

基于突变能量比值的多端柔性直流电网闭锁式纵联保护方案

林湘宁^{1,2}, 刘琦¹, 范理想², 郑宇超², 童宁², 李正天²

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:多端直流电网中的限流电抗器集中配置, 直流线路之间边界元件的缺失将使区内、区外故障的辨别变得困难。针对上述多端柔性直流电网, 提出了一种基于突变能量比值的闭锁式纵联保护方案。以保护安装处的突变能量作为启动判据检测直流电网中的故障, 利用故障前、反行波在换流站两侧的突变能量比值差异构造保护动作判据。双端保护判断完成后, 仅需进行逻辑交换即可决定是否执行跳闸。在PSCAD/EMTDC平台上验证了所提保护方案的有效性, 仿真结果表明该保护方案能够有效辨别区内、区外故障, 并拥有较好的耐过渡电阻能力和抗噪声能力。

关键词:多端柔性直流电网; 继电保护; 纵联保护; 行波传递特性; 突变能量; 换流站

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202004024

0 引言

基于柔性直流输电技术构建的多端直流电网可被用于连接多个交流系统, 能实现多点送电和多点受电, 是解决新能源并网与消纳的有效手段之一^[1-2]。而直流系统的发展尚面临几个难点, 其中直流故障的快速、准确隔离是当前亟待突破的技术难点之一。目前已投运的工程中, 直流故障隔离一般是通过闭锁换流器和跳开交流断路器的方法清除直流线路故障, 但其切除故障所需的时间较长, 极大地限制了柔性直流输电技术的进一步发展^[3]。随着直流断路器技术日趋成熟, 切除故障模块的快速性有望得到进一步提升, 同时也需要能够超高速动作的继电保护原理与之配合^[4-5]。

为限制故障电流的上升速率, 直流系统中通常装有直流电抗器, 根据电抗器安装位置的不同可分为集中配置和分散配置^[6]。当直流电抗器安装于线路两侧时, 相当于在直流线路之间增加了一个天然的边界。已有诸多学者以此边界为基础, 研究区内、区外故障时所检测到的暂态电气量差异, 并以此构造保护判据^[7-9]。文献^[10]提出直流边界对高频暂态量具有很强的衰减特性, 利用边界两侧的高频能量差异构造保护判据, 能够实现故障的快速、准确识别。文献^[11]利用故障线路和非故障线路的直流电

抗器电压在大小和方向上的差异, 实现故障线路的快速识别, 并且能根据故障线路正、负两极电抗器电压的差异实现故障选极。

当电抗器集中配置时, 直流电网线路之间的边界元件将不再存在, 边界保护的原理不再适用于此类“网孔型”多端直流电网。针对上述结构, 文献^[12]通过Hausdorff距离度量了故障线路与非故障线路的两侧同名行波与异名行波首波头的衰减特性差异, 形成了一套波形匹配式纵联差动保护。文献^[13]通过双端/多端暂态电流构造差动保护, 引入连续采样的保护判据, 同时考虑差动电流的方向和幅值, 以避免线路分布电容对保护的不良影响。然而, 实现上述差动类保护的前提条件为本地测量装置足以对故障暂态特征进行深度刻画, 这就要求具备很高的系统采样率。另外, 对于基于形态学特征的差动保护, 双端故障波形的信息交互又依赖能够承载大容量实时信息的通信技术作为支撑。文献^[14]针对直流配电系统分析了不同故障位置发生故障时暂态高频阻抗的特征差异, 在此基础上, 提出了一种基于暂态高频阻抗比较的方向纵联保护方案, 该方案通过比较直流母线各侧高频阻抗幅值的大小有效地实现了站内含有潜在故障线路侧的识别, 方向纵联后能够可靠、有选择性地识别故障线路, 且该方案无需定值整定和通信严格同步, 为方向纵联保护方案的设计提供了良好的思路。

鉴于此, 本文提出了一种基于突变能量比值的闭锁式纵联保护方案。首先分析了故障初期行波在线路末端的折、反射规律; 以此为理论基础, 设计了基于换流站两侧线路的反、前行波能量比值差异的动作判据; 本地保护判断完成后, 仅需借助是否收到对侧传来的闭锁信号决定保护的动作为; 结合基于突变能量的启动判据, 形成了一套线路闭锁式

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2020-03-13

基金项目: 国家电网公司科技项目(5100-201999331A-0-0-00); 中国博士后科学基金资助项目(2018M642838); 湖北省博士后科技活动项目择优资助(G54)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5100-201999331A-0-0-00), China Postdoctoral Science Foundation(2018M642838) and Hubei Province Postdoctoral Scientific and Technological Activities Funded Project(G54)

快速保护方案。最后在PSCAD/EMTDC平台仿真验证了本文方案在各种故障工况情况下的有效性。

1 行波在直流系统边界处的传播特性

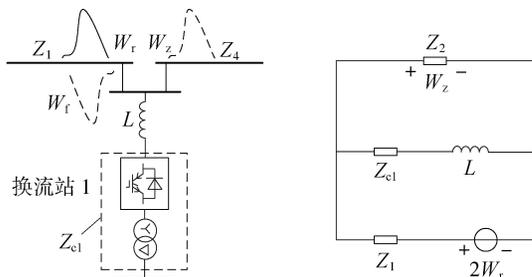
1.1 柔性直流系统边界等效

目前仍在建设中的张北±500 kV四端柔性直流电网工程,其限流电抗器分散布置于直流线路的两端,增加的边界条件有助于保护原理的设计。然而,线路两端的电抗器对直流系统的动态性能和安全性存在负面影响,从改善系统动态性能和电压稳定性的角度考虑,可将线路两端的电抗器改为集中配置到换流器出口处,其系统结构见附录中图A1。

直流电网的线路故障点处产生初始波头后,电压行波的线模分量及地模分量分别向两侧传播,行波在传播过程中遇到波阻抗不连续的点时将会发生折、反射;而在故障分量网络中,线路末端也属于波阻抗不连续点,行波将在线路末端发生折、反射^[15]。

在线路末端时,线模网络与零模网络并没有交汇,不会产生模量间的折、反射过程,此时,可对故障电路进行等效并采用彼得逊法则进行分析。以线路1为例,行波传递至换流站1处时,入射波记为 W_r ,发生折、反射后,折射波、反射波分别记为 W_z 、 W_f 。

图1(a)为直流边界示意图。图1(a)中, Z_1 为线路1的波阻抗; Z_4 为线路4的波阻抗; L 为直流电抗器的电感; Z_{c1} 为换流站1处电力电子开关元件与变压器的集中等效参数。为简化分析,利用彼得逊法则对图1(a)进行等效,等效电路如图1(b)所示。



(a) 集中配置电抗器时的直流边界 (b) 直流边界等效电路

图1 直流边界及其等效电路

Fig.1 Boundary of DC system and its equivalent circuit

入射波传播到线路1末端时产生折射,折射波沿线路2继续传播,波阻抗 Z_2 上的电压即为折射波幅值。

由此可通过分压计算折射波,如式(1)所示。

$$W_z = 2W_r \frac{(Z_{c1} + L) // Z_2}{Z_1 + (Z_{c1} + L) // Z_2} \quad (1)$$

易知 $W_z = W_r + W_f$,则 W_f 为:

$$W_f = W_r \frac{(Z_{c1} + L) // Z_2 - Z_1}{Z_1 + (Z_{c1} + L) // Z_2} \quad (2)$$

则行波传播到线路末端时的折射系数 K_z 、反射系数 K_f 分别如式(3)、(4)所示。

$$K_z = \frac{W_z}{W_r} = \frac{2[(Z_{c1} + L) // Z_2]}{Z_1 + (Z_{c1} + L) // Z_2} \quad (3)$$

$$K_f = \frac{W_f}{W_r} = \frac{(Z_{c1} + L) // Z_2 - Z_1}{Z_1 + (Z_{c1} + L) // Z_2} \quad (4)$$

1.2 首波头在线路末端的传递特性

为进一步研究故障行波波头首次到达(简称为首波头)线路末端时的传播特性,需要在复频域内对发生故障时系统的动态电路进行分析。特别对于含有多个电力电子器件的换流站,若考虑子模块电容、桥臂电感、桥臂电容、二极管等效阻抗等参数,则动态电路的计算将变得非常复杂,故有必要对换流站进行等效处理。

图2(a)为换流站侧的具体结构,由图可见在直流电抗器与电力电子元件之间还并联了2个大电容。仅考虑线模分量网络的情况下,当线路发生故障时,虚线框中的结构可在线模分量中等效为如图2(b)所示的故障电路。图中, Z_k 为不包括电容的换流站等效阻抗; C 为并联大电容; Δi_{k1} 为换流站处线路的线模电流故障分量; Δi_{c1} 为并联大电容注入线路的线模电流的故障分量; Δi_1 为线路上的线模电流的故障分量。

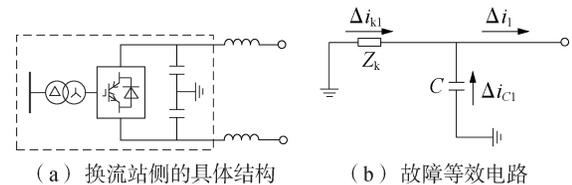


图2 换流器拓扑结构及其故障等效电路

Fig.2 Topological structure of converter and its fault equivalent circuit

文献[16-17]已验证,在很短的时间内, Δi_{k1} 相对于 Δi_{c1} 而言非常小,几乎可以认为线路上的故障电流 Δi_1 均由并联电容的注入电流 Δi_{c1} 提供。因此,在短时间内换流站可以直接等效为并联的大电容。

系统参数确定后就可以进行线路末端的折、反射系数计算。为了使结果更直观,避免噪声干扰,不妨设置入射波为一个存在0.5 ms延时、幅值为500的阶跃信号。经拉普拉斯变换后的系统参数如表1所示。

将表1中的数据代入式(3)、(4)中计算折、反射系数,结果分别如式(5)、(6)所示。

$$K_z(s) = 1 - \frac{265}{265 + \frac{100\,000}{3s} + 0.4s} \quad (5)$$

表1 时域和复频域下的系统参数

Table1 System parameters in time and complex frequency domains

参数	参数值	
	时域	复频域
$Z_{cl} / \mu\text{F}$	6000	$5000 / (3s)$
L / mH	200	$0.2s$
$Z_1, Z_2 / \Omega$	265	265
u / kV	$500\varepsilon(t - 0.0005)$	$(500/s)e^{-0.0005s}$

$$K_f(s) = - \frac{265}{265 + \frac{100000}{3s} + 0.4s} \quad (6)$$

继续进行反拉普拉斯变换,得到的折、反射系数结果如图3所示。

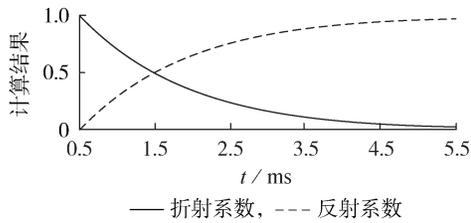


图3 折、反射系数计算结果

Fig.3 Calculative results of refraction and reflection coefficients

从图3中可以看出,在阶跃信号经过0.5 ms延时到达线路末端后,数毫秒内折射系数从1逐渐减小至0,而反射系数逐渐增大至接近1。上述结果符合预期,即:电抗器进行集中配置时,线路两端电抗器缺失,即线路两端没有明显的边界;行波到达线路末端时,短时间内并联电容无法突变,行波会完全透射,而反射波几乎没有,一段时间后电容电压逐渐变化,线路末端开始具有边界效应,折射波逐渐减小,反射波逐渐增大。

进一步研究系统参数对折、反射系数的影响,查阅相关资料得知^[18-19],500 kV 直流工程中电抗器参数 L 的取值范围一般为100~300 mH,并联电容的最大取值一般为12000 μF 左右。参考上述范围,在不同系统的参数取值情况下计算行波在边界的反射系数,结果见附录中图A2。通过对比图A2中的反射系数结果不难得知,并联电容器的参数变化对反射系数的影响十分微弱;相比于电容参数,反射系数对集中配置的电抗器参数更为敏感。另一方面,即使电抗器取值变化较大,反射系数的曲线只存在曲率的变化而故障初期总体上升的趋势并未改变。

2 基于行波能量比的纵联保护方案

2.1 保护设计思路

对于边界不明显的多端直流系统,行波到达线路末端时,短时间内反射系数很小、折射系数很大。

因此,行波也会呈现反射波幅值较小而折射波幅值较大的特性。幅值差异也意味着行波突变量能量的差异,借鉴文献[6]的思想,可以进行如下分析。

(1)区内故障场景。

首波头到达线路末端时,短时间内反射系数小,此时反行波幅值的绝对值将大于前行波幅值的绝对值,线路两侧保护的情况相同,即区内故障下两侧保护感受到的行波突变量能量大小关系为反行波大于前行波。

(2)区外故障场景。

故障行波透射到非故障线路时,至少经历一次线路末端的折射现象,因为短时间内折射系数较大,非故障线路上的前行波幅值较大,而此时故障反行波并未到达,故前行波幅值的绝对值将大于反行波幅值的绝对值。

考虑到环网对侧保护接收到的首波头可能是来自于本侧传递过去的故障行波,此时对侧保护处的反行波幅值绝对值将大于前行波幅值的绝对值。综合考虑后可认为区外故障下至少有一侧保护感受到的行波突变量能量大小关系为前行波大于反行波。

以换流站1为例进行详细说明,多端直流电网的前、反行波传播特点如图4所示。图中,线路1发生故障,故障行波传递到保护 B_{11} 处,在线路末端发生折反射,因短时间内反射系数较小,反行波 u_{11f} (入射波)的突变量能量将大于前行波 u_{11q} (反射波),而此时保护 B_{42} 处也将感受到故障前行波 u_{42q} (折射波),此时保护 B_{42} 还未感受到反行波 u_{42f} ,即前行波 u_{42q} (折射波)的突变量能量将大于反行波 u_{42f} 。

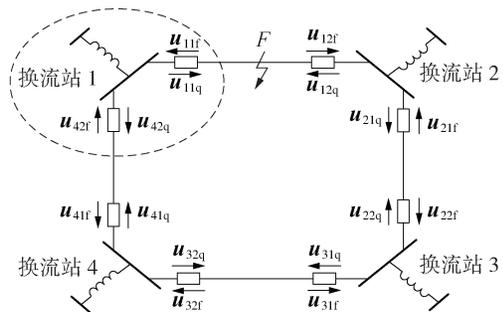


图4 多端直流电网的前、反行波传播特点

Fig.4 Propagation characteristics of forward and back traveling waves in multi-terminal DC grid

行波都是从换流站一侧入射,再从另一侧折射后继续传播,入射侧线路保护的反射波能量大于前行波能量,折射侧的前行波能量大于反行波能量,可以根据这一特征识别换流站的近故障侧。

考虑到环网中保护到故障点的距离不同,不同安装位置的保护感受到的行波也有所差异。对于线路1内不同位置的故障点,以故障点为起点、 $l_{\text{total}}/2$ 为

半径进行搜索(l_{total} 为直流线路总长),其搜索轨迹与线路的交点可分为如图5所示的2种情况,图中■表示各换流站出线中反行波与前行波能量比值较大的出线,即近故障侧保护,可见仅故障线路两侧保护都具有近故障特征。

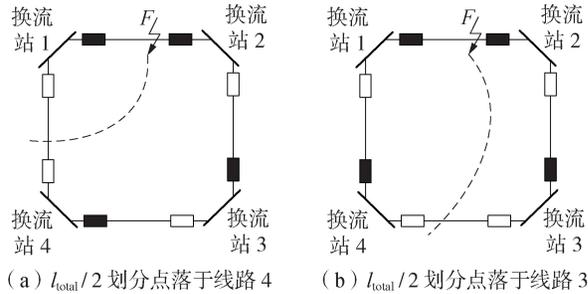


图5 不同故障位置的搜索轨迹

Fig.5 Searching trajectory under different fault locations

2.2 启动判据

本文设计了基于突变能量能量的启动判据,并且针对四端环网的结构特点,提出了详细的整定方法。

启动判据门槛值的整定应以保护能感受到的最轻微的故障信息作为参考。在环网中,对于任何保护安装位置而言,总能找到一点,该点沿线路两侧到保护的距離相等,即距离为 $l_{\text{total}}/2$,保护在该点发生故障的场景下所感受到的突变能量可视为最轻微的故障信息。又因为故障首波头到达保护时的突变能量最大,则以该点发生故障时保护所能感受到的首波头突变能量作为启动门槛整定依据(不考虑方向)。只要有1条出线的保护启动,则该换流站处所有出线的保护均开始进行突变能量计算。

以系统某换流站A为例,该换流站有q、p这2条出线,2条出线上近换流站侧(以下简称为近站侧)的保护分别为 B_{q1} 和 B_{p2} ,2条出线的保护(电气距离为同一个点)均能在环网内找到最轻微故障信息参考点F,如图6所示。

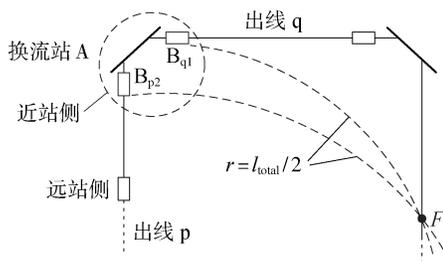


图6 换流站两侧的出线

Fig.6 Outgoing lines of converter station

将点F发生故障时,保护 B_{q1} 处与保护 B_{p2} 能够检测到的首次故障行波突变能量值的较小值作为启动门槛的整定依据,其突变能量计算方式为:

$$E_{ij}^{\text{set}} = \max \left\{ \left(\Delta u_{ij}(k) + Z_i \Delta i_{ij}(k) \right)^2 \right\} \quad (7)$$

其中,下标*i*表示线路标号;*j*表示线路端号; $\Delta u_{ij}(k)$ 、 $\Delta i_{ij}(k)$ 分别为线路*i*的电压、电流故障分量。

在进行启动判据门槛整定时,考虑能覆盖到全线最高 300Ω 过渡电阻的所有故障,应以点F处发生过渡电阻为 300Ω 的单极接地故障时,保护所感受到的突变能量作为最轻微故障信息。再参考欠范围式的整定方法,比较得出各保护感受到的最轻微故障信息中的最小值,并乘以一个可靠系数,从而将启动判据设置为:

$$E_{ij} \geq K_{\text{rel}} \cdot \min \left\{ E_{ij}^{\text{set}} \mid \text{换流站A出线保护} \right\} \quad (8)$$

其中, K_{rel} 为可靠系数,本文取典型值1.2。经过整定计算,换流站1—4处保护的启动门槛值分别为8470、8127、7981、8642 kV^2 。

2.3 基于站域故障方向识别的闭锁式动作判据

基于换流站两侧近端的前、反行波幅值差异,可以将每处保护感受到的故障反行波突变能量与前行波的突变能量的比值 E_r/E_q 作为参考量(其中 E_r 为该保护处的反行波突变能量, E_q 为前行波突变能量),对换流站所有出线的近端保护均进行突变能量的比值运算,并找出比值最大的出线*i*,即有:

$$\left(\frac{E_r}{E_q} \right)_{\text{line}i} = \max \left[\left(\frac{E_r}{E_q} \right)_{\text{line}1}, \left(\frac{E_r}{E_q} \right)_{\text{line}2}, \dots, \left(\frac{E_r}{E_q} \right)_{\text{line}n} \right] \quad (9)$$

其中,*n*为换流站A所有出线的数量。

在数据窗内计算 E_r/E_q 的值,若满足式(9)所示的判据,则由出线*i*上近站侧的保护输出数字逻辑1,否则其逻辑输出为0。数据窗的截取方式为:以式(8)所示的判据启动时刻为起点,截取其之后长度为 t_{pro} 的数据。

为保证彼得逊法则有效,本侧保护的截取数据窗内不能混有对侧反射波,由此可得线路长度下限约束为:

$$\frac{2l_1}{v_1} \geq t_{\text{pro}} \quad (10)$$

其中, l_1 为保护所在线路的长度; v_1 为线模波速度。结合本文模型中的线路长度, t_{pro} 的取值范围为0.1~0.5 ms,本文取 $t_{\text{pro}}=0.25$ ms。

出线*i*的近站侧保护判断完成后,将通过光纤将逻辑信息发送至出线*i*的另一端保护;同时等待远端保护传来逻辑信息。若在最大等待时间 t_d 之内本侧保护收到对侧发来的闭锁信号(逻辑0),则本侧保护随即被闭锁,否则保护开放。

故障发生在线路首/尾处时,一侧保护的启动判据会率先启动,而另一侧保护启动的滞后时间为 t_r 。考虑上述情况,再计及通信距离的延时 t_{com} ,则最大等待时间 t_d 应满足式(11)。

$$t_d \geq t_r + t_{\text{com}} + t_{\text{pro}} \quad (11)$$

本文中多端柔性直流(VSC-MTDC)电网模型的最长线路长度为184 km,故 t_d 的最小值应为1.47 ms,不妨取 $t_d=1.5$ ms。

保护方案的总体流程见附录中图A3。

3 仿真研究

基于PSCAD/EMTDC平台搭建如图A1所示的张北±500 kV四端柔性直流仿真模型,线路模型采用依频模型,其架空线路模型的参数见图A1。采样率设定为50 kHz,故障发生时刻设为1 s。

3.1 区内故障

(1)算例1:区内线路中点发生金属性接地故障。

用于长距离输电的架空线路工作环境恶劣,故障率高^[20]。以其中最常见单极接地故障为例,故障位置设置为典型的线路1中点处,过渡电阻为0。由于线路中点发生故障时,线路两端换流站感受到的故障首波头几乎完全相同,故该情况下只需研究一侧换流站故障行波即可。换流站1的2条出线的近站侧保护 B_{11} 、保护 B_{42} 处首次到达的故障行波突变能量如图7所示。

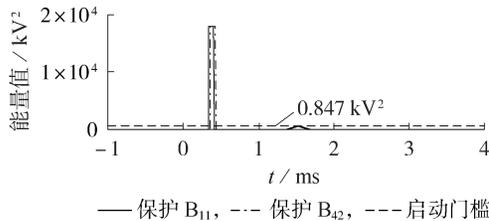


图7 区内中点发生金属性接地故障时的故障行波突变能量

Fig.7 Superimposed energy of fault traveling wave during internal grounding fault at midpoint of Line 1

由图7可见,保护 B_{11} 处与保护 B_{42} 处的突变能量几乎同时在 $t_1=0.32$ ms时越过启动门槛,换流站1处的保护启动,此时闭锁换流站1出线其他保护的启动判据。然后,保护 B_{11} 、 B_{42} 均开始计算启动时刻 t_1 后一个短时间窗(0.25 ms)的前行波突变能量 E_f 、反行波突变能量 E_q ,结果如图8所示。

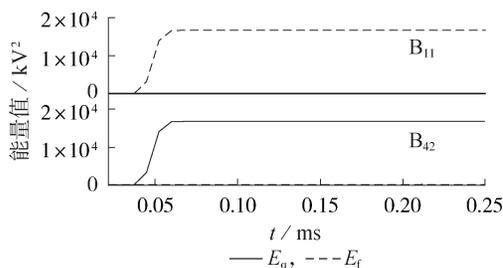


图8 B_{11} 和 B_{42} 处的 E_q 、 E_f

Fig.8 Values of E_q and E_f at B_{11} and B_{42}

由图8可见,换流站两侧不同出线上所安装的保护装置感受到近乎相反的前行波、反行波能量。进一步计算各出线反行波与前行波突变能量的比值 E_f/E_q ,结果如图9所示。

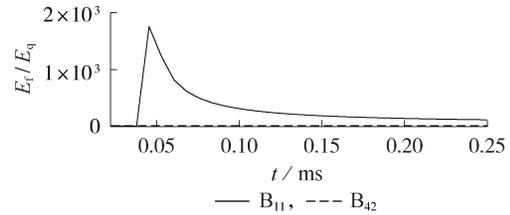


图9 E_f/E_q 的计算结果

Fig.9 Calculative results of E_f/E_q

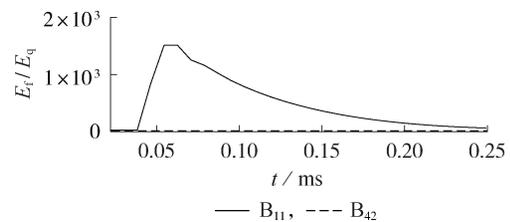
由图9可知,在时间窗内,保护 B_{11} 处的 E_f/E_q 波动非常大,而保护 B_{42} 处的 E_f/E_q 较小,且整个时间窗内始终满足式(12)。

$$\left(\frac{E_f}{E_q}\right)_{B_{11}} \geq \left(\frac{E_f}{E_q}\right)_{B_{42}} \quad (12)$$

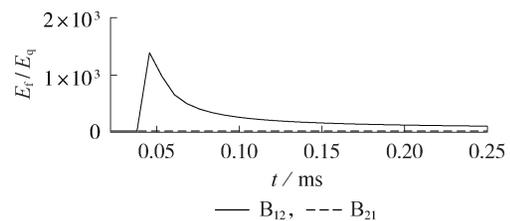
此时,线路1的本端保护 B_{11} 的逻辑输出为1,保护准备动作;同理,对端保护 B_{12} 的逻辑输出也为1。交换逻辑后,截止到 t_{pm} 末,双端保护均未收到闭锁信号(逻辑0),则双端保护执行跳闸。

(2)算例2:区内线路首端发生高阻接地故障。

在线路1首端设置过渡电阻为300 Ω的单极接地故障,此时线路两端换流站出线的 E_f/E_q 如图10所示。



(a) 换流站1出线



(b) 换流站2出线

图10 区内线路首端发生高阻接地故障时的 E_f/E_q

Fig.10 Values of E_f/E_q under internal grounding fault with high resistance in head of Line 1

由图10可见,线路1首端发生单极高阻接地故障时,线路的远端保护 B_{12} 仍能正确识别故障。通过分析不难得知,保护之所以体现出很好的故障覆盖能力,原因在于采用求比值的处理消除了过渡电阻

和传播距离对行波突变能量量的影响。

3.2 区外故障

(1)算例3:区外近端极间短路故障。

仍然以线路1为研究对象,考虑其最严重的区外故障,即线路2的首端(近换流站2处)发生过渡电阻为0的极间短路故障。此时,非故障线路1的换流站2保护于0时刻率先启动,而离故障点更远的换流站1保护在0.6 ms时刻启动。以启动时刻为起点,取其之后一个保护时间窗内的数据计算换流站1、2的各出线近端保护的前行波与反行波突变能量。基于各保护装置所感受到的行波能量数据,继续计算各保护的 E_r/E_q ,结果如图11所示。

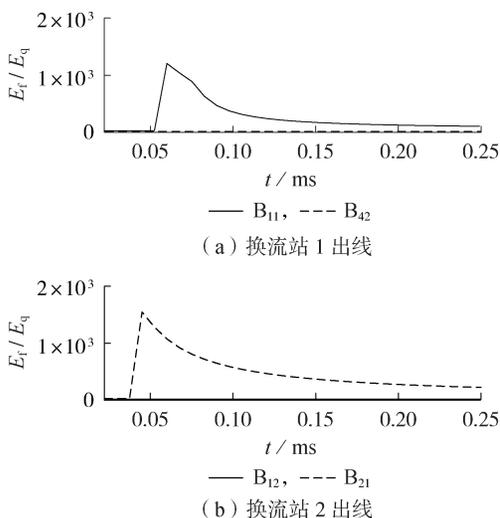


图11 区外近端极间短路故障下换流站出线的 E_r/E_q

Fig.11 Values of E_r/E_q of converter stations' outgoing line under external bipolar short circuit fault in head of Line 2

对于非故障线路1而言,保护 B_{11} 的 E_r/E_q 始终大于保护 B_{42} 的 E_r/E_q ,换流站1的判定结果为线路1近端故障;而保护 B_{12} 的 E_r/E_q 始终小于保护 B_{21} 的 E_r/E_q ,根据构造的保护判据,此时保护 B_{12} 输出为0。随后,两端保护相互交换逻辑,保护 B_{11} 将收到对端保护发送来的闭锁信号,从而在区外故障的场景下线路1的双端保护能保持可靠不误动。

(2)算例4:考虑噪声的区外近端极间短路故障。

为考察噪声干扰对保护性能的影响,在算例3的故障场景中加入信噪比为30 dB的噪声。基于算例3已有的结果,加入噪声后应着重考察保护 B_{12} 能否继续发出闭锁信号,换流站2出线的 E_r/E_q 结果如附录中的图A4所示。对比图A4和图11不难发现,即使在信噪比为30 dB的噪声干扰下,区内保护 B_{12} 仍能向线路对侧保护发出闭锁信号以保证双端保护不误动。

(3)算例5:直流母线故障。

以换流站2连接的直流母线故障发生接地故障为例,换流站2出线的 E_r/E_q 见附录中的图A5。

直流母线发生故障时,保护 B_{21} 和保护 B_{12} 都会率先感受到从母线传播来的故障前行波,由于此时线路上不存在阻抗不连续点,前行波只有传播到线路另一侧末端时才会发生折、反射,因此保护在短时间内不会感受到反行波。故图A5所示的结果是符合实际情况的,此时线路两侧保护均能发出闭锁信号,保护不误动。

3.3 其他因素对保护性能的影响

(1)算例6:采样率为10 kHz的保护性能。

传统的高压直流输电工程中,保护采样率一般为10 kHz,鉴于此,降低采样率到10 kHz来考察本文所提保护方案是否仍然有效。在算例1的设置基础上仅改变采样率,其他参数不变,结果见附录中的图A6。由图可看出,相比于50 kHz采样率,10 kHz采样率下能捕捉到的信息明显变少,故障细节的展示会变得很粗糙。但即使如此,式(9)所示的动作判据仍然成立,区内线路的两侧保护能可靠动作。

(2)算例7:电抗器参数对保护性能的影响。

1.2节已经证明,系统参数能改变行波在线路末端的折、反射系数。为研究所提保护方案在工程参数范围内的有效性,选择折、反射系统更敏感的电抗器参数作为唯一变量。不同电抗器参数取值下区内线路中点发生金属性故障时的 E_r/E_q 见附录中的图A7。由图可见,当电抗器的参数在100~300 mH范围内变化时,本地保护 B_{11} 计算出的 E_r/E_q 会随参数取值变化。而区内、区外的保护感受到的反、前行波差异十分明显,保护的“选择性”拥有充分的裕度。在工程参数范围内,即使不对原有保护方案的门檻进行重新整定,式(9)所示的动作判据仍然成立。

4 结论

为实现多端柔性直流电网中线路故障的快速、可靠识别,本文提出了基于突变能量比值的动作判据,结合行波突变能量量的启动判据形成了线路纵联保护方案。现对本文所提保护方案总结如下。

(1)本文方案的动作判据回避了门檻整定困难的问题,只需通过比较数据窗内各出线的行波能量比值的大小差异即可识别出故障出线;不依赖测量装置对故障行波特征进行深入刻画,降低了对采样率的要求。

(2)本地保护判断完成后,通过数据窗时间和最大等待时间的配合,只需交换双端保护的逻辑信息即可,不依赖大量数据的同步。

(3)在各种区外故障场景(包括强噪声干扰)下,本文方案能够可靠不动作,实现保护的选择性,维持

非故障线路的正常运行。

(4)在区内故障场景下,本文方案能够有效实现对极间故障、单极接地故障的识别与隔离,具有较强的抗过渡电阻能力并且能覆盖线路的全长。

(5)为保证彼得逊法则有效,当直流线路太短时,保护的适用范围将极大缩小。受限于此,即使保护采用很高的采样率也难以适应线路很短的直流配电系统,故如何对本文方法做出改进使其适用于短线(配电网)是下一步研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):1-7.
- [2] 李斌,张纪航,刘海金,等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):27-32,53.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):27-32,53.
- [3] 蔡静,董新洲. 高压直流输电线路故障清除及恢复策略研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):181-190.
CAI Jing, DONG Xinzhou. Overview on research of fault clearing and recovery strategy for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11):181-190.
- [4] 王金健,王志新. 一种具有限流能力的新型混合式高压直流断路器拓扑[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):143-149.
WANG Jinjian, WANG Zhixin. A novel hybrid high-voltage DC circuit breaker topology with current limiting capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):143-149.
- [5] LI Zhengtian, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. Enhanced summation impedance relay for EHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3):807-818.
- [6] 孙栩,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.
- [7] 孔飞,张保会,王艳婷,等. 超高速直流输电线路保护方向元件[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):83-88.
KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting, et al. Ultra-high-speed directional element of relay protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8):83-88.
- [8] 张明,和敬涵,罗国敏,等. 基于本地信息的多端柔性直流电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):155-161.
ZHANG Ming, HE Jinghan, LUO Guomin, et al. Local information-based fault location method for multi-terminal flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3):155-161.
- [9] CHU X, SONG G, LIANG J. Analytical method of fault characteristic and non-unit protection for HVDC transmission lines[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2016, 2(4):37-43.
- [10] 李斌,何佳伟,李晔,等. 基于边界特性的多端柔性直流配电网系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749,6016.
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):5741-5749,6016.
- [11] 周家培,赵成勇,李承昱,等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):89-94,146.
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19):89-94,146.
- [12] 童宁,范理想,林湘宁,等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报,2019,39(13):3820-3833.
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3820-3833.
- [13] 彭发喜,汪震,邓银秋,等. 混合式直流断路器在柔性直流电网中应用初探[J]. 电网技术,2017,41(7):2092-2098.
PENG Faxi, WANG Zhen, DENG Yinqiu, et al. Potentials of hybrid HVDC circuit breakers' application to MMC-HVDC grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2092-2098.
- [14] 贾科,宣振文,李晨曦,等. 柔性直流配电网中基于暂态高频阻抗比较的方向纵联保护[J]. 中国电机工程学报,2018,38(18):5343-5351.
JIA Ke, XUAN Zhenwen, LI Chenxi, et al. A directional pilot protection based on phase angle of transient high-frequency impedance for flexible DC distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18):5343-5351.
- [15] 汤兰西,董新洲,施慎行,等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术,2018,42(10):3176-3186.
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3176-3186.
- [16] 宋国兵,李德坤,靳东晖,等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):83-88.
SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):83-88.
- [17] TONG Ning, LIN Xiangning, LI Yan, et al. Local measurement based ultra-high-speed main protection for long distance VSC-MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):353-364.
- [18] 杨赛昭,向往,张峻樾,等. 基于人工神经网络的架空柔性直流电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4416-4430.
YANG Saizhao, XIANG Wang, ZHANG Junjie, et al. The artificial neural network based fault detection method for the overhead MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15):4416-4430.
- [19] 汤广福,王高勇,贺之渊,等. 张北500 kV直流电网关键技术及设备研究[J]. 高电压技术,2018,44(7):2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7):2097-2106.
- [20] 王艳婷,张保会,范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方

Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid

LIU Jian¹, HE Yuwei¹, XU Xianghai¹, TANG Jian¹, TAI Nengling², YANG Xuan¹

(1. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;
2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Fault current limiting technology is an important transition mean to realize the protection and fault isolation of flexible DC grid. Based on the fault characteristic of flexible DC grid and research results at home and abroad, the principle and performance of various current limiting techniques and methods are analyzed considering three aspects, including current limiting at AC side, current limiting by converter and current limiting at DC side. In addition, simulations are carried out to test and evaluate those current limiting techniques and methods. An improved hybrid current limiting circuit is proposed based on the comparative analysis results. The current limiting circuit is able to limit the fault current effectively and accelerate the fault current decay during fault interruption with a DC circuit breaker. Finally, possible research directions for fault current limiting technology of flexible DC grid are also discussed.

Key words: flexible DC grid; protection; DC line; fault isolation; fault current limiting

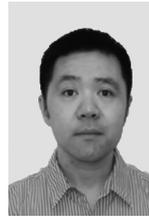
(上接第8页 continued from page 8)

案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 13-19.

WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.

作者简介:

林湘宁(1970—), 男, 广西南宁人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制 and 新能源微



林湘宁

网规划运行;

刘琦(1993—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: liuqi804250283@qq.com);

童宁(1988—), 男, 广东广州人, 博士后, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: tony1109@qq.com)。

(编辑 任思思)

Blocking pilot protection based on ratio of superimposed energy for VSC-MTDC grid

LIN Xiangning^{1,2}, LIU Qi¹, FAN Lixiang², ZHENG Yuchao², TONG Ning², LI Zhengtian²

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: When the current limiting reactor in the multi-terminal DC grid is designed for centralized configuration, the lack of boundary elements between the DC lines will make it difficult to distinguish internal and external faults. Aiming at the above-mentioned VSC-MTDC grid, a blocking pilot protection scheme based on the ratio of superimposed energy is proposed. The superimposed energy in the protection installation site is used as the start-up criterion to detect the fault in the DC grid, and the protection action criterion is constructed by using the difference between the ratio of superimposed energies of forward and backward traveling waves at two sides of the converter station. A logical exchange can be made to determine whether to perform a trip or not after the judgment of two-terminal protection is completed. The effectiveness of the proposed protection scheme is verified on the PSCAD/EMTDC platform. The simulative results show that the proposed protection scheme can effectively distinguish internal and external faults with better resistant capability to transition resistance and noise.

Key words: VSC-MTDC grid; relay protection; pilot protection; traveling wave propagation characteristics; superimposed energy; converter station

附录

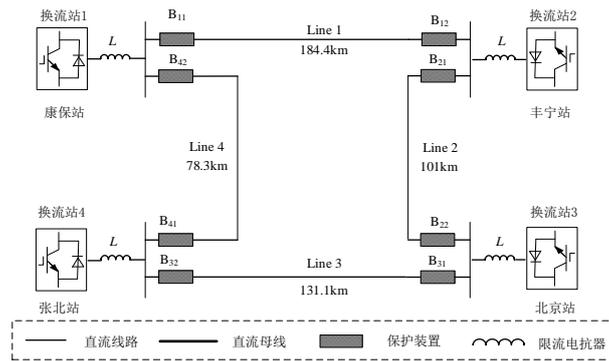


图 A1 多端柔性直流电网结构示意图

Fig.A1 Schematic diagram of structure of VSC-MTDC

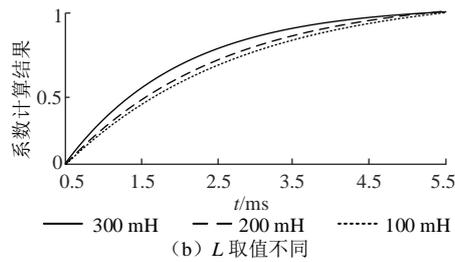
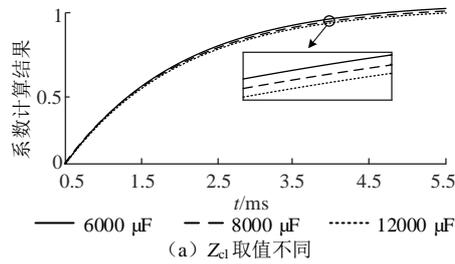


图 A2 反射系数和系统参数的关系

Fig.A2 Relationship between reflection coefficient and system parameters

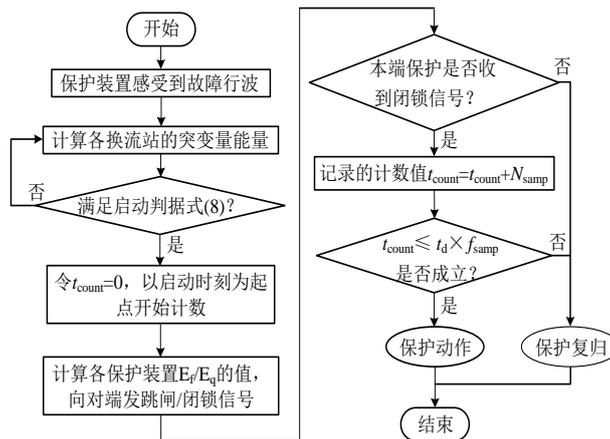


图 A3 保护方案的总体流程

Fig.A3 Flowchart of protection scheme