

高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析

王海军, 黄义隆, 周全

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要: 从高压直流输电熄弧角控制的原理出发, 对比了实测型和预测型熄弧角控制方式的优缺点, 从控制系统响应和保护系统响应两方面探讨了 SIEMENS 和 ABB 所采取的换相失败响应策略。着重研究了换相失败预测控制功能 (CFPREV) 在不同交流母线电压跌落程度和电压畸变程度故障下的响应情况。仿真结果表明, 当交流母线电压跌落较为严重时, 无论是否投入 CFPREV 功能, 都未能阻止换相失败, 但投入 CFPREV 功能后有利于换相失败后直流系统恢复; 当直流系统与交流母线间的电气联系较强或交流母线电压畸变程度较低时, CFPREV 功能在预防换相失败上有明显效果。

关键词: 熄弧角控制; 换相失败响应策略; 换流失败预测控制功能; 交流电压跌落; 交流电压畸变; 实时数据仿真

Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC

WANG Hai-jun, HUANG Yi-long, ZHOU Quan

(China Southern Power Grid EHV Maintenance & Test Center, Guangzhou 510663, China)

Abstract: From the principle of extinction angle control used in HVDC, the advantage and shortage of extinction angle control based on actual measuring and predictive calculation are contrasted. And the response strategies of commutation failure based on the Siemens and ABB technology are discussed from control and protection system. The response of commutation failure prediction control function (CFPREV) under AC voltage falling and distortion fault are focused. The results of simulation show that, when AC voltage falls seriously, the CFPREV cannot prevent commutation failure, but the CFPREV is in the favour of the restoration of DC system after commutation failure; when the electrical relation between DC and AC system is strong or the distortion degree of AC voltage is low, the CFPREV function has obvious effect on preventing commutation failure.

Key words: extinction angle control; commutation failure response strategies; commutation failure prediction control; AC voltage falling; AC voltage distortion; real time digital simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0124-08

0 引言

熄弧角控制是高压直流输电工程逆变侧的一种主要控制策略, 该控制器的主要目的是将熄弧角控制在设定范围内, 防止由于熄弧角过小造成换相失败。目前国内已投运的大容量高压直流输电工程熄弧角控制大致可以分为 SIEMENS 和 ABB 两种技术路线, SIEMENS 技术路线采用实测型熄弧角控制, ABB 技术路线采用预测型熄弧角控制。南方电网公司所辖的高肇、兴安、楚穗、普侨等直流采用了 SIEMENS 技术路线, 国家电网公司所辖的呼辽、德宝、向上等直流采用了 ABB 技术路线。两种技术路线在世界范围内都得到成功和广泛的应用, 工程运行经验表明这两种技术均能有效降低熄弧角减小造成的换相失败。但是, 当多回直流落在同一

局域电网时, 交流系统故障时, 仍可能导致多回直流同时换相失败^[1-10]。

国内对换相失败的原因及影响因素的研究较为深入, 但对预防换相失败的研究仍较少^[11-19]。文献[17]提出了一种利用多馈入交互作用因子快速判断直流系统换相失败的方法。文献[18]针对单相接地故障的特点, 通过判断交流电压计算得到理想的触发角, 从而预防换相失败。ABB 和 SIEMENS 换相失败响应策略之间一个重要区别是 ABB 采用了换相失败预测控制功能 (CFPREV)。文献[19]在 CFPREV 的基础上提出了一种基于 sin-cos 分量检测交流电压以预防换相失败的方法, 在一定程度上提高了 CFPREV 功能启动的灵敏性, 但对 CFPREV 功能在预防换相失败方面的作用、效果以及受影响因素等的认识还不够深入。

本文从熄弧角控制原理出发, 对比了实测型和预测型熄弧角控制方式的优缺点。针对不同的熄弧角控制方式, SIEMENS 和 ABB 所采取的换相失败策略也各不相同, 本文从控制系统响应和保护系统响应两方面进行梳理分析。

本文对换相失败预测控制功能进行深入分析, 利用实时数字仿真平台 (Real Time Digital Simulator, RTDS) 模拟了不同电压跌落程度和电压畸变程度的交流系统故障, 着重研究了换相失败预测控制功能在这些故障下的响应特性。

1 实测型和预测型熄弧角控制原理及优缺点

由换流阀换相原理可知, 熄弧角是衡量逆变站是否发生换相失败最直接的状态量。如果实际熄弧角 γ 小于晶闸管恢复阻断能力需要最小熄弧角 γ_{\min} , 就会发生换相失败。目前高压直流输电所用晶闸管的去离子恢复时间一般为 $400 \mu\text{s}$ 左右, 考虑到串联元件的不一致、器件特性的变化、交流系统三相电压的不对称性、换相回路各相阻抗的不一致和安全裕度的需要等, 工程中通常取熄弧角的设定值为 $15^\circ \sim 21.5^\circ$ 。熄弧角可以用式 (1) 表示。

$$\gamma = \arccos(\sqrt{2}X_r I_d / U + \cos \beta) - \varphi \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 换相电压 U 下降、超前触发角 β 减小、直流电流 I_d 增大及换相电压过零点前移都会使熄弧角减小, 可能导致换相失败。

熄弧角控制是通过比较熄弧角测量值与熄弧角设定值之间的差, 通过 PI 调节器产生用于调节触发脉冲的触发角, 最终确保直流系统的实际熄弧角在设定范围内。

1.1 实测型熄弧角控制

实测型熄弧角控制是指用于控制的熄弧角测量值是采用实测方式得到的。晶闸管电压监测板 (TVM) 检测晶闸管上电压的负向过零, 利用回检光纤将相关信号送至阀基电子设备 (VBE), VBE 基于此产生阀电流过零点信号。控制系统通过比较来自 VBE 系统的 EOC 信号与锁相的电压过零信号得到熄弧角。最后, 通过取所有换流阀熄弧角的最小值得到整个直流系统的熄弧角测量值。

实测型熄弧角控制的优点: 根据实际波形测量的熄弧角进行控制, 角度测量准确, 控制精度较高, 鲁棒性较好。

实测型熄弧角控制的缺点: 熄弧角测量值依赖于每个换流阀的电流过零信号, 任意一个测量的电流过零信号出现误差都可能影响最终产生的熄弧角测量值; 电流过零信号采用脉冲信号, 容易受到

干扰; 当直流电流增大很快, 电压下降很快或者两者同时发生, 熄弧角可能突然减小很多或者继续很快地减小, 使控制器来不及调节就发生换相失败。

1.2 预测型熄弧角控制

预测型熄弧角控制是指用于控制的熄弧角是通过直流电流、换流变二次侧电压、换相电抗等模拟量计算得到的。由于当逆变侧运行在定熄弧角控制时, 系统在低频下具有负阻特性, 这不利于系统的稳定。因此, ABB 技术路线通常采用逆变侧最大触发角控制 (A_{\max}) 对熄弧角控制特性进行修正, 使之在暂态情况下具有正斜率。最大触发角控制的原理是:

(1) 首先将 γ_0 设定为参考值, 计算出越前触发角 β , 相关公式为

$$\beta = \arccos[\cos \gamma_0 - 2 \cdot d_x \cdot \frac{I_0}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{d0N}}{U_{d0}} - K(I_0 - I_d)] \quad (2)$$

(2) 然后用 $A_{\max} = 180^\circ - \beta$ 得到最大触发角 A_{\max} , 由于整流侧和逆变侧存在电流裕度, 逆变侧的电流控制器的 PI 调节器输入一直不为零, 所以其输出将一直试图增大触发角直至被允许的最大值。因此将上述计算得到的 A_{\max} 作为电流控制器的最大限制值就可以实现最大触发角控制。

稳态情况下, 由于 I_d 等于电流指令 I_0 , 式 (2) 所确定的 β 可使逆变侧运行在定 γ 状态。暂态情况下, I_0 保持不变, I_d 因扰动而变大时, A_{\max} 控制将减小 β 角使得逆变侧电压增大, 直流电流 I_d 变小, 从而回到稳态工作点; 反之, I_d 因扰动变小时, A_{\max} 控制将增大 β 角使得逆变侧电压减小, 直流电流 I_d 增大。

基于 ABB 技术路线的熄弧角测量值主要通过以下几个步骤获得:

(1) 首先计算换相角 μ , 根据换流阀触发时间、 U_{ac} 、 I_{d0} 、 d_x 等量得到换流阀换相的结束时间, 相关公式为

$$\int_{\pi-\gamma-\mu}^{\pi-\gamma} U_{ac} \sin(\omega t) dt = 2 \cdot k \cdot d_x \cdot (I_{d0} + \Delta I_d / 2) \quad (3)$$

(2) 利用锁相环的电压过零时刻与换流阀换相结束时间之间的差得到熄弧角, 相关功能示意图如图 1 所示。

预测型熄弧角控制的优点: 能够根据触发脉冲发出之前系统的运行情况计算得到熄弧角进行控制, 响应速度较快。

预测型熄弧角控制的缺点: 熄弧角不是通过测量得到, 在故障情况下计算出的角度与实际熄弧角相差较大; 在脉冲发出之后, 无法预计到换相期间

运行情况的继续变化,如换相期间直流电流继续增加,则换相角可能比预期的大,使实际熄弧角小于最小值。

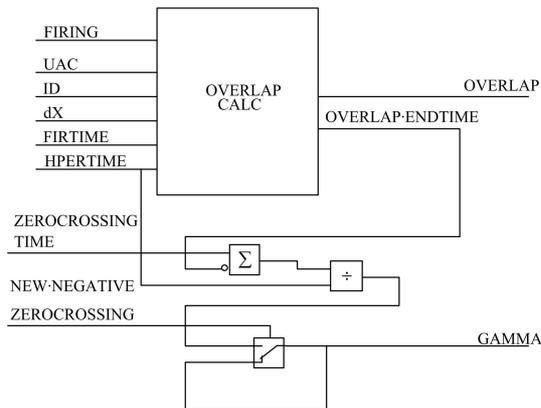


图 1 预测型熄弧角计算示意图

Fig. 1 Sketch of the calculation of predictive extinction angle

2 换相失败响应策略

实际工程中应用的预测型和实测型熄弧角控制,都采用了多种措施以防止和控制换相失败的发展,但无论是预测型还是实测型都不可能完全避免换相失败^[20]。

2.1 SIEMENS 换相失败响应策略

2.1.1 控制系统响应情况

换相失败发生后,逆变侧极控系统会通过减少换流器触发角的方式来提高换相裕度。与此同时,当直流系统电压下降到某一阈值时,极控系统内的低压限流单元(VDCL)起作用,降低直流电流参考值,以便尽快恢复正常换相。为避免由于控制系统丢脉冲造成换相失败,极控在换相失败后一段时间会启动系统切换。

1) 极控系统切换

在 200 ms 内连续检测到换流器发生换相失败,为了避免因控制系统设备故障而造成直流停运,极控系统和 VBE 系统会由值班系统切换到备用系统。ABB 技术中将此功能作为保护的出口方式。

2) 熄弧角控制策略

换相失败后,实测的熄弧角会变成零,熄弧角控制起作用,快速将触发角移动到上限以提高换相裕度;整流侧 VDCL 动作快速降低直流电流。

3) 低压限流控制(VDCL)

低压限流控制功能(VDCL)是换流器触发控制的一个重要功能,该功能会在换相失败、交流系统故障、直流系统故障等情况下启动,通过降低电流设定值来减少发生连续换相失败的几率,避免由于逆变器长时间换相失败造成直流场设备谐振过电

压。

2.1.2 保护系统响应情况

对于单次换相失败,直流系统一般会顺利恢复,不会发生闭锁的现象,而长时间的换相失败会使直流保护动作(一般来说与换相失败时间长短和交流系统故障恢复时间有关),导致直流闭锁甚至停运。与换相失败相关的保护功能有 50 Hz 保护(81DC-50 Hz)、桥差保护(87CBY/87CBD)、阀组差动保护(87CG)等。

2.2 ABB 换相失败响应策略

ABB 在控制策略中加入了换相失败预测控制(CFPRED),降低换相失败的发生几率。控制器通过零序检测法和交流电压 α/β 转换来检测交流系统故障,增大熄弧角 γ 并采用逆变侧最小换相裕度(AMIN)控制提高换相裕度,减少换相失败的几率,减轻连续多次换相失败对直流系统的影响,提高运行可靠性。

2.2.1 控制系统响应情况

1) 换相失败预测控制(CFPRED)

换相失败预测控制(CFPRED)用于防止由交流故障引起的换相失败。这部分内容将在 3.1 小节中详细讨论。

2) 最小换相裕度(AMIN)控制

当极控系统检测到交流系统故障后,将采用最小换相裕度(AMIN)控制增大换相角来提高换相裕度,将当前时刻所对应的换相裕度值 AMIN_CALC 与最小允许的剩余电压-时间区域的参考值 AMINREF 作比较,如果 AMIN_CALC 低于 AMINREF,为了防止阀的换相电压-时间区域过小,需立即发出点火指令。

如果换相失败预测功能检测到交流系统故障,需增大 AMINREF,以防止换相失败。如果发生了换相失败,迅速增大 AMINREF,以避免连续的换相失败。最小换相裕度(AMIN)控制功能退出的时间常数相对较大,可以避免再次发生换相失败。

3) 低压限流控制(VDCL)

ABB 路线控制系统的 VDCL 与 SIEMENS 路线控制系统的 VDCL 在原理上是相同的。ABB 是通过在整流侧和逆变侧设置带上下限幅环节的滤波器来实现的,而 SIEMENS 是通过在整流侧和逆变侧设置变化曲线来实现的。ABB 技术路线的 VDCL 将当前直流电流值引入到 VDCL 曲线中,可以确保当直流电压降低时,电流限制是从当前电流开始的,所以在某些情况下其响应特性比基于 SIEMENS 技术路线的 VDCL 要快。SIEMENS 技术路线的 VDCL 退出时,控制系统会在电流指令上增加一个

电流变化量, 以利于系统从故障状态快速恢复到正常状态。

2.2.2 保护系统响应情况

为防止交流系统故障引发的换相失败, ABB 路线的直流保护系统配置了换相失败保护 (87CFP), 通过交直流电流差反应换相失败。与换相失败相关的保护还包括桥差动保护 (87CBY/87CBD)、阀组差动保护 (87CG) 和 50 Hz 保护, 通过增大换流阀触发角、极控系统切换和闭锁换流器等方式对直流系统进行保护。

3 换相失败预测控制功能研究

3.1 换相失败预测控制原理

换相失败预测控制(CFPRED)用于防止由交流系统故障引起的换相失败。该功能包括两部分: ①基于零序检测法检测单相故障; ②基于交流电压 $\alpha\beta$ 转换检测三相故障^[19]。换相失败预测控制原理如下。

1) 单相故障判据: 当逆变侧交流系统发生单相故障时, 交流母线电压出现零序分量, 即三相电压总和不为零。若零序分量大于设定值, 则启动换相失败预测控制功能。

$$u_0 = u_a + u_b + u_c \quad (4)$$

2) 三相故障判据: 当逆变侧交流系统发生三相故障时, 交流电压通过 abc- $\alpha\beta$ 变换得到在 α - β 平面 α 轴和 β 轴上对应的两个分量, 三相对称分量经变换后在 α - β 平面得到一个以角速度旋转的矢量 $u_{\alpha\beta}$ 。

$$u_\alpha = \frac{2}{3}u_a - \frac{1}{3}(u_b + u_c) \quad (5)$$

$$u_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(u_b - u_c) \quad (6)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (7)$$

当交流系统发生故障时, 若 $u_{\alpha\beta}$ 与故障前该量之差大于设定值, 则启动控制模块, 并将该差值通过变化转换为一角度, 最终从逆变站的触发角中减去该角度。

换相失败预测控制的输入为交流电压, 输出为在交流系统故障时对 AMIN 控制和 AMAX 控制的角度增大值。如果检测到交流故障, 将增大 AMINREF, 以提前点火, 预防换相失败的发生。该角度同时送给 AMAX 控制, 以减小触发角的最大限幅值。图 2 为换相失败预测控制逻辑功能图。

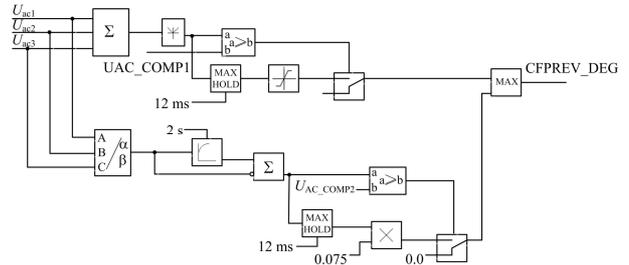


图 2 换相失败预测控制(CFPRED)逻辑功能图

Fig. 2 Logic function of CFPRED

3.2 交流母线电压跌落故障下的换相失败预测控制响应

在天广直流 RTDS(Real Time Digital Simulator) 仿真平台上模拟不同程度的三相、单相交流母线电压跌落故障, 逆变侧交流系统采用直流系统与交流母线间电气联系较强的系统模型 (系统等值阻抗为 4.372Ω), 直流系统在 1 800 MW 下双极大地回线方式运行。

表 1 比较了是否投入换相失败预测控制功能下不同程度的三相交流母线电压跌落对直流控制保护的影响。表中 CFPREV 表示换相失败预测控制功能最终输出, 当未投入换相失败预测控制功能且检测到系统发生换相失败时, 该输出为一固定值 5° 。从表中可以看出三相交流母线电压跌落至 0.9 p.u.、0.8 p.u.、0.7 p.u.时, 都会发生换相失败, 无论是否投入 CFPREV, 都不能阻止换相失败发生; 单相交流母线电压跌落至 0.9 p.u.时, 不会发生换相失败, 而跌落至 0.85 p.u.、0.8 p.u.时, 会发生换相失败。但投入 CFPREV 后, 由于满足三相故障判据, CFPREV 动作后会根据电压的跌落程度增大 CFPREV 输出, 电压跌落越严重, CFPREV 输出越大, 最终减小逆变侧触发角, 有利于直流系统恢复。

下面以三相交流母线电压跌落至 0.8 p.u.的试验为例, 分析故障期间直流控制保护系统的响应情况。

图 3、图 4 分别是无 CFPREV 和投入 CFPREV 时三相交流电压跌落故障下直流控制系统极 1 录波图。由图可知, 无 CFPREV 时换相失败预测控制功能输出为一固定值 5° , 投入 CFPREV 后增大至 12.65° , 逆变侧触发角减小, 换相失败引起的直流电流 I_{dH} 迅速增大的情况也有所缓解, 有利于换相失败后直流系统的恢复。

图中 UACA、UACB、UACC 分别是三相交流电压; IACY_L1、IACY_L2、IACY_L3 分别是三相阀侧电流; ALPHA_ORD、ALPHA_MEAS 分别是触发角指令和测量值; IDH 是极母线电流; COMM_FAILURE_IND 是换相失败信号, 下同。

表 1 交流母线电压跌落对直流控制保护系统的影响
Table 1 Effect of AC voltage falling on DC control and protection system

	故障类型	交流母线电压跌落程度	是否报换相失败	CFPREV 是否响应	CFPREV 输出
无 CFPREV	三相	0.9 p.u.	是	/	5°
	三相	0.8 p.u.	是	/	5°
	三相	0.7 p.u.	是	/	5°
	单相	0.9 p.u.	无	/	/
	单相	0.85 p.u.	是	/	5°
	单相	0.8 p.u.	是	/	5°
投入 CFPREV	三相	0.9 p.u.	是	仅满足三相故障判据	8.64°
	三相	0.8 p.u.	是	仅满足三相故障判据	12.65°
	三相	0.7 p.u.	是	仅满足三相故障判据	16.45°
	单相	0.9 p.u.	无	无	/
	单相	0.85 p.u.	是	满足单相、三相故障判据	8.64°
	单相	0.8 p.u.	是	满足单相、三相故障判据	10.55°

注：“/”表示不需填写或该试验没有做的必要，下同。

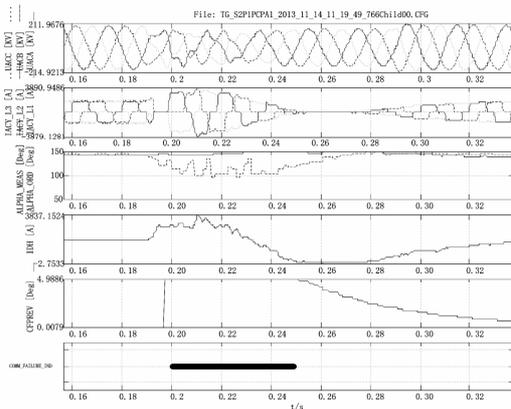


图 3 无 CFPREV 时三相交流电压跌落故障下直流控制系统极 1 录波图

Fig. 3 Record of pole 1 under three phase AC falling fault without CFPREV

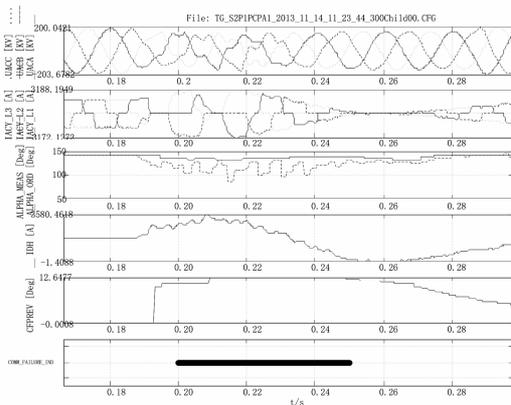


图 4 投入 CFPREV 时三相交流电压跌落故障下直流控制系统极 1 录波图

Fig. 4 Record of pole 1 under three phase AC falling fault with CFPREV

3.3 交流母线电压畸变故障下的换相失败预测控制响应

在天广直流 RTDS 仿真平台上通过改变小组交

流滤波器开关投入时与交流电压过零点的延迟角度（本文简称延迟角），模拟不同程度的三相、两相交流母线电压畸变故障。逆变侧交流系统等值阻抗对电压畸变的程度影响较大，因此根据不同的延迟角采用不同等值阻抗的交流系统模型（阻抗 4.372 Ω、8.139 Ω、12 Ω，阻抗越小说明直流系统与交流系统的电气联系越强）。直流系统在 1 400 MW 下双极大地回线方式运行，通过手动投入一组交流滤波器来模拟电压畸变故障。

表 2 比较了不同交流系统阻抗时交流母线电压畸变对直流控制保护的影响。故障类型包括交流滤波器三相和 AB 两相以一定延迟角合闸两种方式。

从表中可以看出，当交流系统阻抗为 4.372 Ω 时，由于交流系统较强，交流电压不容易受交流滤波器投入影响，只有在三相延迟角 90°合闸的最严重情况下才发生换相失败；当交流系统阻抗为 8.139 Ω 时，交流滤波器三相和 AB 两相在延迟角 90°合闸的情况下会发生换相失败，但投入 CFPREV 后，直流系统没有发生换相失败，说明 CFPREV 对预防换相失败有一定作用。而当交流系统阻抗为 12 Ω 时，交流系统较弱，不管是否投入 CFPREV 交流滤波器在延迟角三相 60°和 45°合闸的情况下都会发生换相失败。

图 5、图 6 分别是同一次试验，极 2 未投入 CFPREV，极 1 投入 CFPREV 下交流滤波器三相 90°合闸的录波图。图 7 是在双极都投入 CFPREV 下重复该试验。从图 5 中极 2 D 桥阀侧电流录波可以看出，D 桥发生了换相失败，但投入 CFPREV 后的极 1 D 桥却没有发生换相失败，如图 6 所示。从图 7 中也可以看出，投入 CFPREV 后的 D 桥也没有发生换相失败，说明 CFPREV 能够快速反应投入交流滤波器引起的交流电压畸变故障，及时减小逆变侧触发角，增大熄弧角，有效防止换相失败。

表 2 不同交流系统阻抗时交流母线电压畸变对直流控制保护的影响
Table 2 Effect of AC voltage distortion on DC control and protection without CFPREV and with CFPREV

	系统阻抗	故障类型	交流滤波器延迟角	是否报换相失败	CFPREV 是否响应	CFPREV 输出
无 CFPREV	4.372 Ω	三相	90°	是	/	5°
		AB 相	90°	无	/	/
	8.139 Ω	三相	90°	是	/	5°
		AB 相	90°	是	/	5°
	12 Ω	三相	60°	是	/	5°
		AB 相	60°	是	/	5°
投入 CFPREV	4.372 Ω	三相	90°	无	满足单相、三相故障判据	14.15°
		AB 相	90°	无	满足单相、三相故障判据	12.35°
	8.139 Ω	三相	90°	无	满足单相、三相故障判据	12.48°
		AB 相	90°	是	满足单相、三相故障判据	15.76°
	12 Ω	三相	60°	是	满足单相、三相故障判据	15.54°
		AB 相	60°	是	满足单相、三相故障判据	15.47°

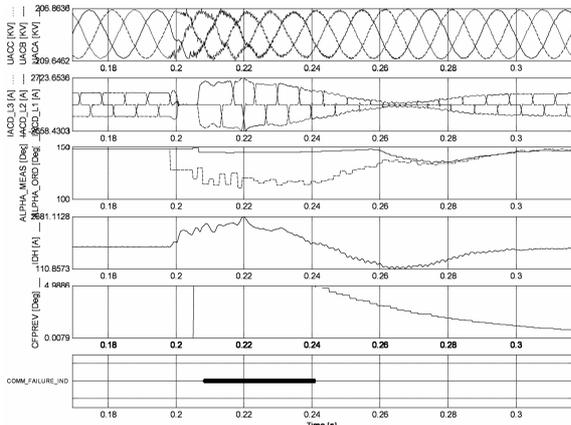


图 5 系统阻抗为 4.372 Ω、未投入 CFPREV 下三相 90° 合闸极 2 录波图

Fig. 5 Record of pole 2 under the condition of impedance is 4.372 Ω, breaker closed at 90° and without CFPREV

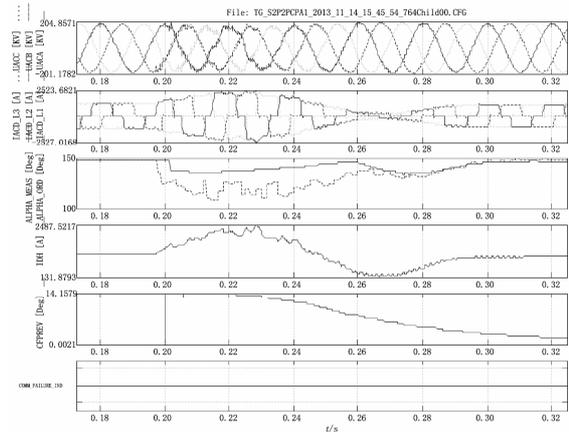


图 7 系统阻抗为 4.372 Ω、投入 CFPREV 下三相 90° 合闸极 2 录波图

Fig. 7 Record of pole 2 under the condition of impedance is 4.372 Ω, breaker closed at 90° and with CFPREV

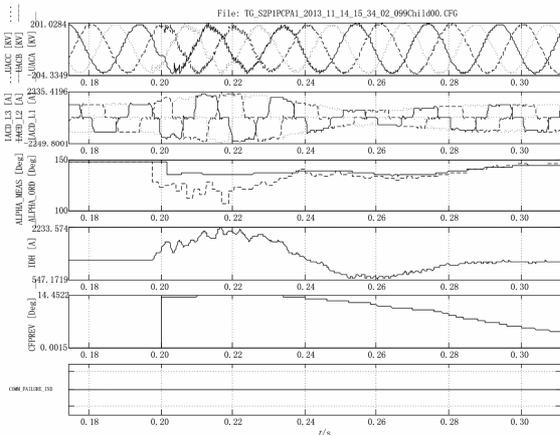


图 6 系统阻抗为 4.372 Ω、投入 CFPREV 下三相 90° 合闸极 1 录波图 (与图 4 同一次试验)

Fig. 6 Record of pole 1 under impedance is 4.372 Ω, breaker closed at 90° and with CFPREV (the same test with Fig. 4)

4 结语

本文对比了实测型、预测型熄弧角控制的优缺点, 并梳理了基于两种控制模式的换相失败响应策略, 其特点如下:

- 1) 实测型的控制精度较高, 鲁棒性较好; 预测型响应速度较快, 但控制精度不如实测型。
- 2) 从控制系统和保护系统的响应情况看, 实测型和预测型方法在实际工程中都采用了多种措施以防止和控制换相失败。

本文着重研究了换相失败预测控制功能 (CFPREV) 在交流母线电压跌落和电压畸变故障下的响应情况, 研究结论如下:

- 1) 当系统发生较为严重的交流母线电压跌落故障时, 无论是否投入 CFPREV 功能, 都未能阻止换相失败。

2) CFPREV 功能能够快速反应交流母线电压跌落故障, CFPREV 动作后会根据交流电压的跌落程度增大 CFPREV 输出, 减小逆变侧触发角, 增大熄弧角, 抑制换相失败引起的直流电流 I_{dH} 迅速增大的情况, 有利于换相失败后直流控制保护系统恢复。

3) 当逆变侧交流系统较弱时, 交流滤波器在电压非过零点合闸引起的电压畸变故障容易引起换相失败。

4) 当逆变侧交流系统较强或交流母线电压畸变程度较小时, CFPREV 功能在预防换相失败上有明显效果。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
LIN Ling-xue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46.
- [3] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Current situation of research on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [4] 于占勋, 朱倩茹, 赵成勇, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)含直流馈入的山东电网 EMTDC 建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 58-64.
YU Zhan-xun, ZHU Qian-ru, ZHAO Cheng-yong, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part one: modeling and simulation of Shandong Grid with DC feed-in system based on EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 58-64.
- [5] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(二)直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 65-71.
LEI Hong-yun, YU Zhan-xun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part two: analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation failure on AC line protections[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 65-71.
- [6] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 交流系统故障对滤波换相换流器的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 144-150.
XU Jia-zhu, LUO Long-fu, LI Ji, et al. Analysis of the impact of AC system faults on filter commutated converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 144-150.
- [7] 李晓华, 刘洋, 蔡泽祥. 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 38-45.
LI Xiao-hua, LIU Yang, CAI Ze-xiang. Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 38-45.
- [8] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等. 一种滤波换相换流器工作机理与稳态模型[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 53-59.
LI Ji, LUO Long-fu, XU Jia-zhu, et al. Operation mechanism and steady state model of filter commutated converter in HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 53-59.
- [9] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17.
YANG Wei-dong, XU Zheng, HAN Zhen-xiang. Special issues and suggestion on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 13-17.
- [10] 何朝荣, 李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 51-57.
HE Chao-rong, LI Xing-yuan. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 51-57.
- [11] 邵震, 王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 42-45.
SHAO Zhen, WANG Bing-yan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45.
- [12] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.
HE Zhao-rong, LI Xing-yuan, JIN Xiao-ming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [13] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 116-120.

- ZHU Tao-xi, NING Wu-jun, OU Kai-jian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 116-120.
- [14] 李思思, 贺兴容, 明志强, 等. 电容换相换流器在预防高压直流换相失败上的特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 88-92.
- LI Si-si, HE Xing-rong, MING Zhi-qiang, et al. Characteristics of capacitor commutated converter in the prevention of HVDC in commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 88-92.
- [15] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统换相失败的分析及处理[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1769-1733.
- ZHU Tao-xi, WANG Chao. Analysis and recovery of commutation failure in Tian Guang HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1769-1733.
- [16] 任震, 欧开健, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二): 避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 6-9.
- REN Zhen, OU Kai-jian, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 2: measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 6-9.
- [17] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114.
- SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114.
- [18] HANSEN A, HAVEMANN H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-1026.
- [19] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.
- CHEN Shu-yong, LI Xin-nian, YU Jun, et al. A method based on the Sin-Cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6.
- [20] 傅闯, 饶宏. 高压直流系统应对换相失败的定关断角控制策略[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 17-22.
- FU Chuang, RAO Hong. The strategy of gamma control over commutation failure for HVDC transmission systems[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2(6): 17-22.

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-04-03

作者简介:

王海军(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护;

黄义隆(1989-), 男, 工学硕士, 主要研究方向为高压直流输电控制保护; E-mail: sw.hyl@163.com

周全(1984-), 男, 工学硕士, 主要研究方向为高压直流输电控制保护。