delta I_{T2} = \Delta I_{T0} \\ \Delta I_{F1} = \Delta I_{F2} = \Delta I_{F0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由六序故障分量法和式(4)可得

$$\begin{cases} \Delta I_{TA} = \Delta I_{T0} + \Delta I_{T1} + \Delta I_{T2} = 3\Delta I_{T1} \\ \Delta I_{TB} = \Delta I_{T0} + \alpha^2\Delta I_{T1} + \alpha\Delta I_{T2} = 0 \\ \Delta I_{TC} = \Delta I_{T0} + \alpha\Delta I_{T1} + \alpha^2\Delta I_{T2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

#### (3) IBIIC 故障

IBIIC故障的边界条件为

$$\begin{cases} \Delta I_{T0} + \Delta I_{T1} + \Delta I_{T2} = \Delta I_{F0} + \Delta I_{F1} + \Delta I_{F2} = 0 \\ \Delta I_{T0} + \alpha^2\Delta I_{T1} + \alpha\Delta I_{T2} = \Delta I_{F0} + \alpha^2\Delta I_{F1} + \alpha\Delta I_{F2} \\ \Delta I_{T0} + \alpha\Delta I_{T1} + \alpha^2\Delta I_{T2} = -(\Delta I_{F0} + \alpha\Delta I_{F1} + \alpha^2\Delta I_{F2}) \end{cases} \quad (6)$$

由六序故障分量法和式(6)可得

$$\begin{cases} \Delta I_{TA} = \Delta I_{T0} + \Delta I_{T1} + \Delta I_{T2} = 0 \\ \Delta I_{TB} = \Delta I_{T0} + \alpha^2\Delta I_{T1} + \alpha\Delta I_{T2} \\ \Delta I_{TC} = \Delta I_{T0} + \alpha\Delta I_{T1} + \alpha^2\Delta I_{T2} \end{cases} \quad (7)$$

#### (4) IBCIIB 故障

IBCIIB 故障的边界条件为

$$\begin{cases} \Delta I_{T0} + \Delta I_{T1} + \Delta I_{T2} = \Delta I_{F0} + \Delta I_{F1} + \Delta I_{F2} = 0 \\ \Delta I_{T0} + \alpha \Delta I_{T1} + \alpha^2 \Delta I_{T2} = \Delta I_{F0} + \alpha \Delta I_{F1} + \alpha^2 \Delta I_{F2} \end{cases} \quad (8)$$

由六序故障分量法和式(8)可得

$$\begin{cases} \Delta I_{TA} = \Delta I_{T0} + \Delta I_{T1} + \Delta I_{T2} = 0 \\ \Delta I_{TB} = \Delta I_{T0} + \alpha^2 \Delta I_{T1} + \alpha \Delta I_{T2} \\ \Delta I_{TC} = \Delta I_{T0} + \alpha \Delta I_{T1} + \alpha^2 \Delta I_{T2} \end{cases} \quad (9)$$

#### (5) 其他故障类型

其他故障类型, 如: IABC、IAIIBC、IABCIABC, 三相同向量电流幅值近似相等。又如: IABCIIA、IABIIBC、IABCIIBC, 三相同向量电流幅值虽不完全相等, 但相差不大。

### 1.2 同向量电流突变量选相流程

本文提出的同向量电流突变量选相流程如图 1

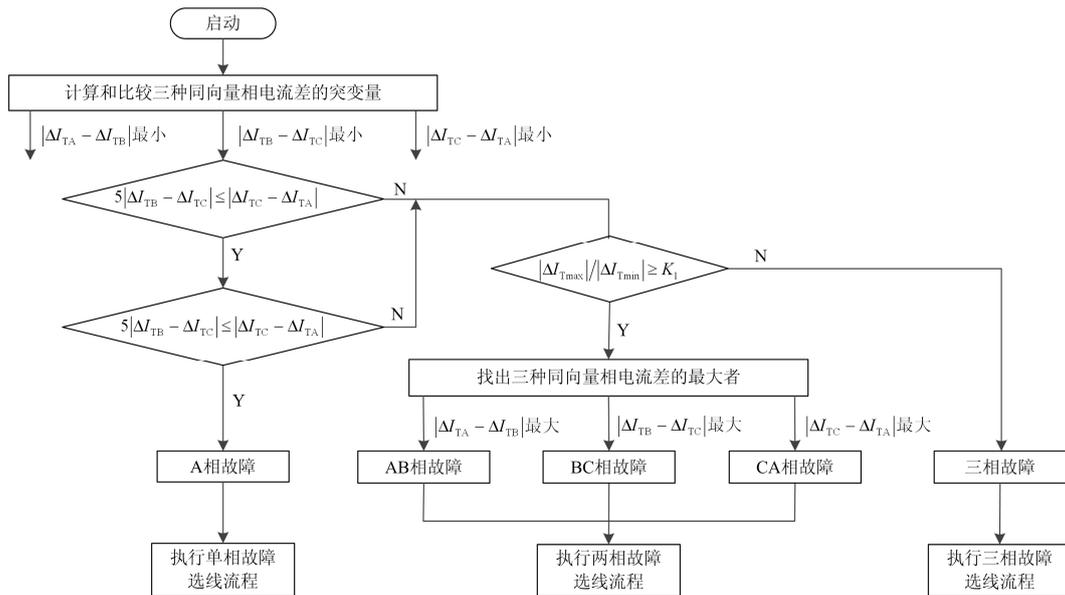


图 1 故障相判别流程图

Fig. 1 Fault phase identification flowchart

## 2 基于故障选相的电流平衡保护

### 2.1 传统电流平衡保护

(1) 启动判据

$$|I_{I\varphi} - I_{II\varphi}| \geq K_1 |I_{I\varphi} + I_{II\varphi}| / 2 \quad (11)$$

式中:  $I_{I\varphi}$  为第 I 回线相电流;  $I_{II\varphi}$  为第 II 回线相电流;  $\varphi$  为 A、B 或 C。

(2) 选线判据

第 I 回线选线判据为

$$|I_{I\varphi}| > K_2 |I_{II\varphi}| \quad (12)$$

所示。图中, 首先计算同向量电流突变量, 即  $\Delta I_{TAB} = |\Delta I_{TA} - \Delta I_{TB}|$ 、 $\Delta I_{TBC} = |\Delta I_{TB} - \Delta I_{TC}|$ 、 $\Delta I_{TCA} = |\Delta I_{TC} - \Delta I_{TA}|$ , 进而比较其幅值实现故障选相。图中仅给了  $\Delta I_{TBC}$  最小的情况, 其他两种情况类同。若判定不是单相接地故障, 通过式(10)来判别两相故障和三相故障<sup>[17]</sup>。

$$\frac{|\Delta I_{Tmax}|}{|\Delta I_{Tmin}|} \geq K_1 \quad (10)$$

式中:  $|\Delta I_{Tmax}| = \max\{\Delta I_{TAB}, \Delta I_{TBC}, \Delta I_{TCA}\}$ ,  $|\Delta I_{Tmin}| = \min\{\Delta I_{TAB}, \Delta I_{TBC}, \Delta I_{TCA}\}$ ;  $K_1$  按躲过三相故障时可能出现的最大比例值整定。

两相短路时, 三个相电流差突变量中故障相间电流差最大, 因此  $|\Delta I_{Tmax}|$  与  $|\Delta I_{Tmin}|$  的比值应大于 1; 而三相短路时, 三个相电流差突变量的有效值接近相等或相等, 因此  $|\Delta I_{Tmax}|$  与  $|\Delta I_{Tmin}|$  的比值近似为 1。

第 II 回线选线判据为

$$|I_{II\varphi}| > K_2 |I_{I\varphi}| \quad (13)$$

式中:  $K_1$ 、 $K_2$  为可靠系数, 按躲过区外短路故障时的最大不平衡电流整定, 取值范围通常为 1.05~1.1。

### 2.2 故障特征分析

基于 1.2 节方法的选相结果, 进一步实现电流平衡保护功能, 需要区分区内故障和区外故障、各故障相中是单回线故障还是同名相跨线故障。

双回线电流具有以下性质: 在同名相跨线故障或区外故障时, 两回线完全对称, 理论上反向量电

流均为零；两同名相只有一相故障时，反向量电流值较大；两同名相均故障时，反向量电流值较小<sup>[21]</sup>。因此，本文利用反向量电流的幅值大小判断同名相中是单回线故障还是跨线故障。

在实际线路中，同名相跨线故障或区外故障时，由于受不平衡电流等因素影响，反向量电流可能不为零，需要留有一定裕度，因此需设置反向量电流的阈值。若反向量电流大于阈值，则判定为单回线故障；若反向量电流小于阈值，则利用反向量与同向量比值作为判别依据，再次判断同名相中是单回线故障还是跨线故障。单回线故障，通过比较两回线的突变量电流，选出故障线；跨线故障，则利用单回线距离保护判断故障区域。

典型故障类型的故障特征分析如下。令  $\sigma_\varphi = |\Delta I_{F\varphi}|/|\Delta I_{T\varphi}|$ ，其中  $\varphi$  为 A、B、C。

(1) IA-G 故障

由式(2)、式(3)可得

$$\Delta I_{FA} = \Delta I_{F0} + \Delta I_{F1} + \Delta I_{F2} = 3\Delta I_{T1} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{A1} = \Delta I_{TA} + \Delta I_{FA} = 6\Delta I_{T1} \\ \Delta I_{A2} = \Delta I_{TA} - \Delta I_{FA} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(16)可见 A 相反相电流值较大且 I 回线电流大于 II 回线电流，因此可选为 IA-G 故障。

(2) IAIIA-G 故障

由式(4)、式(5)可得

$$\Delta I_{FA} = \Delta I_{F0} + \Delta I_{F1} + \Delta I_{F2} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{A1} = \Delta I_{TA} + \Delta I_{FA} = 3\Delta I_{T1} \\ \Delta I_{A2} = \Delta I_{TA} - \Delta I_{FA} = 3\Delta I_{T1} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知， $\Delta I_{A1} = \Delta I_{A2}$ ，无法区分区内故障和区外故障，则利用单回线距离保护判断故障区域。

(3) IBIIIC 故障

由六序故障分量法可得

$$\begin{cases} \Delta I_{FB} = \Delta I_{F0} + \alpha^2 \Delta I_{F1} + \alpha \Delta I_{F2} = \Delta I_{TB} \\ \Delta I_{FC} = \Delta I_{F0} + \alpha \Delta I_{F1} + \alpha^2 \Delta I_{F2} = -\Delta I_{TC} \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可得

$$\sigma_B = 1, \sigma_C = 1 \quad (19)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{B1} = \Delta I_{TB} + \Delta I_{FB} = 2\Delta I_{TB} \\ \Delta I_{B2} = \Delta I_{TB} - \Delta I_{FB} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{C1} = \Delta I_{TC} + \Delta I_{FC} = 0 \\ \Delta I_{C2} = \Delta I_{TC} - \Delta I_{FC} = 2\Delta I_{TC} \end{cases} \quad (21)$$

由式(18)一式(21)可见 B 相、C 相反向电流值均较大；且 B 相 I 回线电流大于 II 回线电流，而 C 相 II 回线电流大于 I 回线电流，因此选为 IBIIIC 故障。

(4) IBCIIB 故障

由六序故障分量法可得

$$\begin{cases} \Delta I_{FB} = \Delta I_{F0} + \alpha^2 \Delta I_{F1} + \alpha \Delta I_{F2} \\ \Delta I_{FC} = \Delta I_{F0} + \alpha \Delta I_{F1} + \alpha^2 \Delta I_{F2} = \Delta I_{TC} \end{cases} \quad (22)$$

由式(9)、式(22)可得

$$\sigma_B = |\Delta I_{FB}|/|\Delta I_{TB}| = \frac{|\Delta I_{F0} + \alpha^2 \Delta I_{F1} + \alpha \Delta I_{F2}|}{|\Delta I_{T0} + \alpha^2 \Delta I_{T1} + \alpha \Delta I_{T2}|} \quad (23)$$

$$\sigma_C = 1 \quad (24)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{B1} = \Delta I_{TB} + \Delta I_{FB} \\ \Delta I_{B2} = \Delta I_{TB} - \Delta I_{FB} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{C1} = \Delta I_{TC} + \Delta I_{FC} = 2\Delta I_{TC} \\ \Delta I_{C2} = \Delta I_{TC} - \Delta I_{FC} = 0 \end{cases} \quad (26)$$

由式(24)、式(26)可见，C 相反向电流值较大并且 I 回线电流大于 II 回线电流，因此可选出 IC 相故障。

对于 IB 相、IIB 相， $\Delta I_{FB}$  虽不为零，但值很小，因此  $\sigma_B < 1$ 。双回线区内 C 相接地故障，同时区外 B 相接地故障时，具有同样的特征。同理，利用单回线距离保护来判断故障区域。

(5) 其他故障类型

其他故障类型，如：IABC、IAIIBC，各故障相 I 回线与 II 回线的电流幅值均有明显差异，可以判别出故障线路。又如：IABCIIA、IABIIBC、IABCIIIC，其中有一相或两相跨线故障，故障相反向量电流值很小，则利用单回线距离保护判断故障区域。

2.3 电流平衡保护流程

根据 2.2 节结论，本文给出了电流平衡保护流程，如图 2 和图 3 所示。

(1) 单相故障

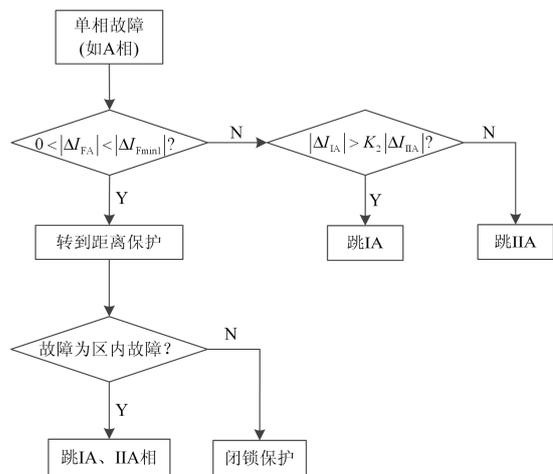


图 2 单相故障时的选线流程

Fig. 2 Line selection process flowchart for single-phase fault

单相故障有两种故障类型: IAG、IAIIAG, 其选线流程如图 2 所示。

图 2 中  $\Delta I_{Fmin1}$  为单相故障时反向量电流的门槛值;  $K_2$  为可靠系数, 取值与传统电流平衡保护相同。

### (2) 两相故障

两相故障的流程图如图 3 所示。两相故障也需设置反向量电流门槛值  $\Delta I_{Fmin2}$ , 但由于存在 IBCIIB 等故障类型, 其值与单相故障时不同。与单相故障流程相比, 两相故障流程增加了两同名相均故障的故障判别。该判据通过比较同向量电流和反向量电

流幅值的接近程度来判别是否两同名相均故障。若  $|\Delta I_{F\phi}| < \sigma |\Delta I_{T\phi}|$ , 则说明同向量电流和反向量电流幅值接近, 表示两同名相均故障; 若  $|\Delta I_{F\phi}| \geq \sigma |\Delta I_{T\phi}|$ , 则说明同向量电流和反向量电流幅值相差较大, 表示两同名相中只有一相故障, 再通过判断两同名相的相电流突变量来确定故障。系数  $\sigma$  的取值根据线路参数确定<sup>[18]</sup>。

### (3) 三相故障

三相故障的流程与两相故障相类似, 限于篇幅不再赘述。

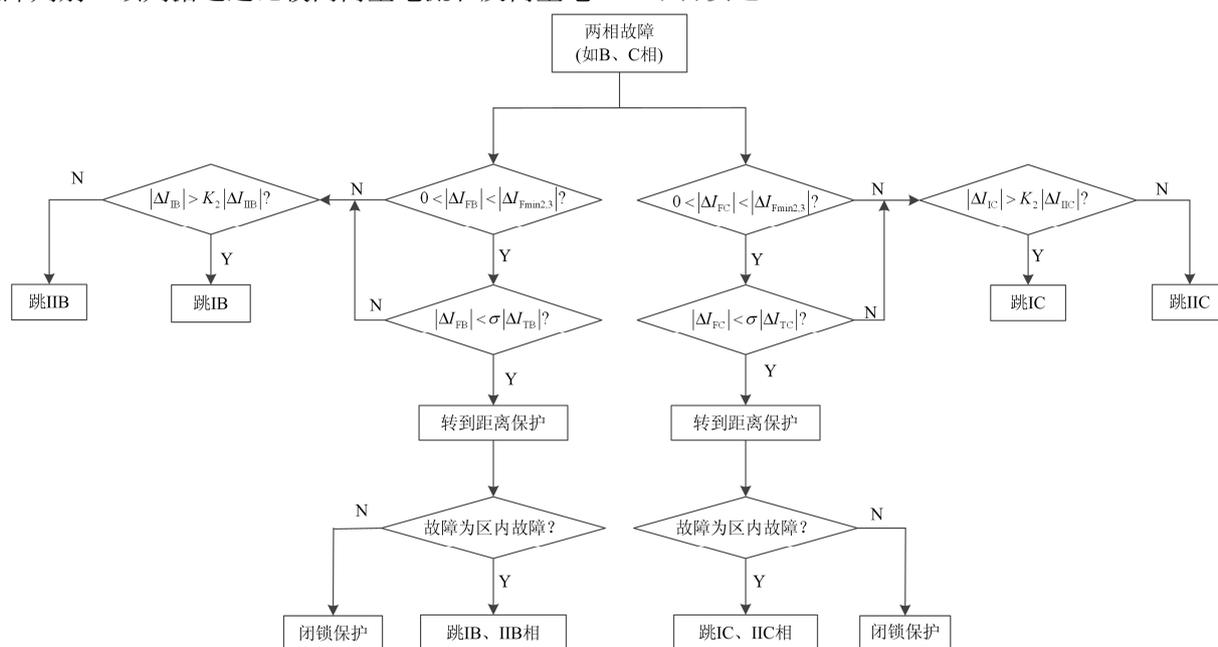


图 3 相间故障时选线流程

Fig. 3 Line selection process flowchart for interphase failure

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真模型

为了验证本文方法的正确性和有效性, 利用 ATP-EMTP 进行了大量的仿真计算。仿真系统采用某一长 300 km, 电压为 500 kV 的双侧电源平行双回线路输电系统, 如图 4 所示。

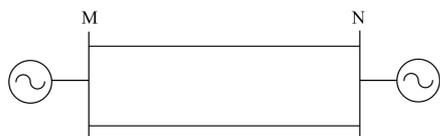


图 4 双回线系统简图

Fig. 4 Simulation model of double-transmission line

系统参数为: M 侧系统正序阻抗  $Z_{M1} = j49.34 \Omega$ , 零序阻抗  $Z_{M0} = j141.34 \Omega$ ; N 侧系统正

序阻抗  $Z_{N1} = j46.03 \Omega$ , 零序阻抗  $Z_{N0} = j103.36 \Omega$ 。线路参数: 正序阻抗  $Z_1 = 0.034003 + j0.68001 \Omega/\text{km}$ ; 零序阻抗  $Z_0 = 0.307504 + j2.3 \Omega/\text{km}$ ; 线间互阻抗  $Z_m = 0.090833 + j0.38334 \Omega/\text{km}$ ; 正序电容  $C_1 = 0.0124 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 零序电容  $C_0 = 0.0187 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 线间互感电容  $C_m = 0.00041667 \mu\text{F}/\text{km}$ 。线路两端电源相角差为  $30^\circ$ 。门槛参数取  $K_1 = 1.82$ ,  $K_2 = 1.05$ ,  $|\Delta I_{Fmin1}| = 0.05 \text{ kA}$ ,  $|\Delta I_{Fmin2}| = 1 \text{ kA}$ ,  $|\Delta I_{Fmin3}| = 1.79 \text{ kA}$ ,  $\sigma = 0.43$ 。其中,  $|\Delta I_{Fmin3}|$  是三相故障时判别跨线故障的门槛值。

### 3.2 同向突变量电流选相仿真

以 IA-G、IAIIA-G、IBIIC、IBCIIB、IABCIIA 等为例。表 1—表 5 为各种故障类型不同故障位置时的同向量相电流差突变量值。

从表 1、表 2 仿真结果可见,  $\Delta I_{TBC}$  远小于  $\Delta I_{TAB}$ 、 $\Delta I_{TCA}$ , 根据图 1 流程可选出故障相为 A 相。

由表 3、表 4 仿真结果可见,  $\Delta I_{TBC}$  均远小于  $\Delta I_{TAB}$ 、 $\Delta I_{TCA}$ , 根据图 1 流程可选出 BC 相故障特征最明显, 且  $|\Delta I_{Tmax}|/|\Delta I_{Tmin}|$  值大于 1, 即为两相故障。

由表 5 仿真结果可见,  $\Delta I_{TBC}$ 、 $\Delta I_{TAB}$ 、 $\Delta I_{TCA}$  相

表 1 IA-G 相电流差突变量

Table 1 Sudden-change of two-phase current difference for phase A grounding fault on line I

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{TAB}/kA$	2.264	1.253	0.904	0.784	0.881
$\Delta I_{TBC}/kA$	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.000 3
$\Delta I_{TCA}/kA$	2.264	1.253	0.904	0.784	0.881

表 2 IAIIA-G 相电流差突变量

Table 2 Sudden-change of two-phase current difference for phase A on line I and phase A on line II grounding fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{TAB}/kA$	2.294	1.502	1.133	0.95	0.898
$\Delta I_{TBC}/kA$	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.000 3
$\Delta I_{TCA}/kA$	2.294	1.502	1.133	0.95	0.898

表 3 IBIIIC 相电流差突变量

Table 3 Sudden-change of two-phase current difference for phase B on line I and phase C on line II grounding fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{TAB}/kA$	3.557	1.973	1.434	1.228	1.318
$\Delta I_{TBC}/kA$	7.114	3.945	2.868	2.456	2.636
$\Delta I_{TCA}/kA$	3.557	1.973	1.434	1.228	1.318
$ \Delta I_{Tmax} / \Delta I_{Tmin} $	2	2	2	2	2

表 4 IBCIIB 相电流差突变量

Table 4 Sudden-change of two-phase current difference for phase B and C on line I and phase B on line II grounding fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{TAB}/kA$	3.582	2.155	1.597	1.343	1.326
$\Delta I_{TBC}/kA$	7.165	4.31	3.194	2.686	2.652
$\Delta I_{TCA}/kA$	3.582	2.155	1.597	1.343	1.326
$ \Delta I_{Tmax} / \Delta I_{Tmin} $	2	2	2	2	2

表 5 IABCIIA 相电流差突变量

Table 5 Sudden-change of two-phase current difference for phase A, B and C on line I and phase A on line II short-circuit fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{TAB}/kA$	7.127	4.246	3.11	2.545	2.457
$\Delta I_{TBC}/kA$	7.061	3.608	2.581	2.25	2.615
$\Delta I_{TCA}/kA$	7.187	4.377	3.226	2.687	2.604
$ \Delta I_{Tmax} / \Delta I_{Tmin} $	1.018	1.213	1.25	1.194	1.064

差不大, 且由于  $|\Delta I_{Tmax}|/|\Delta I_{Tmin}|$  值接近 1, 即可选为三相故障。

需要指出的是, 表 2—表 5 所示故障类型均为跨线故障。从仿真结果可见, 跨线故障时本文方法均可正确选出故障相, 且不受故障位置的影响。

### 3.3 电流平衡保护仿真

电流平衡保护的仿真结果如表 6—表 10 所示。表中,  $\sigma_\varphi = |\Delta I_{Fm\varphi}|/|\Delta I_{Tm\varphi}|$ ,  $K_\varphi = |\Delta I_{m\varphi 1}|/|\Delta I_{m\varphi 2}|$ ,  $\varphi$  为 A、B 或 C。

对比表 6 和表 7,  $\Delta I_{FA}$  在 IA-G 时较大, 但 IAIIA-G 时为 0, 可以区分出跨线故障。

表 6 IA-G 仿真结果

Table 6 Simulation results for phase A grounding fault on line I

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{FA}/kA$	2.881	1.417	0.866	0.508	0.03
$K_A$	11	30.1	11.9	3.93	1.07

表 7 IAIIA-G 仿真结果

Table 7 Simulation results for phase A on line one and phase A on line two grounding fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{FA}/kA$	0	0	0	0	0
$K_A$	1	1	1	1	1

表 6—表 10 给出了不同故障位置的仿真结果, 验证了保护选线方案的正确性。如, 利用表 10 中数据, 可以明确得出 A 相为跨线故障, B、C 两相为单回线故障, 且可判别 I 回线 B、C 相故障。

表 8 IBIIIC 仿真结果

Table 8 Simulation results for phase B on line I and phase C on line II grounding fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{FB}/kA$	4.52	2.247	1.353	0.773	0.046
$\Delta I_{FC}/kA$	4.52	2.247	1.353	0.773	0.046
$\sigma_B$	1.271	1.139	0.944	0.63	0.035
$\sigma_C$	1.271	1.139	0.944	0.63	0.035
$K_B$	8.337	15.24	33.95	4.401	1.071
$K_C$	0.12	0.066	0.03	0.227	0.934

表 9 IBCIIB 仿真结果

Table 9 Simulation results for phase B and phase C on line I and phase C on line II grounding fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{FB}/kA$	0.926	0.512	0.306	0.182	0.008
$\Delta I_{FC}/kA$	4.553	2.463	1.512	0.848	0.053
$\sigma_B$	0.259	0.238	0.192	0.136	0.006
$\sigma_C$	1.271	1.143	0.947	0.631	0.04
$K_B$	0.679	0.673	0.725	0.793	0.988
$K_C$	8.329	14.9	36.1	4.418	1.084

表 10 IABCIIA 仿真结果

Table 10 Simulation results for phase A and phase B and phase C on line I and phase A on line II short-circuit fault

故障位置	1%	25%	50%	75%	99%
$\Delta I_{FA}/kA$	0.797	0.438	0.277	0.139	0.001
$\Delta I_{FB}/kA$	5.191	2.508	1.497	0.854	0.071
$\Delta I_{FC}/kA$	5.23	2.553	1.557	0.855	0.051
$\sigma_A$	0.192	0.168	0.143	0.088	0.001
$\sigma_B$	1.273	1.148	0.952	0.643	0.049
$\sigma_C$	1.272	1.125	0.945	0.603	0.033
$K_A$	0.701	0.72	0.768	0.843	0.999
$K_B$	8.286	14.13	35.56	4.605	1.1
$K_C$	8.312	16.65	35.01	4.04	1.068

由仿真结果可见, 本文提出的电流平衡保护也存在相继动作区。大量的仿真表明, 本文提出的电流平衡保护的相继动作区小于线路全长的 15%。

实际故障通常会存在过渡电阻, 本文对经过渡电阻故障也进行了仿真。结果表明, 本文提出的保护方案受过渡电阻的影响较小。表 11 给出了线路中点处经过渡电阻 IBCIIB-G 故障时的仿真结果。由表 11 可见, 经过渡电阻故障时本文方法可以正确动作。

表 11 经过渡电阻时 IBCIIB 仿真结果

Table 11 Simulation results for phase B and C on line I and phase C on line II grounding fault when passing through resistance

过渡电阻/ $\Omega$	0.1	50	100
$\Delta I_{FMB}/kA$	0.306	0.113	0.055
$\Delta I_{FMC}/kA$	1.512	1.32	0.959
$\sigma_B$	0.192	0.082	0.054
$\sigma_C$	0.947	0.954	0.952
$K_B$	0.725	0.922	0.989
$K_C$	36.1	38.8	37.06

## 4 结论

(1) 本文提出了适用于同杆并架平行双回线路的电流突变量选相方法。所提方法把双回线看作一个整体, 利用同向量电流选相, 并且在原有方法中增加了两相故障与三相故障的判别方法, 使保护可以实现按相跳闸。

(2) 本文提出了一种基于同向量电流选相的电流平衡保护的方案, 先利用所提出的适用于双回线的电流突变量选相方法选出故障相, 再综合比较同向量和反向量的幅值大小以及同名相电流的幅值大小, 从而进行选线跳闸。ATP-EMTP 仿真表明, 所提保护方案的保护范围达到线路全长的 85%。

(3) 本文所提出的电流平衡保护的方案是基于单端双回线信息的保护, 不需要通道, 而且能反应

跨线故障。我国发展了大量的智能变电站, 本文方法具备了实现条件。

## 参考文献

- [1] SUNDARAVARADAN N A, MEYUR R, RAJARAMAN P, et al. A wavelet based novel technique for detection and classification of parallel transmission line faults[C] // 2016 International Conference on Signal Processing, 2016: 1951-1955.
- [2] 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.
- [3] 陈文哲, 郝治国, 张保会, 等. 同塔双回线纵向故障特征分析及零序方向保护改进[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 133-139.  
CHEN Wenzhe, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Characteristic analysis on longitudinal fault of dual-circuit transmission line and improvement of zero-sequence directional protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 133-139.
- [4] 徐海洋, 黄兴华, 王婷, 等. 同塔双回线零序电压补偿分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 86-92.  
XU Haiyang, HUANG Xinghua, WANG Ting, et al. Analysis of zero-sequence voltage compensation in double-circuit transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 86-92.
- [5] 谢俊, 李勇, 刘宏君, 等. 线路纵联零序方向保护误动机理分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 19-25.  
XIE Jun, LI Yong, LIU Hongjun, et al. Mechanism analysis and countermeasure research on the misoperation of the zero sequence directional pilot protection of line[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 19-25.
- [6] 张旭, 徐振宇, 杨奇逊, 等. 特高压平行双回线路高阻短路下距离保护算法(英文)[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 182-189.  
ZHANG Xu, XU Zhenyu, YANG Qixun, et al. A distance protection algorithm for UHV parallel transmission line with high-resistance short circuit fault (in English)[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 182-189.
- [7] 周春霞, 余越, 赵寒, 等. 特高压同塔双回线路零序电流补偿系数整定对接地距离保护的影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 106-110.  
ZHOU Chunxia, YU Yue, ZHAO Han, et al. Influence of

- zero-sequence current compensation coefficient setting on earth-fault distance protection for double circuit UHVAC transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 106-110.
- [8] 李伟, 毕天姝, 徐振宇, 等. 同杆双回线跨线接地故障的距离保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 131-138, 9.  
LI Wei, BI Tianshu, XU Zhenyu, et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country ground fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 131-138, 9.
- [9] 毕天姝, 李伟, 徐振宇, 等. 基于单端单回线电气量的同杆双回线单相接地距离保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 88-92.  
BI Tianshu, LI Wei, XU Zhenyu, et al. Single-phase grounding distance protection of parallel transmission lines on same poles based on electric quantities data from single terminal and single line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 88-92.
- [10] 宋国兵, 刘志良, 康小宁, 等. 一种同杆并架双回线接地距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 102-106, 114.  
SONG Guobing, LIU Zhiliang, KANG Xiaoning, et al. A scheme for ground distance protection of parallel transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 102-106, 114.
- [11] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2014: 235-239.
- [12] 李世龙, 陈卫, 邹耀, 等. 同杆并架线路阻抗比横联差动保护研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 21-29.  
LI Shilong, CHEN Wei, ZOU Yao, et al. Transverse differential protection based on the ratio of impedance for double circuit lines on the same tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 21-29.
- [13] 梁振锋, 康小宁, 索南加乐, 等. 平行双回线路故障分量电流平衡保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 106-110.  
LIANG Zhenfeng, KANG Xiaoning, SUONAN Jiale, et al. Transverse differential protection based on fault superimposed components for double-circuit transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 106-110.
- [14] 解建宝, 梁振锋, 康小宁, 等. 平行双回线电流平衡保护的仿真研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 81-83.  
XIE Jianbao, LIANG Zhenfeng, KANG Xiaoning, et al. Simulation research on current balance protection for double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 81-83.
- [15] 林达, 王慧芳, 王庆庆. 带并联电抗器同杆双回线跨线故障性质判别方法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 2001-2007.  
LIN Da, WANG Huifang, WANG Qingqing. A method to identify properties of cross-country faults occurred in common-tower double-circuit transmission line with shunt reactors[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 2001-2007.
- [16] 梁振锋, 宋国兵, 康小宁, 等. 数字化变电站同杆并架平行双回线路保护的研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 444-448.  
LIANG Zhenfeng, SONG Guobing, KANG Xiaoning, et al. Research on the protective relaying for double-circuit lines on the same tower in digital substation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(4): 444-448.
- [17] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 83-89.
- [18] 张海, 黄少锋. 利用电压辅助电流选相的同杆双回线单端电气量选相原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 139-148, 8.  
ZHANG Hai, HUANG Shaofeng. A fault phase selection scheme of currents with assistant voltages for common-tower double-circuit transmission lines using one-terminal electrical quantities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 139-148, 8.
- [19] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 146-149.
- [20] 索南加乐. 同杆双回线的故障分析及继电保护[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.
- [21] ZHANG Hai, SHENG Wanxing. A fault phase selection scheme based on ratio of opposite-direction-current to same-direction-current for parallel lines[C] // 2014 International Conference on Power System Tech, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 512-517.

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2018-08-06

作者简介:

梁振锋(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: lzf@xaut.edu.cn

吴思奇(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

张惠智(1988—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(编辑 姜新丽)