

直流输电系统换流站保护适应性分析及优化方案研究

张海强,戴文睿,牟大林,刘 磊,林 圣,何正友

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:为防止直流输电系统换流站保护在区外故障下误动作,分析换流站保护的适应性,并提出不影响保护速动性与灵敏性的逆变站保护优化方案。利用最小电压前行波与电压反行波幅值积分比值构造逆变站区内外故障的识别判据,进而考虑逆变站保护与区外交流系统保护在时间上的协调配合,设计逆变站保护在区外故障下的防误动策略。基于PSCAD/EMTDC的仿真结果表明,所提保护优化方案不受故障位置、故障类型、故障初始角、过渡电阻以及噪声干扰的影响。

关键词:高压直流输电;换流站保护误动;故障识别;保护优化

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909022

0 引言

随着直流输电与交流输电及其联网技术的快速发展,我国电网正逐步形成交直流高密度互联的格局^[1-2]。然而,交直流间的相互影响给交直流系统保护带来重大挑战。在交直流混联系统中,当直流系统发生故障时,直流系统保护应可靠动作;而当交流系统发生故障时,原则上应由交流系统保护切除故障,直流系统保护应尽量不动作^[3-4]。然而,现场运行经验表明,交直流系统保护并非严格遵守以上原则,交流系统保护或直流系统保护误动作事故时有发生。其中直流系统故障引起交流系统保护误动作的问题已得到大量关注,并取得一定研究成果^[5-7]。

然而在实际工程中,换流站区外的交流系统故障也会引起直流系统保护误动作,导致直流系统闭锁,严重威胁电网的安全稳定。例如:天广直流“6·23事故”即为交流系统故障造成的直流系统100 Hz保护误动作、直流系统误停运的事故^[8];2018年3月21日巴西发生了大停电事故,此次事故主要是由交流系统故障引起直流系统闭锁而引发,造成了巴西电网约20 000 MW的电力供应中断^[9]。因此,提高直流系统保护在换流站区外故障下的适应性对保障交直流系统的安全稳定运行具有重要意义。

在直流系统保护对换流站区外故障的适应性优化方面,已有一些文献报道,如:文献[10-12]分析了直流输电系统换流站的100 Hz保护在区外故障下

的误动作机理,提出可通过增加100 Hz保护的整定时间以提高其适应性;文献[13-15]分析了几种换流站保护对区外故障的响应特性,并指出可通过延长换流站保护整定时间或者增大保护整定值以减小换流站保护在区外故障下的误动作风险。然而增加保护整定时间会降低保护的速动性;提高保护整定值则会牺牲保护的灵敏性。

因此,本文分析直流输电系统换流站保护在区外故障下的适应性,并以逆变站保护为对象,提出不影响保护速动性与灵敏性的保护优化方案。该方案通过比较故障电压前行波与反行波幅值识别逆变站区内外故障,赋予了逆变站保护对区内外故障的辨识能力;基于此,设计逆变站保护与交流系统保护在时间上的协调配合策略,提高保护在区外故障下的适应性。仿真结果表明,所提方案不受故障位置、故障类型、故障初始角、过渡电阻以及噪声干扰影响。

1 直流系统换流站保护适应性简析

1.1 换流站保护误动作原因分析

图1为直流输电系统受端结构及逆变站保护测点配置示意图。图中, $L_1 \sim L_n$ 为逆变站区外的 n 条

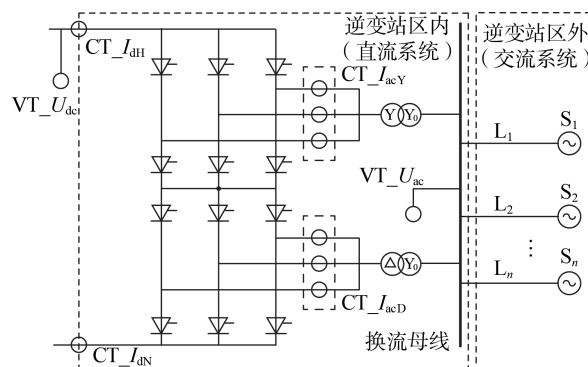


图1 直流输电系统受端结构及逆变站保护测点配置
Fig.1 Structure of HVDC receiving end and protection measurement equipment configuration of inverter station

收稿日期:2019-04-09;修回日期:2019-08-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900600);国家自然科学基金资助项目(51977183);国家电网公司科技项目(52094017000W)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900600), the National Natural Science Foundation of China (51977183) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094017000W)

交流线路; S_1 — S_n 分别为 L_1 — L_n 远端的等效交流电源;测点 $VT_{U_{ac}}$ 测量换流母线三相交流电压,测点 $CT_{I_{acY}}$ 和 $CT_{I_{acD}}$ 分别测量换流器高压桥三相交流电流与低压桥三相交流电流,测点 $VT_{U_{dc}}$ 测量换流器直流侧高压端直流电压 U_{dc} ,测点 $CT_{I_{dH}}$ 测量换流器直流侧高压端电流 I_{dH} ,测点 $CT_{I_{dN}}$ 测量中性线电流 I_{dN} ,整流站测点配置与逆变站相同。

保护判据对故障的检测是保护动作的条件之一,现有研究通过比较以上量测量电气特征与换流站保护判据的关系指出,换流站区外故障与其区内部分故障的电气特征类似,而逆变站的低交流电压保护、低直流电压保护、100 Hz保护、桥差保护、阀组差动保护,以及整流站的低交流电压保护、低直流电压保护与100 Hz保护的判据恰好根据这些特征进行设计^[13]。如逆变站的100 Hz保护根据逆变侧 I_{dH} 的100 Hz分量进行整定,而逆变站区内或区外的不对称故障均将引起 I_{dH} 中出现较大的100 Hz分量,即100 Hz保护判据缺乏对区内外故障的辨识能力,将可能在区外故障下误动作。上述其他4类逆变站保护与3类整流站保护与之类似,均缺乏对逆变站或整流站区内故障的辨识能力。对5类逆变站保护判据与逆变站区内外故障特征的关系总结见表1。表中, U_{ac} 为换流母线各相电压有效值的最小值; I_{acY} 为换流器高压桥各相交流电流绝对值的最大值; I_{acD} 为换流器低压桥各相交流电流绝对值的最大值; I_{ac} 为 I_{acY} 与 I_{acD} 的最大值; Δ_1 — Δ_6 为保护的整定阈值。

表1 逆变站保护判据与区内外故障特征的关系
Table 1 Relationship between protection criteria of inverter station and characteristics of internal and external faults

故障电气特征	逆变站区外故障	逆变站区内故障	逆变站保护(判据)
低交流电压	交流线路短路	直流系统接地故障	低交流电压保护($U_{ac} < \Delta_1$)
低直流电压	交流线路短路	直流系统接地故障	低直流电压保护($U_{dc} < \Delta_2$)
100 Hz分量	交流线路不对称短路	换流器交流侧不对称故障	100 Hz保护($I_{dH}(100\text{ Hz}) > \Delta_3$)
高、低压桥电流不平衡	交流线路短路	换流器高压端对中点短路	桥差保护($I_{ac} - I_{acY} \geq \Delta_4$ 或 $I_{ac} - I_{acD} \geq \Delta_5$)
换流器交流侧电流减小,直流侧电流增大	交流线路短路	换流器高压桥与低压桥短路	阀组差动保护($\max(I_{dH}, I_{dN}) - \max(I_{acY}, I_{acD}) > \Delta_6$)

故障持续时长达到整定时间是保护动作的另一条件,因而要判断上述保护是否在区外故障下误动,还需要研究保护整定时间与区外故障持续时间关系。在现有工程中,低交流电压保护、低直流电压保护、桥差保护以及阀组差动保护的整定时间均小于2 s,100 Hz保护的整定时间在天广直流“6·23事故”发生前为0.7~1 s,事故发生后,各直流工程陆续将

其提高到3 s^[12,15]。然而,整流站和逆变站区外交流线路故障的最长切除时间 $t_{\max}$ 可达到2.3 s,如图2所示, $t_{\max}$ 即为线路后备保护整定时间上限(2 s)、断路器失灵保护整定时间(0.2 s)以及断路器跳闸所需时间(0.1 s)之和。因此,在区外交流线路发生故障时,若交流线路的主保护拒动,后备保护的最长切除故障时间将长于低交流电压保护、低直流电压保护、100 Hz保护(未提高整定时间之前)、桥差保护以及阀组差动保护的整定时间。

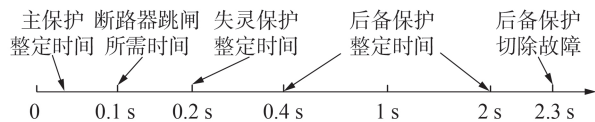


图2 换流站区外交流线路保护动作时序

Fig.2 Action sequence of out-zone AC line protection of converter station

综上可知,5类逆变站保护和3类整流站保护无法辨识出区内外故障,且保护整定时间短于交流线路后备保护的最长切除故障时间,故上述保护将可能在区外交流线路故障下误动作。

1.2 现有换流站保护优化方案分析

现有研究与实际工程主要通过提高换流站保护的整定时间或者整定值来防止其在区外交流线路故障下误动作。

提高整定时间是指将可能误动作的换流站保护整定时间延长至交流线路后备保护最长切除故障时间后,即提高至长于2.3 s。文献[15]指出在考虑系统承受能力的条件下,将上述分析的保护整定时间延长至3 s不会影响系统的安全稳定,目前已有多个直流工程将100 Hz保护的整定时间延长至3 s。然而提高保护整定时间,将降低保护对区内故障的速动性,延长区内故障对换流站设备的冲击时间,增大设备(尤其是老化设备)在区内故障下的损坏风险。

由于通常区外故障下换流站保护量测电气量较正常运行情况下的变化比区内故障下的小^[13-15],因此有研究提出可通过提高上述换流站保护的整定阈值来防止其在区外故障下误动作,但这将影响保护的灵敏性,增大保护在区内故障下的拒动作风险。

综上所述,以上5类逆变站保护以及3类整流站保护在区外交流线路故障下的适应性不足,而现有的优化方案牺牲了保护的速动性或灵敏性。因此,本文以逆变站保护为对象,将保护在区外故障下的误动作原因分为区内外故障识别以及逆变站保护与交流系统保护在时间上的协调配合2步进行分析,提出不影响速动性与灵敏性的保护优化方案。

2 逆变站区内外故障特征分析

2.1 故障行波的基本理论

逆变站区内外故障分布见图3。图中逆变站区

内故障点 f_1 和 f_2 分别表示换流变压器一次侧故障及换流器直流侧故障;故障点 f_{3-L_h} 表示直流输电系统受端连接的 $n(n \geq 1)$ 条交流线路中任一线路 L_h 故障。

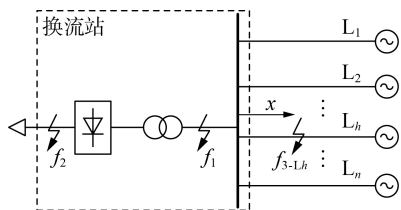


图3 HVDC逆变站区内外故障分布

Fig.3 In- and out-zone fault distribution of HVDC inverter station

由叠加定理可知,在逆变站区内或者区外发生故障时,相当于在故障点附加一电压源,由此产生的故障行波向两侧传播^[16-17],如当在距离换流母线 x 处的点 f_{3-L_h} 发生故障时,该点的电压和电流叠加分量(故障分量) Δu 和 Δi 分别为:

$$\begin{cases} \Delta u = u^+(t-x/v) + u^-(t+x/v) \\ \Delta i = [u^+(t-x/v) - u^-(t+x/v)]/Z_{L_h} \end{cases} \quad (1)$$

其中, v 为行波的传播速度; Z_{L_h} 为故障线路 L_h 的波阻抗; u^+ 与 u^- 分别为沿正方向传播的电压前行波和沿反方向传播的电压反行波,本文令换流母线指向交流线路的方向为行波传播的正方向。

由式(1)可得电压前行波和反行波分别为:

$$u^+ = (\Delta u + \Delta i Z_{L_h})/2 \quad (2)$$

$$u^- = (\Delta u - \Delta i Z_{L_h})/2 \quad (3)$$

行波在传播过程中遇到波阻抗不连续点会发生折射和反射,由故障附加电路可计算行波折射和反射系数。点 f_{3-L_h} 发生故障的附加电路见图4。图中, Z_1 为直流系统等效阻抗; Z_C 为交流滤波器、无功补偿电容和换流母线对地杂散电容的等效阻抗。故障电压行波在母线处的反射系数 β 和折射系数 γ 分别为:

$$\beta = \frac{Z_1 // Z_C // Z_{LS} - Z_{L_h}}{Z_{L_h} + Z_1 // Z_C // Z_{LS}} \quad (4)$$

$$\gamma = 1 + \beta \quad (5)$$

其中, Z_{LS} 为除故障线路 L_h 外所有线路波阻抗的等效阻抗。当直流输电系统受端仅连接1条线路,即 $n=1$

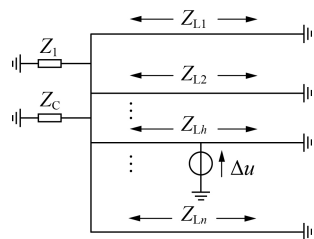


图4 线路 L_h 发生故障时的故障叠加电路

Fig.4 Fault superposed circuit when fault happens on line L_h

时, $Z_{LS} = \infty$ 。令 $p = Z_1 // Z_C // Z_{LS}$,式(4)可简化为:

$$\beta = -\left(\frac{Z_{L_h}}{p} - 1\right) / \left(\frac{Z_{L_h}}{p} + 1\right) \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可得:

$$\gamma = 2 / \left(\frac{Z_{L_h}}{p} + 1\right) \quad (7)$$

因此,无论直流输电系统受端连接多少条线路,故障电压行波在换流母线处的反射系数绝对值均小于1,折射系数绝对值均大于0,即 $|\beta| < 1, |\gamma| > 0$ 。

2.2 故障行波特征分析

以点 f_1 发生故障为例分析逆变站区内故障下的行波特征,见图5。当点 f_1 发生故障时,故障分量的行波向出线 L_1-L_n 折射电压前行波分别为 $u_1^+ \dots u_n^+$,在 $2l_{\min}/v$ ($l_{\min}$ 为 n 条线路长度的最小值)时间内,各线路首端均不存在电压反行波,故区内故障的电压行波特征为:在 $2l_{\min}/v$ 时间内, $|u_k^+| > |u_k^-|$ ($k=1, 2, \dots, n$)。

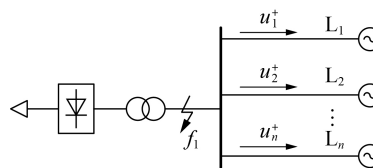


图5 逆变站区内故障下的电压行波情况

Fig.5 Voltage traveling wave of in-zone fault for inverter station

如图6所示,当逆变站区外点 f_{3-L_h} 发生故障时,在 $2l_{\min}/v$ 时间内,故障线路 L_h 首端存在 u_h^+ 和 u_h^- ,并且其故障行波向所有非故障线路折射电压前行波,故区外故障的电压行波特征为:在 $2l_{\min}/v$ 时间内, $|u_h^+| < |u_h^-|, |u_k^+| > |u_k^-|$ ($k=1, 2, \dots, n$ 且 $k \neq h$)。

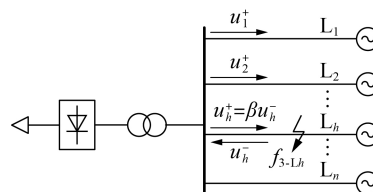


图6 逆变站区外故障下的电压行波情况

Fig.6 Voltage traveling wave of out-zone fault for inverter station

3 保护优化方案

3.1 逆变站区内外故障识别判据

由2.2节分析可知,当发生逆变站区内故障时,在 $2l_{\min}/v$ 时间内,各线路首端的电压前行波幅值均大于反行波幅值,即不存在线路的电压前行波幅值与反行波的幅值比值小于1;在逆变站区外故障下,故障线路的电压前行波幅值小于反行波幅值,即存在线路的电压前行波幅值与反行波幅值比值小于1。因此,本文定义故障后一段时间内的电压前行波

与反行波的幅值积分比值 λ 如下:

$$\lambda = \left(\int_{t_0}^{t_0+T_d} |u^+| dt \right) / \left(\int_{t_0}^{t_0+T_d} |u^-| dt \right) \quad (8)$$

其中, t_0 为检测到故障的时间; T_d 为积分时间窗,其值应小于 $2l_{\min}/v$ 。由于在架空线路中,行波波速 v 一般为 $290 \sim 299 \text{ km}/\mu\text{s}$ ^[18],当线路长度为 $80 \sim 500 \text{ km}$ 时, $2l_{\min}/v$ 为 $0.53 \sim 3.45 \text{ ms}$,本文取 $T_d=0.5 \text{ ms}$ 。

对式(8)进行离散化,可得:

$$\lambda = \frac{S^+}{S^-} = \left(\sum_{k=1}^N |u^+(k)| \Delta t \right) / \left(\sum_{k=1}^N |u^-(k)| \Delta t \right) \quad (9)$$

其中, $k=1$ 表示检测到故障后的第一个采样点; N 为一个积分时间窗内的采样点数; Δt 为采样间隔。

由式(9)分别计算线路 $L_1 \sim L_n$ 的电压前行波幅值积分与反行波幅值积分的比值 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 。进一步,设计基于最小电压前行波与反行波幅值积分比值的区内外故障识别判据为:

$$\lambda_{\min} = \min(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) < k_{\text{set}} \quad n \geq 1 \quad (10)$$

其中, k_{set} 为故障识别门槛值,本文取为1.5。若式(10)成立,则判断故障发生在逆变站区外;否则,判断故障发生在逆变站区内。

3.2 逆变站保护与交流系统保护的协调配合策略

基于对区内外故障的识别,可设计逆变站保护与区外交流系统保护的协调配合策略,基本思路如下:

(1)在判断出发生的故障为逆变站区内故障时,若逆变站低交流电压保护、低直流电压保护、100 Hz保护、桥差保护或者阀组差动保护的整定阈值被满足,则相应的保护按其原有配置动作;

(2)在判断出发生的故障为逆变站区外故障时,闭锁可能误动作的5类逆变站保护2.6 s,并由交流系统保护切除故障,2.6 s后解锁5类逆变站保护。

因此,可设计从故障识别到保护协调配合的逆变站保护优化流程,如图7所示。

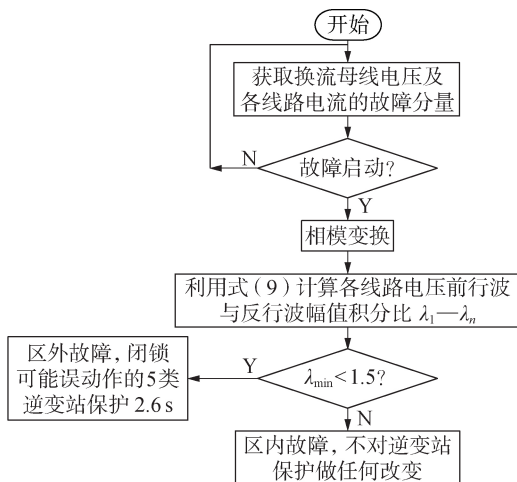


图7 逆变站保护优化流程

Fig.7 Flowchart of protection optimization for inverter station

3.3 保护优化方案可行性

上述逆变站保护优化方案中,在逆变站发生区外故障时,5类逆变站保护的整定时间被延长至交流线路后备保护的最长切除故障时间之后,可避免逆变站保护在交流线路故障被切除前发生误动作,在逆变站发生区内故障时,逆变站保护仍按其原有配置动作,即保护的整定阈值、整定时间及动作策略均未改变,故此优化方案不影响保护对区内故障的速动性、灵敏性等特性。

以上保护优化方案的思路亦适用于整流侧,即在整流站区外发生故障时,闭锁可能误动作的3类整流站保护2.6 s后再解锁;在整流站区内发生故障时,整流站保护仍按其原有配置动作。基于此思路,既可防止整流站保护在区外故障下误动作,又不影响整流站保护对区内故障的速动性与灵敏性。

然而,由于基于最小电压前行波与反行波幅值积分比值的故障识别方法的数据窗 $T_d=0.5 \text{ ms}$,该识别方法仅适用于换流站区外交流线路的最小长度 $l_{\min} > vT_d/2$ 的情况,根据行波在架空线路中的传播速度^[18], $l_{\min}$ 应在72.5 km以上。而在整流侧,功率从发电站经较短线路(一般小于50 km)向整流站传输,因而本文所提的故障识别方法不适用于整流侧。

4 仿真实验

本文所提优化方案包括区内外故障识别和换流站保护与交流系统保护在时间上的协调配合两部分。由于协调配合策略设计的关键点是确定换流站保护在区外故障下的闭锁时间,闭锁时间(2.6 s)仅与交流线路后备保护的最长切除故障时间(2.3 s)有关,故障初始角、过渡电阻等均不影响协调配合策略的设计,因此,仅需分析故障识别方法在不同条件下的适应性以验证所提保护优化方案的可行性。

4.1 仿真模型参数

在PSCAD/EMTDC仿真平台上分别搭建直流输电系统受端连接1条线路的交直流系统仿真模型1和直流输电系统连接3条线路的交直流系统仿真模型2,其中模型1中线路L长度为200 km,模型2中线路 $L_1 \sim L_3$ 长度分别为200、110、80 km。各线路均采用频率相关模型,线路结构选用3H5杆塔。采样频率 $f_s=100 \text{ kHz}$,时间窗 $T_d=0.5 \text{ ms}$,即式(9)中 $N=50$ 。

4.2 典型故障仿真

4.2.1 逆变站区内故障

在模型1的逆变站区内设置点 f_1 发生故障(A相接地),过渡电阻为 40Ω ,故障初始角为 54° ,电压前行波与反行波如图8所示。

由仿真数据可计算出线路L的 $\lambda=224.6$,大于1.5,故可判断发生的故障为逆变站区内故障,该情况下,逆变站保护保持其原有配置。

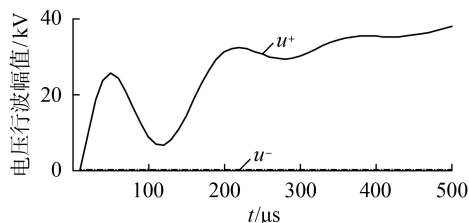


图8 逆变站区内故障(f_1)时的仿真结果
Fig.8 Simulative results of in-zone fault(f_1)
for inverter station

4.2.2 逆变站区外故障

在模型1的线路L上设置逆变站区外的点 f_{3-L} 发生A相接地故障,故障发生在距离换流母线100 km处,过渡电阻为 $40\ \Omega$,故障初始角为 54° ,电压前行波与反行波情况如图9所示。

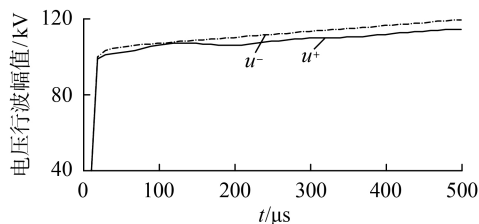


图9 逆变站区外故障(f_{3-L})时的仿真结果
Fig.9 Simulative results of out-zone fault(f_{3-L})
for inverter station

由仿真数据可计算出 $\lambda=0.97$,小于1.5,故判断发生的故障为逆变站区外故障,该情况下,闭锁5类逆变站保护2.6 s后再解锁。

4.3 保护优化方案适应性分析

4.3.1 不同故障位置与故障类型下的适应性分析

分别在模型1与模型2上设置不同位置与类型的故障,仿真结果见表2和表3。其中各故障的过渡电阻均为 $60\ \Omega$,点 f_1 、 f_{3-L} 与 f_{3-L3} 发生故障的初始角为 30° ,1 km和190 km分别表示点 f_{3-L} 故障发生在线路L的近端和远端,1 km和78 km分别表示点 f_{3-L3} 故障

表2 基于模型1的不同位置与类型故障的仿真结果
Table 2 Simulative results of faults with different
positions and types based on Model 1

故障点	故障类型	故障距离 / km	λ	判断结果	保护策略
f_1	AG	—	377.04	区内	0
	AB	—	264.47	区内	0
	ABC	—	270.86	区内	0
f_2	—	—	534.28	区内	0
f_{3-L}	AG	1	0.97	区外	1
	AG	190	0.97	区外	1
	AB	1	0.97	区外	1
	AB	190	0.97	区外	1
	ABC	1	0.97	区外	1
	ABC	190	0.97	区外	1

注:保护策略取值为0表示逆变站保护保持原有配置,取值为1表示闭锁5类逆变站保护2.6 s后再解锁,后同。

表3 基于模型2的不同位置与类型故障的仿真结果
Table 3 Simulative results of faults with different
positions and types based on Model 2

故障点	故障类型	故障距离 / km	λ_1	λ_2	λ_3	判断结果	保护策略
f_1	AG	—	186.24	177.05	91.63	区内	0
	AB	—	306.49	285.45	299.90	区内	0
	ABC	—	342.60	283.59	295.52	区内	0
f_2	—	—	113.25	131.68	137.97	区内	0
f_{3-L3}	AG	1	152.69	155.44	0.97	区外	1
	AG	78	15.87	18.23	0.98	区外	1
	AB	1	308.51	283.09	0.97	区外	1
	AB	78	31.90	41.76	0.97	区外	1
	ABC	1	310.01	285.07	0.97	区外	1
	ABC	78	23.80	32.44	0.97	区外	1

发生在线路 L_3 的近端和远端。

由表2、3知,在逆变站区内不同位置发生不同类型故障时, $\lambda_{\min}$ 均大于1.5,判断发生区内故障,保护策略为0;在线路不同位置发生不同类型故障时, $\lambda_{\min}$ 均小于1.5,判断发生区外故障,保护策略为1。因此,保护优化方案适用于不同位置与类型的故障。

4.3.2 不同故障初始角下的适应性分析

以A相接地故障为例(过渡电阻设为 $60\ \Omega$),分别对不同故障初始角下点 f_1 、 f_{3-L} 与 f_{3-L3} 发生故障时保护优化方案的性能进行验证,仿真结果见表4、5。其中点 f_{3-L} 与 f_{3-L3} 分别距离换流母线120 km和60 km。

表4 基于模型1的不同故障初始角的仿真结果
Table 4 Simulative results of different fault
initial angles based on Model 1

故障点	初始角 / ($^\circ$)	λ	判断结果	保护策略
f_1	5	35.16	区内	0
	90	248.48	区内	0
	120	318.21	区内	0
f_{3-L}	5	0.97	区外	1
	90	0.97	区外	1
	120	0.97	区外	1

表5 基于模型2的不同故障初始角的仿真结果
Table 5 Simulative results of different fault
initial angles based on Model 2

故障点	初始角 / ($^\circ$)	λ_1	λ_2	λ_3	判断结果	保护策略
f_1	5	54.20	70.19	64.72	区内	0
	90	232.14	253.75	290.99	区内	0
	120	456.14	171.33	106.40	区内	0
f_{3-L3}	5	12.05	10.73	0.97	区外	1
	90	96.94	100.20	0.97	区外	1
	120	34.44	20.55	0.97	区外	1

由表4、5知,虽然逆变站区内故障小初始角情况下 $\lambda_{\min}$ 减小,但保护仍能可靠识别故障,故保护优化方案在不同故障初始角下均有良好的适应能力。

4.3.3 不同过渡电阻下的适应性分析

为验证不同过渡电阻(特别是高阻)对保护优化

方案的影响,以A相接地故障(故障初始角均为 30°)为例,不同过渡电阻下点 f_1 、 f_{3-L} 与 f_{3-L3} 的故障仿真结果如表6与表7所示。其中点 f_{3-L} 与 f_{3-L3} 分别距离换流母线120 km和60 km。

表6 基于模型1的不同过渡电阻的仿真结果

Table 6 Simulative results of different fault resistances based on Model 1

故障点	过渡电阻/ Ω	λ	判断结果	保护策略
f_1	0	80.39	区内	0
	100	52.12	区内	0
	200	48.37	区内	0
f_{3-L}	0	0.97	区外	1
	100	0.97	区外	1
	200	0.97	区外	1

表7 基于模型2的不同过渡电阻的仿真结果

Table 7 Simulative results of different fault resistances based on Model 2

故障点	过渡电阻/ Ω	λ_1	λ_2	λ_3	判断结果	保护策略
f_1	0	226.88	229.92	253.57	区内	0
	100	97.87	106.36	49.34	区内	0
	200	40.87	47.28	22.84	区内	0
f_{3-L3}	0	39.95	53.22	0.97	区外	1
	100	18.90	27.13	0.97	区外	1
	200	11.69	17.01	0.97	区外	1

由表6与表7可知,虽然逆变站区内故障的 $\lambda_{\min}$ 随着过渡电阻的增加而减小,但即使在高阻情况下保护仍然可靠识别故障,故保护优化方案具有较高的耐过渡电阻能力。

4.3.4 噪声干扰情况下的适应性分析

为验证噪声干扰对保护优化方案的影响,分别在模型2上设置几种A相接地故障(过渡电阻均为200 Ω),在所得仿真数据中加入信噪比为40 dB和30 dB的噪声,对保护优化方案的验证结果见表8。

表8 噪声干扰情况下的仿真结果

Table 8 Simulative results with noise disturbance

故障点	信噪比/dB	故障距离/km	λ_1	λ_2	λ_3	判断结果	保护策略
f_1	40	—	13.87	15.28	8.84	区内	0
	30	—	8.87	9.28	5.84	区内	0
f_{3-L3}	40	78	6.87	7.23	0.98	区外	1
	30	78	4.87	5.23	0.91	区外	1

根据表8可知,当逆变站区内发生故障时,虽然在噪声干扰下 λ_1 、 λ_2 与 λ_3 均有所减小,但 $\lambda_{\min}$ 仍大于1.5,保护准确判断故障为区内故障;而当逆变站区外发生故障时,各故障状态下的 $\lambda_{\min}$ 仍小于1.5。因此,所提保护优化方案具有较高的耐噪声干扰能力。

5 结论

(1)分析了换流站保护的适应性:逆变站低交流电压保护、低直流电压保护、100 Hz保护、桥差保护

及阀组差动保护无法辨识逆变站区内外故障,且保护整定时间短于交流线路后备保护最长切除故障时间,故这些逆变站保护可能在区外交流线路故障下误动作;同理,整流站低交流电压保护、低直流电压保护与100 Hz保护也可能在交流线路故障下误动作。

(2)设计了基于逆变站区内外故障识别的保护优化方案:在区外发生故障时,闭锁可能误动作的5类逆变站保护2.6 s后再解锁,则可防止保护在区外故障下发生误动作;在区内发生故障时,不对保护进行任何改变,即保护对区内故障的速动性和灵敏性等特性将不受影响。而且保护优化方案不受故障位置、故障类型、故障初始角、过渡电阻以及噪声干扰的影响,具有一定的工程应用前景。

(3)所提保护优化思路也适用于整流侧,因此下一步将研究适用于整流站的区内外故障识别方法,并基于区内外故障的识别,实现对整流站的低交流电压保护、低直流电压保护与100 Hz保护的优化。

参考文献:

- [1] 雷霄,孙栩,李新年,等. 适应大容量直流接入弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):205-209.
LEI Xiao,SUN Xu,LI Xinnian,et al. Optimization methods of pole control system for large-capacity HVDC accessing to weak receiving system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):205-209.
- [2] 张海强,林圣,刘磊,等. 基于直流差动保护动作的送端换流器接地故障定位方案[J]. 电网技术,2018,42(8):2382-2392.
ZHANG Haiqiang,LIN Sheng,LIU Lei,et al. Grounding fault location scheme of HVDC rectifier based on the action of DC differential protection[J]. Power System Technology,2018,42(8):2382-2392.
- [3] EISEROUGI A A,ABDEL-KHALIK A S,MASSOUD A M,et al. A new protection scheme for HVDC converters against DC-side faults with current suppression capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(4):1569-1577.
- [4] 徐敏,蔡泽祥,韩昆仑,等. 交直流混联电网中交流暂态侵入对直流继电保护的影响分析[J]. 高电压技术,2014,40(11):3618-3625.
XU Min,CAI Zexiang,HAN Kunlun,et al. Influence analysis of AC system transient invasion on DC protective relaying in AC/DC hybrid power system[J]. High Voltage Engineering,2014,40(11):3618-3625.
- [5] 蔡泽祥,李佳曼,余超耘,等. 直流扰动对交流继电保护动态行为的影响[J]. 高电压技术,2016,42(10):3246-3252.
CAI Zexiang,LI Jiaman,YU Chaoyun,et al. Impact of DC disturbances on AC protective relaying dynamic behavior[J]. High Voltage Engineering,2016,42(10):3246-3252.
- [6] 申洪明,黄少锋,费彬. HVDC换相失败暂态特性及其对差动保护的影响分析和对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):109-114.
SHEN Hongming,HUANG Shaofeng,FEI Bin. Transient characteristic of HVDC system during commutation failure,its effect on differential protection and countermeasures[J]. Elec-

- tric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 109-114.
- [7] 焦在滨, 金吉良, 行武, 等. 交直流混联电网自适应交流过电压保护方案的研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2541-2547.
JIAO Zaibin, JIN Jiliang, XING Wu, et al. Research of new scheme of adaptive overvoltage protection in hybrid AC/DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2541-2547.
- [8] 傅闯, 饶宏, 黎小林. 交直流混合电网中直流 50 Hz 和 100 Hz 保护研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 57-60.
FU Chuang, RAO Hong, LI Xiaolin. HVDC 50 Hz and 100 Hz protection of AC/DC hybrid transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 57-60.
- [9] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-9.
YI JUN, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on black-out in Brazilian Power Grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-9.
- [10] 成敬周, 徐政, 张静. 交流系统横向故障对 HVDC 100 Hz 保护影响及特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 223-228.
CHENG Jingzhou, XU Zheng, ZHANG Jing. Influence of transverse faults in HVAC power system on HVDC 100 Hz protection of HVDC transmission system and analysis on its characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 223-228.
- [11] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 影响直流 100 Hz 保护的交流系统故障范围分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 48-51.
YU Jiang, ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, et al. Impact of fault location in AC system to 100 Hz protection of HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 48-51.
- [12] LI Z, CHEN Z, WANG G, et al. Study on the operation area of the 100 Hz protection in an HVDC System[C]//Power and Energy Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [13] 李佳曼, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 直流系统保护对交流故障的响应机理与交流故障引发的直流系统保护误动分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 953-960.
LI Jiaman, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Response mechanism of UHVDC system protection to faults in UHVAC system and analysis on malfunction of UHVDC protection caused by faults in UHVAC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 953-960.
- [14] 束洪春, 王璇, 田鑫萃, 等. 交流故障下永富直流换流器差动保护误动风险分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 478-487.
SHU Hongchun, WANG Xuan, TIAN Xincui, et al. Mal-operation risk analysis of Yongfu DC converter differential protection under AC fault[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 478-487.
- [15] 朱韬析, 武诚, 王超. 交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 93-97.
ZHU Taoxi, WU Cheng, WANG Chao. Influence of AC system fault on HVDC system and improvement suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 93-97.
- [16] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 181-252.
- [17] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西, 等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 184-191.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.
- [18] 邓丰, 李欣然, 曾祥君. 基于全波形信息的混联线路单端行波定位方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3471-3485.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun. Single-ended traveling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission line based on the full-waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3471-3485.

作者简介:



张海强

张海强(1994—),男,江西南昌人,硕士研究生,研究方向为HVDC换流站保护与故障定位(E-mail: zhq.swjtu@foxmail.com);

林圣(1983—),男,湖南宁乡人,副教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为供电系统保护与故障定位、故障预测与管理、地铁杂散电流分析与抑制等(E-mail: slin@swjtu.edu.cn);

何正友(1970—),男,四川自贡人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为输(配)电网故障诊断与保护、轨道交通电气化与自动化关键技术等。

Adaptability analysis and optimization scheme for HVDC converter station protection

ZHANG Haiqiang, DAI Wenrui, MOU Dalin, LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to prevent malfunction of HVDC converter station protection under out-zone faults, the adaptability of converter station protection is analyzed, and an optimization scheme of protection without affecting its speed and sensitivity is proposed. The minimum amplitude integration ratio of voltage forward and backward traveling wave is used to construct the identification criterion of in- and out-zone faults of inverter station, and an anti-malfunction strategy of inverter station protection under out-zone faults is designed considering the temporal coordination of inverter station protection and out-zone AC system protection. The simulative results based on PSCAD/EMTDC show that the proposed scheme is not affected by fault location, fault type, initial fault angle, transition resistance and noise.

Key words: HVDC power transmission; converter station protection malfunction; fault identification; protection optimization