

1-15-2024

Improved current sudden variable mutation phase selector for AC/DC hybrid system

Yifei MA

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Vocational College of Science and Technology, Nanyang 474150, China

Yanfang FAN

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China, 410849062@qq.com

Yuehua LU

School of Mechanical and Electrical Engineering, Linyi Technician Institute, Linyi 276005, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

MA, Yifei; FAN, Yanfang; and LU, Yuehua (2024) "Improved current sudden variable mutation phase selector for AC/DC hybrid system," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 5, Article 7.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.007

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/7>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

适用于交直流混联系统的改进型 电流突变量选相元件

马翼飞^{1,2}, 樊艳芳¹, 鲁月华³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 南阳科技职业学院智能制造学院, 河南 南阳 474150;
3. 临沂市技师学院机电工程学院, 山东 临沂 276005)

摘要:受故障期间直流侧系统等效正负序阻抗不相等特性的影响,应用于受端交流线路的传统电流突变量选相元件存在适应性问题。对传统电流突变量选相元件在交直流混联系统中误选相的问题进行深入分析,提出一种改进型电流突变量选相元件。通过电流补偿的方法对传统相电流突变量进行改进,利用改进后的相电流突变量构建选相系数,根据选相系数的幅值关系进行故障选相,从原理上弥补直流侧等效正负序阻抗不相等的影响。仿真结果表明,该选相方法能够在受端交流线路故障期间快速准确地选出故障相,并具有较好的抗过渡电阻性能。

关键词:交直流混联系统;选相元件;电流突变量;电流分配系数;补偿电流

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.007 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2023)05-0065-10

Improved current sudden variable mutation phase selector for AC/DC hybrid system

MA Yifei^{1,2}, FAN Yanfang¹, LU Yuehua³

(1.School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2.School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Vocational College of Science and Technology, Nanyang 474150, China; 3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Linyi Technician Institute, Linyi 276005, China)

Abstract: Due to the unequal characteristic of equivalent positive and negative sequence impedance of the DC side system during the fault period, the traditional current mutation phase selector applied to the receiver AC line has some adaptability problems. In this paper, the problem of wrong phase selection of traditional current mutation phase selection element in AC/DC hybrid system is deeply analyzed, and an improved current mutation phase selector is proposed. The traditional phase current mutation is improved by current compensation method, and the phase selection coefficient is constructed by the improved phase current mutation, and the fault phase selection is carried out according to the amplitude relation of the phase selection coefficient, so as to compensate the effect of the unequal equivalent positive and negative sequence impedance on the DC side in principle. Simulation results show that the improved phase selector could quickly and accurately select the fault phase during the failure of the receiver AC line, and the phase selector would have good resistance to transition resistance.

Key words: AC/DC hybrid system; phase selector; current mutation; coefficient of current distribution; current compensation

中国能源主要分布在西部,用电负荷主要在东部,能源与负荷的逆向分布决定需大力发展长距

离、大容量、高效率的高压直流输电技术^[1-2]。随着高压直流输电技术的大规模应用,电网结构已形成

收稿日期:2020-04-18;修回日期:2022-11-30

基金项目:新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2021H009)

通信作者:樊艳芳(1971—),女,博士,教授,主要从事新能源并网技术及电力系统保护与控制等研究;E-mail:410849062@qq.com

明显的交直流混联系统特征^[3-5]。选相元件能够在线路故障期间识别出故障相和故障类型,其可靠、快速的动作是距离保护和重合闸装置正常工作的前提^[6-9]。但传统选相元件在交直流混联系统中存在适应性问题,研究适用于混联系统的选相元件尤为重要。

众多学者对交直流混联系统的故障特征以及选相元件的适应性进行了大量研究^[10-12]。传统电流突变量选相元件判据简单、灵敏性高并具有较好的抗过渡电阻性能,是目前交流线路主要配置的选相方案之一^[13-16]。交直流混联系统的换流站含有大量电力电子器件,受端交流线路发生故障期间,直流系统呈现弱馈性,直流侧系统等效正负序阻抗不相等且差异过大,导致传统选相元件的动作性能受到影响^[17-19]。文献[20]通过对故障期间逆变器三相电流开关函数的研究,指出交流线路发生故障的时间以及逆变站换相失败的程度都可能影响传统电流突变量选相元件的动作性能。文献[21]指出无论受端交流线路故障是否引起直流逆变站发生换相失败,都会导致传统电流突变量选相元件存在误选相的风险。针对传统选相元件易受保护安装处侧正负序阻抗特性影响的问题,文献[22]提出一种利用电压模故障分量和稳态电压序分量相结合的选相方法,该选相方法可适用在正负序阻抗不相等的弱馈系统,但选相判据复杂且所需电气量较多,实际工程中难以实现。文献[23]根据交直流混联系统受端交流线路保护安装处各序电压与故障点各序电压基本同向的特征,提出一种基于相电压和序电压幅值关系的选相方法,但该方法受过渡电阻影响较大。

综上,亟待研究适用于交直流混联系统受端交流线路的故障选相元件。本文通过负序电流补偿的方法对传统相电流突变量进行改进,利用改进后的相电流突变量构建3个选相系数,根据选相系数的幅值关系进行故障选相,消除直流侧系统等效正负序阻抗不相等的影响。结合新疆某地区交直流混联系统,利用仿真软件搭建模型进行验证。

1 传统电流突变选相元件在交直流混联系统中的适用性分析

1.1 传统电流突变量选相元件的工作原理

传统电流突变量选相元件利用保护安装处两相电流突变量之差的幅值关系进行故障选相。故障期间,保护安装处的相电流突变量为

$$\begin{cases} \Delta I_A = C_1 I_{F1} + C_2 I_{F2} + C_0 I_{F0} \\ \Delta I_B = \alpha^2 C_1 I_{F1} + \alpha C_2 I_{F2} + C_0 I_{F0} \\ \Delta I_C = \alpha C_1 I_{F1} + \alpha^2 C_2 I_{F2} + C_0 I_{F0} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΔI_A 、 ΔI_B 、 ΔI_C 为各相电流突变量; I_{Fj} 为流入故障点 F 的各序电流, $j=0,1,2$ 分别表示零、正、负序; C_0 、 C_1 、 C_2 为各序电流分配系数; α 为旋转因子。

电流突变量差 ΔI_{AB} 、 ΔI_{BC} 、 ΔI_{CA} 为

$$\begin{cases} \Delta I_{AB} = (1 - \alpha^2) C_1 I_{F1} + (1 - \alpha) C_2 I_{F2} \\ \Delta I_{BC} = (\alpha^2 - \alpha) C_1 I_{F1} + (\alpha - \alpha^2) C_2 I_{F2} \\ \Delta I_{CA} = (\alpha - 1) C_1 I_{F1} + (\alpha^2 - 1) C_2 I_{F2} \end{cases} \quad (2)$$

以A相接地短路为例分析传统电流突变量选相元件的选相原理,A相接地故障时故障分量的正负序分量满足边界条件 $I_{F1} = I_{F2}$,正负序电流分配系数 C_1 和 C_2 相等,相电流差突变量的大小满足:

$$\begin{cases} |\Delta I_{AB}| = 3 |C_1 I_{F1}| \\ |\Delta I_{BC}| = 0 \\ |\Delta I_{CA}| = 3 |C_1 I_{F1}| \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,单相接地短路的故障特征为:含非故障相的相电流突变量差等于零,含故障相的电流突变量差相等且不为零。可得传统电流突变量选相元件在A相接地短路的判据为

$$(|\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{AB}|) \cap (|\Delta I_{BC}| < |\Delta I_{CA}|) \quad (4)$$

其他类型故障的选相原理分析同上所述,只不过不同故障的边界条件不同。两相相间短路故障的边界条件为 $I_{F1} = -I_{F2}$,两相接地短路故障的边界条件为 $I_{F1} = -\varphi I_{F2}$ ($0 < \varphi < 1$),三相短路故障的边界条件为 $I_{F2} = 0$,在纯交流线路中 $C_1 = C_2$ 的基础上,根据不同边界条件可得到传统相电流差突变量的选相依据如表1所示。

表 1 传统电流突变量选相元件的判据

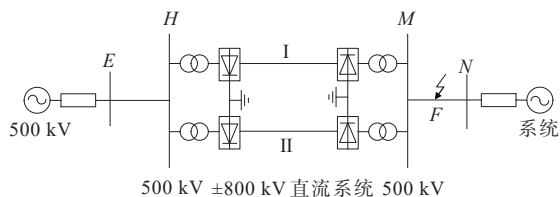
Table 1 Criterion of current mutation phase selector

选相结果	相电流差突变量幅值关系		
	$ \Delta I_{AB} $	$ \Delta I_{BC} $	$ \Delta I_{CA} $
A	+	-	+
B	+	+	-
C	-	+	+
AB	++	+	+
BC	+	++	+
CA	+	+	++
ABC	++	++	++

注:“-”、“+”、“++”分别代表极小、较大、极大

1.2 传统电流突变量选相元件在交直流混联系统中的适用性分析

结合故障期间直流侧等效正负序阻抗的仿真图,分析传统电流突变量选相元件的适应性。图 1 为某交直流混联系统示意图,直流系统电压等级为 ±800 kV,两侧交流系统电压等级为 500 kV。设置在 3 s 时 F 点发生 0.3 s 的单相接地故障。



500 kV ±800 kV 直流系统 500 kV

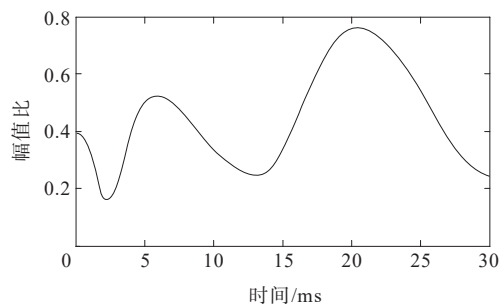
图 1 交直流混联系统示意

Figure 1 Schematic of AC/DC hybrid power grid

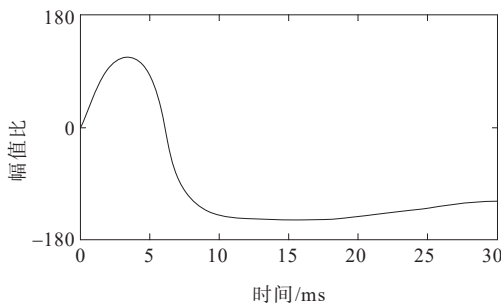
图 2 为单相接地故障时直流侧等效正负序阻抗的幅值比和相角差,可以看出直流系统等效正负序阻抗不相等,且随着故障的发展不断变化。

交直流混联系统受端交流线路中点 F 发生故障时,故障附加网络如图 3 所示。

在图 3 中, M、N 侧分别表示直流侧和常规电源侧; Z_{Mj} 和 Z_{Nj} 分别表示直流侧系统和常规电源侧系统的等值阻抗; Z_{LMj} 和 Z_{LNj} 分别表示故障点 F 到 M、N 两端的线路序阻抗; R_F 为过渡电阻; U_{Fj} 为故障附加电源; I_j 和 U_j 为 M 侧保护安装处测得的各序故障分量电流。



(a) 直流侧等效正负序阻抗的幅值比



(b) 直流侧等效正负序阻抗的相角差

图 2 直流侧系统等效正负序阻抗的故障特征

Figure 2 Fault characteristics of equivalent positive and negative sequence resistance of DC side system

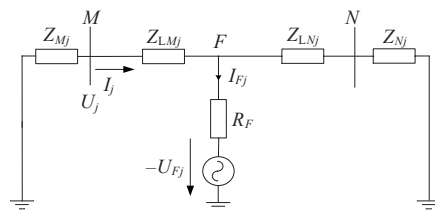


图 3 交直流混联系统故障附加网络

Figure 3 Additional fault net of AC/DC hybrid power grid

直流侧保护安装处各序电流与故障各序电流的关系为

$$I_j = C_j I_{Fj} \quad (5)$$

保护安装处电流分配系数的表达式为

$$C_j = \frac{Z_{LNj} + Z_{Nj}}{Z_{Mj} + Z_{LMj} + Z_{LNj} + Z_{Nj}} \quad (6)$$

在交直流混联系统中,故障点两端线路和常规系统的正负序阻抗相等,且都远小于直流侧系统阻抗,故障分量负正序电流分支系数比可以用直流侧系统正负序阻抗表示:

$$\frac{C_2}{C_1} \approx \frac{Z_{M1}}{Z_{M2}} \quad (7)$$

直流侧系统正负序阻抗在故障时不相等且不

断变化,使负正序电流分支系数不再相等,对选相元件的动作性能产生不利影响。在交直流混联系统中 $C_1 \neq C_2$,以线路MN发生A相接地故障为例分析传统电流突变量选相元件的适应性,令 $C=C_2/C_1$,且 $C \neq 1$,此时相电流差突变量为

$$\begin{cases} |\Delta I_{AB}| = \sqrt{3} |C_1 \Delta I_{F1}| \left| \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} + C \right| \\ |\Delta I_{BC}| = \sqrt{3} |C_1 \Delta I_{F1}| |1 - C| \\ |\Delta I_{CA}| = \sqrt{3} |C_1 \Delta I_{F1}| \left| 1 + \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) C \right| \end{cases} \quad (8)$$

对比式(3)可知,在交直流混联系统中 $C \neq 1$,BC相电流差突变量不等于零,AB相和CA相电流差突变量也不相等。 $|\Delta I_{BC}|$ 远小于 $|\Delta I_{AB}|$ 和 $|\Delta I_{CA}|$ 的特性被弱化,AG故障的判据无法满足,因此选相元件在交直流混联系统中无法正确选相。

在交直流混联系统中,直流系统等效正负序阻抗在故障时不相等导致保护安装处正负序电流分配系数产生较大的差异。由于 $C_1 \neq C_2$,表1中的电流突变量差幅值特征紊乱,传统电流突变量选相元件不能正确选相,直流侧等效正负序阻抗相差越大,影响就越明显。

2 考虑附加负序电流补偿的电流突变量改进方法

为解决正负序电流分配不均衡的问题,引入正负序电流分配系数的不平衡系数 γ ,定义:

$$\gamma = \frac{C_1 - C_2}{C_2} \quad (9)$$

C_1 与 C_2 的关系为

$$C_2 = \frac{C_1}{(1 + \gamma)} \quad (10)$$

将式(1)中的 C_2 全部用 C_1 替换,可得:

$$\Delta I_A = C_1 I_{F1} + \frac{C_1}{(1 + \gamma)} I_{F2} + C_0 I_{F0} \quad (11)$$

经整理可得:

$$\Delta I_A + \gamma I_2 = C_1 I_{F1} + C_1 I_{F2} + C_0 I_{F0} \quad (12)$$

令 $\Delta I'_A = \Delta I_A + \gamma I_2$,即

$$\Delta I'_A = C_1 I_{F1} + C_1 I_{F2} + C_0 I_{F0} \quad (13)$$

式中, $\Delta I'_A$ 为A相经负序电流补偿的改进相电流突变量。

同理,B、C相的改进相电流突变量 $\Delta I'_B$ 和 $\Delta I'_C$ 为

$$\begin{cases} \Delta I'_B = \Delta I_B + \alpha \gamma I_2 \\ \Delta I'_C = \Delta I_C + \alpha^2 \gamma I_2 \end{cases} \quad (14)$$

改进型相电流突变量的关键在于不平衡系数 γ 的计算。由式(6)可得, γ 的计算公式为

$$\gamma = \frac{Z_{M2} - Z_{M1}}{Z_{N1} + Z_{M1} + Z_{LN1} + Z_{LM1}} \quad (15)$$

直流侧等效阻抗可用M侧保护安装处测得的正负序故障分量电流和电压表示:

$$Z_{Mj} = -\frac{U_j}{I_j} \quad (16)$$

改进型电流突变量的计算只需在传统相电流突变量的基础上加上补偿量,补偿量由线路和常规电源侧系统的正序阻抗、保护安装处的正负序电流和电压组成,前者为固定值,后者为容易获取的本地量。改进后的电流突变量和相电流差突变量如下:

$$\begin{cases} \Delta I'_A = C_1 I_{F1} + C_1 I_{F2} + C_0 I_{F0} \\ \Delta I'_B = \alpha^2 C_1 I_{F1} + \alpha C_1 I_{F2} + C_0 I_{F0} \\ \Delta I'_C = \alpha C_1 I_{F1} + \alpha^2 C_1 I_{F2} + C_0 I_{F0} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \Delta I'_{AB} = (1 - \alpha^2) C_1 I_{F1} + (1 - \alpha) C_1 I_{F2} \\ \Delta I'_{BC} = (\alpha^2 - \alpha) C_1 I_{F1} + (\alpha - \alpha^2) C_1 I_{F2} \\ \Delta I'_{CA} = (\alpha - 1) C_1 I_{F1} + (\alpha^2 - 1) C_1 I_{F2} \end{cases} \quad (18)$$

对比式(1)中传统电流突变量的计算,经负序电流补偿的改进电流突变量中,负序电流分配系数 C_2 被正序电流分配系数 C_1 取代,有效地解决了直流侧系统等效正负序阻抗不相等的问题。

3 改进型电流突变量选相元件

经负序电流补偿后的电流突变量可以解决正负序电流分配系数不等的问题,但故障期间交直流故障信息相互影响,传统电流突变量选相元件的选相流程不再适用。为解决该问题,利用两相改进电

流差突变量之差和剩余一相改进电流突变量的比例关系建立3个选相系数,其表达式为

$$\begin{cases} P_1 = \frac{|\Delta I'_B - \Delta I'_C|}{|\Delta I'_A|} \\ P_2 = \frac{|\Delta I'_C - \Delta I'_A|}{|\Delta I'_B|} \\ P_3 = \frac{|\Delta I'_A - \Delta I'_B|}{|\Delta I'_C|} \end{cases} \quad (19)$$

式中, P_1 、 P_2 和 P_3 为选相系数。

将 P_1 、 P_2 和 P_3 按照从大到小的顺序依次排列为 P_{\max} 、 P_{mid} 、 P_{\min} 。在不同故障类型的情况下,通过比较3个选相系数的大小关系进行选相。

根据保护安装处中是否含有零序电压分量,判断是否为接地故障,再根据选相系数的关系对故障相进行识别。

3.1 接地故障的选相判据

当保护安装处中含有零序电压分量时,判断为接地故障。

1) 单相接地故障。当交直流混联系统受端交流线路发生单相接地故障时,故障相的改进电流突变量大于健全相的改进电流突变量,并且2个健全相的改进电流突变量的大小基本相同。而对于改进后的相电流差突变量,2个含故障相的相电流差突变量基本相同,且大于不含故障相的相电流差突变量。

以受端交流线路MN发生A相接地故障为例,改进后的相电流突变量和相电流差突变量的大小如下:

$$\begin{cases} \Delta I'_A = 2C_1 I_{F1} \\ \Delta I'_B = -C_1 I_{F1} \\ \Delta I'_C = -C_1 I_{F1} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \Delta I'_{AB} = 3C_1 I_{F1} \\ \Delta I'_{BC} = 0 \\ \Delta I'_{CA} = 3C_1 I_{F1} \end{cases} \quad (21)$$

由式(20)、(21)可看出A相接地故障时,各改进电流突变量和相电流差突变量的幅值关系为

$$\begin{cases} |\Delta I'_A| > |\Delta I'_B| \approx |\Delta I'_C| \\ |\Delta I'_{BC}| \ll |\Delta I'_{CA}| \approx |\Delta I'_{AB}| \end{cases} \quad (22)$$

A相接地故障期间选相系数的关系满足:

$$P_1 \ll P_2 \approx P_3 \quad (23)$$

同理,可推出B、C相发生单相接地故障时的关系为

$$P_2 \ll P_1 \approx P_3 \quad (24)$$

$$P_3 \ll P_2 \approx P_1 \quad (25)$$

其中,推导过程中需注意故障相为参考相。结合式(23)~(25)可看出,线路发生单相故障期间,3个选相系数中最小选相系数的分母对应故障相,可推出单相接地故障选相判据如下:

$$mP_{\min} < P_{\text{mid}} \quad (26)$$

式中, m 为整定系数,在继电保护中,远小于通常无法直接判断,需要引入整定系数 m 来参与判断, $P_{\min} \ll P_{\text{mid}}$ 可写作 $mP_{\min} < P_{\text{mid}}$,即用 m 倍的 P_{\min} 仍小于 P_{mid} 来表达 P_{\min} 远小于 P_{mid} , m 取值在4~8,本文中 m 取值为5。

在确定故障类型为接地故障后,当式(26)成立时,判断为单相接地故障,且 P_{\min} 分母所对应的相为故障相,且 P_{\min} 分子对应的相为健全相。

2) 两相接地故障。如果不满足式(26)中单相接地故障的判据,则确定故障类型为两相接地故障。

当交直流混联系统受端交流线路发生两相接地故障时,故障相的改进电流突变量大于健全相的改进电流突变量,并且2个故障相的改进电流突变量的大小基本相同。而对于改进后的相电流差突变量,2个含健全相的相电流差突变量的大小应基本相同,且小于不含健全相的相电流差突变量。

以受端交流线路MN发生BC两相接地故障为例,推导过程与上述相同,改进后的相电流突变量和相电流差突变量满足:

$$\begin{cases} |\Delta I'_A| \ll |\Delta I'_B| \approx |\Delta I'_C| \\ |\Delta I'_{BC}| > |\Delta I'_{CA}| \approx |\Delta I'_{AB}| \end{cases} \quad (27)$$

BC两相接地故障期间选相系数的关系满足:

$$P_1 \gg P_2 \approx P_3 \quad (28)$$

同理,可推出CA、AB两相接地故障时的关系如下:

$$P_2 \gg P_1 \approx P_3 \quad (29)$$

$$P_3 \gg P_2 \approx P_1 \quad (30)$$

上述分析可得,在确定故障类型为两相接地故障后, P_{\max} 分子中所对应的两相为故障相, P_{\max} 分母中所对应的相为健全相。

3.2 相间故障的选相判据

当保护安装处中不含零序电压分量时,判断为相间故障。

1) 两相相间故障。两相相间故障的改进电流突变量、相电流差突变量的大小关系与两相接地故障相同,选相系数的关系也相同,可推出两相相间故障的选相判据为

$$mP_{\text{mid}} < P_{\text{max}} \quad (31)$$

当式(31)成立时,判断为两相相间故障, P_{\max} 分子所对应的两相为故障相, P_{\max} 分母对应的相为健全相。

2) 三相对称故障。各相改进电流突变量的灵敏度近似相等,改进相电流差突变量也近似相等。在确定为相间故障时,若不满足判据公式(31),则为三相对称故障。

3.3 选相流程与性能分析

图4为适用于交直流混联系统的改进型电流突变量选相方法流程。

电流突变量只存在于故障初始阶段且存在时间短,通常采用一个周期内的电流采样值,即20 ms以内的电流突变量,该选相元件的本质还是利用电流突变量,因此具有较好的快速性。

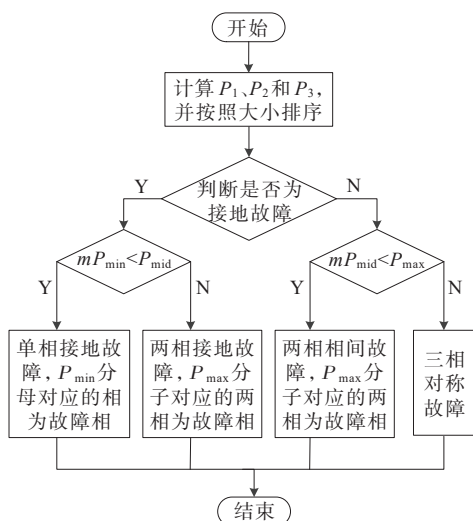


图4 选相流程

Figure 4 The phase selection process

稳态电流序分量选相方法不能识别两相相间故障和三相对称故障,依靠分相纵联差动保护的故障选相方法需要利用线路两端保护安装处信息交互才能确定故障类型,且这2种故障选相方法都无法适用于交直流混联系统。本文所提选相元件通过引入故障负序电流补偿的方法改进电流突变量的计算,有效地解决直流系统接入导致传统选相元件不适用的问题,且该方法原理简单且只需利用单端量信息,在交直流混联系统受端交流线路发生各种类型故障期间都可以准确识别。

4 仿真验证

在前文理论分析的基础上,依托新疆某地区交直流混联系统网架结构,在电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示的交直流混联系统模型进行仿真验证,仿真模型的参数如表2所示。

表2 仿真模型参数

Table 2 Simulation model parameters

参数	单位	数值
直流线路电压等级	kV	±800
受端交流线路电压等级	kV	500
线路MN长度	km	110
线路单位正序电阻	Ω/km	0.018
线路单位正序电抗	Ω/km	0.277
线路单位正序电容	μF/km	0.013
线路单位零序电阻	Ω/km	0.231
线路单位零序电抗	Ω/km	0.973
线路单位零序电容	μF/km	0.008
受端交流系统侧的正序阻抗	Ω	4.37+j57.18
受端交流系统侧的正序阻抗	Ω	3.10+j20.45

设置在3 s时发生故障,故障持续时间为0.3 s,采样频率取3 kHz。

4.1 传统电流突变量选相元件的适应性分析

在线路MN中点处分别设置A相接地故障、BC两相相间故障、BC两相接地故障、三相对称故障,故障发生20 ms内,传统电流突变量选相元件的选相结果如图5所示。

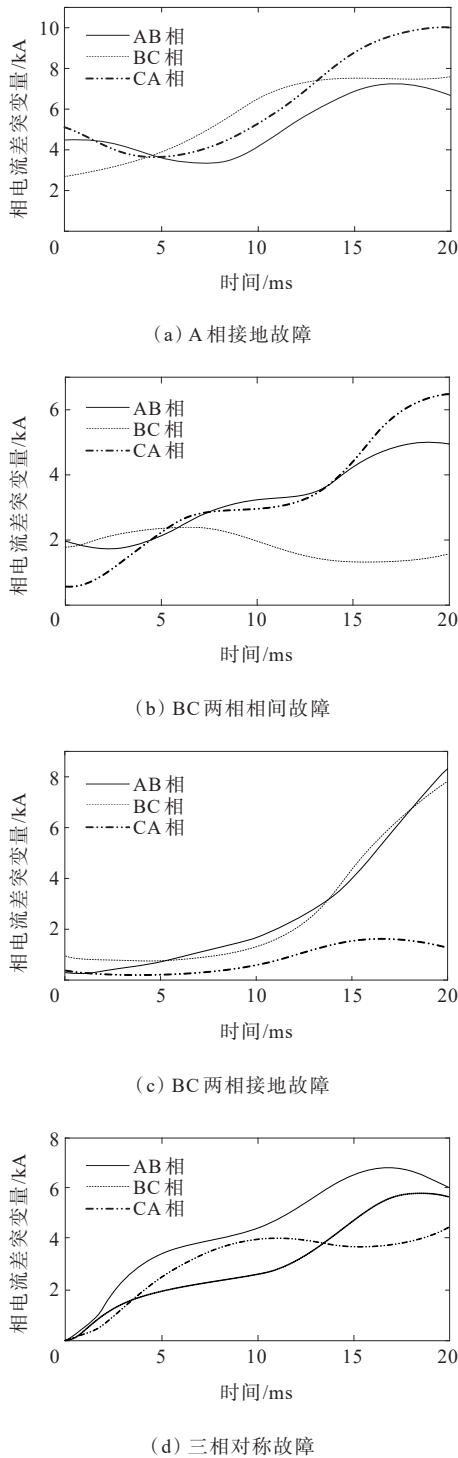


图 5 传统电流差突变量选相元件的选相结果
Figure 5 Results of conventional current mutation phase selector

由图 5 可明显看出,在交直流混联系统受端交流线路故障期间,保护安装处测得的相电流差突变量幅值关系变得紊乱,不再满足表 1 中的判据,除三相对称故障外,传统相电流差突变量元件均无法正确选相。

4.2 改进型电流突变量选相元件的适应性分析

设置与文 4.1 相同的故障,采用 15 ms 数据窗,得到改进型电流突变量选相元件的选相结果如图 6 所示,其他类型故障的选相结果如表 3 所示。

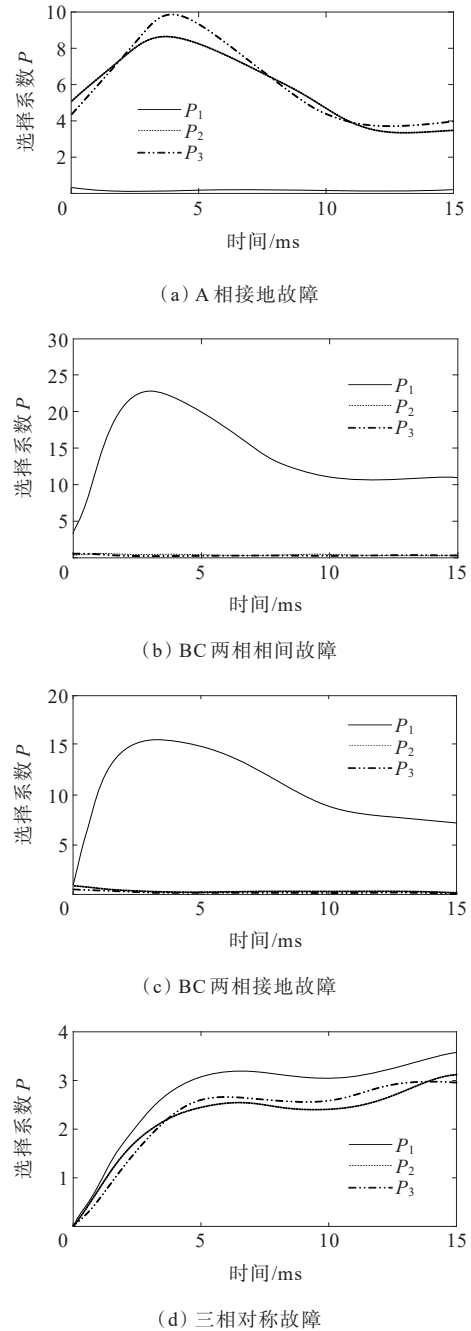


图 6 改进型电流突变量选相元件的选相结果
Figure 6 Results of improved current mutation phase selector

由图 6 和表 3 可知,改进型电流突变量选相元件在交直流混联系统受端交流线路发生各种类型故障的情况下均能快速可靠地选出故障相,克服直流系统接入的影响。

对改进型选相元件的抗过渡电阻能力进行验证,在交流线路中点设置不同类型故障,分别经50、100、200 Ω 过渡电阻接地时的选相结果如表4所示。

表3 改进型电流突变量选相元件的选相结果

Table 3 Results of improved current mutation phase selector

故障类型	U_0/kV	选相系数			选相结果
		P_1	P_2	P_3	
BG	17.05	6.41	0.15	6.01	BG
CG	11.87	4.39	3.49	0.25	CG
AB	—	1.07	0.98	9.97	AB
CA	—	0.82	15.97	1.53	CA
ABG	9.88	0.81	1.33	13.28	ABG
CAG	28.65	0.19	16.15	1.36	CAG

注:A、B、C表示故障相,G表示接地。

表4 过渡电阻对选相结果的影响

Table 4 Influence of transition resistance on selection results

故障类型	过渡电阻	U_0/kV	选相系数			选相结果
			P_1	P_2	P_3	
AG	50	8.76	0.07	7.09	5.03	AG
	100	7.66	0.29	7.36	6.39	AG
	200	5.94	0.15	8.02	12.29	AG
BC	50	—	11.37	1.10	0.83	BC
	100	—	14.04	0.61	1.55	BC
	200	—	12.13	0.63	1.29	BC
BCG	50	8.17	14.04	1.16	1.42	BCG
	100	6.33	12.13	0.63	1.15	BCG
	200	4.03	10.97	0.69	1.21	BCG
ABC	50	—	2.69	2.14	1.46	ABC
	100	—	3.48	2.18	4.53	ABC
	200	—	2.42	1.86	1.34	ABC

为验证所提选相元件在直流侧逆变器发生换相失败的动作性能,在交流线路出口处(保护安装处M左侧10 km)设置A相金属性接地故障,直流逆变器关断角波形如图7所示。

该仿真模型中设置的直流逆变器最小关断角为 15° ,从图7可以看出,3.00~3.05 s逆变器关断角为 0° ,即逆变器发生换相失败。图8为发生上述故障期间改进型电流突变量选相元件的选相结果,从

图8可看出,受端交流线路故障引起直流逆变器换相失败时,改进型电流突变量选相元件仍可以准确选出故障相。

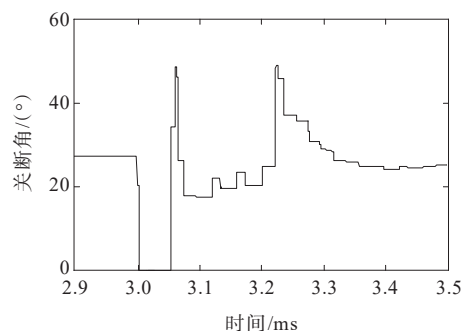


图7 直流逆变器关断角大小

Figure 7 The shutdown angle of the DC inverter station

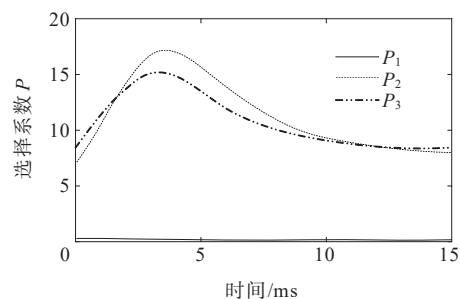


图8 换相失败时的选相结果

Figure 8 Results of phase selection when commutation fails

仿真结果表明,该选相元件在各种故障的情况下均可准确快速地选出故障相和故障类型,并具有一定的抗过渡电阻的能力。

5 结语

交直流混联系统受端交流线路故障期间,直流侧系统等效正负序阻抗不相等,保护安装处正负序电流分配系数差异较大,导致传统电流突变量选相元件存在误选相的风险。

本文提出一种改进型电流突变量选相元件,通过负序电流补偿的方法改进电流突变量的计算,利用改进后的电流突变量构建选相系数,根据选相系数的幅值关系进行故障选相。该选相元件能够在受端交流线路故障期间快速准确地选出故障相,有效地解决直流系统接入的影响,并具有一定的抗过渡电阻性能。

参考文献:

- [1] 张增强,解超,陈伟伟,等.基于电容调压原理的自适应高压直流断路器[J].高压电器,2021,57(9):152-160.
ZHANG Zengqiang, XIE Chao, CHEN Weiwei, et al. Adaptive HVDC circuit breaker based on capacitor voltage regulation principle[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(9):152-160.
- [2] 申志鹏,熊会,朱介北,等.影响特高压直流输电工程安全高效运行评估因素集的建模与分析[J].发电技术,2021,42(1):48-59.
SHEN Zhipeng, XIONG Hui, ZHU Jiebei, et al. Modelling and analysis on evaluation factor sets affecting the safe and high-efficiency operation of UHVDC transmission project[J]. Power Generation Technology, 2021,42(1):48-59.
- [3] 马汝祥,周洪益,邵林,等.计及可中断负荷的交直流混合微电网运行优化研究[J].供用电,2021,38(10):97-106.
MA Ruxiang, ZHOU Hongyi, SHAO Lin, et al. Study on operation optimization of AC/DC hybrid microgrid with interruptible load[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(10):97-106.
- [4] 汤未,于溯,郑涛,等.基于交直流保护协同配合的交直流碰线保护新方案[J].中国电力,2022,55(11):41-50.
TANG Wei, YU Su, ZHENG Tao, et al. A novel protection scheme of AC and DC line-touching based on coordination of AC and DC protection[J]. Electric Power, 2022,55(11):41-50.
- [5] LIU Z, GAO H L, LUO S B, et al. A fast boundary protection for an AC transmission line connected to an LCC-HVDC inverter station[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020,5(1):1-12.
- [6] 张明一,孙元章,黎雄,等.改进时域反演算法在配电网故障定位中的应用[J].电力系统自动化,2021,45(15):101-108.
ZHANG Mingyi, SUN Yuanzhang, LI Xiong, et al. Application of improved time reversal algorithm in fault location for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(15):101-108.
- [7] 叶远波,蔡翔,谢民,等.配电网单相接地故障快速选相方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):96-103.
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(3):96-103.
- [8] 陈羽,石巍,杨兵,等.混合式高压直流断路器控制保护系统[J].电力工程技术,2021,40(5):164-170+199.
CHEN Yu, SHI Wei, YANG Bing, et al. Hybrid HVDC circuit breaker control and protection system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021,40(5):164-170+199.
- [9] SONG G B, WANG C Q, WANG T, et al. A phase selection method for wind power integration system using phase voltage waveform correlation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(2):740-748.
- [10] 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.
- [11] 束洪春,代月,安娜,等.基于线性回归的柔性直流电网纵联保护方法[J].电工技术学报,2022,37(13):3213-3226+3288.
SHU Hongchun, DAI Yue, AN Na, et al. Pilot protection method of flexible DC grid based on linear regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13):3213-3226+3288.
- [12] 李彬,杜丁香,王兴国,等.基于平均绝对误差的海上风电经柔直送出系统交流海缆纵联保护[J].电测与仪表,2022,59(6):122-129.
LI Bin, DU Dingxiang, WANG Xingguo, et al. AC submarine cable pilot protection for offshore wind power through MMC-HVDC system based on mean absolute error[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6):122-129.
- [13] 孙志达,杨涛,吴栋冀,等.基于多源信息和遗传算法的配电网故障定位模型[J].智慧电力,2021,49(12):104-110.
SUN Zhida, YANG Tao, WU Dongqi, et al. Fault location model for distribution networks based on multi-source information and genetic algorithm[J]. Smart Power, 2021,49(12):104-110.
- [14] 何谋超.高压输电线路故障选相方法的研究[D].杭州:浙江大学,2008.
HE Mouchao. Study on the method of fault phase selection for UHV transmission line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [15] 刘欣,黄少锋,张鹏.相电流差突变量选相在混压同塔输电线路跨电压故障中的适应性分析[J].电工技术学报,

- 2015,30(21):118-126.
- LIU Xin, HUANG Shaofeng, ZHANG Peng. Adaptability analysis of phase-selector based on sudden-change of phase-current-difference in cross-voltage fault occurred in mixed-voltage transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21):118-126.
- [16] 张健康, 索南加乐, 焦在滨, 等. 交直流混联电网突变量选相元件动作性能分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17):76-80.
- ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, JIAO Zaibin, et al. Performance analysis of phase selector device based on fault component in AC-DC hybrid power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17):76-80.
- [17] 李金东, 王勇, 王猛, 等. 基于二次扰动的配电网单相接地故障有源电流消弧方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12):72-78.
- LI Jindong, WANG Yong, WANG Meng, et al. An active current arc suppression method for single-phase grounding faults in the distribution network based on secondary current disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12):72-78.
- [18] 宋国兵, 张宇轩, 张晨浩, 等. 换流站传递特性及其对交直流电网保护影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5):465-477.
- SONG Guobing, ZHANG Yuxuan, ZHANG Chenhao, et al. Converter station transmission characteristics for protecting hybrid AC/DC power grids[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 465-477.
- [19] 陈实, 郇能灵, 范春菊, 等. 逆变型电源接入对选相元件的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12):106-112+187.
- CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Influence of inverter-interfaced generator on element of phase selectors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 106-112+187.
- [20] 李永丽, 杨子荷, 宋金钊, 等. HVDC 馈入及其换相失败对交流电网选相元件的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5):1825-1834.
- LI Yongli, YANG Zihe, SONG Jinzhao, et al. Influence analysis of HVDC and commutation failure on AC phase selector[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1825-1834.
- [21] 黄少锋, 申洪明, 费彬. 交直流互联系统对电流选相元件的影响分析及对策[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(2):1-7.
- HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, FEI Bin. The effect of AC/DC interconnected network on the phase selector based on current and the countermeasure[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2016, 43(2):1-7.
- [22] 马健, 樊艳芳, 李锋, 等. 适用于集群风电场送出线的选相元件研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(9):1217-1225.
- MA Jian, FAN Yanfang, LI Feng, et al. Research on fault phase selection method for cluster wind farm outgoing line [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9):1217-1225.
- [23] 陈静, 唐飞, 廖清芬. 相/序电压幅值比较的交直流电网故障选相[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 29-33.
- CHEN Jing, TANG Fei, LIAO Qingfen. Faulty phase selection criterion in AC/DC hybrid power system based on the comparison of phase/sequence voltage amplitude[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4):29-33.