

# 工频变化量距离保护在交直流混联系统中的 动作特性分析及改进措施

刘建勋, 李凤婷, 解超, 刘雨珊

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 交直流混联系统的故障特征不同于纯交流系统, 影响传统交流保护的動作。针对工频变化量距离保护, 首先从象限的角度分析保护背侧系统等值阻抗角的变化范围, 进而分析其动作特性, 分析结果表明工频变化量距离保护在交直流混联系统中保护范围会缩小、抗过渡电阻能力会减弱, 极端情况下可能完全失去保护范围。然后针对此问题, 减小可靠系数, 并使用两侧零序电流相位差的余弦值避免区外误动, 提出基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护的改进措施。最后以 PSCAD/EMTDC 为平台搭建仿真, 验证理论分析的正确性和所提改进措施的有效性。

**关键词:** 交直流混联电网; 工频变化量; 距离保护; 动作特性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.010 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2023)01-0088-09

## Action characteristic analysis and improvement measures of the distance protection using power frequency variable components in AC/DC hybrid system

LIU Jianxun, LI Fengting, XIE Chao, LIU Yushan

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The characteristics of AC/DC hybrid system faults are different from those of AC systems, which will affect the reaction of traditional AC protections. For the power frequency variation distance protection, firstly, the variation range of equivalent impedance angle of protection back system is analyzed from the perspective of quadrants, and then its action characteristics are further assessed. The results show that the protection range of power frequency variation distance protection in AC/DC hybrid system will be reduced, the anti-transition resistance capacity will be weakened, and the protection range may be completely lost in some extreme cases. To solve this, the reliability coefficient is diminished, the cosine value of phase difference of zero sequence current on both sides is used to avoid misoperation outside the area, and thus an improved measure of power frequency variation distance protection based on zero sequence current phase compensation can be proposed. An case study platform is built on PSCAD/EMTDC to verify the correctness of the theoretical analysis, and the effectiveness of the proposed improvement measures.

**Key words:** AC/DC hybrid grid; power frequency variable components; distance protection; operating characteristics

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51877185); 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01C087)

通信作者: 李凤婷(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统继电保护与电力市场研究; E-mail: xjlf2009@sina.com

中国电网逐渐由纯交流系统过渡为交直流混联系统<sup>[1-3]</sup>。交直流混联系统的故障特征不同于纯交流系统,会导致交流系统的继电保护装置性能下降<sup>[4-5]</sup>。因此有必要针对传统交流系统继电保护在交直流混联系统中的动作特性展开研究。

工频变化量距离保护因判据简单、动作迅速、具有较好的选相能力而被广泛应用<sup>[6]</sup>。交流系统中工频变化量距离保护受系统运行方式、可靠系数、负荷及过渡电阻的影响<sup>[7-9]</sup>。文献[10]指出交直流混联系统中工频变化量距离保护的保护区会随直流系统等值阻抗增大而缩小,但分析过程中未考虑相角的影响;文献[11]提出在投入的容性器件或限流器阻抗已知情况下可适当增大整定值缓解保护区缩小的问题;文献[12]提出使用系统最大及最小运行阻抗综合判断故障位置,但故障时直流系统阻抗变化较大,此类方法不适用于交直流混联系统。

本文从工频变化量距离保护的基本原理出发,分析保护背侧系统等值阻抗角的变化范围,进而分析其动作特性。基于减小可靠系数能够有效缓解保护区缩小及抗过渡电阻能力减弱,提出基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护,以PSCAD/EMTDC为平台搭建仿真模型,验证理论分析的准确性和所提措施的有效性。

### 1 影响工频变化量距离保护动作特性的因素

工频变化量距离保护动作判据<sup>[13]</sup>为

$$|\Delta \dot{U}_{op}| > k_{rel} U_N \quad (1)$$

式中,  $\Delta \dot{U}_{op}$  为工作电压;  $k_{rel}$  为可靠系数,通常取 1.05~1.2;  $U_N$  为额定电压。由式(1)推理<sup>[7]</sup>可得:

$$\left| Z_M + \left[ \frac{1}{P} Z_{set} + \left( \frac{1}{P} - 1 \right) Z_M \right] \right| > |Z_M + Z_F| \quad (2)$$

$$P = \frac{k_{rel} U_N}{\Delta E_f} \quad (3)$$

式中,  $Z_M$  为保护背侧系统等值阻抗;  $\Delta E_f$  为系统正常运行时故障点的电压;  $Z_F$  为测量阻抗;  $Z_{set}$  为整定阻抗。由式(2)、(3)可知,影响工频变化量距离保护动作特性的因素有  $Z_M$ 、 $k_{rel}$  以及  $\Delta E_f$ 。文献[10]仅分

析  $Z_M$  的幅值对工频变化量距离保护的影响,但  $Z_M$  的相角同样会产生影响。

### 2 保护背侧系统等值阻抗角分析

交直流混联系统分为交直流多端馈入系统和交直流单端馈入系统(下文简称为多端馈入系统和单端馈入系统),其故障网络分解如图1、2所示。

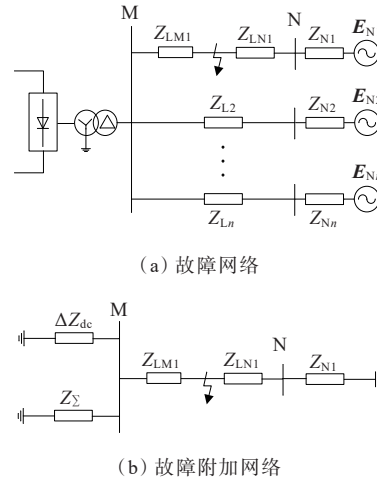


图 1 交直流多端馈入系统故障网络分解

Figure 1 Decomposition diagram of a fault network for AC/DC multi-terminal infeed system

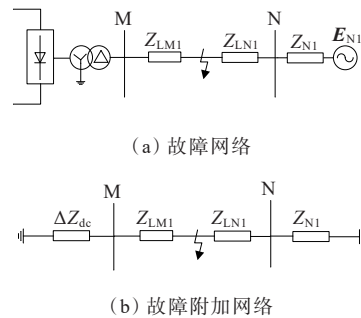


图 2 交直流单端馈入系统故障网络分解

Figure 2 Decomposition diagram of a fault network for AC/DC single-terminal infeed system

图1、2中,  $Z_{LM1}$ 、 $Z_{LN1}$  分别为馈线1的母线M和母线N至故障发生点的线路阻抗,  $Z_{L2}$ 至 $Z_{Ln}$ 为馈线2至馈线n的线路阻抗,  $Z_{N1}$ ~ $Z_{Nn}$ 为馈线1至馈线n的等效系统阻抗,  $\Delta Z_{dc}$ 为直流系统等值工频变化量阻抗,当交流系统发生接地故障时,不同的过渡电阻会使直流系统发生不同程度的换相失败,导致  $\Delta Z_{dc}$  可能处于阻抗平面上第1象限至第4象限的任意一个象限<sup>[14]</sup>,  $Z_{\Sigma}$ 为系统馈线阻抗,其表达式为

$$Z_{\Sigma} = (Z_{L2} + Z_{N2}) / (Z_{L3} + Z_{N3}) / \dots / (Z_{Ln} + Z_{Nn}) \quad (4)$$

当系统为图1所示的多端馈入系统时,对于馈线1的M侧的保护装置,直流系统和馈线2至馈线 $n$ 对应的交流系统均为背侧,因此保护背侧系统等值阻抗为

$$Z_M = \Delta Z_{dc} / Z_{\Sigma} \quad (5)$$

为分析 $\Delta Z_{dc}$ 对 $Z_M$ 的阻抗角 $\theta_M$ 的影响,引入象限的概念,将 $Z_M$ 和 $\Delta Z_{dc}$ 写为如下形式:

$$\begin{cases} Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} = A_{\Sigma} \angle \theta_{\Sigma} \\ \Delta Z_{dc} = \Delta R_{dc} + j\Delta X_{dc} = A_{dc} \angle \theta_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $R_{\Sigma}$ 、 $X_{\Sigma}$ 分别为除所研究线路外的其余所有交流系统的电阻和电抗; $\Delta R_{dc}$ 、 $\Delta X_{dc}$ 分别为直流系统的等值工频变化量电阻和电抗; $A_{\Sigma}$ 、 $A_{dc}$ 分别为除开所研究线路外的其余所有交流系统的阻抗和直流系统等值工频变化量阻抗的幅值; $\theta_{\Sigma}$ 、 $\theta_{dc}$ 分别为除开所研究线路外的其余所有交流系统阻抗和直流系统等值工频变化量阻抗的阻抗角。

将式(6)带入式(5)可得:

$$Z_M = \frac{(R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2)\Delta R_{dc} + (\Delta R_{dc}^2 + \Delta X_{dc}^2)R_{\Sigma}}{(\Delta R_{dc} + R_{\Sigma})^2 + (\Delta X_{dc} + X_{\Sigma})^2} + j \frac{(\Delta R_{dc}^2 + \Delta X_{dc}^2)X_{\Sigma} + (X_{\Sigma}^2 + R_{\Sigma}^2)\Delta X_{dc}}{(\Delta R_{dc} + R_{\Sigma})^2 + (\Delta X_{dc} + X_{\Sigma})^2} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得多端馈入系统中保护背侧系统等值工频变化量阻抗角的正切为

$$\tan \theta_M = \frac{A_{dc} \sin \theta_{dc} + A_{\Sigma} \sin \theta_{\Sigma}}{A_{dc} \cos \theta_{dc} + A_{\Sigma} \cos \theta_{\Sigma}} \quad (8)$$

求解式(7)、(8)可得 $Z_M$ 的阻抗角 $\theta_M$ 与 $\Delta Z_{dc}$ 的关系如图3所示<sup>[15]</sup>。其中区域1为平面内除区域2~6之外的所有区域。交流系统的阻抗角通常较大, $\cos \theta_{\Sigma}$ 约等于0, $\sin \theta_{\Sigma}$ 约等于1,因此圆 $C_1$ 的直径远大于 $A_{\Sigma}$ ,圆 $C_2$ 的直径略大于 $A_{\Sigma}$ 。当交流系统故障时,直流系统的换流器无法提供足够的短路电流,对外表现为弱馈系统, $\Delta Z_{dc}$ 的幅值远大于 $A_{\Sigma}$ <sup>[10]</sup>,即 $\Delta Z_{dc}$ 的幅值远大于圆 $C_2$ 的直径,因此 $\Delta Z_{dc}$ 将只会出现在区域1~3中。当系统为图1所示的多端馈入系统时 $\theta_M \in (0^\circ, 180^\circ)$ , $Z_M$ 将只会处于阻抗平面的第1象限或第2象限。

当系统为图2所示的单端馈入系统时, $Z_M$ 的大小完全由 $\Delta Z_{dc}$ 决定, $Z_M$ 可能处于阻抗平面上第1象限至第4象限的任意一个象限。

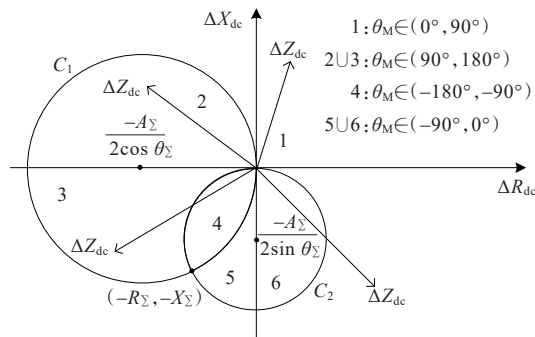


图3  $\theta_M$ 与 $\Delta Z_{dc}$ 的关系

Figure 3 Relationship between  $\theta_M$  and  $\Delta Z_{dc}$

使用PSCAD/EMTDC搭建如图1所示的多端馈入系统模型,对分析结论进行验证。故障位置选取交流线路出口处,分别进行单相经100、75、50、25 $\Omega$ 接地,以及单相金属性接地故障下的仿真测试。保护背侧系统等值阻抗角在多端馈入系统中的测试结果如图4所示,均处于第1象限或第2象限,验证了分析结论的正确性。

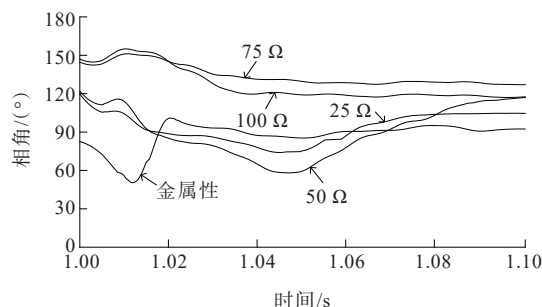


图4 保护背侧系统等值阻抗角

Figure 4 Equivalent impedance phase angle of a protection back side system

### 3 工频变化量距离保护在交直流混联系统中的动作特性分析

#### 3.1 在多端馈入系统中的动作特性分析

由式(2)可知,当 $Z_M$ 处于第1象限,且阻抗角与线路的阻抗角相同时,因为 $P > 1$ ,所以当 $Z_M$ 增大时,保护范围缩小<sup>[10]</sup>。当 $Z_M$ 处于第2象限或处于第1象限但阻抗角与线路阻抗角不同时,动作特性无法通过式(2)直接得到,因此通过向量图进行分析,如图5所示。特性圆以 $-Z_M$ 为圆心,以虚线向量 $Z_M + [Z_{set}/P + (1/P - 1)Z_M]$ 为半径。

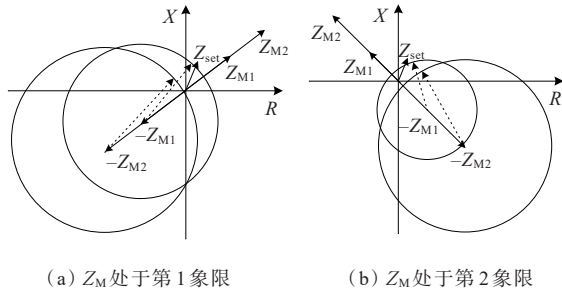


图 5 工频变化量距离保护在多端馈入系统中的动作特性  
**Figure 5** Operation characteristics of the fault component distance protection in a multi-terminal infeed system

由图 5 可知,  $Z_M$  处于第 1 象限或第 2 象限时, 整定阻抗的末端均在特性圆外, 保护范围缩小了, 且随  $Z_M$  幅值的增大, 阻抗圆会向第 3 象限或第 4 象限移动, 当  $Z_M$  达到一定值后, 保护范围可能完全消失; 同时由于  $R$  轴正方向的面积也减小了, 因此抗过渡电阻的能力也被削弱。

3.2 在单端馈入系统中的动作特性分析

由文 2 可知, 在单端馈入系统中  $Z_M = \Delta Z_{dc}$ , 因此  $Z_M$  可能处于第 1 象限至第 4 象限的任意一个象限。当  $Z_M$  的阻抗角处于第 1 象限或第 2 象限时, 动作特性与多端馈入系统相同。当  $Z_M$  的阻抗角处于第 3 象限或第 4 象限时, 同样通过向量图分析保护的動作特性, 如图 6 所示。由图 6 可知, 当  $Z_M$  处于第 3 象限或第 4 象限时, 保护完全失去保护范围。

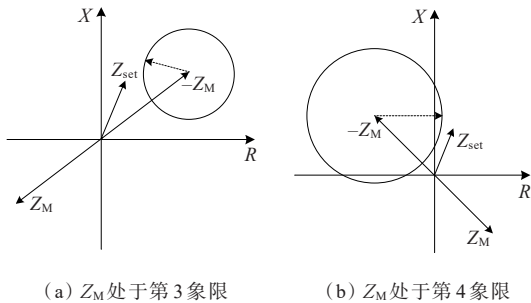


图 6 工频变化量距离保护在单端馈入系统中的动作特性  
**Figure 6** Operation characteristics of the fault component distance protection in a single-terminal infeed system

综上所述, 在多端馈入系统及单端馈入系统中, 工频变化量距离保护均会出现抗过渡电阻能力减弱, 保护范围缩小, 极端情况下可能完全失去保护范围等问题。但在多端馈入系统中, 保护背侧系统的阻抗角只会出现在第 1 象限和第 2 象限, 因此保护在多端馈入系统中受到的影响小于在单端馈入系统中受到的影响。

4 基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护

4.1  $P < 1$  时工频变化量距离保护的動作特性

由文 3 的分析可知, 当  $P > 1$  时, 保护会因  $Z_M$  的变化, 出现性能下降的问题, 因此考虑减小  $k_{rel}$  使  $P < 1$ , 此时其动作特性如图 7 所示。由图 7 可知, 当  $P < 1$  时, 工频变化量距离保护的保護范围均不再缩小, 相反, 随  $Z_M$  幅值的增大, 其保护范围扩大, 且  $R$  轴正方向的面积也会扩大, 使保护有较强的抗过渡电阻能力, 但保护范围的扩大可能引起超越现象。当故障发生在区内时, 超越现象有利于保护的快速动作, 但当故障发生于下一段线路出口处时, 却可能导致误动。

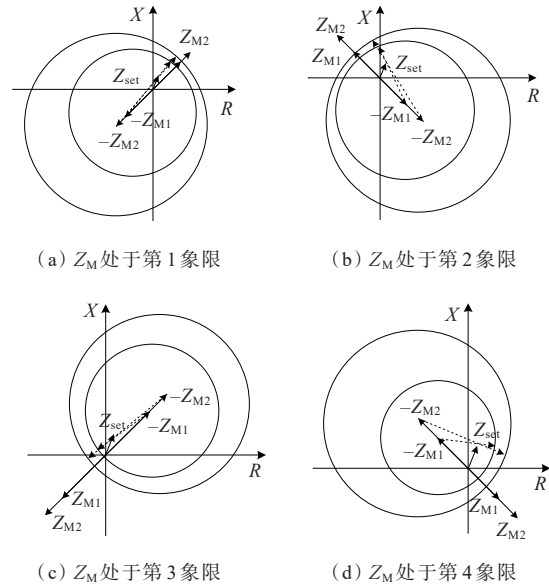


图 7  $P < 1$  时工频变化量距离保护的動作特性  
**Figure 7** Operating characteristics of the fault component distance protection when  $P < 1$

4.2 基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护

由文献 [16] 可知, 当区内发生故障时, 线路两端零序电流相位差的余弦值约等于 1, 而区外故障时, 线路两端零序电流相位差的余弦值约等于 -1。因此将工频变化量距离保护与线路两端零序电流相位差的余弦值相结合, 构成工频变化量距离保护的辅助判据。当传统判据在交直流混联系统中因保护范围减小和抗过渡电阻能力减弱而出现拒动时, 使用辅助判据使保护可靠动作。辅助判据为

$$\cos \beta \left| \Delta \dot{U}_{op} \right| > k U_N \quad (9)$$

$$\Delta \dot{U}_{op} = \Delta \dot{U} - (\Delta \dot{I} + 3 \dot{I}_0 K_0) Z_{set} \quad (10)$$

式中,  $\beta$  为线路两端零序电流相位差;  $k$  为辅助判据的系数;  $K_0$  为零序补偿系数;  $\dot{I}_0$  为保护安装处的零序电流;  $\Delta \dot{U}$ 、 $\Delta \dot{I}$  分别为保护安装处的工频变化量电压和电流。当故障发生在区内时,  $\cos \beta$  等于 1, 此时保护的動作特性如图 7 所示, 其保护范围较大, 灵敏度高, 且抗过渡电阻能力较强; 当故障发生于区外时,  $\cos \beta$  等于  $-1$ , 此时不等式左边小于 0, 不等式右边大于 0, 辅助判据不成立, 保护不会动作。

为使辅助判据的保护范围不再缩小, 需要确定  $k$  的取值上限, 由式(3)同理可得:

$$P = \frac{k U_N}{\Delta E_f} \quad (11)$$

系统正常运行时母线电压一般在额定电压的  $\pm 5\% \sim \pm 10\%$  范围内变化<sup>[7]</sup>, 因此要使  $P < 1$ ,  $k$  的取值就要小于 0.9。

为使辅助判据依然具有选相能力, 需要确定  $k$  的取值下限, 即需要计算发生单相故障时非故障相的工作电压。故障发生于出口处时, 工作电压有最大值, 因此以 A 相出口处发生金属性单相接地故障为例分析非故障相的工作电压。A 相故障后, B 相的电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_b &= a^2 \dot{U}_{f(1)} + a \dot{U}_{f(2)} + \dot{U}_{f(0)} = \\ & a^2 (\dot{U}_{fa|0|} - \dot{I}_{f(1)} Z_{\Sigma(1)}) + a (-\dot{I}_{f(2)} Z_{\Sigma(2)}) - \dot{I}_{f(0)} Z_{\Sigma(0)} = \\ & \dot{U}_{fb|0|} - \frac{a^2 Z_{\Sigma(1)} + a Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}}{Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}} \dot{U}_{fa|0|} \end{aligned} \quad (12)$$

则 B 相的工频变化量电压为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_b &= \dot{U}_{fb|0|} - \dot{U}_b = \\ & \frac{a^2 Z_{\Sigma(1)} + a Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}}{Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}} \dot{U}_{fa|0|} \end{aligned} \quad (13)$$

式(12)、(13)中,  $a$  为对称分量法的算子;  $\dot{U}_{f(1)}$ 、 $\dot{U}_{f(2)}$ 、 $\dot{U}_{f(0)}$  分别为故障点的正序、负序以及零序电压;  $\dot{I}_{f(1)}$ 、 $\dot{I}_{f(2)}$ 、 $\dot{I}_{f(0)}$  分别为流过线路的正序、负序以及零序电流;  $Z_{f(1)}$ 、 $Z_{f(2)}$ 、 $Z_{f(0)}$  分别为从故障点看进去的系统正序、负序和零序阻抗;  $\dot{U}_{fa|0|}$ 、 $\dot{U}_{fb|0|}$ 、 $\dot{U}_{fc|0|}$  分别为各相故障点故障前的电压。

同理可得 A 相故障后, C 相的工频变化量电压为

$$\Delta \dot{U}_c = \frac{a Z_{\Sigma(1)} + a^2 Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}}{Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}} \dot{U}_{fa|0|} \quad (14)$$

故障发生后, 非故障相的工频变化量电流主要由直流系统注入。由文献[17]可知, 直流系统注入交流系统的等值工频变化量电流为

$$\Delta \dot{I} = \frac{I_{Ndc} \frac{3 - \lambda - j(\lambda\mu + \sqrt{3}) + (\lambda - 3 + j\sqrt{3}) e^{-j\mu}}{\pi\mu}}{\pi\mu} \quad (15)$$

式中,  $\lambda$  为换相失败后直流系统的直流电流相对于正常运行时的倍数;  $\mu$  为换相角;  $I_{Ndc}$  为直流系统正常运行时的电流。

由文献[18]可知, 发生金属性单相接地故障时零序电流可以由式(16)得到, 即

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_{fa|0|}}{Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}} \quad (16)$$

综上所述, 将式(13)~(16)带入式(10), 即可计算出发生单相接地故障时非故障相的工作电压。通过选取适合的  $k$ , 使得非故障相的最大工作电压小于  $k U_N$ , 辅助判据就拥有选相能力。基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护的流程如图 8 所示。图 8 中,  $k_{rel}$  为传统判据的可靠系数, 取 1.05~1.20。由文 3 的分析可知, 传统工频变化量距离保护的保護范围虽然会缩小, 但并非所有情况下都会完全失效, 且辅助判据使用对端信息, 由于通信延迟的原因, 動作速度上会略慢于传统工频变化量距离保护, 因此保护方案中仍然保留了传统判据。

本文所提辅助判据对同步性有要求, 但在实际工程中已有完善的解决方案, 可以使用现有方法满足同步性的要求。对于可使用 GPS 的工程, 可采用基于具有统一时钟的同步方法, 此种方法采用 GPS

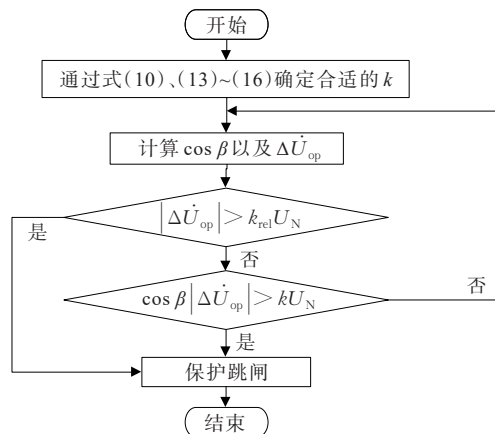


图 8 基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护  
Figure 8 The fault component distance protection based on zero sequence current phase compensation

的全球授时功能,可将两侧采样的误差控制在  $2\ \mu\text{s}$  内,从而实现两端采样的严格同步;对于无法使用 GPS 的工程,可采用基于数据通道的同步方法,这种方法通过测量主站与从站之间的通道延时对采样时刻进行调整,可将误差控制在  $5\%$  以下。

### 5 仿真验证

使用 PSCAD/EMTDC 搭建如图 1、2 所示的多端馈入系统和单端馈入系统模型。多端馈入系统交流出线为 2 回线,线路长度均为  $30\ \text{km}$ ,线路参数如表 1 所示。保护范围取线路全长的  $80\%$ 。

表 1 线路参数  
Table 1 Line parameters

正序参数	单位	数值	零序参数	单位	数值
$R_1$	$\Omega/\text{m}$	$0.178\ 1\times 10^{-4}$	$R_0$	$\Omega/\text{m}$	$0.295\ 2\times 10^{-3}$
$L_1$	$\Omega/\text{m}$	$0.313\ 9\times 10^{-3}$	$L_0$	$\Omega/\text{m}$	$0.104\ 0\times 10^{-3}$
$C_1$	$\text{M}\Omega\cdot\text{km}$	3.824	$C_0$	$\text{M}\Omega\cdot\text{km}$	7.648

#### 5.1 传统工频变化量距离保护仿真分析

多端馈入系统和单端馈入系统中交流线路  $50\%$  处发生 A 相金属性单相接地故障时,工作电压如图 9 所示,交流线路出口处发生 A 相经  $15\ \Omega$  过渡电阻单相接地故障时,工作电压如图 10 所示。

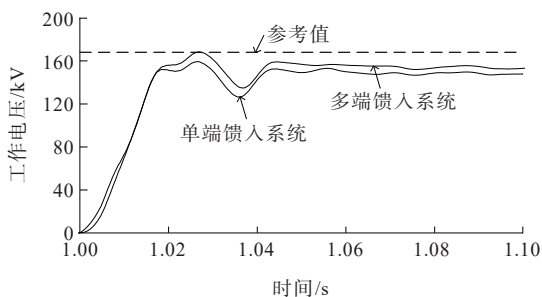


图 9 交流线路  $50\%$  处 A 相金属性接地的的工作电压

Figure 9 Operating voltage of A-phase metallic grounding at  $50\%$  of AC line

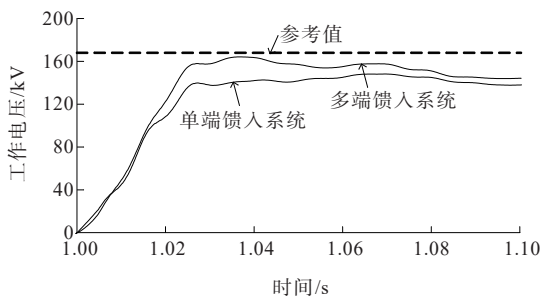


图 10 出口处 A 相经  $15\ \Omega$  过渡电阻接地的的工作电压

Figure 10 Operating voltage of phase A at the outlet via  $15\ \Omega$  transition resistor grounding

由图 9 可知,工作电压均小于参考值,说明在多端馈入系统和单端馈入系统中保护范围均大幅缩小,且单端馈入系统的工作电压小于多端馈入系统,说明单端馈入系统中保护范围缩小更多。由图 10 可知,工作电压均小于参考值,因此抗过渡电阻能力在多端馈入系统和单端馈入系统中均被大幅削弱了,且单端馈入系统的工作电压小于多端馈入系统的,说明在单端馈入系统中抗过渡电阻能力也被削弱的更多。

#### 5.2 基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护仿真分析

交流线路  $80\%$  处发生 A 相金属性接地故障时,辅助判据的工作电压如图 11 所示。由图 11 可知,在多端馈入系统和单端馈入系统中辅助判据的工作电压均大于参考值,说明保护范围均扩大了,此时有利于保护的快速动作。

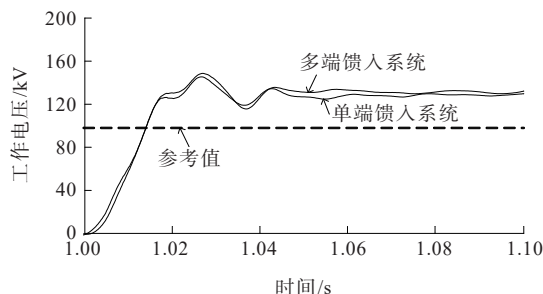


图 11 交流线路  $80\%$  处 A 相金属性接地的的工作电压

Figure 11 Operating voltage of A-phase metallic grounding at  $80\%$  of AC line

交流线路出口处发生 A 相经过渡电阻单相接地故障时,辅助判据的工作电压如图 12 所示,其中多端馈入系统的过渡电阻是  $25\ \Omega$ ,单端馈入系统的过渡电阻是  $70\ \Omega$ 。由图 12 可知,本文所提出的辅助判据相较于传统判据,抗过渡电阻的能力得到了大幅的提升,且在单端馈入系统中的提升更大。

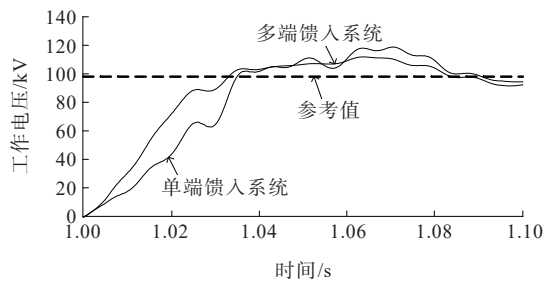


图 12 出口处 A 相经过渡电阻接地的的工作电压

Figure 12 Operating voltage of phase A at the outlet via transition resistance grounding

下一段线路出口处发生A相金属性接地故障时,辅助判据的工作电压如图13所示。由图13可知,在多端馈入系统和单端馈入系统中辅助判据的工作电压均小于参考值,说明发生区外故障时,保护均不会误动。

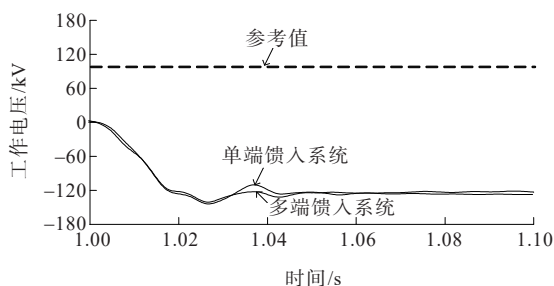


图13 下一段线路出口处A相金属性接地的的工作电压  
Figure 13 Operating voltage of metallic grounding of phase A at the exit of the next section of the line

交流线路出口处发生A相金属性接地故障以及AB两相金属性接地故障时,辅助判据的工作电压如图14~17所示。由图14~17可知,故障相的工作电压均大于参考值,非故障相的工作电压均小于参考值,本文所提的辅助判据依然具有较好的选相能力。

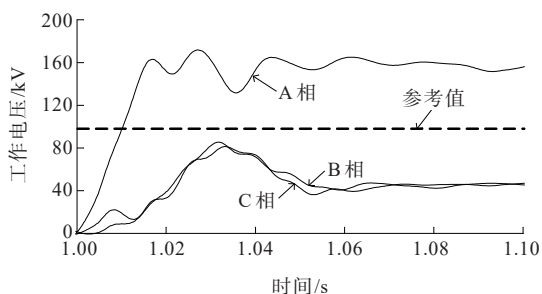


图14 单端馈入系统出口处A相金属性接地的的工作电压  
Figure 14 Operating voltage for metallic grounding of phase A at the outlet of the single-terminal infeed system

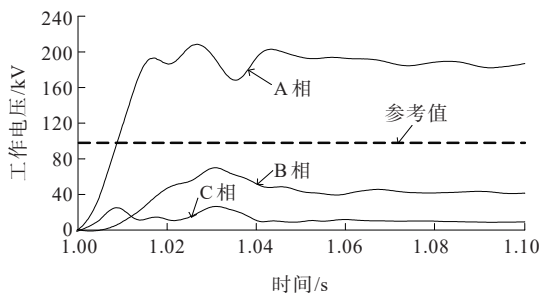


图15 多端馈入系统出口处A相金属性接地的的工作电压  
Figure 15 Operating voltage for metallic grounding of phase A at the outlet of a multi-terminal infeed system

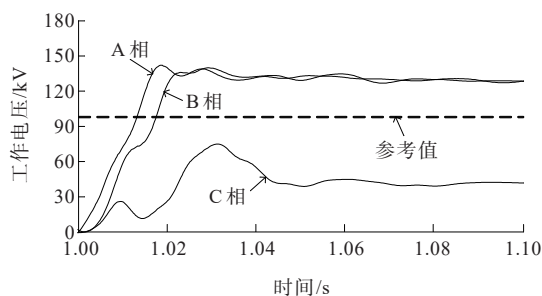


图16 单端馈入系统出口处AB两相金属性接地的的工作电压  
Figure 16 Operating voltage of AB two-phase metallic grounding at the outlet of the single-terminal infeed system

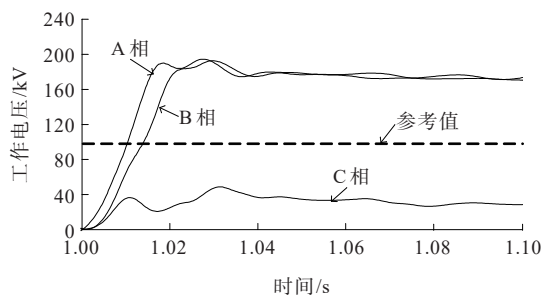


图17 多端馈入系统出口处AB两相金属性接地的的工作电压  
Figure 17 Operating voltage of AB two-phase metallic grounding at the outlet of the multi-terminal infeed system

为验证多端馈入系统中换流母线处接有更多回交流线路时,本文所提基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护依然适用,将交流系统出线改为4回,其余系统参数均不发生改变。仿真结果如图18~22所示。由图18可知,保护范围同样扩大了;由图19可知,相较于传统判据,抗过渡电阻能力也增强了;由图20可知,区外故障时,不会发生误动;由图21、22可知,辅助判据依然具有选相能力。以上仿真结果说明换流母线处接有更多回交流线路时,本文所提基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护任然有效。

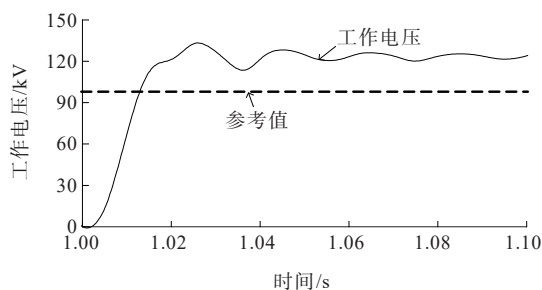


图18 交流线路80%处A相金属性接地的的工作电压  
Figure 18 Operating voltage of A-phase metallic grounding at 80% of AC line

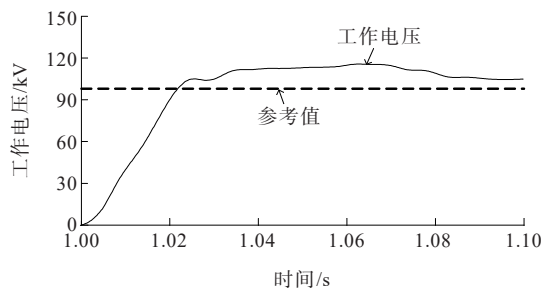


图19 出口处A相经过 $20\Omega$ 渡电阻接地的工作电压

Figure 19 Operating voltage at outlet A phase grounded through  $20\Omega$  transition resistor

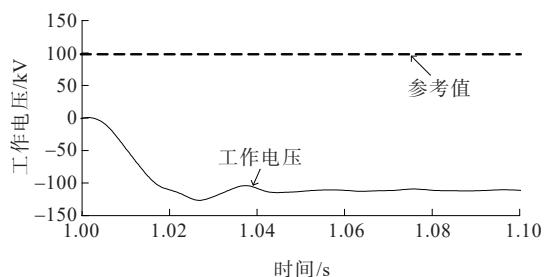


图20 下一段线路出口处A相金属性接地的工作电压

Figure 20 Operating voltage of metallic grounding of phase A at the exit of the next section of the line

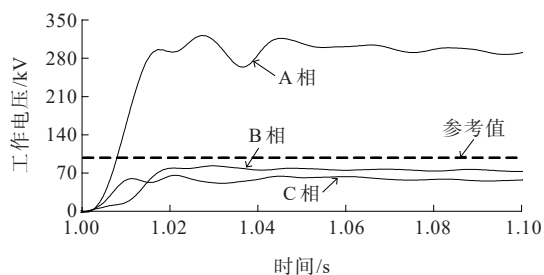


图21 出口处A相金属性接地故障的工作电压

Figure 21 Operating voltage of A-phase metallic earth fault at the outlet

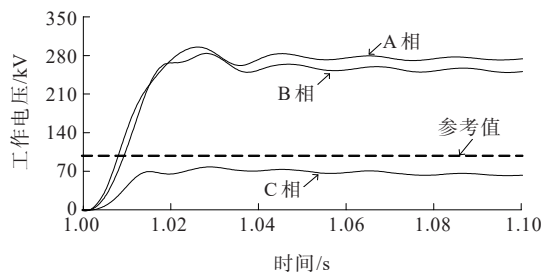


图22 出口处AB两相金属性接地的工作电压

Figure 22 Operating voltage of AB two-phase metallic grounding at the outlet

## 6 结语

本文分析工频变化量距离保护背侧系统阻抗

角在交直流多端馈入系统和单端馈入系统中的变化范围,进而分析其动作特性。分析发现保护背侧系统阻抗角的变化范围在单端馈入系统中大于在多端馈入系统中,因此保护在单端馈入系统中受到的影响更大。分析还发现减小可靠系数可以有效缓解保护范围缩小及抗过渡电阻能力减弱的问题;但减小可靠系数可能导致区外发生故障时保护误动,因此结合两侧零序电流相位差的余弦值,提出基于零序电流相位补偿的工频变化量距离保护,扩大保护范围,增强了抗过渡电阻能力,区外故障时也不会发生误动,且依然具有较好的选相能力。

### 参考文献:

- [1] 蔡泽祥,李晓华. 直流输电系统故障暂态和继电保护动态行为[M]. 北京:科学出版社,2020:1-15.  
CAI Zexiang, LI Xiaohua. Fault transient and relay protection dynamic behavior of HVDC transmission system[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-15.
- [2] 肖友强,邓步青,文云峰. 计及送端电网频率稳定的直流联络线极限承载能力评估[J]. 电力科学与技术学报, 2021,36(2):3-12.  
XIAO Youqiang, DENG Buqing, WEN Yunfeng. Total transfer capability assessment of HVDC tie-lines based on frequency stability of the sending-end grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 3-12.
- [3] 苏海林,朱林,高琴,等. 基于换流母线视角的交直流系统交互无功功率动态特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017,32(2):126-133.  
SU Hailin, ZHU Lin, GAO Qin, et al. Analysis of dynamic characteristic for reactive power feeding into AC/DC system based on the converter bus perspective[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 126-133.
- [4] 董新洲,汤涌,卜广全,等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(11):3107-3119.  
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [5] 黄志光,曹路,李建华,等. 混合多馈入直流作用下江苏受端电网安全稳定评估及改善[J]. 中国电力, 2021, 54(9):55-65.  
HUANG Zhiguang, CAO Lu, LI Jianhua, et al. Evaluation and improvement of security and stability of Jiangsu



- receiving-end power grid with hybrid multi-infeed DC[J]. Electric Power, 2021, 54(9):55-65.
- [6] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社,2010:120-125.  
ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system protective relaying(second edition)[M]. Beijing:China Electric Power Press,2010:120-125.
- [7] 索南加乐,何方明,焦在滨,等. 工频变化量距离元件特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28):59-65.  
SUONAN Jiale, HE Fangming, JIAO Zaibin, et al. Research on the characteristics of distance element based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28):59-65.
- [8] 侯俊杰,宋国兵,徐瑞东,等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(14):176-187.  
HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14):176-187.
- [9] 张安龙,钱堃,黄福全,等. 含分布式风电的变压器中性点经间隙接地对距离保护影响的分析与对策[J]. 智慧电力, 2021, 49(9):103-108.  
ZHANG Anlong, QIAN Kun, HUANG Fuquan, et al. Analysis and countermeasures for the impact of transformer neutral point via gap grounding on distance protection for transformers containing distributed wind power[J]. Smart Power, 2021, 49(9):103-108.
- [10] 张健康,索南加乐,何方明,等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4):98-103.  
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, HE Fangming, et al. Analysis of operation characteristics of power frequency variation distance protection in AC/DC hybrid power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 98-103.
- [11] 吴海江,陈锦荣,廖锋,等. 小电阻接地配电系统集中式接地保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 141-149.  
WU Haijiang, CHEN Jinrong, LIAO Feng, et al. Centralized protection for a grounding fault in a low-resistance grounding distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21):141-149.
- [12] 金能,邢家维,林湘宁,等. 一种抗电流互感器饱和的工频变化量保护新方案[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S1): 213-220.  
JIN Neng, XING Jiawei, LIN Xiangning, et al. A new scheme of frequency variation protection resisting current transformer saturation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1):213-220.
- [13] 王冰倩,赵文强,侍乔明,等. 受端混联LCC-VSC特高压直流输电系统故障穿越方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6):69-76.  
WANG Bingqian, ZHAO Wenqiang, SHI Qiaoming, et al. Fault ride-through method of inverter hybrid cascade LCC-VSC UHVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6):69-76.
- [14] 李海锋,张璞,王钢,等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一)直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9):41-46.  
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part one DC-system equivalent impedance of power-frequency component variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9):41-46.
- [15] 宋国兵,常鹏,侯俊杰,等. 故障分量方向元件在交直流多端馈入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9):136-145.  
SONG Guobing, CHANG Peng, HOU Junjie, et al. Adaptability analysis of fault component directional element in AC/DC multi terminal feed in system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 136-145.
- [16] 韩伟,杨睿璋,刘超,等. 混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 179-188.  
HAN Wei, YANG Ruizhang, LIU Chao, et al. DC fault characteristics and fault current suppression strategy of three-terminal hybrid HVDC system based on LCC and hybrid MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 179-188.
- [17] 崔子轩,袁婉玲,郝正航,等. 基于电流幅值关系与制动系数相配合的有源配电网差动保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12):1-7.  
CUI Zixuan, YUAN Wanling, HAO Zhenghang, et al. Differential protection scheme of active distribution network based on current amplitude relation and braking coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12):1-7.
- [18] 方万良,李建华,王建学. 电力系统暂态分析(第四版)[M]. 北京:中国电力出版社,2017:107-170.  
FANG Wanliang, LI Jianhua, WANG Jianxue. Power system transient analysis(fourth edition)[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2017:107-170.