

基于频谱比较的直流线路差动保护闭锁判据

李爱民¹, 蔡泽祥², 孙奇珍³, 徐敏⁴

(1. 广东电网公司, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

3. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510600; 4. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510640)

摘要: 为解决目前直流线路差动保护动作时间过长的问题, 提出了一种基于频谱比较的直流线路差动保护闭锁判据。分析了差动电流的频谱特征, 由分析可知区内故障时差动电流含有较多直流分量, 区外故障时差动电流含有较多 50 Hz 和 100 Hz 分量, 根据这一区别设计了闭锁判据。该判据能够有效识别区内、区外故障, 且具有可靠性高、对采样频率要求较低等优点。基于某实际直流系统建立了 EMTDC 仿真模型。仿真结果表明, 该判据能够在区外故障时闭锁差动保护, 提高了保护的可靠性。

关键词: 高压直流输电; 继电保护; 差动保护; 闭锁; 频谱分析; 可靠性; 仿真; 故障分析

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.017

0 引言

高压直流输电(HVDC)在远距离、大功率输电和异步电网互联中占有越来越重要的地位。HVDC 输电线路长, 输电走廊情况复杂, 发生故障的概率大。直流线路故障后, 控制系统能够快速抑制故障电流, 但由于直流故障电弧不存在过零的特点, 必须通过线路保护动作启动直流重启顺序, 通过强制移相去游离后才能恢复运行^[1-4]。直流线路一般作为大区联网的联络线, 因此准确检测线路故障并启动控制系统中的重启顺序, 及时恢复直流运行, 不仅关系到直流系统本身的安全性, 而且对保证与其连接的交流电网的稳定运行意义重大。

目前, 直流输电工程中均以行波保护为线路主保护, 以低压保护和电流差动保护作为后备保护。研究和运行经验表明: 现有行波保护和低压保护难以检测高阻接地故障^[5-9]; 后备保护尤其是差动保护受直流控制系统影响较大^[10-11], 难以起到后备作用。对天广直流 2001—2007 年故障统计显示, 很多直流停运事故是由于线路保护没有正确及时动作而引起的^[4]。

一方面, 直流线路电压等级高、对地电容大, 区外故障导致直流电压扰动时会产生较大的充放电电流; 另一方面, 直流控制系统能够很快抑制故障电流。因此, 单纯依靠差流的大小难以识别区外故障和区内故障^[11-13]。实际直流工程中, 多采用闭锁差动保护以保证选择性^[14], 使差动保护动作时间较长, 进而导致直流控制系统中的最大触发电角保护或极控低压保护先动作而引起不必要的直流闭锁^[3, 11]。

本文首先详细分析了现有差动保护的逻辑和存在的问题, 提出了基于频谱比较的新闭锁判据原理, 该原理可正确识别线路故障和区外故障, 加快

故障的恢复时间。设计了差动保护动作逻辑, 结合南方电网某实际直流系统搭建了 EMTDC 仿真模型, 验证了本文工作的正确性和有效性。

1 直流线路差动保护动作特性分析

实际工程中, 常用的直流线路差动保护的逻辑如图 1 所示。

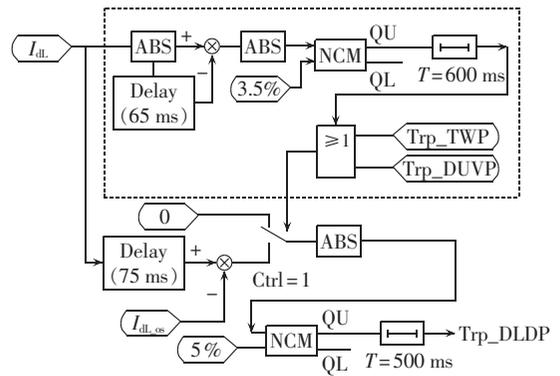


图 1 差动保护动作逻辑示意图

Fig.1 Operating logic of differential protection

图 1 中, ABS 表示求绝对值; NCM 表示比较模块; I_{dl} 、 $I_{dl.os}$ 分别为本侧线路和对侧线路电流; 虚线框中为闭锁判据; QU 表示比定值高则输出 1, QL 表示比定值低则输出 1; Trp_TW 和 Trp_DUVP 分别表示若行波保护、低压保护动作也会闭锁差动保护。当任一侧的线路电流当前采样值和 65 ms 前采样值之差大于某一定值时, 差动保护闭锁 600 ms。

差动保护闭锁判据在区内线路故障时, 同样存在电流波动而将差动保护闭锁的问题, 再加上出口延时, 差动保护闭锁时间一般为 1.1 s。当控制系统作用使线路电流持续波动时, 闭锁时间会更长。为避免换流器的损坏, 控制系统中的低压保护或者最大触发电角保护会先动作, 直接闭锁故障极, 引起不必要的直流停运。

收稿日期: 2014-03-04; 修回日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077055)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077055)

由于控制系统的强制作用,故障电流很小,差动保护定值较低(一般取 0.05 p.u.),无法通过定值躲开区外故障,只能通过闭锁判据保证选择性,而现有的闭锁判据无法区分线路故障和区外交流系统故障,导致差动保护闭锁时间过长,控制系统先动作而引起不必要的直流停运。

2 基于差流频谱比较的新型闭锁判据

2.1 差流频谱分析

当交流系统故障导致电压畸变时,会在直流系统产生非特征谐波^[15-16],其中主导非特征谐波电压的次数为:

$$n = \pm(m-1) \quad (1)$$

其中, n 为直流谐波电压次数; m 为交流谐波电压次数(正序谐波 m 取正值,负序谐波 m 取负值)。因此,当交流系统发生不对称短路时,负序基波分量在直流系统中产生 100 Hz 谐波分量^[15]。在交流系统三相短路以及严重的不对称短路期间,由于变压器饱和等原因在交流系统产生 2 次谐波分量,进而在直流系统中产生 50 Hz 分量。此外,持续换相失败、换流阀故障、触发系统故障也会在直流侧产生 50 Hz 分量^[15]。

以整流侧线路差动保护为例,图 2 给出了区外交流系统故障时差流的频谱图(纵轴为标么值)。

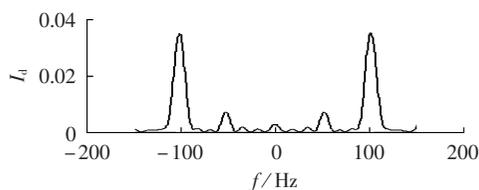
从图 2 可见,交流系统不对称故障时,直流差流含有较为稳定的 100 Hz 分量;三相短路故障时,会产生 50 Hz 分量。

直流线路故障后,逆变侧电流下降,整流侧电流上升,随后在定电流控制的作用下两侧差流稳定在一个固定值(即电流裕度,一般为 0.1 p.u.)。因此,线路故障时差流主要以直流分量为主。图 3 为直流线路金属性接地故障和高阻接地故障时的差流频谱(纵轴为标么值),从图中可以看出直流分量远远大于 50 Hz 或 100 Hz 分量。

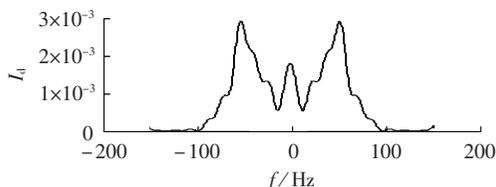
整流侧换流器出口到线路出口之间故障时,相当于失去电源,整流侧电流快速衰减,逆变侧电流相对衰减较慢,差流以直流分量为主;逆变侧换流器出口到线路出口之间故障时,相当于负荷侧接地故障,两侧电流均上升,在定电流作用的控制下,差流稳定于电流裕度附近,因此也主要以直流分量为主。因此,换流器出口到线路出口之间故障时,可能导致闭锁判据失效。

针对上述问题,引入换流器出口电流与线路电流的差流作为闭锁判据,示意图如 4 所示。

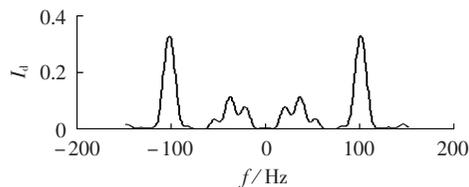
图 4 中, I_{dH} 、 I_{dL} 分别是整流侧换流器出口电流和线路电流。整流侧换流器出口故障(F_1)时, I_{dH} 快速上升, I_{dL} 快速下降, $I_{dH}-I_{dL}$ 快速增大;线路故障(F_2)时, I_{dH} 和 I_{dL} 均上升, $I_{dH}-I_{dL}$ 变化不大。可据此设置闭锁



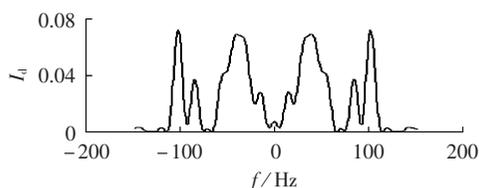
(a) 单相短路故障



(b) 三相短路故障



(c) 两相相间故障



(d) 两相接地故障

图 2 交流系统故障时的直流系统差流频谱
Fig.2 Differential current spectrum of HVDC system for different AC system faults

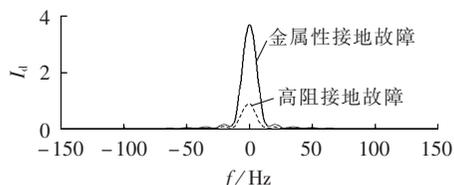


图 3 直流线路故障时的差流频谱
Fig.3 Differential current spectrum for different HVDC system faults

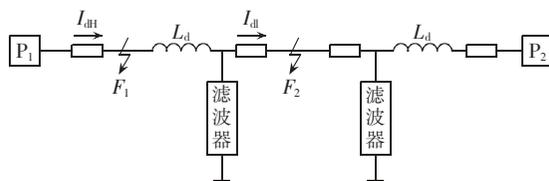


图 4 故障位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of fault location

判据。

2.2 差动保护闭锁判据原理

对差流采样并进行离散傅里叶变换(DFT):

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (2)$$

其中, $x(j)$ 为差流采样值; N 为数据长度; $\omega_N = e^{2\pi j/N}$ 。谱能量定义为:

$$E(k) = |X(k)|^2 \quad (3)$$

设 E_{dc} 、 E_{50} 、 E_{100} 分别为直流分量、50 Hz 分量和 100 Hz 分量的谱能量。定义:

$$\begin{cases} K_1 = E_{50}/E_{dc} \\ K_2 = E_{100}/E_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

闭锁判据为:

$$K_1 > K_{thres} \text{ 或 } K_2 > K_{thres} \quad (5)$$

其中, K_{thres} 为闭锁条件定值, K_1 、 K_2 中有 1 个大于该值则闭锁差动保护。

为有效识别换流器出口与线路出口之间故障, 设置如下判据:

$$|I_{dl} - I_{dl}| > \Delta \quad (6)$$

其中, Δ 为闭锁判据定值, 根据大量仿真结果, Δ 在本文中取 0.3 p.u.。实践和研究表明, 该定值受直流滤波器充放电电流、电流互感器特性等因素影响较大, 在实际系统中应采取加装低通滤波器、选择相近的电流互感器等手段以保证其正确动作。图 5 给出了基于上述闭锁原理的差动保护逻辑结构设计图, 并在 EMTDC 中建立了相应的仿真模型。

图 5 中, N、D、F 为逻辑模块输入端口的名称; I_d 为两侧差流; FFT 为快速傅里叶变换模块; ABS 模块用于取绝对值; Mean 模块用于取 20 个采样点的平均值; Block_OS 表示如果对侧保护发出闭锁信号,

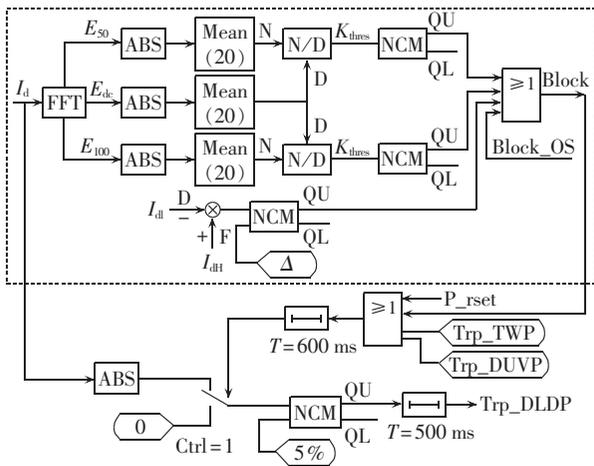


图 5 基于所提闭锁判据设计的差动保护动作逻辑

Fig.5 Operating logic of differential protection based on proposed blocking criterion

则本侧保护也需要闭锁; Trp_TWP 、 Trp_DUVP 分别表示在线路行波保护或者低压保护动作后, 闭锁差动保护。考虑到在功率调整过程中, 差流以直流分量为主, 可能导致闭锁判据失效, 因此图中 P_rset 为功率调整时闭锁保护。如果没有闭锁信号, 且差流大于电流定值(一般为 0.05 p.u.)时, 差动保护发出动作信号启动直流重启顺序, 控制系统闭锁晶闸管, 迫使电流降为零且去游离后重启直流系统。

3 仿真结果及分析

结合我国某实际直流系统, 建立 EMTDC 仿真模型, 示意图如图 6 所示。

直流线路采用相域频变参数模型, 全长 960 km, L_d 为平波电抗器, 整流侧为定电流控制方式, 逆变侧为定电流和定熄弧角控制方式, 直流电压为 ± 500 kV。 F_{L1} 、 F_{L2} 、 F_{L3} 分别对应线路出口、线路中点和线路末端故障; F_{R3} 、 F_{R1} 、 F_{R2} 、 $F_{R2,G}$ 分别表示整流侧交流系统三相接地、单相接地、两相相间和两相接地故障; F_{I3} 、 F_{I1} 、 F_{I2} 、 $F_{I2,G}$ 表示逆变侧交流系统故障; $F_{2,R}$ 、 $F_{2,I}$ 表示换流器出口与平波电抗器之间故障。

仿真步长为 50 μ s, 参考实际工程, 差动保护采样频率为 556 Hz。快速傅里叶变换(FFT)数据窗口长度选为基频周期即 20 ms 的倍数或整数倍再加半个周期长度。窗口长度越长, 计算结果越稳定, 然而需要的计算时间越长。所幸差动保护作为后备保护对快速性要求不高, 本文取窗口长度为 20 ms。值得一提的是, 本判据不需要很高的采样频率, 只要能反映基频和 2 次谐波即可, 更便于在现有保护基础上进行改进。

3.1 区外故障时的响应特性

图 7 给出了在不同过渡电阻情况下, 交流系统单相接地故障时差动保护的响应曲线。图中, K_1 和 K_2 分别为 50 Hz 和 100 Hz 分量与直流分量频谱能量的比值; I_d 为差流标幺值; 点划线为对应变量的定值。从图中可见, 金属性接地故障时, 潮流大于定值, 但 K_2 也大于定值, 则闭锁差动保护。随着过渡电阻的增大, 线路中各分量的频谱逐渐减小, 当过渡电阻超过一定值(仿真结果为 680 Ω 左右)时, 闭锁判据无法识

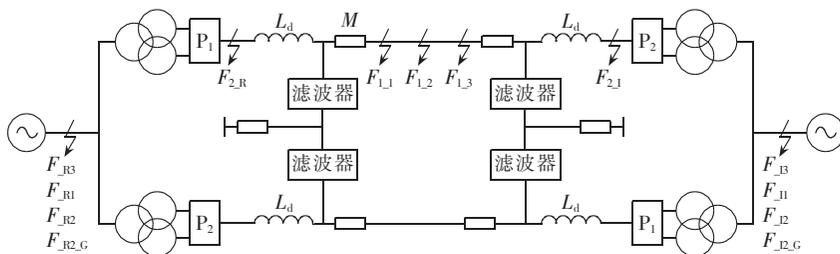


图 6 直流仿真系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of simulation HVDC system

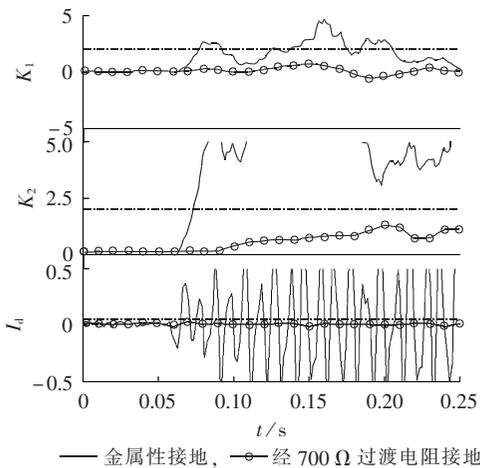


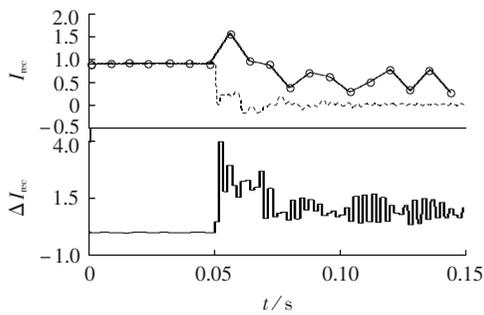
图 7 交流系统发生单相接地故障时, 差动保护的响应曲线

Fig.7 Response of differential protection to single-phase grounding fault of AC system

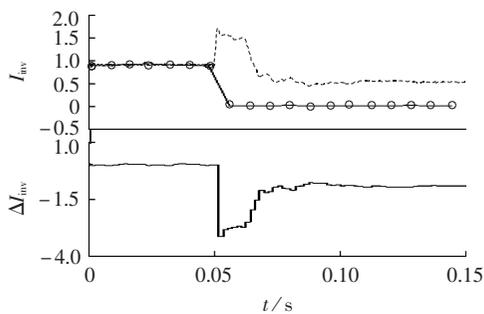
别区外交流故障,但此时差流也没有达到定值,差动保护不会发生误动作。

图 8 给出了平波电抗器和换流器之间发生故障时的响应曲线,图中 I_{rec} 、 I_{inv} 分别为整流侧、逆变侧电流, ΔI_{rec} 、 ΔI_{inv} 分别为整流侧、逆变侧的换流器出口电流与线路电流的差值,均为标么值。由图 8 可见,换流器出口故障时, ΔI_{rec} 迅速增大,可靠闭锁差动保护。逆变侧同理。

综上所述,在交流系统金属性接地故障或经小



(a) 整流侧换流器出口故障



(b) 逆变侧换流器出口故障

..... 线路电流, — 换流器出口电流

图 8 平波电抗器和换流器之间发生故障时, 差动保护的响应曲线

Fig.8 Response of differential protection to fault located between smoothing reactor and converter

电阻故障时,差动保护能够可靠闭锁不动作;发生高阻接地故障时,差动保护由于差流未能达到定值而不动作;换流器出口故障时,换流器出口电流与线路电流的差值迅速增大,能够可靠闭锁差动保护,保证选择性。

3.2 区内线路故障时的响应特性

图 9 给出了在线路中点处,经不同过渡电阻接地故障时的仿真结果。图中, I_d 为标么值;点划线为对应变量的定值。线路故障时,由于潮流中主要是直流分量, K_1 、 K_2 均小于定值,且随着过渡电阻的增大而减小。线路故障后,两侧控制系统迅速抑制故障电流到电流裕度附近(一般为 0.1 p.u.),大于差流定值,差动保护能够可靠动作。

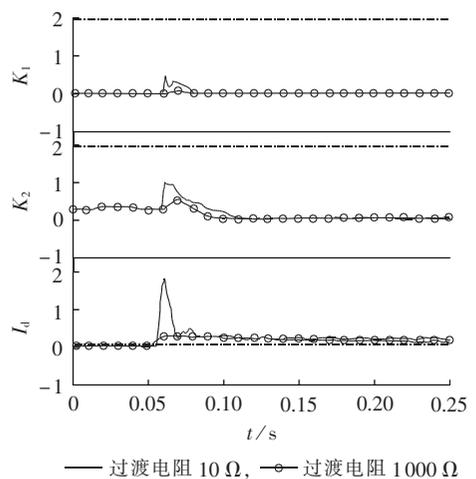


图 9 过渡电阻不同时,差动保护的响应曲线

Fig.9 Response of differential protection to fault for different transition resistances

表 1 给出了其他仿真结果。

表 1 其他仿真结果

Table 1 Other simulative results

| 故障 | 过渡电阻/ Ω | 闭锁情况 | 差流和定值的关系 | 保护动作情况 |
|--------------------------------------|----------------|------|--------------|--------|
| $F_{1,1}$ | 10 | 不闭锁 | 差流>定值 | 正确动作 |
| $F_{1,2}$ | 10 | 不闭锁 | 差流>定值 | 正确动作 |
| | 1000 | 不闭锁 | 差流>定值 | 正确动作 |
| $F_{1,3}$ | 10 | 不闭锁 | 差流>定值 | 正确动作 |
| | 1000 | 不闭锁 | 差流>定值 | 正确动作 |
| | 3000 | 不闭锁 | 差流>定值 | 正确动作 |
| $F_{2,R}$ | 10 | 闭锁 | 差流>定值 | 正确不动作 |
| $F_{2,L}$ | 10 | 闭锁 | 差流>定值 | 正确不动作 |
| $F_{R3}, F_{L3}, F_{R1}, F_{L1}$ | 10 | 闭锁 | 差流>定值 | 正确不动作 |
| | 400 | 闭锁 | 差流 \leq 定值 | 正确不动作 |
| $F_{R2}, F_{L2}, F_{R2,G}, F_{L2,G}$ | 700 | 不闭锁 | 差流 \leq 定值 | 正确不动作 |
| | 10 | 闭锁 | 差流>定值 | 正确不动作 |
| $F_{R2,G}, F_{L2,G}$ | 500 | 闭锁 | 差流 \leq 定值 | 正确不动作 |
| | 800 | 不闭锁 | 差流 \leq 定值 | 正确不动作 |

大量的仿真结果证明,基于频谱比较的闭锁判据能够有效识别区内和区外故障,提高直流线路差

动保护的正確动作率。

4 结语

直流线路故障后,由于控制系统的强制作用,故障电流很小,线路差动保护定值较低,无法通过定值躲开区外故障,只能通过闭锁逻辑保证选择性,而现有的电流突变量闭锁判据无法区分线路故障和区外故障,导致差动保护闭锁时间过长,极控保护先动作而引起不必要的直流闭锁事故。

线路故障和区外故障时线路两端差流的频谱有较大差异,本文据此提出了基于频谱比较的闭锁判据新原理,设计了包含新闭锁判据的差动保护动作逻辑,并在实际直流系统控制保护模型的基础上建立了 EMTDC 仿真平台。大量的仿真表明,该判据能够有效区分线路故障与区外故障,且受过渡电阻、故障距离影响较小,能够有效提高差动保护的正確动作率,缩短动作时间。该闭锁判据对采样率和通道要求不高,只需对现有保护的软件逻辑进行改进,不必更换设备,具有良好的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 刘永浩,蔡泽祥,徐敏,等. 基于波速优化与模量传输时间差的直流线路单端行波测距新算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):72-76.
LIU Yonghao,CAI Zexiang,XU Min,et al. Single-end fault location algorithm based on traveling wave speed optimization and modal propagation time difference for DC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):72-76.
- [2] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等. 高压直流输电线路微分欠压保护特征量动态特性分析与整定[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):114-118.
HAN Kunlun,CAI Zexiang,XU Min,et al. Dynamic characteristic analysis and setting of characteristic parameters of differential under-voltage protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):114-118.
- [3] 王海军,吕鹏飞,曾南超,等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启功能研究[J]. 电网技术,2006,30(23):32-35.
WANG Haijun,LÜ Pengfei,ZENG Nanchao,et al. Research on DC line fault recovery sequence of Guizhou-Guangdong HVDC project[J]. Power System Technology,2006,30(23):32-35.
- [4] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术,2006,32(9):173-176.
REN Dayong. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Engineering,2006,32(9):173-176.
- [5] SHANG L,HEROLD G,JAEGER J,et al. High-speed fault identification and protection for HVDC line using wavelet technique[C]//IEEE Porto Power Tech Conf. Porto,Portugal:IEEE,2001:1-5.
- [6] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术,2013,37(1):255-260.
HAN Kunlun,CAI Zexiang,XU Min,et al. Dynamic characteristics of characteristic parameters of traveling wave protection for HVDC transmission line and their setting[J]. Power System Technology,2013,37(1):255-260.
- [7] 金玉生,王欢,李学鹏,等. 新型直流输电行波电流极性比较式方向保护[J]. 高电压技术,2006,32(9):106-110.
QUAN Yusheng,WANG Huan,LI Xuepeng,et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. High Voltage Engineering,2006,32(9):106-110.
- [8] 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):83-87.
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):83-87.
- [9] 束洪春,田鑫萃,张广斌,等. ± 800 kV 特高压直流输电线路的极波暂态保护[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):96-104.
SHU Hongchun,TIAN Xincui,ZHANG Guangbin,et al. Protection for ± 800 kV HVDC transmission lines using pole wave transients[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(22):96-104.
- [10] 杨卫东,薛禹胜,荆勇. 直流系统控制策略对南方电网暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):68-72.
YANG Weidong,XUE Yusheng,JING Yong. Influence of DC system's control strategy on the transient stability of South China Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):68-72.
- [11] 李爱民,蔡泽祥,任达勇,等. 高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):72-75.
LI Aimin,CAI Zexiang,REN Dayong,et al. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):72-75.
- [12] TAKEDA H,AYAKAWA H,TSUMENAGA M,et al. New protection method for HVDC lines including cables[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1995,10(4):2035-2039.
- [13] ZHENG X D,TAI N L,YANG G L,et al. A transient protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2012,27(2):718-723.
- [14] 周红阳,余江,黄佳胤,等. 直流线路纵联差动保护的相关问题[J]. 南方电网技术,2008,2(3):17-21.
ZHOU Hongyang,YU Jiang,HUANG Jiayin,et al. Issues over DC line differential protection[J]. Southern Power System Technology,2008,2(3):17-21.
- [15] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:76-81.
- [16] 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.

作者简介:



李爱民

李爱民(1981—),男,河北张家口人,博士,主要研究方向为电力系统控制保护及其自动化(E-mail: liaimin4u@126.com);

蔡泽祥(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统继电保护与控制、电力系统稳定分析与控制(E-mail: epzxcai@scut.edu.cn)。

Criterion of HVDC line differential protection blocking based on spectrum comparison

LI Aimin¹, CAI Zexiang², SUN Qizhen³, XU Min⁴

(1. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510640, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 510600, China; 4. EPRI of CSG, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the long operation time of HVDC line differential protection, a blocking criterion based on spectrum comparison is proposed. The spectrum characteristics of differential current are analyzed and the analytical results show that, it contains more DC component during the in-zone fault while contains more 50 Hz and 100 Hz components during the out-zone fault, according to which, a blocking criterion is designed. With high reliability and low sampling frequency, it identifies the in-zone and out-zone faults efficiently. A simulation model is built with EMTDC based on an actual HVDC system and the simulative results show that, the differential protection is blocked during the out-zone fault according to the proposed criterion, improving the protection reliability.

Key words: HVDC power transmission; relay protection; differential protection; blocking; spectrum analysis; reliability; computer simulation; failure analysis

.....
(上接第 114 页 continued from page 114)

Transient characteristic of HVDC system during commutation failure, its effect on differential protection and countermeasures

SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Source,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The relation between equivalent power-frequency current and converter bus voltage during the commutation failure of DC system is obtained based on the CIGRE HVDC benchmark model. The criterion expression of current differential protection for AC-DC interconnected system is deduced and the differential protection connected to DC power system for transmission line is analyzed. The analytical results indicate that, the differential protection may reject to act when in-zone fault occurs in AC-DC interconnected operation. It is proposed to detect the internal fault based on the amplitude criterion. Simulative results by PSCAD/EMTDC validate the correctness of theoretical analysis and the effectiveness of proposed criterion.

Key words: HVDC power transmission; commutation failure; transients; transient characteristic; equivalent power-frequency current; differential protection; relay protection; amplitude criterion