

交直流混联系统对距离保护暂态超越的影响及解决措施

索南加乐¹, 张健康², 刘林林¹, 谈树峰¹, 杨忠礼³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西北电力调度通信中心, 710048, 西安;
3. 河南省电力公司新乡供电公司, 453002, 河南新乡)

摘要: 针对传统的距离保护应用于交直流混联系统,特别是当直流系统发生换相失败时存在暂态超越的问题,分析发现交直流混联系统直流侧发生换相失败时,故障暂态信号中含有大量衰减缓慢的低频分量、非周期分量及高频分量,这是引起距离保护暂态超越的根本原因.同时,给出一种先利用分布参数模型将保护安装处的电压、电流补偿至整定点,再采用 $R-L$ 线路模型建立微分方程,识别出整定点与故障点之间距离的保护方案.动模数据仿真结果表明,该方案在特高压、长线路末端故障时能够有效地防止暂态超越,不受线路分布电容、低频分量以及非周期分量的影响,提高了长线距离保护的动作可靠性.

关键词: 交直流混联;距离保护;换相失败;暂态超越

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0057-05

Impact of AC-DC Compound Power System on Distance Protection Transient Overreach and Resolving Measures

SUONAN Jiale¹, ZHANG Jiankang², LIU Linlin¹, TAN Shufeng¹, YANG Zhongli³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest China Power Dispatch & Communication Center, Xi'an 710048, China; 3. Xinxiang Electric Power Supply Corporation, Henan Electric Power Corporation, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: The traditional distance protections applied to the AC-DC power system usually induce transient overreach, especially for the Inverter commutation failure in DC system. It is found that the transient overreach in AC-DC power system is due to fault transient signals containing a large number of low-frequency components of the slow decay and non-periodic components and high frequency components. The voltage and current of tuning point based on distributed-parameter model are calculated, and the equations for identifying the distance between tuning point and the point of failure by $R-L$ model are established to put forward a protection scheme. The simulations show the ability for distinguish internal fault from external fault and preventing transient overreach.

Keywords: AC-DC compound power system; distance protection; inverter commutation failure; transient overreach

目前,我国正大力建设超大规模的交直流混合输电网,为了研究交直流混合输电对交流继电保护的影响,国家电网公司和西北电网公司特设立了重点科技项目“交直流混联电网继电保护应用研究”,

并于2008年12月在南京南瑞继保电气有限公司和2009年5月在许继电气有限公司进行了两次大规模交直流混合电网实时数字仿真(RTDS)试验,积累了重要的试验数据.交直流混联系统对距离保护的影响是其中一项主要研究工作,本文利用这些数据对交直流混联系统距离保护暂态超越问题进行了研究.

输电线路发生短路故障时,由于各种原因,会使得距离保护感受到的阻抗值比实际线路的短路阻抗值小,使得下一条线路出口(区外)短路时,保护出现非选择性动作,这就是超越现象^[1-2].超越可分为暂态超越和稳态超越.

通常保护中克服暂态超越的方法有两种,一种是采用全周傅里叶算法滤除暂态信号中的高频分量和非周期分量,它具有滤除基波整数倍谐波分量的性能,但是受非整数次谐波以及非周期分量的影响严重,而且降低了保护的动作时间.为了克服非周期分量的影响,许多学者进行了大量的研究,给出了很多滤掉非周期分量的方法^[3-4],但都不适用于基于较短数据窗的快速保护,对于非整数次谐波尚没有很好的滤除方法.另一种方法是采用反时限动作特性^[5],它缩短了距离Ⅰ段保护范围,通过延长保护的動作时间以躲过暂态过程,使得保护的動作速度大大降低,尤其是不能快速切除远端故障,不利于整个系统的稳定、可靠运行.

本文详细分析了交直流混联系统造成距离保护暂态超越的原因,给出一种基于分布参数模型的时域距离保护方案,并利用动模仿真数据对方案进行了验证.仿真结果表明,该方法可有效地克服距离保护暂态超越问题,对保证交直流混联系统的安全稳定运行具有重要意义.

1 交直流混联系统暂态超越现象

利用西北网交流系统和德宝直流系统参数建立的RTDS模型进行动模试验,动模仿真系统如图1所示.选取逆变侧交流系统中PQ双回线的Ⅰ回线K₆点故障进行仿真验证.PQ双回线的Ⅰ回线全长

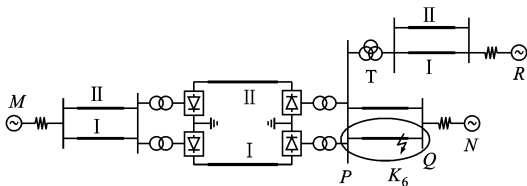


图1 仿真系统简图

为200 km,K₆点位于输电线路全长的85%处,距离保护Ⅰ段按线路全长的80%整定.

以动模仿真系统在K₆点发生A相单相接地故障和直流线路逆变侧换相失败后K₆点发生A相单相接地故障为例进行仿真.传统的基于工频相量的距离保护的测距结果如图2所示.

观察图2可知,计算距离均围绕整定距离发生波动,存在计算距离小于整定距离的时刻,此时保护将产生超越现象.

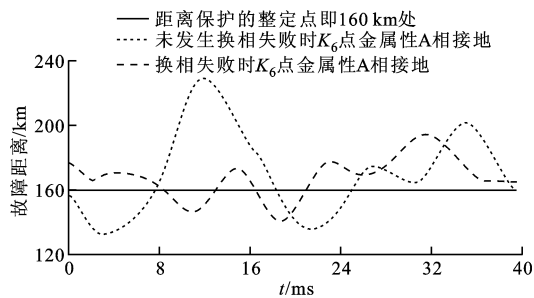


图2 传统工频相量距离保护的测距结果

2 交直流混联系统故障暂态特征分析

距离保护暂态超越现象是由暂态分量引起的,有必要对交直流混联系统暂态特征进行分析.当直流系统逆变侧PQ双回线的Ⅰ回线路上K₆点发生A相单相接地故障,以及直流线路逆变侧换相失败后K₆点发生A相单相接地故障时,A相电流I_{A1}、I_{A2}的滤波图如图3所示.

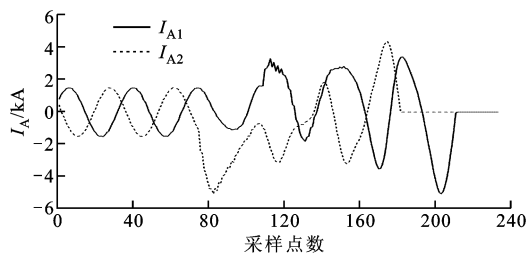


图3 交直流混联系统故障电流波形

由图3可知,交直流混联系统发生故障后,A相电流中含有很多的衰减直流分量,而且衰减时间较长,初始值比故障前电流值大,经过两个周波仍然没有彻底衰减完.在故障初始的一个周波内,高频分量较多,但其幅值相对于基频分量很小,且衰减时间很短,经过一个周波的衰减之后,信号中基本没有高频分量的存在.

利用prony算法分析故障电流谐波含量,如表1所示.观察表1和表2,由各行的谐波幅值可知,在

未发生换相失败和发生换相失败两种情况下,含有衰减非周期分量、非整次谐波及高频分量,前两种谐波含量较高,由各列谐波幅值随时间的变化可知,非周期分量和非整次谐波衰减缓慢.未发生换相失败时,谐波主要表现为整数次谐波,而换相失败时,谐波主要为低频分数次谐波.

表 1 未发生换向失败时故障电流谐波含量

t/ ms	电流谐波幅值/kA					
	0 Hz	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	720 Hz
0	19.5	0.66	0.54	0.12	0.13	0.30
20	3.67	1.16	0.62	0.043	0.067	0.34
40	1.09	2.02	0.71	0.016	0.035	0.39

表 2 换向失败时故障电流谐波含量

t/ ms	电流谐波幅值/kA					
	4.6 Hz	26 Hz	50 Hz	58 Hz	83 Hz	100 Hz
0	2.3	1.3	1.7	0.37	1.1	0.45
20	1.54	0.69	2.44	0.41	0.80	0.43
40	1.03	0.36	3.49	0.45	0.58	0.42

3 交直流混联系统暂态超越原因分析

(1)在交直流混联系统中,直流输电系统换流站含有大量的电力电子元件,运行会产生大量高次谐波,可以说在正常运行的条件下从交流侧看,直流换流器实际上类似一个具有特征谐波的谐波电流源.

(2)交直流输电系统交流侧发生故障时导致交流侧三相电压不平衡,引起平均直流电压变化,使得直流电流发生畸变.直流系统的控制部分动作,改变触发角,试图保持直流电流不变,但由于直流系统中平波电抗器的电感为有限值,会使直流电流的波形发生变化.由于换流器的非线性特性,反映到交流系统中将导致三相电流的不平衡,从而产生大量的非特征谐波和非周期分量,它们随时间推移衰减并不明显.

(3)给出交直流混联系统发生换相失败对交流系统的影响.图 4 为直流系统 6 脉动逆变侧换流器的构图,正常工作时换流器导通顺序为 1,2→2,3→3,4→4,5→5,6→6,1 各个晶闸管交替导通.若阀 1 向阀 2 换相过程中发生换相失败,则阀 1 持续导通,阀 2、阀 4、阀 6 换相过程正常,因此必然会出现阀 1 和阀 4 同时导通的情况,其导通将造成直流系统的

短路.从交流系统看,这一过程中直流系统不再为交流系统供电,对应于图 5 中的 $2\pi/3\sim4\pi/3$ 区间,此段时间对交流系统相当于“三相断线”.如果此时交流系统再次发生故障,相当于发生了复故障,且直流系统和交流系统之间相互作用,使暂态过程非常复杂,在故障初期的暂态过程中还含有大量的低频分量和衰减缓慢的非周期分量.

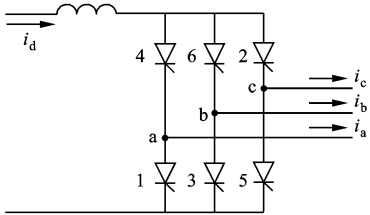


图 4 逆变侧 6 脉动换流器结构图

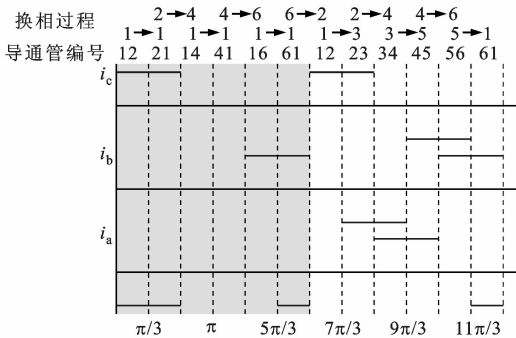


图 5 逆变器换相失败交流系统电流示意图

由以上分析可知,交直流混联系统发生故障,特别是在直流侧发生换相失败时,故障暂态信号中含有大量衰减缓慢的低频分量、非周期分量及高频分量,这些暂态分量的存在影响了传统距离保护的动作性能.首先,传统的基于工频量距离保护^[6-7]广泛采用全周波傅里叶算法,该算法无法滤除分数次谐波以及衰减的非周期分量;其次,交直流混联系统中非整次低频分量和非周期分量衰减十分缓慢,即使采用反时限动作特性仍然不能躲过暂态谐波的影响,无法保证动作的可靠性.因此,在交直流混联系统中,线路末端发生故障时易出现暂态超越现象.

4 保护方案

4.1 解决思路

距离保护通过测量故障点到保护安装处的距离分为区内、区外故障保护.对于输电距离较短的线路,传统保护可以在全线范围内准确测距来判别故障位置,但对于高压长距离输电线路由于分布电容的影响,使距离保护测距精度降低,在故障末端易发

生暂态超越。

如图6所示,距离保护Ⅰ段整定值为 l_{set} ,设系统发生故障时,保护安装处测距结果为 l_c ,保护正确动作的条件归纳为

$$\left. \begin{array}{l} l_c < l_{\text{set}} \quad \text{区内故障} \\ l_c > l_{\text{set}} \quad \text{区外故障} \end{array} \right\} \quad (1)$$

若故障发生在整定点附近,由于交直流混联系统故障时产生的低频分量、非周期分量及高压远距离输电线路分布电容的影响,采用 $R-L$ 集中参数线路模型进行计算,测量结果 l_c 精度低, l_c 在 l_{set} 左右波动,由保护动作判据可知易发生暂态超越现象。

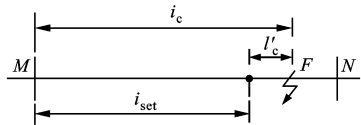


图6 双端系统

假设将保护安装在距离Ⅰ段整定点处,故障时测距结果为 l'_c ,此时保护正确动作条件为

$$\left. \begin{array}{l} l'_c < 0 \quad \text{区内故障} \\ l'_c > 0 \quad \text{区外故障} \end{array} \right\} \quad (2)$$

若在整定点附近发生故障,由于故障点与整定点之间距离较短,采用 $R-L$ 集中参数线路模型建立微分方程进行故障定位,测距精度较高, l'_c 在0附近不发生波动,且不受低频分量、非周期分量及高次谐波的影响,由保护动作判据可知该方法解决了距离保护暂态超越问题。若故障发生在线路首端,应用该方法计算的故障距离虽然误差比较大, l'_c 围绕 $-l_{\text{set}}$ 波动较大,但是仍然满足保护正确动作的条件,即 $l'_c < 0$ 。

据此,给出一种先将保护安装处的电压电流补偿至整定点再进行故障距离测量的保护方案。

4.2 基本原理

如图7所示,利用测量装置得到保护安装处的采样数据 u 、 i ,在时域中采用分布参数线路模型计算出保护整定点处的 u' 、 i' ,计算公式参见文献[8],再采用 $R-L$ 线路模型,建立微分方程,识别出整定点 E 与故障点 F 之间线路参数 R 或 L ,从而得到 D_f ,据此计算出故障距离。

整定点到故障点之间的微分方程如下

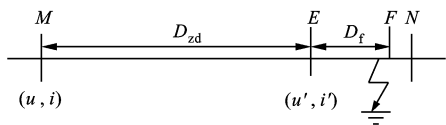


图7 保护原理简图

$$u'(t) = (ri' + ldi'/dt)D_f + i_f R_g \quad (3)$$

假定故障点处的电流 i_f 与保护安装处的故障分量电流 i_g 同相,则下式成立

$$i_f = i_g / C_m \quad (4)$$

式中: C_m 是测量端电流分布系数, C_m 为实数。将式(4)带入式(3),得

$$u'(t) = (ri' + ldi'/dt)D_f + i_g R'_g \quad (5)$$

式中: $R'_g = R_g / C_m$;保护安装处故障分量电流 i_g 可由 i 减去故障前一周波的滤波数据得到; di'/dt 可由三点数值微分得到。

式(5)中,只有 D_f 和 R'_g 两个未知量,取两个采样时刻,建立二元一次方程组就可以求出 D_f 。为了提高计算精度,减小参数估计的波动性,故障后以 ΔT 为采样间隔进行 N 次采样,建立 N 维方程组,利用最小二乘法解冗余方程组,求出 D_f 。若 $D_{\text{zd}} + D_f > D_{\text{zd}}$,故障点位于保护范围外,判为区外故障。若 $D_{\text{zd}} + D_f < D_{\text{zd}}$,则故障点位于保护范围内,判为区内故障。

4.3 仿真验证

利用西北网交流系统和德宝直流系统的参数建立动模仿真系统,如图1所示。选取逆变侧交流系统中PQ双回线的Ⅰ回线 K_6 点故障进行仿真验证。PQ双回线的Ⅰ回线全长为200 km。 K_6 点位于输电线路全长的85%处,即故障发生在距保护安装点170 km处。距离保护按线路全长的80%整定,因此整定点距离为160 km。动模试验采样频率为每周周期35点。

新保护方案仿真考虑 K_6 点AG、BC、ABG、ABC故障,直流线路逆变侧丢失20 ms脉冲,即换相失败后 K_6 点发生AG、BC、ABG、ABC故障,数据窗为半个周波。

图8和图9中实线为距离保护的整定点即160 km处,其他线为各种故障下的测距结果。观察两图发现,测距结果均十分接近170 km,与实际故障点的距离误差在5%以内,说明该保护方案能够克服暂态超越问题,保护不误动且测距精度高。该保护不

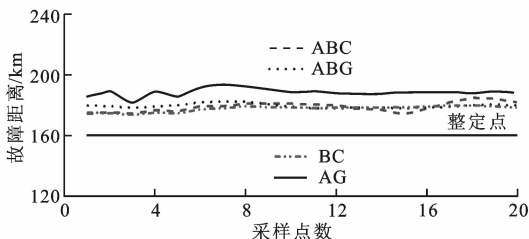


图8 距离保护新算法测距结果

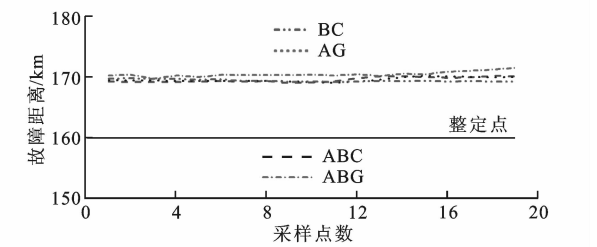


图 9 换相失败新距离保护算法测距结果

受交直流系统混联,以及发生换相失败引起的衰减缓慢的非周期分量和低频分量的影响。

仿真结果表明,该方法有效地克服了交直流混联系统距离保护暂态超越问题,且不需要滤掉非周期分量,有效提高了保护动作速度,且不受系统频率变化等因素的影响,可靠性高。

5 结 论

本文分析指出交直流系统混联,特别是在发生换相失败情况下,由于直流系统控制部分的存在,使得交流线路发生故障时故障信号中含有大量的低频分量、谐波以及衰减缓慢的非周期分量,这些是引起距离保护暂态超越的根本原因. 文中给出了解决方案并进行动模仿真验证,结果表明新保护方案在线路保护末端故障时可有效克服暂态超越。

参考文献:

[1] 陈建国,宋璇坤. 阻抗继电器的超越与对策[J]. 继电器,1991,19(2):7-13.
CHEN Jianguo, SONG Xuankun. The overreach of distance relay and solution[J]. Relay, 1991,19(2):7-13.

[2] 索南加乐,许庆强,宋国兵,等. 自适应接地距离继电器[J]. 电力系统自动化,2005,29(17):54-58.
SUONAN Jiale, XU Qingqiang, SONG Guobing, et al. Adaptive earth fault distance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17):54-58.

[3] 苏文辉,李刚. 一种能滤除衰减直流分量的改进全波傅里叶算法[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):42-44.

SU Wenhui, LI Gang. An improved full-wave Fourier algorithm for filtrating decaying DC component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (23): 42-44.

[4] 熊刚,陈陈. 一种能滤除衰减直流分量的交流采样新算法[J]. 电力系统自动化,1997,21(2):24-26.
XIONG Gang, CHEN Chen. A novel alternating current sampling algorithm for filtering decaying direct current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(2): 24-26.

[5] 陈朝晖,黄少锋,陶慧良,等. 一种新的基于转矩大小的距离保护 I 段反时限特性实现方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):54-61.
CHEN Zhaohui, HUANG Shaofeng, TAO Huiliang, et al. A new implementation method of the zone I relay of the distance protection with inverse time characteristics based on the magnitude of the torque[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 54-61.

[6] 索南加乐,刘文涛,张健康,等. 基于波形系数的自适应距离保护[J]. 电力系统自动化,2005,29(5):38-44.
SUONAN Jiale, LIU Wentao, ZHANG Jiankang, et al. Adaptive distance protection based on waveform factor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 38-44.

[7] 索南加乐,顾嘉,薛晓辉,等. 基于工频量补偿算法的长线距离保护[J]. 电力系统自动化,2007,31(23):57-60.
SUONAN Jiale, GU Jia, XUE Xiaohui, et al. Distance protection based on frequency-domain compensation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 57-60.

[8] 宋国兵,索南加乐,许庆强. 基于双回线环流的时域法故障定位[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):24-29.
SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang. A novel time-domain algorithm for locating faults on parallel transmission lines by circulating circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3):24-29.

(编辑 杜秀杰)