

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211013

基于特征谐波电流积分比值的 HVDC 整流站保护优化方案

许婷苇¹, 张海强², 林圣¹, 郑涛³

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;
3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对现有高压直流输电(HVDC)系统换流站保护在区外交流系统故障时误动作的问题, 提出了基于特征谐波电流积分比值的 HVDC 整流站保护优化方案。此方案利用换流变压器一次侧与送端交流线路的特征谐波电流积分比值来识别整流站区内故障。当发生整流站区内故障时, 该比值大于 1; 当发生整流站区外故障时, 该比值小于 1。进而考虑整流站保护与区外交流系统保护在时间上的协调配合, 设计了防止整流站保护在区外交流系统故障时的误动作策略。仿真结果表明, 所提保护优化方案可以准确识别区内外故障, 且不受故障类型、故障距离、过渡电阻、故障初始角以及噪声干扰的影响。

关键词: 高压直流输电; 特征谐波; 谐波电流积分比值; 故障识别; 整流站保护优化

A novel optimization scheme for HVDC rectifier station protection based on an integral ratio of characteristic harmonic current

XU Tingwei¹, ZHANG Haiqiang², LIN Sheng¹, ZHENG Tao³

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: The existing converter station protection of high-voltage direct current transmission (HVDC) system has the problem of misoperation when external faults occur. Based on the integral ratio of characteristic harmonic currents, a protection optimization scheme for HVDC rectifier stations is proposed. In this scheme, the characteristic harmonic current ratio between the primary side of the converter transformer and the AC line at the transmission end is used to identify the internal and external faults. The ratio is greater than 1 when the internal fault occurs, and the ratio is less than 1 when the external fault occurs. Then the time coordination between the protection of the rectifier station and the outside AC system is designed to prevent misoperation of rectifier station protection in the case of AC system failure outside the zone. Simulation results show that the proposed protection optimization scheme can accurately identify internal and external faults, and is not affected by fault type, fault distance, transition resistance, fault initial angle, and noise interference.

This work is supported by Key Research and Development Project of Sichuan Province (No. 2020YFG0063).

Key words: HVDC transmission; characteristic harmonics; harmonic current integral ratio; fault identification; rectifier station protection optimization

0 引言

随着“西电东送、北电南送、全国联网”电网战略的全面实施, 中国电网日益呈现出交直流混联

的新形态^[1-3]。交直流混联格局给交直流系统保护带来了严峻挑战^[4]。换流站是连接交直流系统的重要组成部分, 换流站保护用以保障站内设备免受故障威胁, 在交直流混联系统保护中起到至关重要的作用^[5-10]。

然而现场的运行经验表明, 换流站区外交流系统故障导致换流站保护误动作的事件时有发生, 严

基金项目: 四川省重点研发计划项目资助(2020YFG0063);
新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS20007)

重时将引起直流系统闭锁, 威胁电网安全稳定^[11-12]。例如: 2018 年 3 月 21 日, 巴西欣古换流站区外交流系统故障导致直流系统闭锁, 对电网造成重大冲击, 全国约四分之一负荷失电^[13]。天广直流“6.23 事故”为在交流系统故障时, 换流站 100 Hz 保护误动作, 导致直流系统误停运^[14], 究其原因是因为交流系统故障时, 其对应的主保护拒动, 而其后备保护动作延时大于 100 Hz 保护整定时间, 同时交流系统故障时亦产生了大量的 100 Hz 分量, 从而导致 100 Hz 保护满足其动作条件而误动作^[15]。已有研究表明, 除 100 Hz 保护外, 换流站的低交流电压保护、低直流电压保护等同样存在交流系统故障导致其误动的风险^[16]。因此, 有必要对换流站保护进行优化, 防止其误动作而导致直流系统闭锁。

针对上述换流站保护误动问题, 有学者提出了提高保护整定值或延长保护整定时间的优化方案。如文献[16-17]指出可通过提高直流低电压保护、100 Hz 保护等几种换流站后备保护整定值来减小其在换流站区外交流故障时的误动作风险; 但保护整定值的提高仅能减小导致换流站保护动作的交流故障范围, 同时也降低了保护的灵敏性。文献[18-20]提出通过延长换流站 100 Hz 保护的整定时间能够有效避免交流故障下保护误动, 但保护整定时间的延长有可能导致换流站区内的故障无法及时切除。因此, 若能在换流站保护动作前快速辨识出故障的区域, 并根据辨识结果来决定是否对可能误动的换流站保护进行闭锁, 则既能消除换流站区外交流系统故障导致的换流站保护误动, 又能避免区内故障情况下的换流站保护拒动。

基于此, 通过分析整流站区内外故障时换流变压器一次侧联络线与送端交流线路特征谐波分布特征发现: 在区内故障时换流变压器一次侧联络线特征谐波电流大于送端交流线路的特征谐波电流; 区外故障时换流变压器一次侧联络线特征谐波电流小于送端交流线路的特征谐波电流。因此, 提出了基于谐波电流积分比值的整流站区内外故障辨识方法; 并在此基础上, 设计了考虑低交流电压保护、低直流电压保护与 100 Hz 保护这 3 类整流站保护与交流系统保护动作时限协调配合的整流站保护优化方案。大量仿真结果表明, 所提整流站区内外故障辨识方法基本不受故障类型、故障位置、故障初始角、过渡电阻以及噪声干扰等的影响, 有效提升了整流站保护的可靠性。

1 整流站区内外故障特征分析

图 1 为单极高压直流输电(HVDC)系统结构示

意图, 主要由送端交流线路、交流滤波器、换流变压器、换流器、直流输电线路等构成, 从交流母线到平波电抗器左侧为换流站区内部分。 f_1 为换流变压器一次侧联络线故障, f_2 为换流变压器二次侧故障, f_3 为整流器直流侧出口故障, 均为整流站区内故障; f_4-L_n 表示直流输电系统 n 条送端交流线路中的任意一条线路 L_n 故障, 为整流站区外故障。

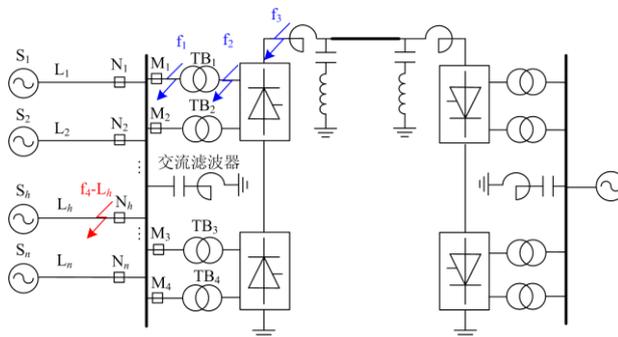


图 1 单极 HVDC 系统

Fig. 1 Unipolar HVDC system

图 1 中 $L_1 \sim L_n$ 为整流站区外 n 条送电交流线路, $S_1 \sim S_n$ 分别为其等效电源。交流母线有换流变压器、交流线路以及交流滤波器三类出线, $M_1 \sim M_4$ 、 $N_1 \sim N_n$ 分别为换流变压器一次侧联络线和交流线路上的电流测点, 以 M 点代表流过测点 $M_1 \sim M_4$ 电流之和, N 点代表流过测点 $N_1 \sim N_n$ 电流之和。

交流滤波器起着滤除交流谐波以及无功补偿的作用, 图 1 采用双 12 脉动换流器, 所以在交流侧产生 $12k \pm 1$ 次谐波 ($k = 1, 2, 3, \dots$), 且 11 次谐波含量最高^[5]。以某 ± 800 kV 特高压实际工程为例, 其交流滤波器配备了 1 个 11/24 的双调谐滤波器和 1 个 13/36 的双调谐滤波器, 用于消除 12 脉动换流器在交流侧产生的特征谐波。其中 11/24 双调谐滤波器阻抗特性曲线如图 2 所示。

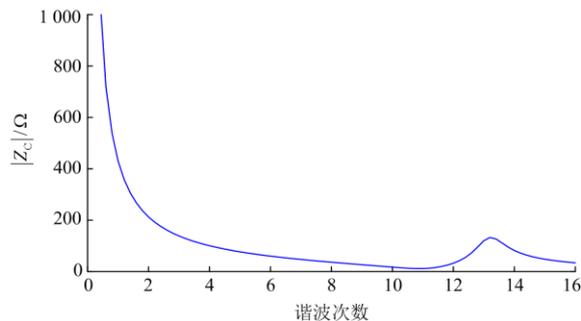


图 2 交流滤波器(DT11/24)阻抗特性分析

Fig. 2 AC filter (DT11/24) impedance characteristics analysis

由图 2 可知, 交流滤波器支路 11 次谐波阻抗幅值 $|Z_c|$ 趋近于 0。

1.1 整流站区内故障特征分析

对于整流站区内故障 f_1 、 f_2 以及 f_3 ，三类故障的等效电路有所不同，但其故障特征相似或者相同。因此，本文以换流变压器 TB_1 一次侧联络线 f_1 故障为例分析整流站区内发生故障时的故障特征分布， f_1 处发生故障前一瞬间的电压为 u_1 ，12 脉动换流器正常运行产生的 11 次谐波会流过 f_1 点，因此 u_1 中含有 11 次谐波。且因控制系统的时滞性，在故障后短时间内直流电流不变，因此换流器产生的 11 次谐波不变。从而在故障分量等效电路中，11 次谐波源为故障点处电压的故障分量，其大小与故障前一瞬间的电压相同，方向与故障前一瞬间的电压相反，得到故障分量等效电路如图 3 所示。

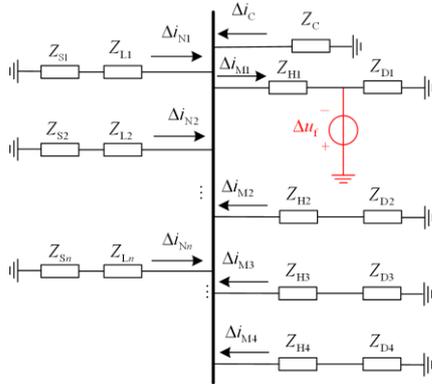


图 3 区内故障的故障分量等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of fault component of in-zone fault

图中： Δu_f 代表故障点 f_1 处电压的故障分量，且 $\Delta u_f = -u_1$ ； $\Delta i_{M1} \sim \Delta i_{M4}$ 分别为流过换流变压器 $TB_1 \sim TB_4$ 一次侧联络线测点 $M_1 \sim M_4$ 电流的故障分量； $\Delta i_{N1} \sim \Delta i_{Nn}$ 分别为流过交流线路 $L_1 \sim L_n$ 末端测点 $N_1 \sim N_n$ 电流的故障分量； $Z_{H1} \sim Z_{H4}$ 分别为换流母线到换流变压器 $TB_1 \sim TB_4$ 一次侧联络线阻抗； $Z_{D1} \sim Z_{D4}$ 分别为换流变压器 $TB_1 \sim TB_4$ 支路等效阻抗^[15]； Z_C 为交流滤波器等效阻抗； $Z_{L1} \sim Z_{Ln}$ 分别为送端交流线路 $L_1 \sim L_n$ 等效阻抗； $Z_{S1} \sim Z_{Sn}$ 分别为送端交流电源 $S_1 \sim S_n$ 的等效阻抗。

以 11/24 双调谐交流滤波器为例，由于其 11 次谐波阻抗很小，接近于 0。分析区内故障的 11 次谐波等效电路时，图 3 中与交流滤波器支路并联的非故障支路可忽略不计^[21]，因此区内故障时故障分量等效电路的 11 次谐波电路可近似等效为如图 4 所示电路。以下各电气量的上标 11 表示 11 次谐波特征量。

因此，当发生区内故障时有

$$\Delta i_{M1}^{11} \approx \Delta i_C^{11} \approx \frac{\Delta u_f^{11}}{Z_C^{11} + Z_{H1}^{11}} \quad (1)$$

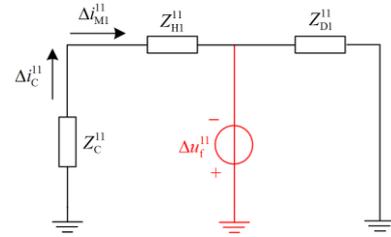


图 4 区内故障的故障分量 11 次谐波近似等效电路

Fig. 4 Approximate equivalent circuit of the 11th harmonic of the fault component of in-zone fault

而流过非故障点所在支路的故障电流 11 次谐波分量接近于 0，即 $\Delta i_{Mx}^{11} \approx 0 (x=2,3,4)$ ， $\Delta i_{Ny}^{11} \approx 0 (y=1,2,\dots,n)$ 。因此，若以 Δi_M^{11} 表示流过测点 $M_1 \sim M_4$ 中故障电流分量 11 次谐波的幅值之和， Δi_N^{11} 表示流过测点 $N_1 \sim N_3$ 中故障电流分量 11 次谐波的幅值之和，则有 $\Delta i_M^{11} = \sum_{x=1}^4 \Delta i_{Mx}^{11} \approx \frac{\Delta u_f^{11}}{Z_C^{11} + Z_{H1}^{11}}$ ， $\Delta i_N^{11} = \sum_{y=1}^n \Delta i_{Ny}^{11} \approx 0$ ，即 $\Delta i_M^{11} > \Delta i_N^{11}$ 。

可见，在整流站区内故障时，流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量大于流过送端交流线路的。

1.2 整流站区外故障特征分析

以区外交流线路 L_1 故障为例， f_4-L_1 处故障前一瞬间的电压为 u_2 ，同理可得故障分量等效电路如图 5 所示。图中， Z_{L1-1} 为线路 L_1 上从故障点指向电源分段的等效阻抗， Z_{L1-2} 为线路 L_1 上从故障点指向换流母线分段的等效阻抗， Δu_{f1} 为故障点处电压的故障分量，且 $\Delta u_{f1} = -u_2$ ， Δu 为换流母线处电压的故障分量。

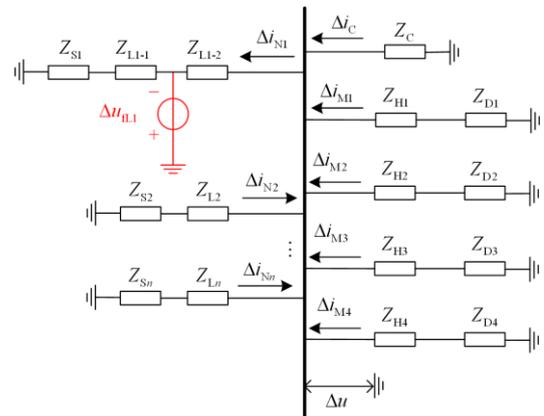


图 5 区外故障的故障分量等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of fault component of out-zone fault

同样, 以 11/24 双调谐交流滤波器为例, 分析区外故障的 11 次谐波等效电路时, 图 5 中与交流滤波器支路并联的非故障支路可忽略不计, 因此区外故障的故障分量等效电路的 11 次谐波电路可近似等效为如图 6 所示电路。

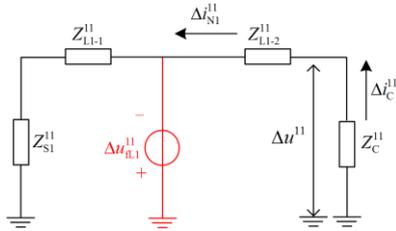


图 6 区外故障的故障分量 11 次谐波近似等效电路

Fig. 6 Approximate equivalent circuit of the 11th harmonic of the fault component of out-zone fault

因此, 当发生区外故障时有

$$\Delta i_{N1}^{11} \approx \Delta i_C^{11} = \frac{\Delta u^{11}}{Z_C^{11}} \quad (2)$$

而流过非故障点所在支路的故障电流 11 次谐波分量接近于 0, 即 $\Delta i_{Mx}^{11} \approx 0$ ($x=1,2,3,4$), $\Delta i_{Ny}^{11} \approx 0$ ($y=2,3,\dots,n$)。故有 $\Delta i_N^{11} \approx \frac{\Delta u^{11}}{Z_C^{11}}$, $\Delta i_M^{11} \approx 0$, 即 $\Delta i_M^{11} < \Delta i_N^{11}$ 。

可见, 在整流站区外故障时, 流过换流变压器一次侧故障电流的 11 次谐波含量小于送端交流线路故障电流的 11 次谐波。

综上所述, 在整流站发生区内和区外故障时, 流过换流变压器一次侧与送端交流线路特征谐波电流相对含量存在明显差异。在整流站区内故障时, 流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量大于流过送端交流线路的; 而在整流站区外故障时, 流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量小于流过送端交流线路的。

2 整流站保护优化方案

2.1 整流站区内外故障识别判据

由于换流器产生的 11 次谐波含量比 13 次多, 因此使用 11 次谐波时区内外故障特征更明显。利用快速傅里叶变换^[22-23]提取故障电流分量的 11 次特征谐波。取保护算法启动后一段时间内流过换流变压器一次侧与送端交流线路的故障电流分量中 11 次谐波进行积分, 再求二者比值来构造整流站区内外故障识别判据。

定义保护算法启动后一段时间内流过换流变压

器一次侧与送端交流线路的故障电流分量中 11 次谐波积分比值为 λ , 其计算公式为

$$\lambda = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} |\Delta i_M^{11}(k)|}{\sum_{k=1}^{N_s} |\Delta i_N^{11}(k)|} \quad (3)$$

式中: $k=1$ 表示保护算法启动后的第一个采样点; N_s 代表积分时间窗内采样点的个数; Δi_M^{11} 表示流过测点 $M_1 \sim M_4$ 中故障电流分量 11 次谐波的幅值之和; Δi_N^{11} 表示流过测点 $N_1 \sim N_n$ 中故障电流分量 11 次谐波的幅值之和。为后续表示方便, 取 $X_1 = \sum_{k=1}^{N_s} |\Delta i_M^{11}(k)|$,

$$X_2 = \sum_{k=1}^{N_s} |\Delta i_N^{11}(k)|。$$

进一步设计出基于故障电流分量 11 次谐波积分比值的整流站区内外故障识别判据:

$$\lambda > k_{set} \quad (4)$$

式中, k_{set} 为门槛值, 由前述故障特征分析可知, 整流站区内故障时, 流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量大于流过送端交流线路的, 即在保护算法启动后一段时间内流过换流变压器一次侧与送端交流线路的故障电流分量中 11 次谐波积分比值大于 1; 而在整流站区外故障时, 流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量小于流过送端交流线路的, 即在保护算法启动后一段时间内流过换流变压器一次侧与送端交流线路的故障电流分量中 11 次谐波积分比值小于 1; 因此门槛值 k_{set} 取 1, 且 11 次谐波比值无论大于 1 还是小于 1 均与系统运行方式无关, 因此无需乘以可靠系数。

若式(4)成立, 则判定为整流站区内故障; 否则, 判定为整流站区外故障。

2.2 启动判据

保护算法启动步骤采用电压故障分量启动元件来实现^[19], 其对故障检测的原理为

$$\max(|\Delta u_A|, |\Delta u_B|, |\Delta u_C|) > \Delta u_{set} \quad (5)$$

式中: $|*|$ 代表对*求绝对值; Δu_A 、 Δu_B 与 Δu_C 分别为换流母线的 A 相、B 相与 C 相电压的故障分量; Δu_{set} 为保护算法启动阈值, 一般取 0.01~0.1 倍保护算法启动所用电压的额定值^[24]。当换流母线三相电压故障分量的最大值大于 Δu_{set} 时, 则认为在此时开始检测到故障。

2.3 整流站保护与交流系统保护的协调配合策略

引言中所介绍到的可能误动作的 3 类换流站保护中, 低交流电压保护、低直流电压保护的整定时间为 800~1 500 ms, 100 Hz 保护的整定时间一般为 700~2 000 ms^[17,25]。而换流站区外交流线路故障时,

若此时其主保护拒动，那么应由其后备保护动作以切除故障。换流站区外交流线路故障可能最长的持续时间 t_{max} 可由图 7 所示的交流线路保护动作时序得到。

针对于 ±800 kV 直流工程，区外交流线路保护动作时序中的典型时间如图 7 所示， t_{max} 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^[15]，即 $t_{max}=2.3$ s。结合本文引言所述的 3 类换流站保护的判据缺乏对换流站区内外故障的辨识能力，若区外交流线路故障使得这 3 类保护动作判据被满足，且此时交流线路主保护拒动作，这 3 类换流站保护则会由于整定时间小于交流线路后备保护的最长切除故障时间而先于交流线路保护动作。

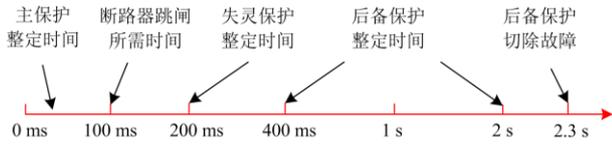


图 7 换流站区外交流线路保护动作时序

Fig. 7 Protection action sequence of AC line outside the converter station area

为防止交流故障下低交流电压保护、低直流电压保护以及 100 Hz 保护这 3 类整流站保护误动作，设计了基于对整流站区内外故障识别的整流站保护与交流系统保护的协调配合策略，基本思路如下：

- (1) 当判断出故障为整流站区内故障时，整流站保护按照原有的配置动作；
- (2) 当判断出故障为整流站区外故障时，闭锁可能动作的 3 类整流站保护，且当交流系统保护切除故障后闭锁返回，2.6 s 后将 3 类整流站保护解锁。

换流站区外交流线路的最长切除时间可达 2.3 s，因此采用上述保护协调配合策略，保证了 3 类整流站保护的可靠性；且若在区外故障切除后继而发生区内故障，若直接将 3 类整流站保护整定时间延长至 3 s，即在 5.3 s 内切除故障，虽不影响系统的安全稳定^[25]，但影响整流站保护的速动性。而采用本文所提出的保护协调配合策略不改变整流站保护的整定时间，保证了整流站保护的速动性；由于未改变其保护阈值，因此也保证了整流站保护的灵敏性。

因此，可以设计出从故障识别到保护协调配合的整流站保护优化方案流程，如图 8 所示。在保护算法启动后，取一定时间窗长的整流侧换流变压器一次侧和送端交流线路三相电流的故障分量，并对其进行相模变换，从而得到换流变压器一次侧和送

端交流线路故障电流分量的模量。本文采用的相模变换手段是电力系统保护领域应用较为广泛的 Clark 相模变换^[26-27]。在相模变换后进行快速傅里叶变换，提取流过换流变压器一次侧和送端交流线路故障电流分量的 11 次特征谐波，而后计算 λ ，由式 (4) 判断故障发生在整流站区内还是区外，基于故障判别结果，实现整流站后备保护与区外交流线路后备保护的协调配合。

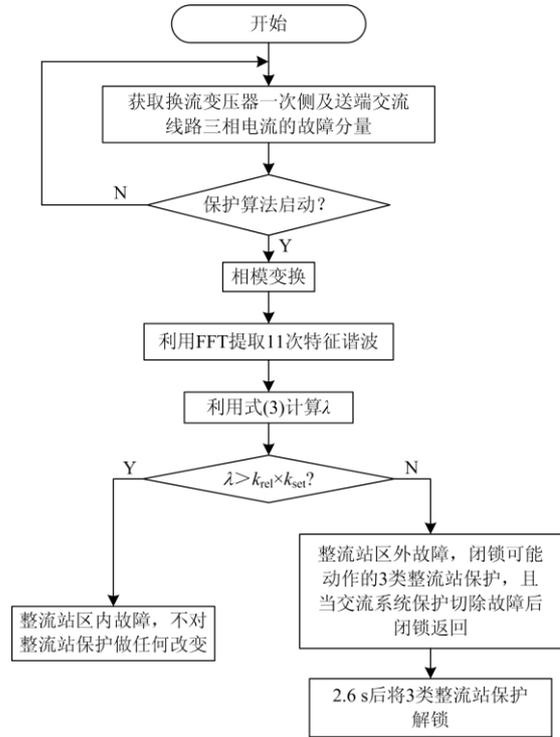


图 8 保护优化方案流程图

Fig. 8 Flow chart of protection optimization plan

3 仿真验证与分析

3.1 仿真模型与参数

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建送端连接有 3 条交流线路的 ±800 kV 直流工程仿真模型，模型中 3 条送端交流线路 $L_1 \sim L_3$ 的长度分别为 40 km、40 km、20 km，保护算法启动阈值 Δu_{set} 为 0.3 kV^[24]，仿真中采样频率为 10 kHz。计算暂态信号在一定时间内的积分，考虑到故障发生后控制系统的调节过程一般约为 30 ms^[28]，且为了快速检测出故障，取积分时间窗为 1 ms，即式(3)中 $N_s=10$ 。

3.2 典型故障仿真分析

3.2.1 整流站区内故障

设置整流站区内换流变压器 TB_1 一次侧 f_1 处在 $t = 3$ s 时 A 相发生金属性接地故障，保护算法启动

后 Δi_M^{11} 和 Δi_N^{11} 如图 9 所示。

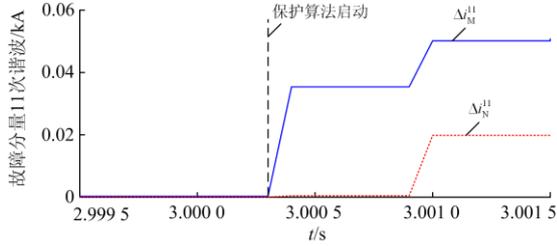


图 9 区内故障时 Δi_M^{11} 与 Δi_N^{11}

Fig. 9 Δi_M^{11} and Δi_N^{11} at the time of in-zone fault

根据图 9 中仿真结果可知, 故障发生后 0.5 ms 内保护算法启动, 且可清晰地看出保护算法启动后流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量大于流过送端交流线路的, 与理论分析结果一致。取保护算法启动后 1 ms 数据窗长内的数据计算可得 $X_1=0.41339$, $X_2=0.08223$; $\lambda=5.0270>1$, 故判断故障为整流站区内故障, 此时整流站后备保护按照原有保护配置动作。

3.2.2 整流站区外故障

设置送端交流线路 L_1 上故障点 f_4-L_1 处在 $t=3$ s 时 A 相发生金属性接地故障, 并设置故障点 f_4-L_1 距离换流母线 20 km。保护算法启动后 Δi_M^{11} 和 Δi_N^{11} 如图 10 所示。

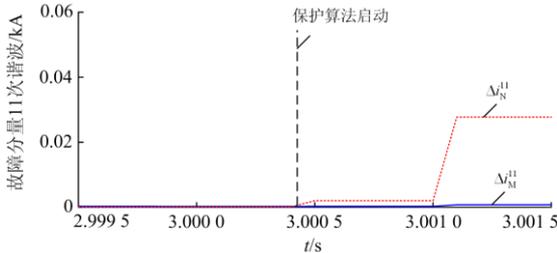


图 10 区外故障时 Δi_M^{11} 与 Δi_N^{11}

Fig. 10 Δi_M^{11} and Δi_N^{11} at the time of out-zone fault

根据图 10 中仿真结果可知, 故障发生后 0.5 ms 内保护算法启动, 且可清晰地看出保护算法启动后流过换流变压器一次侧的故障电流 11 次谐波含量小于流过送端交流线路的, 与理论分析结果一致。取保护算法启动后 1 ms 数据窗长内的数据计算可得 $X_1=0.00514$, $X_2=0.12327$; $\lambda=0.0417<1$, 故判断故障为整流站区外故障, 此时闭锁可能动作的 3 类整流站保护, 当交流系统保护切除故障后闭锁返回, 2.6 s 后将 3 类整流站保护解锁。

3.3 保护优化方案适应性分析

本文所提优化方案包括整流站区内外故障识别

和整流站后备保护与区外交流线路后备保护在时间上的协调配合两部分。由于协调配合策略部分设计的关键点是确定整流站后备保护在区外故障下的闭锁时间, 由于闭锁时间仅与交流线路后备保护的最长切除故障时间(2.3 s)有关, 故障类型和位置、过渡电阻等均不影响协调配合策略的设计。因此, 仅

需分析整流站区内外故障识别方法在不同故障条件下的适应性, 以验证所提保护优化方案的可行性。

3.3.1 不同故障类型和位置下的适应性分析

设置不同类型与位置的故障, 其中过渡电阻为 15Ω , 故障初始角为 0° , 故障距离为故障点 f_4-L_1 到换流母线的距离, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同故障类型和距离下的仿真结果

Table 1 Simulation results under different fault types and distances

故障点	故障类型	故障距离/km	X_1	X_2	λ	判断结果	保护策略
f_1	AG	—	0.066 03	0.027 67	2.386 3	区内	0
	BC	—	3.562 80	1.031 51	3.454 0	区内	0
	ABC	—	0.095 85	0.043 23	2.217 3	区内	0
f_2	AG	—	0.046 49	0.026 12	1.779 9	区内	0
	BC	—	2.004 06	0.296 67	6.755 2	区内	0
	ABC	—	0.050 26	0.039 63	1.268 2	区内	0
f_3	—	—	0.050 16	0.039 65	1.265 2	区内	0
	AG	10	0.003 40	0.012 19	0.279 2	区外	1
	BC	10	0.086 30	2.477 98	0.034 8	区外	1
f_4-L_1	ABC	10	0.003 02	0.029 20	0.103 5	区外	1
	AG	25	0.005 05	0.103 32	0.048 9	区外	1
	BC	25	0.039 61	1.122 64	0.035 3	区外	1
	ABC	25	0.003 46	0.229 13	0.015 1	区外	1

注: 保护策略取值为 0 表示整流站保护保持原有的配置, 取值为 1 代表闭锁可能动作的 3 类整流站保护, 当交流系统保护切除故障后闭锁返回, 2.6 s 后将 3 类整流站保护解锁, 后同。

由表 1 仿真结果可知, 在整流站区内发生不同类型故障时, λ 均大于 1, 则可判断故障为整流站区内故障, 此时整流站后备保护按照原有保护配置动作; 而在整流站区外交流线路不同位置发生不同类型的故障时, λ 均小于 1, 则判断故障发生在整流站区外, 此时闭锁可能动作的 3 类整流站保护, 当交

流系统保护切除故障后闭锁返回, 2.6 s 后将 3 类整流站保护解锁。因此, 保护优化方案在不同故障类型和故障位置下有良好的适应性。

3.3.2 不同过渡电阻下的适应性分析

为分析不同过渡电阻对保护优化方案的影响, 以 A 相接地故障为例, 其中 f_4-L_1 处发生的故障在距离换流母线 10 km 处, 故障初始角为 0° 。仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻下的仿真结果

Table 2 Simulation results under different transition resistances

故障点	过渡电阻/ Ω	X_1	X_2	λ	判断结果	保护策略
f_1	0	0.413 39	0.082 23	5.027 0	区内	0
	30	0.034 03	0.012 25	2.778 3	区内	0
	200	0.008 22	0.003 38	2.434 7	区内	0
f_4-L_1	0	0.003 85	0.204 87	0.018 8	区外	1
	30	0.003 67	0.113 53	0.032 4	区外	1
	200	0.002 29	0.007 87	0.290 3	区外	1

由表 2 仿真结果可知, 在不同过渡电阻下能够可靠识别故障发生在整流站区内还是区外, 因此, 保护优化方案具有较高的耐过渡电阻能力。

3.3.3 不同故障初始角下的适应性分析

为验证不同故障初始角对保护优化方案的影响, 以 A 相接地故障为例(过渡电阻设置为 10Ω), f_4-L_1 处发生的故障在距离换流母线 10 km 处。仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同故障初始角下的仿真结果

Table 3 Simulation results under different initial fault angles

故障点	故障初始角/ $^\circ$	X_1	X_2	λ	判断结果	保护策略
f_1	18	1.127 27	0.315 00	3.578 6	区内	0
	90	0.950 34	0.562 85	1.688 4	区内	0
	120	0.936 19	0.704 95	1.328 0	区内	0
f_4-L_1	18	0.029 97	0.417 86	0.071 7	区外	1
	90	0.032 04	0.843 49	0.038 0	区外	1
	120	0.037 49	0.866 48	0.043 3	区外	1

由表 3 仿真结果可知, 在不同故障初始角下能够可靠识别故障发生在整流站区内还是区外, 因此, 保护优化方案在不同故障初始角下具有较好的适应能力。

3.3.4 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, 以 A 相金属性接地故障为例, f_4-L_1 处发生的故障在距离交流换流母线 10 km 的位置处, 故障初始角为 0° ,

在所得仿真数据中加入信噪比为 50 dB、40 dB 和 30 dB 的噪声, 仿真结果如表 4 所示。

表 4 噪声干扰情况下的仿真结果

Table 4 Simulation results under noise interference

故障点	信噪比/ dB	X_1	X_2	λ	判断结果	保护策略
f_1	50	0.409 67	0.090 46	4.528 5	区内	0
	40	0.435 02	0.166 17	2.617 8	区内	0
	30	0.474 74	0.354 20	1.340 3	区内	0
f_4-L_1	50	0.027 15	0.047 56	0.570 8	区外	1
	40	0.076 48	0.092 07	0.830 7	区外	1
	30	0.192 53	0.225 15	0.855 1	区外	1

由表 4 结果可知, 在噪声干扰情况下能够可靠识别故障发生在整流站区内还是区外, 因此, 保护优化方案具有较高的抗噪声干扰性能。

4 结论

根据 HVDC 系统整流站区内外故障时, 流过整流站区内测点和整流站区外测点的故障电流 11 次谐波含量的不同, 提出了从整流站区内外故障识别到整流站保护与交流系统保护在时间上的协调配合策略的整流站保护优化方案, 通过理论分析与仿真验证, 得到以下结论。

(1) 当整流站区内故障时, 区内测点测得的故障电流分量的 11 次谐波含量大于区外测点测得的; 当发生整流站区外故障时, 区内测点测得的故障电流分量的 11 次谐波含量小于区外测点测得的。根据特征谐波积分比值的差异性可以识别区内外故障。

(2) 所提保护优化方案在整流站区内发生故障时, 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; 而在整流站区外发生故障时, 闭锁可能动作的 3 类整流站保护, 当交流系统保护切除故障后闭锁返回, 2.6 s 后将 3 类整流站保护解锁, 则可防止保护在区外故障下误动作。

(3) 本文所提保护优化方案基本不受故障类型、故障距离、过渡电阻、故障初始角以及噪声干扰的影响, 具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] 鲁月华, 樊艳芳, 罗瑞. 适用于交直流混联系统的时域全量故障模型判别纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 81-88.
- LU Yuehua, FAN Yanfang, LUO Rui. Principle of active distribution network pilot protection based on time domain model identification[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 81-88.

- [2] 彭云豪, 董希建, 周海强, 等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 123-131.
PENG Yunhao, DONG Xijian, ZHOU Haiqiang, et al. Reliability evaluation of power grid security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 123-131.
- [3] 汤吉鸿, 章德, 丛凡超, 等. 基于线性二次型最优控制的多端直流最优功率调制方案[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 32-39.
TANG Jihong, ZHANG De, CONG Fanchao, et al. Optimal power adjustment scheme based on linear quadratic optimal control for MTDC[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 32-39.
- [4] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 31-37.
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 31-37.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 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.
- [7] 彭宇锋, 张英敏, 李俊松, 等. 考虑线路电容的 MMC-HVDC 系统直流接地故障电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 57-63.
PENG Yufeng, ZHANG Yingmin, LI Junsong, et al. Ground fault current calculation method for an MMC-HVDC system considering line capacitance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 57-63.
- [8] 陈卫中, 李清波, 王东鹏, 等. 基于柔性限流器的直流配电网方向纵联保护[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 109-117.
CHEN Weizhong, LI Qingbo, WANG Dongpeng, et al. Directional pilot protection of DC distribution network based on flexible current limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 109-117.
- [9] 彭涛, 郭贤朝, 吴江一, 等. MMC-HVDC 系统阀区单相接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 143-149.
PENG Tao, GUO Xianchao, WU Jiangyi, et al. Research on location of single-phase grounding fault in valve side of MMC-HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 143-149.
- [10] 郭贤珊, 卢亚军, 郭庆雷. 张北柔性直流电网试验示范工程直流控制保护设计原则与验证[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 181-189.
GUO Xianshan, LU Yajun, GUO Qinglei. Design principle and verification of control and protection system for Zhangbei VSC-HVDC grid demonstration project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 181-189.
- [11] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 176-187.
HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.
- [12] 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优化方案的研究[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.
- [13] 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 blackout 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.
- [14] LI Z, CHEN Z, WANG G, et al. Study on the operation area of the 100 Hz protection in an HVDC system[C]// 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 25-28, 2011, Wuhan, China: 1-4.
- [15] 张海强, 戴文睿, 牟大林, 等. 直流输电系统换流站保护适应性分析及优化方案研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 102-108.
ZHANG Haiqiang, DAI Wenrui, MOU Dalin, et al. Adaptability analysis and optimization scheme research for HVDC converter station protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 102-108.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 等. 南方电网直流 100 Hz 保护的改进措施[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 96-100.
- ZHOU Hongyang, YU Jiang, HUANG Jiayin, et al. Improvement measures of 100 Hz protection in China Southern Power Grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 96-100.
- [21] 宋国兵, 冉孟兵, 褚旭, 等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1402-1407.
- SONG Guobing, RAN Mengbing, CHU Xu, et al. A new single-end current based whole-line quick-action protection for VSC-HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1402-1407.
- [22] ZHENG X, TAI N, YANG G, et al. A transient protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 718-724.
- [23] 武晓. 交直流混联系统输电线路继电保护关键问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- WU Xiao. Research on the key issues of protection relaying of transmission lines in hybrid AC-DC system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [24] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.

- ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.
- [25] 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): 93-98.
- 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): 93-98.
- [26] ZOU G, GAO H. A traveling-wave-based amplitude integral busbar protection technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 602-609.
- [27] 李小鹏, 何正友, 武骁, 等. 利用 S 变换能量相对熵的幅值比较式超高速方向元件[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 113-117.
- LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao, et al. Ultra high speed directional element based on amplitude comparison using S-transform energy relative entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 113-117.
- [28] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 52-56.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 52-56.

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-09-20

作者简介:

许婷苇(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电系统换流站保护; E-mail: xtwsyjs@163.com

张海强(1994—), 男, 助理工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhq.swjtu@foxmail.com

林 圣(1983—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与故障定位, 牵引供电系统健康诊断与主动运维等。E-mail: slin@swjtu.edu.com

(编辑 魏小丽)