

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.015

基于模型识别的交直流混联输电系统时域双端量选相方法

马翼飞, 樊艳芳

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要:针对传统单端量选相元件在交直流混联系统受端交流长线路不适用问题,文中提出基于模型识别的时域双端量选相方法。首先,利用模型识别的思想,研究故障期间受端带并联电抗器的交流长线路非故障相和故障相的时域模型,经分析可知,非故障相的差动电流和差动电压满足电容模型而故障相不满足。其次,通过 Spearman 等级相关系数计算各相的电容模型符合度,与阈值对比进行故障选相。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建交直流混联系统模型,从故障类型、故障位置、过渡电阻、采样频率以及噪声干扰等方面对所提故障选相方法进行仿真验证。结果表明,该故障选相方法在受端交流线路各位置故障期间均能快速准确地选出故障相,不依赖直流侧电源特性、不受并联电抗器的影响,并具有较好的抗过渡电阻和抗干扰性能。

关键词:交直流混联系统;故障选相;交流线路;Spearman 等级相关系数;模型识别;并联电抗器

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0130-09

0 引言

由于我国的能源与负荷呈逆向分布,须大力发展长距离、大容量、高效率的高压直流输电技术。随着高压直流输电技术的大规模应用,我国电网结构已形成明显的交直流混联系统特征^[1-6]。选相元件能在线路故障期间识别出故障相和故障类型,其可靠、快速动作是距离保护和重合闸正常工作的前提^[7-10],但单端量选相元件在交直流混联系统受端长线路中存在误选相的问题,因此研究适用于交直流混联系统的选相方法尤为重要。

众多学者对传统选相元件在交直流混联系统中的适应性进行了大量研究^[11-15]。目前,我国高压线路常采用基于相电流差突变量和稳态电流序分量的单端量选相方法进行故障识别,这2种传统选相方法的前提是保护安装处背侧系统等效正负序阻抗近似相等^[16-18]。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,使传统单端量选相元件出现误选相^[19-21]。单端量的选相元件在中长线路两端存在灵敏度不同的问题,故障期间长线路两端并联电抗器的存在也为谐波分量提供通道,影响传统选相元件的动作性能^[22-24]。随着通信技术的发展,许多学者研究了基于双端量的故障选相原理。文献[25]提出利用两端相间电流和与两端相间电压结合的

选相方法,区分单相故障和多相故障,但无法识别多相故障类型。文献[26]通过接地故障期间各序差动电流的幅值和相位关系进行故障选相,并通过零序电流区分单相和两相接地故障,但零序电流只存在于接地故障,该选相方法无法判别相间故障类型。文献[27]利用正序电容电流对线路两端正序电流之差进行补偿,结合补偿后的正序电流差与线路两端负序电流差的相位关系进行选相,但直流馈入使序分量关系紊乱,导致该方法在交直流混联系统中难以正确选相。

综上,为研究适用于交直流混联系统受端交流长线路的故障选相方法,文中提出基于模型识别的时域双端量选相方法,根据受端交流线路故障期间,非故障相的差动电流和差动电压满足电容模型而故障相不满足的特性,利用 Spearman 等级相关系数计算电容模型符合度进行故障选相。该选相元件不依赖电源特性、不受并联电抗器的影响,解决了单端量选相在长线路两端灵敏度不一致的问题,在交直流混联系统受端交流长线路中可快速可靠地进行故障选相。

1 交直流混联系统的故障特征

图1为交直流混联系统,其中 H 、 D 分别为整流侧和逆变侧所连母线; G 为送端交流系统, R 为其所连母线; E 、 E_1 、 E_2 为受端交流系统, S 、 S_1 、 S_2 为其所连母线; F 为故障点。

受端交流侧接三回线路送出直流系统传输的功率,以线路 DS 为例, DS 发生故障导致直流系统呈弱馈性,而传统单端量选相元件的原理依赖电源

收稿日期:2022-12-09;修回日期:2023-03-06

基金项目:新疆维吾尔自治区天山英才培养计划资助项目(2022TSYCLJ0019)

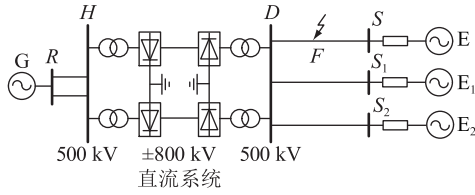


图1 交直流混联系统示意

Fig.1 Schematic diagram of AC/DC hybrid system

特性,故障期间直流系统的不确定性会导致选相元件误选相。传统单端量选相元件在长线路两端存在灵敏度不一致的缺陷,且受端交流线路两端并联电抗器的存在也影响传统单端量选相元件的性能。为解决上述问题,采用不受直流侧电源特性影响的时域全量,构建含并联电抗器的非故障相与故障相时域双端量模型。

1.1 非故障相模型

以受端交流线路 DS 发生 A 相接地故障为例,分析故障相和非故障相的故障模型。图 2 为线路 DS 中 F 点发生 A 相接地故障的示意, M 、 N 为 2 条紧靠故障位置的虚拟母线。其中 $i_{D\theta}$ 、 $i_{S\theta}$ 分别为流经保护安装处 D 、 S 的电流, $\theta=A, B, C$; $i_{M\theta}$ 、 $i_{N\theta}$ 分别为虚拟母线 M 、 N 流出点的电流; $u_{M\theta}$ 、 $u_{N\theta}$ 分别为 M 、 N 处的三相电压。

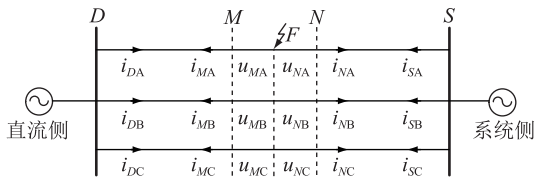


图2 受端交流线路故障示意

Fig.2 Schematic diagram of the fault of the receiving AC line

图 3 为非故障相的电路,其中 Z_{LD} 、 Z_{LS} 分别为故障点 F 到保护安装处 D 、 S 的线路阻抗; C_M 、 C_N 分别为线路 DM 、 NS 对地电容; i_D 、 i_S 分别为保护安装处 D 、 S 侧流出的电流。

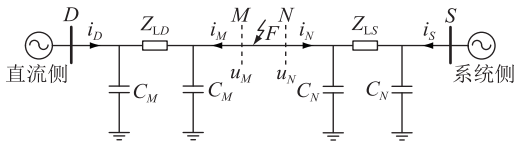


图3 非故障相电路

Fig.3 Non-fault phase circuit

考虑到虚拟母线 M 、 N 的位置紧靠故障点,非故障相 M 、 N 处的电压及流出的电流满足:

$$\begin{cases} u_M = u_N \\ i_M + i_N = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,线路 DS 之间发生单相接地故障

不会影响非故障相线路结构的完整性。按照分布参数的思想, DM 和 NS 两段线路可以等效为如图 4 所示的电路。其中 Z_L 为线路 DS 之间的阻抗; C 为线路 DS 的对地电容; L 为线路两端并联电抗器的等效电感; u_D 、 u_S 分别为两侧保护安装处的电压; i_{DL} 、 i_{SL} 分别为流过线路两侧电抗器的电流; i_{DC} 、 i_{SC} 分别为流过线路两侧分布电容的电流; i_{D1} 、 i_{S1} 分别为两侧流入线路阻抗的电流。

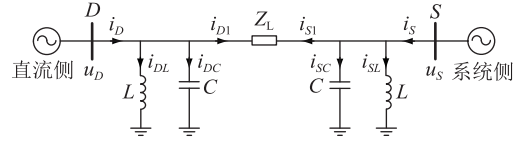


图4 非故障相简化电路

Fig.4 Non-fault phase simplified circuit

图 4 中,保护安装处 D 、 S 侧流出的电流分别为:

$$\begin{cases} i_D = i_{D1} + C \frac{du_D}{dt} + \frac{1}{L} \int u_D dt \\ i_S = i_{S1} + C \frac{du_S}{dt} + \frac{1}{L} \int u_S dt \end{cases} \quad (2)$$

定义差动电流 i_{cd} 和差动电压 u_{cd} 分别为:

$$\begin{cases} i_{cd} = i_D + i_S \\ u_{cd} = u_D + u_S \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),并考虑到 $i_{D1} + i_{S1} = 0$,则非故障相的两端差动电压、电流满足:

$$i_{cd} = C \frac{du_{cd}}{dt} + \frac{1}{L} \int u_{cd} dt \quad (4)$$

由式(4)可知,非故障相的差动电压、电流符合如图 5 所示的电容与电感并联模型,电感值为并联电抗器等效电感,电容值为线路对地电容。

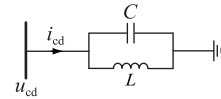


图5 非故障相等效模型

Fig.5 Equivalent electrical model of non-fault phase

为进一步简化模型,计算电感与电容并联的阻抗大小为:

$$Z_{eq} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (5)$$

式中: ω 为角频率。

由于研究对象为长线路,输电线路长度大于 150 km 时, $1 - \omega^2 LC < 0$,电容与电感的并联阻抗呈容性,等效电容记为 C_{eq} ,表达式为:

$$C_{eq} = C - \frac{1}{\omega^2 L} \quad (6)$$

非故障相的差动电流、电压满足:

$$i_{cd} = C_{eq} \frac{du_{cd}}{dt} \quad (7)$$

由式(7)可知,交直流混联系统受端交流线路故障期间,非故障相的差动电压和差动电流参数满足电容关系时可将非故障相等效为电容模型。

1.2 故障相模型

图6为受端交流线路故障期间故障相的等效电路,其中 R_F 为过渡电阻; i_F 为流过渡电阻的电流。

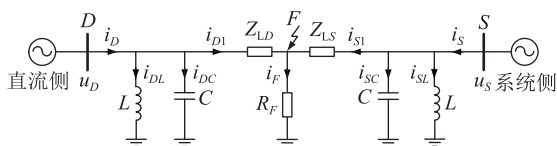


图6 故障相电路

Fig.6 Fault phase circuit

保护安装处的电流 i_D 流入分布电容、并联电抗器以及故障点,由于分布电容的容抗与并联电抗器的感抗高达上千欧姆,远大于线路和系统阻抗,且大部分电容电流被电抗器欠补偿, i_D 在分布电容和电抗器的分流较小,满足以下关系:

$$\begin{cases} i_{DC} + i_{DL} \ll i_D \\ i_{SC} + i_{SL} \ll i_S \end{cases} \quad (8)$$

i_D 主要流入故障点 F ,即 i_D 和 i_{D1} 近似相等,故计算差动电流时忽略 i_{DL} 、 i_{DC} 、 i_{SC} 、 i_{SL} 的影响。由图6可得, D 、 S 侧电压分别为:

$$\begin{cases} u_D = R_{LD}i_D + L_{LD} \frac{di_D}{dt} + R_F i_F \\ u_S = R_{LS}i_S + L_{LS} \frac{di_S}{dt} + R_F i_F \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_{LD} 、 R_{LS} 分别为故障点到 D 、 S 处的线路电阻; L_{LD} 、 L_{LS} 分别为故障点到 D 、 S 处的线路电感。

故障相的差动电流 i_{cd} 、电压 u_{cd} 满足:

$$u_{cd} = R_{LD}i_D + L_{LD} \frac{di_D}{dt} + R_{LS}i_S + L_{LS} \frac{di_S}{dt} + 2R_F i_F \quad (10)$$

对式(10)进行整理可得:

$$u_{cd} = R_{eq}i_{cd} + L_{eq} \frac{di_{cd}}{dt} \quad (11)$$

式中: R_{eq} 、 L_{eq} 分别为等效电阻值和电感值,其表达式见式(12)。

$$\begin{cases} R_{eq} = R_{LD} \frac{Z_{LS}}{Z_{LS} + Z_{LD}} + R_{LS} \frac{Z_{LD}}{Z_{LS} + Z_{LD}} + 2R_F \\ L_{eq} = L_{LD} \frac{Z_{LS}}{Z_{LS} + Z_{LD}} + L_{LS} \frac{Z_{LD}}{Z_{LS} + Z_{LD}} \end{cases} \quad (12)$$

受端交流线路故障期间,若故障相的差动电压

和差动电流参数满足式(11),则可将故障相的模型等效为电感与电阻串联模型。

在交直流混联系统中,任意长度范围输电线路的故障相都可等效为阻抗模型,但线路过短时,非故障相不能等效为电容模型,因此要求距离不小于150 km。考虑模型识别的方法使用双端量信息,要结合线路两侧信息进行判断,因此线路不适宜过长,最大距离选择500 km较为合适。根据非故障相的差动电压、电流符合电容模型而故障相符合阻抗模型的特性,利用线路两端差动电压和电流的时域全量,构建基于模型识别的双端量选相方法。

2 基于模型识别的时域双端量选相元件

相比非故障相的电容模型,故障相阻抗模型的计算必须以确定故障位置为前提,且计算量大、忽略了并联电抗器和分布电容对差动电流的影响,故选取电容模型进行故障选相,即非故障相符合电容模型而故障相不符合电容模型。由式(7)可知,受端交流线路故障期间,非故障相的差动电流与差动电压的导数值具有强正相关特性,而故障相不具有强正相关性,根据该特征可进行模型识别。

2.1 Spearman 等级相关系数的引入

为高效地判别电容模型的符合度,文中引入Spearman 等级相关系数。Spearman 等级相关系数是判断模型相似度常用的算法之一,对数据的条件要求较少,不像余弦相似度对数值积差要求较为严格,且不受数据量纲的影响,对异常数据不敏感,更适合处理离散型数据。

计算 Spearman 等级相关系数前须对2组数据进行处理,把数据 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 按升序排列得到数据 $x' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$,将数列 x 内元素 x_i 在数列 x' 中的位置记为 a_i ,得到数列 x 对应的秩次数列 a 。将另一波形数列 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 按同样方式排列得到其秩次数列 b 。将数列 a 、 b 内每个对应元素相减得到秩差数列 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$,并将其代入如式(13)所示的 Spearman 等级相关系数公式中。

$$P(x, y) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (13)$$

式中: n 为数据个数,即数据窗的采样数; $P(x, y)$ 为 Spearman 等级相关系数,其取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $P(x, y)$ 的正负代表2组数据的变化方向是否相同,即 $P(x, y) > 0$ 表示2组数据正相关, $P(x, y) < 0$ 表示2组数据负相关;而两者相互关系的紧密程度体现在 $|P(x, y)|$ 的数值上, $|P(x, y)|$ 越大表示相关

性越强。

2.2 时域双端量选相新原理

构建电容模型的差动电压 u_{cd} 、差动电流 i_{cd} 均来自保护安装处提取的时域全量信息,其中包含来自直流侧的故障电压、电流的时域全量信息。时域全量信息具有不受谐波以及频率偏移影响的优点,克服了并联电抗器以及直流换流站的高谐波故障特性对所提选相方法的影响。

故障相和非故障相的模型对应单相线路,而实际工程为三相线路,因此文中对该选相方法应用于三相输电线路进行修正。由式(6)可知,等效电容中线路电容占比较大,且线路运行过程中发生不对称接地短路故障时,线路的零序电容与正负序电容不同,因此通过零序电压对各相的差动电压进行补偿,补偿步骤如式(14)所示。

$$i_{cd} = \left(c_1 \frac{du_{cd1}}{dt} + c_2 \frac{du_{cd2}}{dt} + c_0 \frac{du_{cd0}}{dt} \right) l = c_1 l \left(\frac{du_{cd1}}{dt} + \frac{du_{cd2}}{dt} + \frac{du_{cd0}}{dt} + \frac{c_0 - c_1}{c_1} \times \frac{du_{cd0}}{dt} \right) = c_1 l \frac{d(u_{cd} + K_c u_{cd0})}{dt} \quad (14)$$

式中: l 为线路长度; c_1 、 c_2 、 c_0 分别为线路单位正、负、零序电容; u_{cd1} 、 u_{cd2} 、 u_{cd0} 分别为差动电压正、负、零序分量; K_c 为零序电压补偿系数, $K_c = (c_0 - c_1)/c_1$ 。

补偿后的差动电压 u'_{cd} 如式(15)所示。

$$u'_{cd} = u_{cd} + K_c u_{cd0} \quad (15)$$

利用三点差分形式代替差动电压导数形式,数列 x 的第 n 个数据 x_n 和数列 y 的第 n 个数据 y_n 分别为:

$$\begin{cases} x_n = i_{cd\theta}(n) \\ y_n = \frac{u'_{cd\theta}(n+1) - u'_{cd\theta}(n-1)}{2T_s} \end{cases} \quad (16)$$

式中: T_s 为采样间隔时间; $i_{cd\theta}(n)$ 为第 n 个采样点的 θ 相差动电流; $u'_{cd\theta}(n+1)$ 、 $u'_{cd\theta}(n-1)$ 分别为第 $n+1$ 和第 $n-1$ 个采样点的 θ 相差动电压导数。

将式(16)代入式(13),求得每一相的 Spearman 等级相关系数,对线路中的故障相进行判别,通过与电容模型正相关系数的阈值 P_{set} 对比,进行电容模型相关度的判别,确定故障类型。

阈值的选取须考虑同步误差、互感器同步误差、线路参数误差等因素的影响。阈值的整定如式(17)所示。

$$P_{set} = P_w P_{rel} \quad (17)$$

式中: P_w 为角度误差系数; P_{rel} 为裕度系数。

首先考虑数据同步误差和互感器传变误差,保

护安装处两端通信时采用乒乓对时法,两侧存在约 0.5 ms 的同步误差,对应一个周期的电角度约为 9° ;常用互感器的传变误差大约为 0.4 ms 的时间差,对应 7° 的电角度。综合考虑同步误差及互感器的传变误差,角度误差在一个周期的误差约为 4.4%,此时对应 Spearman 等级相关系数的计算值为 0.95,在此基础上设定角度误差系数为 0.9。除此之外,考虑到交直流混联系统运行特征复杂以及线路参数误差,要留出充足的裕度,故选择裕度系数为 0.9。综合考虑各因素后,文中将阈值 P_{set} 定为 0.8,选相判据为:

$$P > P_{set} \quad (18)$$

$P > P_{set}$ 时,符合电容模型,判定为非故障相; $P < P_{set}$ 时,判定为故障相。故障选相方法如下:在保护启动元件动作后,求解受端交流线路各相的 Spearman 等级相关系数,用 K 表示等级相关系数大于 0.8 的相数;反之,用 $3-K$ 表示等级相关系数小于 0.8 的相数,即故障相数。其中,利用零序电压分量的存在来区分相间故障和接地故障,接地故障判据如式(19)所示。

$$u_0 > 0.2u_1 \quad (19)$$

式中: u_0 、 u_1 分别为保护安装处的零、正序电压。

具体选相流程如图 7 所示。

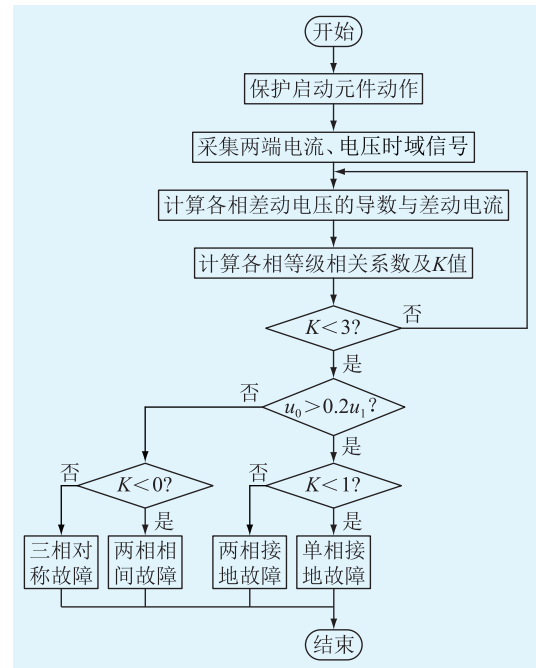


图 7 选相流程

Fig.7 The process of phase selection

3 仿真实验

根据新疆某地区交直流混联系统电网结构,在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建对应的交直流混联

系统模型,对所提故障选相方法进行仿真验证。仿真模型中直流系统整流侧采用定电流控制策略和定最小触发角控制策略,逆变侧采用定关断角控制策略,模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

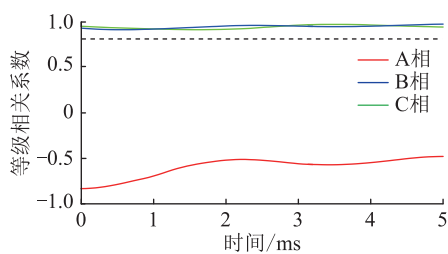
参数	数值
直流线路电压等级/kV	±800
受端交流线路电压等级/kV	500
线路 DS 长度/km	350
线路单位正序电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.018
线路单位正序电抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.277
线路单位正序电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.013
线路单位零序电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.231
线路单位零序电抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.973
线路单位零序电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.008
并联电抗器/H	6.42
受端交流系统的正序阻抗/ Ω	4.37+j57.18
受端交流系统的零序阻抗/ Ω	3.10+j20.45
送、受端之间传输功率/MW	4 000
定电流控制的电流参考值/kA	2.5
最小触发角/($^\circ$)	5
关断角/($^\circ$)	15

设置在 3 s 时发生故障,故障时间为 0.3 s,采样频率取 5 kHz,选取 5 ms 的数据窗,仿真得出线路 DS 两端电压有效值为 532.2 kV 和 517.6 kV。

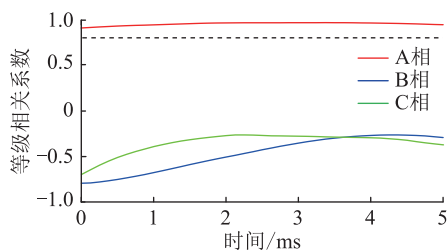
3.1 不同故障类型的选相结果仿真

在线路 DS 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,其选相结果如图 8 所示(虚线为阈值)。

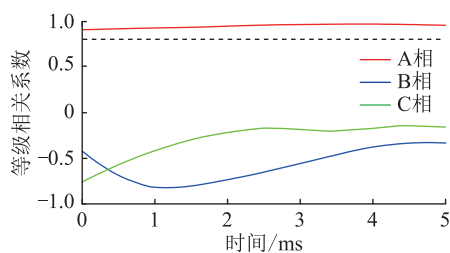
其他类型故障的选相结果见表 2,第一列与最后一列中的 A、B、C 代表故障相,G 为接地故障,即 BG 为 B 相接地故障,依次类推。



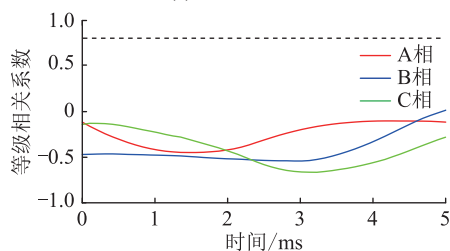
(a) A相接地故障



(b) BC两相相间故障



(c) BC两相接地故障



(d) 三相对称故障

图 8 不同故障类型的等级相关系数选相结果

Fig.8 Phase selection results of class correlation coefficients for different fault types

表 2 不同故障类型的选相结果

Table 2 Phase selection results for different fault types

故障类型	等级相关系数			u_0 是否大于 $0.2u_1$	选相结果
	P_A	P_B	P_C		
BG	0.94	-0.15	0.97	是	BG
CG	0.93	0.97	-0.35	是	CG
AB	0.19	-0.62	0.98	否	AB
CA	-0.52	0.99	0.25	否	CA
ABG	-0.50	0.11	0.92	是	ABG
CAG	-0.47	0.94	-0.13	是	CAG

由图 8 和表 2 可知,受端交流线路中发生各种类型故障期间,故障相的差动电压和差动电流都不满足电容模型而非故障相满足。差动电压和差动电流均为时域全量信息,不受直流系统接入的影响,所提双端量选相方法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。

3.2 故障位置对选相结果的影响

为验证所提选相方法在受端交流线路各位置的动作性能,在仿真模型中另外设置 4 个故障点 F_1 — F_4 ,分别位于保护安装处 D 、 D 右侧 100 km、保护安装处 S 、 S 左侧 100 km,各故障点设置不同类型的故障,其中不同位置的 A 相接地故障的仿真结果如图 9 所示。

其他类型故障在受端交流线路各个位置的选相结果如表 3 所示。

文中所提的选相原理是基于故障等效模型的思想,不管故障发生在受端交流线路的任何位置,都可将非故障相等效为电容模型,故障相则不可等

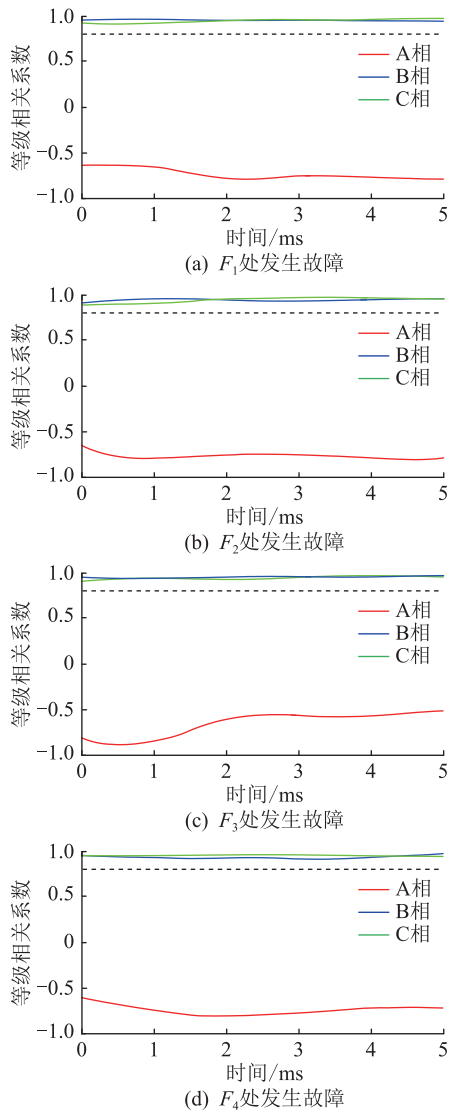


图9 不同故障位置的等级相关系数选相结果
Fig.9 Phase selection results of class correlation coefficients for different fault locations

表3 不同故障位置的选相结果

Table 3 Phase selection results for different fault locations

故障位置	故障类型	等级相关系数			u_0 是否大于 $0.2u_1$	选相结果
		P_A	P_B	P_C		
F_1	BC	0.99	-0.42	-0.29	否	BC
	BCG	0.95	-0.34	-0.17	是	BCG
	ABC	-0.43	-0.15	0.12	否	ABC
F_2	BC	0.96	-0.23	-0.28	否	BC
	BCG	0.93	-0.28	-0.19	是	BCG
	ABC	-0.26	-0.54	0.21	否	ABC
F_3	BC	0.98	-0.53	-0.34	否	BC
	BCG	0.93	-0.15	-0.68	是	BCG
	ABC	-0.17	0.16	-0.02	否	ABC
F_4	BC	0.99	-0.15	-0.31	否	BC
	BCG	0.92	-0.49	-0.31	是	BCG
	ABC	-0.49	-0.22	-0.21	否	ABC

效为电容模型。由图9和表3可知,所提选相方法在线路不同位置故障期间均可准确选相。

3.3 过渡电阻对选相结果的影响

为验证所提选相方法在交直流混联系统中的选相性能,文中对抗过渡电阻性能进行仿真。在交直流混联系统受端交流线路中点设置各种类型的故障,分别经50、100、200Ω的过渡电阻,其选相结果如表4所示。

表4 不同过渡电阻的选相结果

Table 4 Phase selection results for different transition resistors

过渡电阻/Ω	故障类型	等级相关系数			u_0 是否大于 $0.2u_1$	选相结果
		P_A	P_B	P_C		
50	AG	-0.29	0.97	0.98	是	AG
	BC	0.99	-0.46	-0.53	否	BC
	BCG	0.95	-0.26	-0.48	是	BCG
	ABC	-0.76	-0.36	-0.41	否	ABC
100	AG	0.08	0.99	0.96	是	AG
	BC	0.96	-0.19	-0.46	否	BC
	BCG	0.93	-0.61	0.08	是	BCG
	ABC	-0.61	0.18	-0.31	否	ABC
200	AG	0.16	0.98	0.99	是	AG
	BC	0.97	-0.32	-0.51	否	BC
	BCG	0.99	-0.73	-0.12	是	BCG
	ABC	-0.47	-0.11	-0.31	否	ABC

受端交流线路发生过渡电阻故障期间,非故障相仍符合电容模型而故障相不符合。由表4可知,文中所提选相方法具有较好的抗过渡电阻性能。

3.4 采样频率对选相结果的影响

为验证所提选相方法在采样率不同时性能,文中将数据的采样率设为2、4、8、10kHz,在交直流混联系统受端交流线路中点设置不同类型故障,其仿真结果如表5所示。

文中提出的选相方法是基于时域全量的模型识别原理,仅反映非故障相与故障相的模型相似度关系,对采样率的要求较低。由表5可以看出,所提选相方法的相关性系数受采样率影响较小,在各种采样率下均能保证正确选相。

3.5 噪声干扰对选相结果的影响

在实际交直流混联系统运行中,换流站中的电力电子装置互相干扰,因此须验证所提选相方法的抗干扰性能。在交直流混联系统受端交流线路中点设置各种类型的故障,并在故障仿真数据中分别加入20dB和40dB的噪声干扰,其选相结果如表6所示。

从表6中可以看出,当采样数据中存在噪声干

表 5 不同采样频率的选相结果
Table 5 Phase selection results for different sampling frequencies

采样频率/kHz	故障类型	等级相关系数			u_0 是否大于 $0.2u_1$	选相结果
		P_A	P_B	P_C		
2	AG	-0.53	0.95	0.97	是	AG
	BC	0.96	-0.27	-0.46	否	BC
	BCG	0.98	-0.48	-0.62	是	BCG
	ABC	-0.45	-0.13	-0.25	否	ABC
4	AG	-0.61	0.98	0.93	是	AG
	BC	0.91	-0.31	-0.43	否	BC
	BCG	0.95	-0.38	-0.49	是	BCG
	ABC	-0.47	-0.21	-0.36	否	ABC
8	AG	-0.43	0.99	0.96	是	AG
	BC	0.92	-0.24	-0.35	否	BC
	BCG	0.97	-0.46	-0.51	是	BCG
	ABC	-0.34	-0.08	-0.17	否	ABC
10	AG	-0.48	0.97	0.94	是	AG
	BC	0.95	-0.43	-0.21	否	BC
	BCG	0.97	-0.33	-0.54	是	BCG
	ABC	-0.41	-0.19	-0.22	否	ABC

表 6 不同噪声干扰的选相结果
Table 6 Phase selection results for different noise interference

噪声干扰/dB	故障类型	等级相关系数			u_0 是否大于 $0.2u_1$	选相结果
		P_A	P_B	P_C		
20	AG	-0.34	0.97	0.93	是	AG
	BC	0.99	-0.27	-0.62	否	BC
	BCG	0.97	-0.39	-0.56	是	BCG
	ABC	-0.33	-0.43	-0.09	否	ABC
40	AG	-0.32	0.98	0.93	是	AG
	BC	0.99	-0.28	-0.64	否	BC
	BCG	0.96	-0.20	-0.55	是	BCG
	ABC	-0.31	-0.44	0.10	否	ABC

扰时,所提的故障选相方法均能准确识别出故障相和故障类型,具有较强的抗干扰性能。

4 结论

(1) 基于故障等效模型的思想,交直流混联系统受端带并联电抗器的交流长线路故障期间,可将非故障相的差动电压和差动电流的关系等效为电容模型,而故障相不可等效为电容模型。

(2) 文中提出的基于模型识别的交直流混联系统时域双端量故障选相方法,可利用 Spearman 等级相关系数计算各相的电容模型符合度,通过与门槛值对比实现故障选相。

(3) 所提故障选相方法采用时域双端量,不依赖电源特性,在受端交流长线路各处发生故障时均

能准确选相,不受并联电抗器的影响,所需数据窗时间短,并具有良好的抗过渡电阻和抗干扰性能。该选相方法在理论上同样适用于传统交流输电长线路。

致 谢

本文得到新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2021H009)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 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.

[2] 张鑫,李媛媛,吉平. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划方法[J]. 全球能源互联网,2021,4(4):372-381.
ZHANG Xin,LI Yuanyuan,JI Ping. A planning approach for AC/DC hybrid power grid with high proportion of renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2021,4(4):372-381.

[3] 雷朝煜,郝良收,戴甲水,等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(11):178-187.
LEI Zhaoyu,HAO Liangshou,DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control,2022,50(11):178-187.

[4] 钟明明,夏成军,黎寿涛,等. 混合多馈入直流输电系统连续换相失败抑制策略[J]. 电力工程技术,2022,41(2):20-28.
ZHONG Mingming,XIA Chengjun,LI Shoutao, et al. Continuous commutation failure suppression strategy in hybrid multi-infeed HVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(2):20-28.

[5] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术,2022,46(2):503-510.
LYU Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology,2022,46(2):503-510.

[6] 金楚,李作红,葛景,等. 交直流混联受端电网动态无功规划研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(1):12-17.
JIN Chu,LI Zuohong,GE Jing, et al. Research on dynamic reactive power planning of hybrid AC/DC receiving-end power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2022,43(1):12-17.

[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] SONG G B,WANG C Q,WANG T, et al. A phase selection

- method for wind power integration system using phase voltage waveform correlation[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland,OR,USA. IEEE,2018:1.
- [9] DU X T,DUAN J D,YANG W, et al. A novel high-speed transient-based phase selector for AC transmission line connected to LCC-HVDC inverter station[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2022,141:108129.
- [10] 曾祥君,黄慧,喻锟,等. 基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(3):9-18.
- ZENG Xiangjun, HUANG Hui, YU Kun, et al. Voltage phase selection method for high resistance grounding and a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage [J]. Power System Protection and Control,2022,50(3):9-18.
- [11] 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 component in AC/DC multi-terminal infeed system[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):136-145.
- [12] 邱威,贺静波,樊小伟,等. 应对特高压直流大扰动的稳定措施综述[J]. 电网技术,2022,46(8):3049-3067.
- QIU Wei, HE Jingbo, FAN Xiaowei, et al. Overview on stability measures for large disturbances of UHVDC[J]. Power System Technology,2022,46(8):3049-3067.
- [13] 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):29.
- [14] 于溯. 交直流系统不同碰线故障下继电保护适应性及对策研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.
- YU Su. Study on adaptability and countermeasures of relay protection in AC/DC system under different contact faults[D]. Beijing:North China Electric Power University,2021.
- [15] 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.
- [16] 李一泉,屠卿瑞,陈桥平,等. 大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J]. 电网技术,2018,42(9):2976-2982.
- LI Yiquan, TU Qingrui, CHEN Qiaoping, et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections[J]. Power System Technology,2018,42(9):2976-2982.
- [17] 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.
- [18] 陈洁羽,谈震,贺晓,等. 传统选相元件在风电集中接入系统中的应用研究[J]. 智慧电力,2018,46(5):27-32.
- CHEN Jieyu, TAN Zhen, HE Xiao, et al. Application of traditional phase selector in wind power centralized access system [J]. Smart Power,2018,46(5):27-32.
- [19] 梁莹玉,许冠军,李武林,等. 柔性直流换流站对传统选相方法的影响分析及对策[J]. 电工技术学报,2020,35(1):201-212.
- LIANG Yingyu, XU Guanjun, LI Wulin, et al. Influence of the integration of MMC-HVDC station on traditional phase selection method and the countermeasure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(1):201-212.
- [20] 陈实,邵能灵,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.
- [21] 齐子杰,陈天华,王彬,等. 基于多阶轨迹灵敏度交直流混联受端电网无功储备优化方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):74-81.
- QI Zijie, CHEN Tianhua, WANG Bin, et al. Reactive power reserve optimization method for AC/DC hybrid receiving network based on multi-order trajectory sensitivity[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):74-81.
- [22] 杨铖,索南加乐,贾伟,等. 采用双端量的高压输电线路选相元件[J]. 高电压技术,2011,37(5):1261-1267.
- YANG Cheng, SUO Nanjiale, JIA Wei, et al. Transmission line phase selector of measurements at two terminals[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1261-1267.
- [23] 宋金钊,李永丽,张云柯,等. 逆变侧交流线路单相自适应重合闸的适用性分析与改进策略[J]. 高电压技术,2022,48(3):1001-1010.
- SONG Jinzhao, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Applicability analysis and improved strategy of adaptive single-phase reclosure for AC lines on inverter side[J]. High Voltage Engineering,2022,48(3):1001-1010.
- [24] 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.
- [25] 陆金凤,赵青春,谢华,等. 基于双端量的半波长交流输电线路故障选相方法[J]. 高压电器,2018,54(12):251-256.
- LU Jinfeng, ZHAO Qingchun, XIE Hua, et al. Scheme of fault phase selection in half-wavelength AC transmission line based

on two-terminal electrical quantities[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 251-256.

[26] 郭雅蓉, 柳焕章, 王兴国. 零序电流差动保护选相元件[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 155-159, 172.
GUO Yarong, LIU Huanzhang, WANG Xingguo. Phase selection elements for zero sequence current differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 155-159, 172.

[27] 刘凯, 索南加乐. 基于故障支路电流序分量相位关系的选相元件[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 77-83.
LIU Kai, SUO Nanjiale. Phase selection element based on phase relationship between sequence components of faulty branch

current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 77-83.

作者简介:



马翼飞

马翼飞(1997),男,硕士在读,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 2530796916@qq.com);

樊艳芳(1971),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护、新能源并网技术。

Time-domain double-ended phase selection method for AC/DC hybrid transmission system based on model recognition

MA Yifei, FAN Yanfang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: To solve the problem that the traditional single-ended phase selection elements are no longer suitable for AC long lines at the receiving end of the AC/DC hybrid system, a time-domain double-ended phase selection method based on model recognition is proposed. Firstly, the time domain model of the non-fault phase and fault phase of long AC lines with shunt reactors at the receiving end during fault is studied by using the idea of model identification. It can be seen from the analysis that the differential current and differential voltage of the non-fault phase satisfy the capacitance model but the fault phase does not. Secondly, the capacitance model conformity of each phase is calculated by Spearman rank correlation coefficient, and the fault phase is selected by comparing it with the threshold value. Finally, an AC/DC hybrid system model is built in PSCAD/EMTDC, and the proposed fault phase selection method is simulated and verified from the aspects of fault type, fault location, transition resistance, sampling frequency and noise interference. The results show that the fault phase selection method can quickly and accurately select the fault phase during the fault at each position of the receiving end AC line, without relying on the characteristics of the DC-side power supply, without the influence of the shunt reactors, and with good anti-transition resistance and anti-interference performance.

Keywords: AC/DC hybrid system; fault phase selection; AC lines; Spearman rank correlation coefficient; model recognition; shunt reactor

(编辑 陆海霞)