

基于电压源型换流器的柔性直流系统快速方向保护

李斌¹, 邱宏¹, 洪潮², 张野², 杨健²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663)

摘要:基于电压源型换流器的直流配电系统发生故障时,故障电流具有速度快、峰值大的特点,对保护速动性与可靠性要求高。针对典型环状直流配电系统,研究了保护正、反方向发生故障时的差异特征。在此基础上,提取直流侧并联电容电压与线路电流在保护正、反方向发生故障时的相关性特征,提出并设计了一种直流线路快速方向保护新原理。该原理具有动作速度快、选择性高、抗过渡电阻能力较强等特点。在PSCAD中搭建了四端环状直流配电系统,大量仿真算例验证了所提保护原理的可行性与优越性。

关键词:直流配电系统;电压源型换流器;相关性;方向判据;纵联保护

中图分类号:TM 773

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.001

0 引言

随着电力电子技术的不断发展,柔性直流配电网在传输容量、电能质量及供电可靠性等方面更具优势,成为了国内外理论研究与应用的热点课题和发展方向^[1]。基于脉宽调制 PWM (Pulse Width Modulation) 技术的柔性直流配电系统具有控制灵活、可靠性高、有利于分布式电源接入等优点,在未来电网智能化发展进程中具有广阔的应用前景^[2-3]。

直流配电网一旦发生故障,其故障电流具有上升速度快、峰值大的特点,会对直流配电网中的电气设备造成严重损害。因此,直流配电网的继电保护必须快速准确地识别故障^[4]。目前,直流配电网技术的研究与应用尚处于理论研究和试验探索阶段。国内外建成的柔性直流工程大多是高压直流系统^[5],其保护方案多借鉴于传统直流系统保护技术。例如,以行波保护和微分欠压保护为主保护、电流差动保护作为后备保护等保护方案^[6]。然而,行波保护和微分欠压保护虽然具有动作速度快和不受电流互感器等因素影响等优点,但是存在采样率要求高、耐受过渡电阻能力弱等缺点^[6]。而电流差动保护的動作速度慢,不符合柔性直流配电网对保护速动性的要求。

鉴于常规直流保护的不足,文献[7]提出了一种利用正序分量行波幅值构成的行波纵联方向保

护;文献[8]通过平波电抗器的计算电压与测量电压波形的相关分析判断区内外故障,然而柔性直流配电系统线路上没有明显的边界;文献[9]提出了一种利用线路两端电流信号的互距离度判定区内外故障的方法,但是要求数据同步。

在常规直流保护技术的基础上,国内外学者针对柔性直流系统进行了广泛的研究^[10-12]。文献[10]针对电压源型换流器 VSC (Voltage Source Converter) 构成的柔性直流系统,在线路两端增设直流电抗器作为高频边界,利用电抗器压降判断故障方向,利用小波算法提取边界内高频分量判断区内外故障,保护原理相对复杂。文献[11]针对电压源型换流器的高压直流输电系统,提出了一种发生直流故障时通过识别电感值、电容值与实际值的差异构成方向判据的方法。文献[12]提出了一种利用电容参数识别的差动保护方法,但在多端柔性直流配电系统中,各换流站电容的存在使得发生区内故障时难以准确地识别电容参数,该方法无法再适用。

本文针对低压直流配电系统,分析总结了线路保护正、反方向的故障暂态特征,利用柯西不等式推导得到了一种表征 2 个信号间相关性与符号性的相关系数,提出了一种基于该相关系数的新型快速方向保护原理。

1 柔性直流配电网及其故障特性

1.1 柔性直流配电线路方向保护的方法

柔性直流配电网可有效消纳各类分布式电源产生的电能,并直接供给直流家电或直流负载使用。典型直流配电网拓扑结构包括两端直流配电网、辐射状直流配电网和环状直流配电网^[2]。其中,辐射状直流配电网的供电可靠性相对较低,而环状直流

收稿日期:2017-02-17;修回日期:2017-12-05

基金项目:国家优秀青年科学基金资助项目(51422703);南方电网重点科技项目(CSGTRC-K163001)

Project supported by the National Science Fund for Excellent Young Scholars of China (51422703) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid (CSGTRC-K1630-01)

配电网和两端直流配电网由于任何一条直流母线都至少有 2 条线路供电,其供电可靠性相对较高,但控制配合及故障识别相对复杂。图 1 给出了一种典型环状直流配电网的拓扑结构。图 1 中故障 f_1 — f_4 分别表示直流线路 L_2 故障、线路 L_3 故障、换流站 1 出口母线故障和直流线路 L_1 故障。其中,故障 f_1 与 f_2 为线路保护正向故障,故障 f_3 与 f_4 为线路保护反向故障。在实际工程中,直流配电网各换流站出口处会装设直流电抗器,起到限流作用。

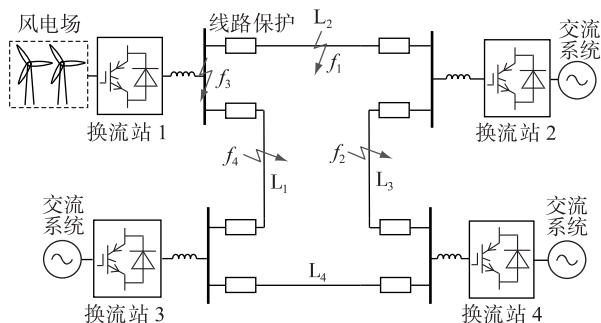


图 1 环状柔性直流配电系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of meshed VSC-based DC distribution system

对于直流系统而言,利用全电流 i 或故障电流分量 Δi (故障后的电流 i 与故障前稳态运行电流 i_0 之差)的变化极性是较为常见的判断故障方向的方法。但是对于柔性直流配电网,采用变化极性的方法存在以下三方面的不足。

a. 全电流 i 的定值整定容易受直流配电网的负荷电流影响,虽然利用故障电流分量 Δi 能够避免负荷电流的影响,但是二者受过渡电阻和故障位置的影响明显。当直流侧发生经较大过渡电阻接地故障时,二者的变化极性不明显,保护可能拒动。图 2 (a)给出了在 10 kV 配电系统中线路发生经不同过渡电阻 R_f 接地故障时的线路电流。并且,当故障位置位于保护近端时,由并联大电容与直流电抗器及线路电感构成的 LC 振荡电路发生谐振,直流电流将出现明显波动(如图 2(b)所示),导致基于直流电流符号特征判别故障方向的保护难以可靠动作。

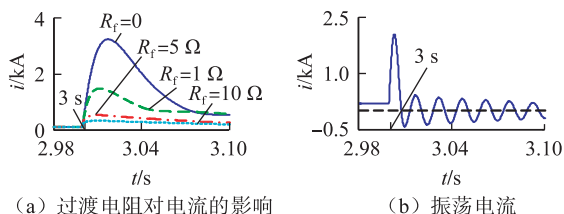


图 2 柔性直流配电系统故障电流

Fig.2 Fault current of VSC-based DC distribution system

b. 在工程应用中,利用全电流 i 与故障电流分量 Δi 判断故障方向方法的保护定值需要依靠大量的仿真试验来确定,这种方式对于点对点式功率传输的线路是有效的;而对于可能构建的直流网络而言,考虑到整定工作量,难以在每次新建直流线路时重新整定定值,因而这种方式无法适用于直流配电网。

c. 从动作速度方面来看,由于故障暂态阶段的电流并不稳定,其判定常需要增加延时来提高可靠性,导致保护无法快速识别故障方向。

考虑到发生不同方向故障时故障电流分量 Δi 具有的极性变化特征,也可采用对 Δi 进行积分的方法判断故障发生方向。但是,积分量的大小同样容易受到过渡电阻与直流配电网拓扑改变的影响,并且积分计算需要选取数毫秒的数据窗长,因而在一定程度上降低了保护的動作速度。

进一步地,考虑到故障电流 i 因故障方向的不同而具有明显的上升或下降趋势,还可采用故障电流的微分量 di 的方法判断故障方向。虽然这种方法在动作速度上有所提升,但是柔性直流配电网中存在较多电缆线路,由于电缆具有较大的分布电容,使得故障后电流中存在大量高次谐波,导致故障电流微分量 di 出现振荡,如图 3 所示,可见判断结果仍不够可靠。

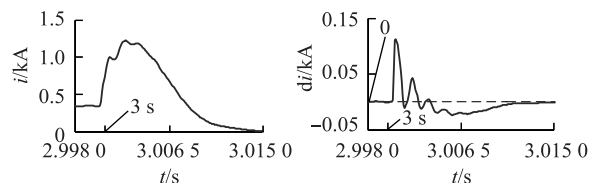


图 3 电缆电流及其微分值

Fig.3 Cable current and its differential value

上述故障方向判断方法虽然原理简单,但是难以适用于直流配电网。为此,本文针对图 1 所示的环状直流配电网进行分析,寻找一种更优的方向保护方法。

1.2 故障特性分析

基于电压源型换流器的柔性直流配电网中发生的直流故障类型包括单极接地故障、双极短路故障和断线故障。由于柔性直流配电网中发生直流故障时故障电流具有上升速度快、幅值大的特点,直流配电网中 IGBT 在自身保护的作用下闭锁,且此时直流场中的直流电压高于交流侧电压。因此,在直流配电网交流侧电抗器短暂续流后,反并联在 IGBT 上的二极管立即闭锁。与此同时,直流场中各并联电容

向故障点快速放电。由于交流侧电抗器的续流相较于并联电容放电而言,其续流时间短且电流值小,本文在故障分析中将其忽略。直流配电网快速过流的故障特征对保护速动性提出了很高的要求,因此在设计直流线路的保护时应该尽可能根据故障初始阶段的暂态特征做出准确判断,即保护应尽可能在直流电容放电初期阶段就能够快速正确地识别故障^[13-16]。

本文以图1所示多端柔性直流配电网为研究对象,以直流线路 L_2 靠近换流站1侧的线路保护为例(本节分析中,若未特别说明,所提线路保护均指该处保护),分析其不同方向发生故障时的故障特征。图4为故障 f_1 — f_4 的故障等效电路。

对图4中各电气测量量进行说明:图4(a)中换流站1出口处正极线路上并联电容测量电压为 u_{p1} ,负极线路上并联电容测量电压为 u_{n1} ;线路保护正极测量电流为 i_{p1} ,线路保护负极测量电流为 i_{n1} ,规定电流的正方向为从母线流向线路的方向。图4(a)中各电气测量量在图4(b)~(d)中表示相同含义,因此不再图中重复标注。

图4(a)为直流线路 L_2 发生故障时的等效回路,图中黑色虚线表示换流站1并联电容的放电路径,灰色虚线表示直流场中其他换流站并联电容对故障点的放电路径。可以看出,线路保护测量电流 i_{p1} 包含来自换流站1并联电容的放电电流和其他换流站并联电容的放电电流,即:

$$i_{p1} = i_c + i'_c \quad (1)$$

其中, i_c 为换流站1并联电容放电电流; i'_c 为直流场中其他换流站并联电容的放电电流。进一步有:

$$i_{p1} = -C \frac{du_{p1}}{dt} - C' \frac{du_{p'}}{dt} \quad (2)$$

其中, C 为换流站1并联电容值; C' 为其他换流站并联电容等效值; $u_{p'}$ 为其他换流站并联电容电压值; t 为时间。

因为在电容放电阶段初期,换流站1并联电容距离故障点的电气距离最近,所以线路电流 i_{p1} 中的主要部分为换流站1并联电容放电电流,即:

$$i_{p1} \approx -C \frac{du_{p1}}{dt} \quad (3)$$

由于电容值 C 为固定值,且在计算机程序数据处理中,当采样率固定时,时间微分值 dt 也为固定值。因而,可以得到 i_{p1} 与 $-du_{p1}$ 近似成比例,二者在时间尺度下的连续信号变化趋势相同,即具有正相关性。考虑到发生故障时,故障电流分量 $\Delta i_{p1} = i_{p1} -$

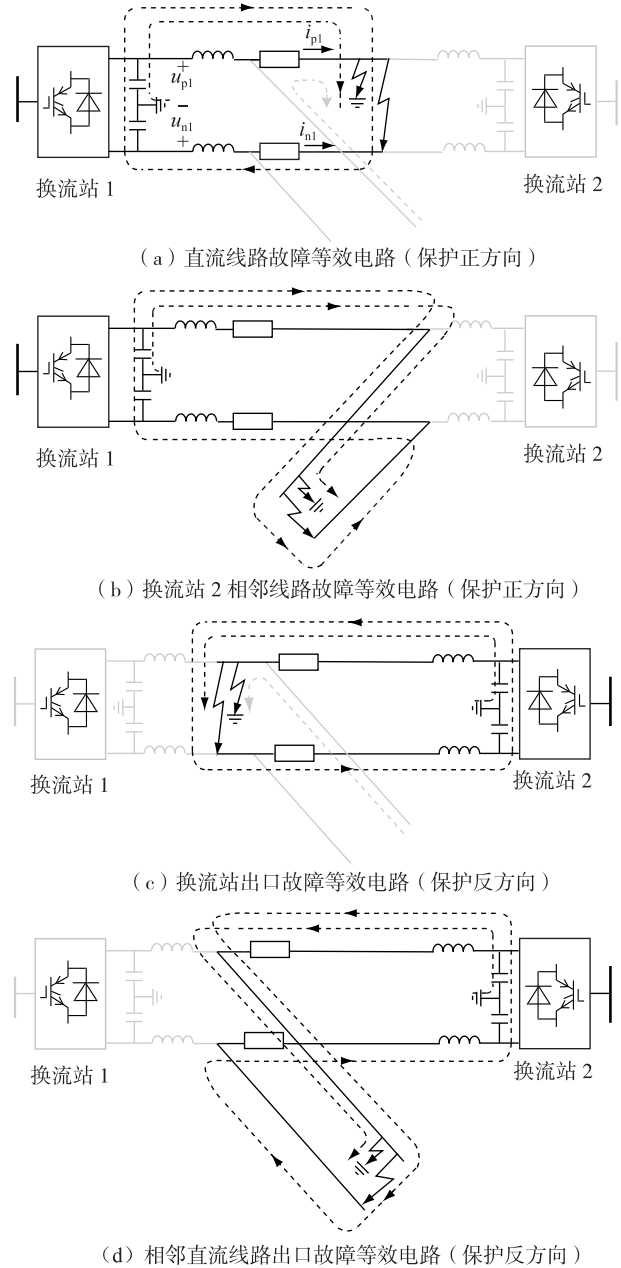


图4 方向保护正、反方向故障等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of fault in positive and reverse direction of direction protection

I_{p1} (I_{p1} 为正常运行时的线路电流)具有单一的突变极性,则进一步有式(4)成立,且二者正相关。

$$\Delta i_{p1} > 0, -du_{p1} > 0 \quad (4)$$

同理分析可得,直流线路 L_2 发生负极接地故障或双极短路故障时,有式(5)成立,且二者正相关。

$$\Delta i_{n1} < 0, -du_{n1} < 0 \quad (5)$$

其中, Δi_{n1} 为线路保护测量电流 i_{n1} 中故障电流分量。

图4(b)为换流站2相邻线路 L_3 发生故障时的等效电路,此时故障仍为线路保护正向故障。换流站1并联电容放电电流路径如图中黑色虚线所示,并联电容与线路保护电流测量装置在同一放电回路

中,有:

$$i_{p1} = -C \frac{du_{p1}}{dt} \quad (6)$$

按上述推导过程同样可得式(4)所示关系。

同理,线路 L_3 发生负极接地故障或双极短路故障时,有式(5)所示关系成立。

图 4(c) 为位于线路保护反方向的换流站 1 出口母线处的故障等效电路。图中黑色虚线表示换流站 2 并联电容的放电路径,灰色虚线表示其他换流站并联电容的放电路径。可以看出,线路保护测量电流 i_{p1} 为换流站 2 并联电容放电电流,与换流站 1 并联电容电流不在同一放电回路中,二者不再具有近似相等关系,且线路保护测量电流中故障分量与换流站 1 并联电容电流符号也不相同。二者关系如式(7)所示,二者不具有正相关性。

$$\Delta i_{p1} < 0, -du_{p1} > 0 \quad (7)$$

同理可分析,当该故障位置发生负极接地故障或双极短路故障时,有式(8)所示关系,二者不具有正相关性。

$$\Delta i_{n1} > 0, -du_{n1} < 0 \quad (8)$$

图 4(d) 为线路保护反方向的邻近直流线路 L_1 发生故障时的等效电路,图中黑色虚线为换流站 2 并联电容放电路径。此时,线路保护测量电流 i_{p1} 与换流站 1 并联电容放电电流仍不在同一放电回路中, i_{p1} 的故障电流分量为负,换流站 1 并联电容放电电流为正,二者仍不具有近似相等关系,且符号相反,与图 4(c) 存在相同关系。

结合上述分析结果可知,对于线路保护而言,发生正方向故障时,并联电容电压微分值的相反数 $-du$ 与直流线路入口电流故障分量 Δi 具有正相关性,且二者同号。将二者放在连续的时间尺度上观察可发现,二者的变化趋势是相同的。发生反方向故障时,二者不存在正相关性,且二者异号。同样将二者放在连续的时间尺度上观察可发现,二者的变化趋势不相关。因此,可以利用一种体现信号间相关性的系数表征发生故障时同侧换流站并联电容电压微分值的相反数 $-du$ 与直流线路入口电流故障分量 Δi 的相关性,据此判断故障发生方向。

在已有的数学方法中,Pearson 相关系数可衡量定距变量间的线性关系^[17]。文献[18]利用 Pearson 相关系数计算被测电路的频域响应信号,从而表征元件的健康度。但是,Pearson 相关系数只能表征信号间的相关变化趋势,无法描述信号间的符号关系。当图 1 所示柔性直流配电系统方向保护的反方向发

生经过渡电阻接地故障时,在故障发生初期,故障电流发生振荡,导致某一区段段的 $-du$ 与 Δi 具有相同的变化趋势,使得计算得到的 Pearson 相关系数正负振荡,如图 5 所示,从而使得保护无法做出准确判断。图 5 中, $-du$ 为并联电容正极测量电压微分值的相反数; Δi 为线路电流中故障分量。

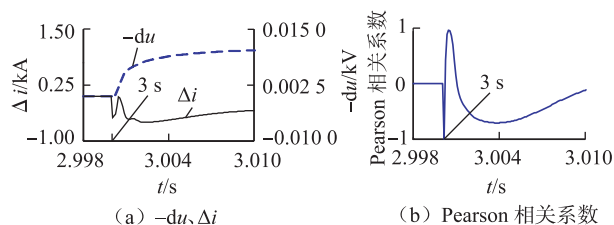


图 5 发生反向故障时 $-du$ 、 Δi 和 Pearson 相关系数

Fig.5 $-du$, Δi and Pearson correlation coefficient when occurring reverse fault

因此,为了既能表征换流站并联电容电压微分值的相反数 $-du$ 与故障电流分量 Δi 的相关性,又能避免 Pearson 相关系数的不足,本文利用柯西不等式定义了相关系数。该系数具备 Pearson 相关系数表征信号间变化趋势的同时,并考虑了故障信号的符号特性,能够更加准确地表征信号间的相关性。

2 基于相关系数的方向保护原理

2.1 相关系数

柯西不等式是数学家柯西在研究数学分析中“流数”问题时得到的。柯西不等式概率论形式表达式为:

$$\left| \sum x_i y_i \right| \leq \sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2} \quad (9)$$

其中, x 与 y 表示 2 组数据; $i=1,2,\dots,n$ 表示数据组中的第 i 个数。式(9)等号成立的条件为:式(10)成立或 2 组数据中有任何一组数据全为 0。

$$\frac{x_1}{y_1} = \frac{x_2}{y_2} = \dots = \frac{x_n}{y_n} \quad (10)$$

当 $\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2} \neq 0$ 时,有:

$$-1 \leq \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}} \leq 1$$

本文得到如下计算 2 组数据间相关性的表达式:

$$\rho(x, y) = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}} \quad (11)$$

可知该系数范围为 $\rho \in [-1, 1]$, 系数取得 1 的条件为式(10)成立。由于在实际情况中,直流配电网

发生故障时,各电气量始终会有一段暂态发展的过程,不会出现并联电容电压信号或线路故障电流分量信号全为0的情况,因此利用式(11)计算 $-du$ 与 Δi 的相关系数是有意义的。同时由式(11)可知,当 x 、 y 同号时, $\sum x_i y_i > 0$,相关系数计算结果为正;当 x 、 y 异号时, $\sum x_i y_i < 0$,相关系数计算结果为负。

2.2 方向判据

选取直流线路入口电流故障分量 Δi 与并联电容电压微分值的相反数 $-du$ 计算相关系数,即令 $x = -du$ 、 $y = \Delta i$ 。由前文分析得到的故障规律可知,当故障为正向故障时,有 x 、 y 同号;当故障为反向故障时,有 x 、 y 异号。计算得到的相关系数具有如下的特征:正向故障时有 $\rho > 0$,反向故障时有 $\rho < 0$,即相关系数将因故障发生方向不同而箝位在不同的极性,使其具有明确的方向性。

由前文分析进一步可知,方向保护正方向发生故障时, $-du$ 与 Δi 是近似正相关的,即满足条件式(10),二者的相关系数计算结果近似为1;发生反方向故障时,二者不再正相关且异号,计算得到的相关系数为一负数。

利用发生正、反方向故障时计算得到的相关系数具有的不同特征,本文设计如下方向判据:

$$\rho > \rho_F \quad (12)$$

其中, ρ 为相关系数; ρ_F 为保护门槛值。当满足该判据时,则认为发生了正方向故障;否则为反方向故障。保护门槛值 ρ_F 的设计是为了保证保护的可靠性与灵敏性。通过大量仿真测试,可选取门槛值 ρ_F 为0.2~0.5。

2.3 方向纵联保护方案

基于上述分析研究,设计方向纵联保护方案的基本步骤如下。

a. 利用电压微分或电流微分启动判据实时检测柔性直流配电系统的异常运行或故障状态。一旦故障发生,启动判据动作,发出启动命令给方向判据。

b. 方向判据收到启动命令后,选取直流线路入口电流中故障电流分量 Δi 与该侧换流站的并联电容电压微分值的相反数 $-du$ 开始计算相关系数 ρ 。如果 $\rho > \rho_F$,则方向判据的逻辑字置为1,同时判断该极为故障极;否则将逻辑字置为0,并将该逻辑字信号发送到线路另一端的方向保护。

c. 线路保护收到来自线路另一端发送的逻辑字信号后,与本端保护逻辑字信号相“与”,得到方向纵联保护最终判断结果。如果直流线路两端的逻辑字均为1,相“与”后为1,可判断直流线路上发生了

故障;如果直流线路一端的逻辑字为1,而另一端的逻辑字为0,相“与”后为0,则可判断该条直流线路未发生故障,但是该极为故障极;如果当直流线路两端方向判据的逻辑字均为0时,则说明该极未发生故障。方向纵联保护基本原理流程图如图6所示。

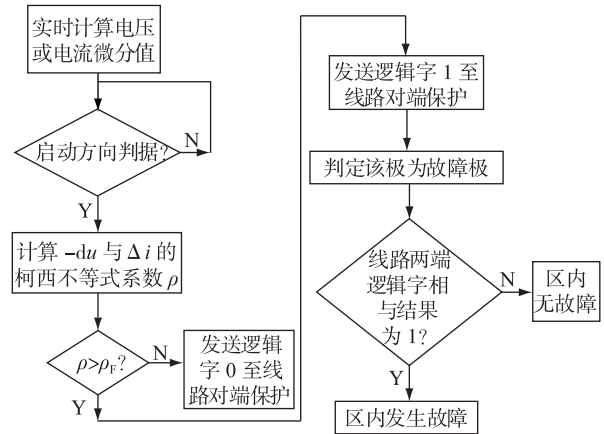


图6 方向保护方案流程图

Fig.6 Flowchart of direction protection scheme

3 仿真实验

3.1 多端柔性直流配电系统仿真测试

本文利用PSCAD/EMTDC仿真软件搭建图1所示的多端直流配电系统仿真模型。利用PSCAD仿真模型模拟直流配电系统中发生的各类故障,再利用MATLAB程序处理故障数据,计算相关系数,验证方向保护方案的可行性。仿真模型参数如下:直流电压为±5 kV,交流电抗器电感为0.01 H,直流电抗器电感为0.01 H,并联电容为0.02 F,换流站1额定容量为8 MV·A,换流站2额定容量为12 MV·A,换流站3额定容量为10 MV·A,换流站4额定容量为10 MV·A,线路 L_1 长度为10 km,线路 L_2 长度为16 km,线路 L_3 长度为12 km,线路 L_4 长度为10 km。

以直流线路 L_2 两端的线路保护为例,仿真测试结果如图7与表1所示。图7为图1中故障 f_1 — f_4 对应的仿真结果,表1为图1中换流站1出口母线、直流线路 L_2 不同位置以及换流站2出口母线发生各类故障时的仿真结果。

图7中,故障发生时刻为3 s, $-du_1$ 、 Δi_1 、 ρ_1 分别为线路 L_2 靠近换流站1侧并联电容正极测量电压微分值的相反数、正极线路电流中故障分量、线路保护计算得到的相关系数; $-du_2$ 、 Δi_2 、 ρ_2 分别为线路 L_2 靠近换流站2侧并联电容正极测量电压微分值的相反数、正极线路电流中故障分量、线路保护计算得到的相关系数。

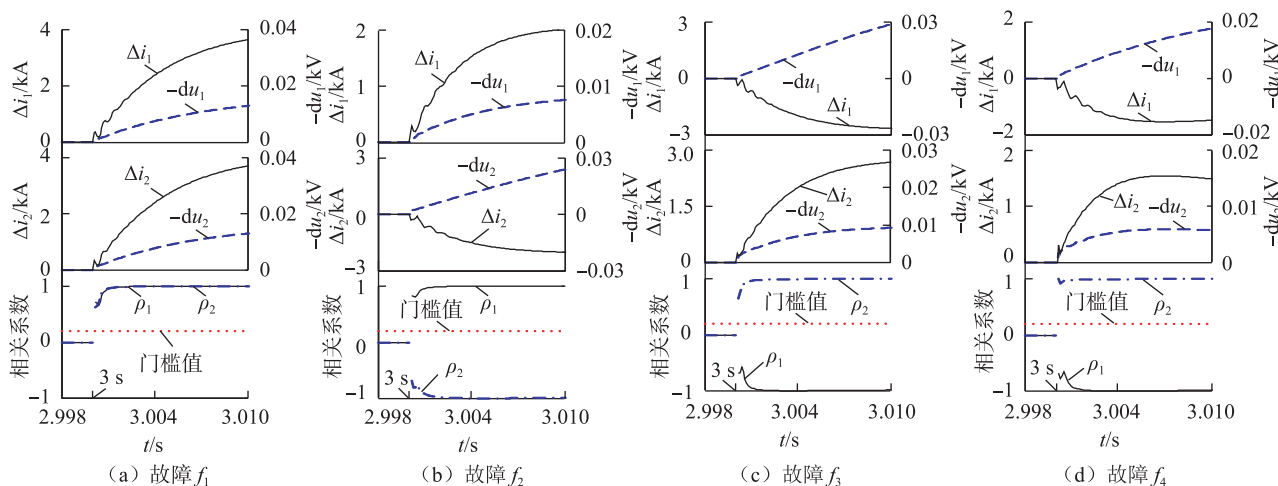


图7 四端直流配电系统仿真结果

Fig.7 Simulative results of four-terminal DC distribution system

表1 各类直流故障仿真结果

Table 1 Simulative results of various types of DC faults

故障位置	故障类型	相关系数				故障判别结果
		ρ_{p1}	ρ_{p2}	ρ_{n1}	ρ_{n2}	
换流站1出口母线	正极故障	-0.982	0.981	0.169	-0.096	换流站1出口正极故障
	负极故障	0.165	-0.175	-0.982	0.986	换流站1出口负极故障
	双极故障	-0.986	0.981	-0.986	0.981	换流站1出口双极故障
线路始端	正极故障	0.982	0.981	0.166	-0.101	线路正极故障
	负极故障	0.166	-0.101	0.982	0.981	线路负极故障
	双极故障	0.982	0.981	0.982	0.981	线路双极故障
线路中端	正极故障	0.975	0.985	0.169	-0.182	线路正极故障
	负极故障	0.083	-0.103	0.981	0.985	线路负极故障
	双极故障	0.974	0.985	0.974	0.985	线路双极故障
线路末端	正极故障	0.967	0.992	0.168	-0.167	线路正极故障
	负极故障	0.170	-0.152	0.968	0.992	线路负极故障
	双极故障	0.983	0.989	0.983	0.989	线路双极故障
换流站2出口母线	正极故障	0.968	-0.992	0.165	-0.165	换流站2出口正极故障
	负极故障	0.163	-0.106	0.968	-0.989	换流站2出口负极故障
	双极故障	0.968	-0.990	0.967	-0.990	换流站2出口双极故障

故障 f_1 为发生在线路 L_2 中点的正极接地故障,仿真结果如图7(a)所示。从仿真结果可以看出,线路 L_2 两侧保护得到的故障数据 $-du$ 与 Δi 的变化趋势近似相同,且均为正,保护计算得到的相关系数迅速趋近并稳定在1附近,线路两侧保护均判定故障

为正方向故障。

故障 f_2 — f_4 分别为发生在线路 L_3 始端的正极接地故障、换流站1出口母线的正极接地故障和线路 L_1 中点的正极接地故障,仿真结果如图7(b)—(d)所示。从仿真结果中同样可看出,若线路 L_2 某一端线路保护正方向发生故障,则故障数据 $-du$ 与 Δi 变化趋势近似相同,计算得到的相关系数迅速趋近并稳定在1附近,保护判别结果为正向故障;若保护的反方向发生故障,则故障数据 $-du$ 与 Δi 变化趋势不同,且二者异号,计算得到的相关系数迅速趋近并稳定在-1附近,保护判别结果为反向故障。

表1为选取图1中换流站1与换流站2之间区间段,当不同位置发生正极接地故障、负极接地故障和双极短路故障时得到的仿真测试结果。表1中, ρ_{p1} 与 ρ_{p2} 分别为 L_2 正极线路换流站1侧与换流站2侧线路保护的相关系数; ρ_{n1} 与 ρ_{n2} 分别为 L_2 负极线路换流站1侧与换流站2侧线路保护的相关系数。

从表1可以看出,若某一极发生故障,线路 L_2 两端方向保护的相关系数将因故障的发生方向不同而呈现不同的结果:若保护正方向发生故障,保护计算得到的相关系数为接近于1的一个数,大于保护门槛值,保护判定为正向故障;若保护反方向发生故障,保护计算得到的相关系数为接近于-1的一个数,远小于门槛值,保护判定为反向故障。而非故障极两端线路保护计算得到的相关系数均小于门槛值,保护判定该极未发生故障。

上述针对多端直流配电系统的大量仿真结果验证了前文的理论分析,表明本文提出的方向保护原理适用于柔性直流配电系统中发生的各类直流故障方向识别与定位,并具备故障选极的能力,具有快速

性与可靠性的特点。

3.2 方向保护抗故障电阻能力分析

考虑到本文搭建的直流配电网仿真模型的电压等级,分别选取过渡电阻为 $5\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 进行仿真测

试。图8为多端直流配电系统直流线路 L_2 中点正极发生经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障的仿真结果,表2为直流线路 L_2 正极不同位置发生经过渡电阻接地故障时的仿真结果。

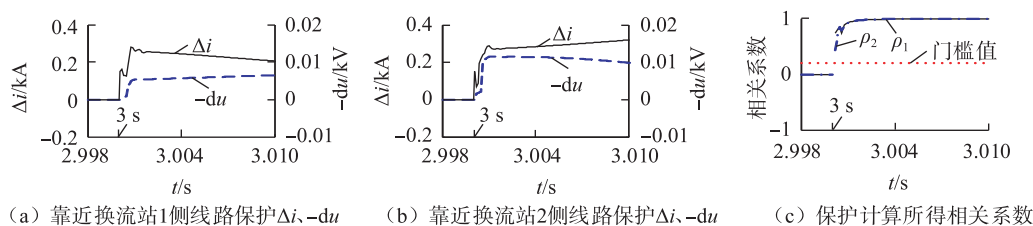


图8 正极线路中点经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障仿真结果

Fig.8 Simulative results of grounding fault with $10\ \Omega$ transition resistance in positive line

表2 线路 L_2 正极经过渡电阻接地故障仿真结果

Table 2 Simulative results of grounding fault with transition resistance in L_2 positive pole

故障位置	过渡电阻/ Ω	相关系数				判断结果
		ρ_{p1}	ρ_{p2}	ρ_{n1}	ρ_{n2}	
线路始端	5	0.932	0.947	0.162	-0.174	正极故障
	10	0.843	0.874	0.161	-0.173	正极故障
线路中端	5	0.932	0.944	0.087	-0.099	正极故障
	10	0.846	0.872	0.086	-0.099	正极故障
线路末端	5	0.880	0.958	0.162	-0.105	正极故障
	10	0.742	0.899	0.162	-0.104	正极故障

从图8可以看出,当直流线路 L_2 中点发生正极经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时,在 $2\ \text{ms}$ 左右换流站1与换流站2计算得到的相关系数逐渐上升并稳定在接近于1的一个数,大于保护门槛值,直流线路 L_2 两端保护判定故障为正向故障,经过相“与”后,故障定位在线路 L_2 上,与实际情况一致。从表2所示仿真结果可以看出,直流线路 L_2 上不同位置发生经过渡电阻接地故障时,基于相关系数的方向保护能够有效、准确地识别故障方向,表明本文提出的方向保护原理具有较强的抗过渡电阻能力。

上述针对多端直流配电系统的大量仿真结果验证了前文理论分析的合理性与正确性,表明了本文提出的基于相关系数的方向保护原理能够准确识别故障发生方向、故障选极和定位故障位置,具有计算速度快、无需实时通信和抗过渡电阻能力较强的特点,满足柔性直流系统对保护速动性与可靠性的要求。

4 结论

直流配电网发生故障时快速过流的特性对继电

保护技术的速动性提出了很高的要求。本文通过对直流配电网线路正、反向故障暂态特性的分析发现,换流站并联电容电压微分值的相反数 $-du$ 与线路故障电流分量 Δi 在故障发生位置不同时,呈现不同的关系,即发生正向故障时,二者同号且相关性较高;发生反向故障时,二者异号且不相干。

基于此,本文利用由柯西不等式得到的相关系数表征电容电压微分值的相反数与线路电流故障分量之间的相关性,实现快速可靠的故障方向判断。在此基础上提出了一种新型方向纵联保护原理,理论分析与大量的仿真算例表明本文所设计的保护方案具有动作速度快、抗过渡电阻能力较强、不受线路分布电容与故障位置的影响、能够实现故障选极等优点。

参考文献:

- [1] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1596-1601.
- [2] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [3] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [4] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based dc distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [5] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.

- DONG Yunlong, LIN Weijia, TIAN Jie, et al. Control and protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [6] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 30-149.
- [7] ZHANG Y, TAI N, XU B. Fault analysis and traveling wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [8] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用电压相关性的 ± 800 kV 直流输电线路区内故障判断方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 151-160.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Identification between internal and external faults of ± 800 kV HVDC transmission lines based on voltage correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 151-160.
- [9] 丁浩寅, 邵能灵, 郑晓冬. 利用信号距离识别的高压直流输电线路保护方案[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1186-1193.
- DING Haoyin, TAI Nengling, ZHENG Xiaolong. HVDC transmission line protection method using signal distance[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1186-1193.
- [10] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
- LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [11] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 基于模型识别的 VSC-HVDC 直流输电线路方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 78-83.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Directional element for VSC-HVDC transmission Lines based of model identification[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 78-83.
- [12] JIN X F, SONG G B, MA Z B. A novel pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on parameter identification[C]// 12th IET International Conference on Development in Power System Protection. Copenhagen, Denmark: IET, 2014: 1-6.
- [13] 孙树, 王华伟, 雷霄, 等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 219-223.
- SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.
- [14] JIN Y, FLETCHER J E, O'REILLY J, et al. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2316.
- [15] JIN Y, FLETCHER J E, O'REILLY J, et al. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [16] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
- LI Bin, HE Jiawei. Research on the fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [17] AHLGREN P, JARNEVING B, ROUSSEAU R. Requirements for a cocitation similarity measure with special reference to Pearson's correlation coefficient[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2003, 54(6): 550-560.
- [18] 张朝龙, 何怡刚, 邓芳明, 等. 一种基于 QPSO-RVM 的模拟电路故障预测方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1751-1757.
- ZHANG Chaolong, HE Yigang, DENG Fangming. An approach for analog circuit fault prognostics based on QPSO-RVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1751-1757.

作者简介:



李斌

李斌(1976—),男,天津人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: binli@tju.edu.cn);

邱宏(1992—),男,四川广汉人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: qiuHong@tju.edu.cn)。

High-speed direction protection of flexible DC system based on voltage source converter

LI Bin¹, QIU Hong¹, HONG Chao², ZHANG Ye², YANG Jian²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: When faults occur in the VSC(Voltage Source Converter)-based DC distribution system, the fault currents have fast speed and high peak value, which require high quickness and reliability of protection. Aiming at the typical meshed VSC-based DC distribution system, the discriminative features between positive and reverse direction fault of protection are analyzed. On this basis, a new fast direction protection principle of DC lines is proposed, by extracting correlation characteristics of DC side parallel capacitor voltage and line current with the positive and reverse direction faults of protection. The principle has the characteristics of fast action speed, high selectivity and strong resistance to transition resistance. A four-terminal meshed DC distribution system is built in PSCAD, whose simulation examples verify the feasibility and superiority of the proposed protection principle.

Key words: DC distribution system; voltage source converter; correlation; directional criterion; pilot protection