

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.012

# 高压直流系统改进型最小换相裕度控制策略

肖建民<sup>1</sup>, 宋胜利<sup>2</sup>, 卢亚军<sup>3</sup>, 张云晓<sup>3</sup>, 邹强<sup>1</sup>, 王俊生<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031; 3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 高压直流系统直流侧发生单极故障时, 故障极会引起非故障极直流电流增大, 严重时可能引起非故障极换相失败。在直流电流增大的情况下, 现有最小换相裕度(AMIN)控制无法启动紧急触发来避免换相失败。针对现有 AMIN 控制无法精确计算实时换相裕度面积的问题, 文中根据现有策略的理论推导, 首先分析其未能达到预期效果的影响因素; 然后, 根据分析结果提出考虑换相过程中直流电流变化、电气量采样延时补偿及预测控制的改进型 AMIN 控制策略; 最后, 基于与实际控制保护程序一致的直流工程 PSCAD/EMTDC 模型, 对提出的改进型策略进行验证。结果表明, 改进型策略能有效避免因直流侧单极故障引起的非故障极换相失败。

**关键词:** 直流输电; 换相失败; 最小换相裕度(AMIN)控制; 换相裕度面积; 关断角

中图分类号: TM722

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)06-0082-07

## 0 引言

高压直流系统发生换相失败后, 会进一步加剧电流波动和交流电压畸变<sup>[1-3]</sup>, 继而影响下一次换相过程, 有连续换相失败的风险。尤其在直流集中馈入的重负荷区域<sup>[4-6]</sup>, 单回直流的换相失败可能引起多回直流相继换相失败, 进而影响系统稳定运行。因此, 避免首次换相失败至关重要。引起换相失败的故障主要有换流器故障(丢脉冲、阀臂短路等)、交流故障(电压幅值下降、过零点前移等)及直流电流突增等<sup>[7-9]</sup>。换流器故障只能通过直流保护动作切除故障换流器来减小影响范围。交流故障时, 换相失败预测控制(commutation failure predictive control, CFPREV)<sup>[10-11]</sup>能快速响应, 最小换相裕度(area-minimum, AMIN)控制较易动作, 是否能避免换相失败取决于故障发生时刻和故障严重程度。直流电流突增时, 交流电压无明显故障特征, AMIN 控制只能通过“直流电流增大”条件来启动紧急触发, 动作灵敏度大大降低。试验表明, 现有 AMIN 策略灵敏度不够, 无法达到预期效果。

单纯的直流电流突增多发生在双极运行、一极故障、故障极对非故障极影响的运行工况, 如对极线路故障及后续的故障恢复过程、对极极区故障、对极换流器故障等。文献[12—15]结合实际工程案例, 给出了双极直流线路故障极对非故障极的影

响机理和互感的定量计算方法, 指出互感大小与架空线的几何参数及线路长度有关: 长度越长, 互感越大, 暂态情况故障极对非故障极的影响就越大。 $\pm 500$  kV 直流工程线路一般为 1 000 km 左右; 特高压工程线路一般较长, 昌吉—古泉 $\pm 1 100$  kV 特高压直流工程线路达到 3 200 km。工程试验发现, 双极运行时, 若线路足够长, 一极靠近逆变侧发生直流线路故障时, 会导致非故障极直流电流急剧增大, 容易发生换相失败。

文中以昌吉—古泉 $\pm 1 100$  kV 特高压直流输电工程为背景, 首先分析单极故障引起非故障极换相失败的暂态过程; 其次, 分析现有 AMIN 控制策略工作原理和未达到设计预期效果的影响因素; 然后, 根据影响因素提出改进措施; 最后, 基于 PSCAD/EMTDC 详细直流模型, 对改进措施进行验证。

## 1 非故障极换相失败仿真分析

图 1 为昌吉—古泉特高压直流工程拓扑, 额定电压 $\pm 1 100$  kV, 双极额定输送功率 12 000 MW, 以线路故障为例进行分析。模拟工况为双极功率控制, 全换流器平衡运行, 运行功率 0.1 p.u.。模拟极 2 线路靠近逆变侧发生金属性接地故障, 持续 100 ms。

图 2 为极 2 线路靠近逆变侧发生金属性接地故障时的相关波形, 包括高端换流器(高阀)交流母线电压、极 2 直流电压、极 1 直流电流、极 1 高阀 Y 桥电流、极 1 高阀触发角、极 1 高阀关断角测量值、极 1 换相失败预测输出角和换相失败标志位。

图 2 中,  $t_1$ 时刻发生故障, 极 2 直流电压快速跌落至 0, 由于互感的作用, 极 1 直流电流迅速上升。

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-18

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“提升 LCC 直流输电系统鲁棒性主动抑制换相失败的关键技术研究”(SGJSJY0-JCJS1800115)

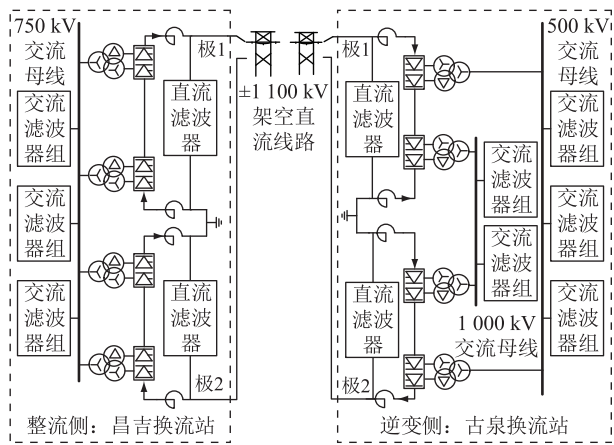


图1 昌吉—古泉特高压直流工程拓扑

Fig.1 Topology of Changji—Guquan UHVDC project

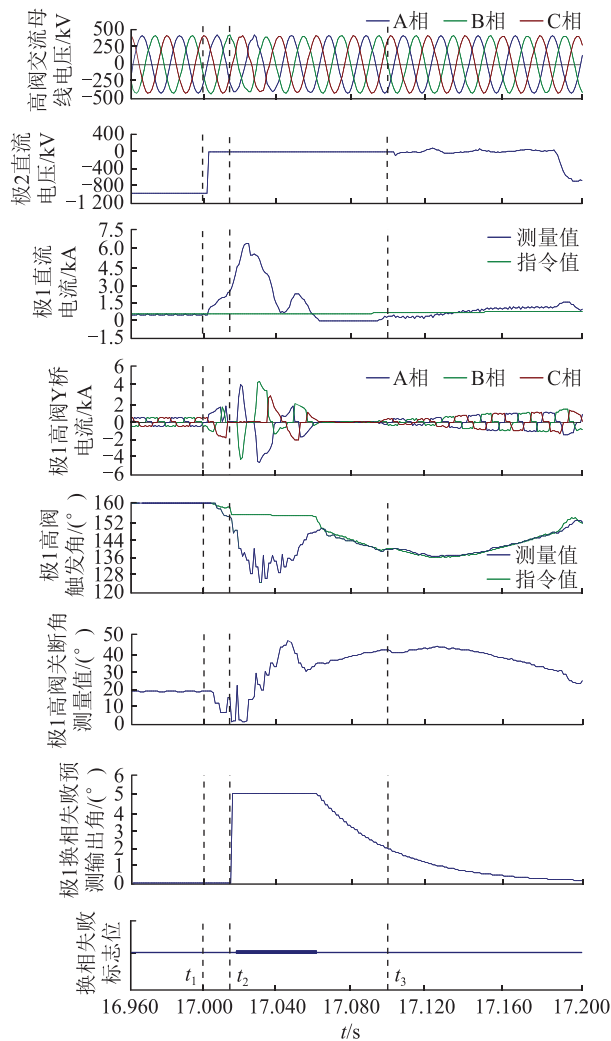


图2 极2线路靠近逆变侧发生金属性接地故障的相关波形

Fig.2 Related waveforms of metallic grounding fault on the pole 2 line close to the inverter station

在  $t_1$ — $t_2$  期间,极1直流电流迅速上升导致换相叠弧角增大,使得关断角不断减小。极1触发角测量值小于指令值,说明实际触发相比指令提前,AMIN 检

测到换相裕度不足而紧急触发,从Y桥电流可看出,发生换相失败。 $t_2$ 时刻,交流电压发生畸变,换相失败预测控制输出角为 $5^\circ$ ,触发角指令相应减小 $5^\circ$ 。在 $t_2$ — $t_3$ 期间,直流电流继续迅速上升,进一步减小关断角,AMIN 紧急触发持续输出,Y桥连续发生换相失败,关断角跌至0。 $t_3$ 时刻,故障消失,极2依靠线路重启逻辑恢复功率。恢复过程中,极1受极2的影响,直流电压、电流波动,未发生换相失败。整个故障过程中,主要故障特征为非故障极直流电流迅速增大,交流电压畸变较小,AMIN 启动紧急触发,未能避免换相失败。

## 2 现有 AMIN 控制策略

如图3所示,以阀5向阀1换相过程为例说明现有控制策略<sup>[16-17]</sup>。

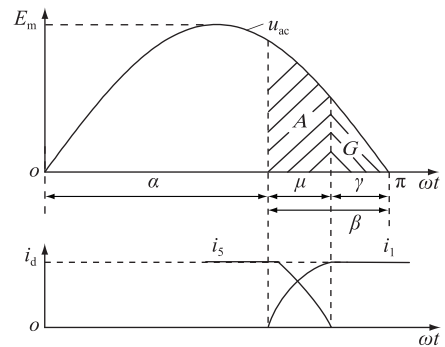


图3 电流换相电压-时间面积

Fig.3 Voltage-time area of current commutation

图3中,  $E_m$  为线电压  $u_{ac}$  的幅值;  $\alpha$  为触发角;  $\mu$  为叠弧角;  $\gamma$  为关断角;  $\beta$  为触发超前角;  $\omega$  为角频率;  $i_1$ ,  $i_5$  分别为对应阀流过的电流;  $i_d$  为直流电流。晶闸管换相过程与电流大小和加在阀两端的反向电压大小有关系,以换相电压对时间的积分得到的电压-时间面积来表征换相过程,即图3中的面积A。以换相电压对熄弧时间的积分得到的电压-时间面积来表征熄弧过程,即面积G(换相裕度面积)。当面积G小于设备定值时,将无法保证晶闸管可靠关断。假设换相过程中直流电流  $i_d$  不变,换相裕度面积为:

$$G_{pu}(t) = \frac{u_{ACpu}(t)}{\sin\omega t} \left( \cos\omega t - \frac{2d_x i_{dpu}(t)}{U_{di0pu}} + 1 \right) \quad (1)$$

式中:  $u_{ACpu}$  为交流电压标幺值;  $i_{dpu}$  为直流电流标幺值;  $U_{di0pu}$  为理想空载直流电压标幺值;  $d_x$  为比换相电抗。式(1)通过时刻  $t$  的电气量计算换相裕度面积,因此式(1)中的电气量精确性决定换相裕度面积计算的准确性,文中从提高电气量精确性方面进行分析。

取额定交流电压下的最小允许关断角  $\gamma_{min}$  与

CFPREV 角度输出  $\theta_{CFPREV}$  之和对应的电压-时间面积作为给定参考值。

$$G_r = \int_{(\pi-\gamma)/\omega}^{\pi/\omega} \sin\omega t dt = 1 - \cos(\gamma_{\min} + \theta_{CFPREV}) \quad (2)$$

AMIN 执行逻辑如图 4 所示,其中,  $V_1 \sim V_6$  为阀两侧交流线电压标么值。通过触发信号选择下一个触发阀和关断阀对应的线电压;主控制器触发角指令减去  $\theta_{CFPREV}$ , 得到最终的触发角指令,并与“电压选择”输出的线电压一起生成下一个触发阀的稳态触发时刻。AMIN 采用式(1)循环计算关断阀的换相裕度面积,与式(2)比较,输出紧急触发时刻。时钟与稳态触发时刻、紧急触发时刻比较,到达任一触发时刻,则下发触发脉冲。下发触发脉冲后,更新下一个触发的阀号,选择新的线电压用于 AMIN 的计算和触发时刻产生。

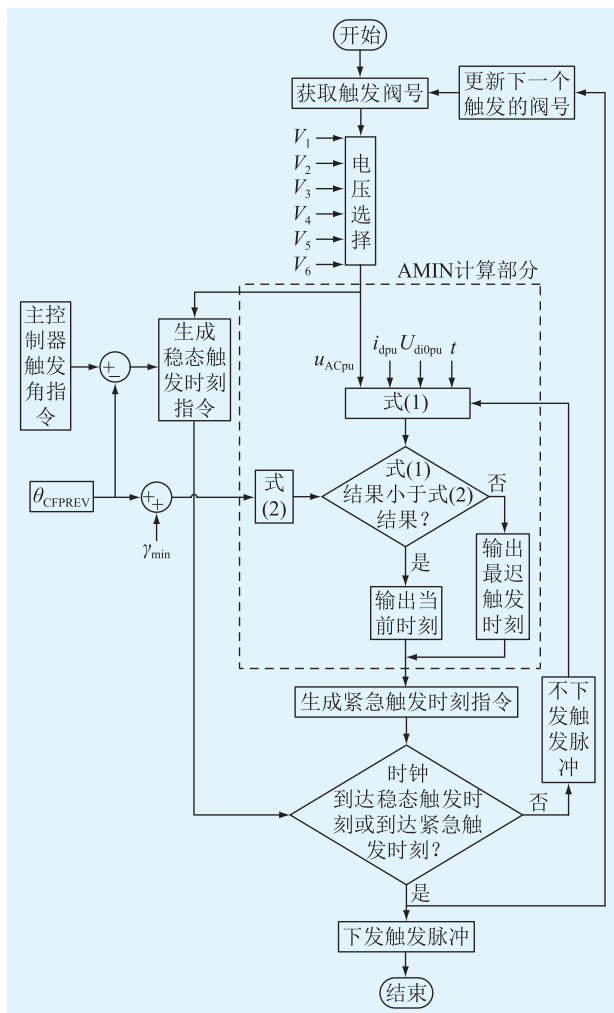


图 4 AMIN 执行逻辑

Fig.4 Execution logic of AMIN

稳态情况下,通过主控制器设计与  $\gamma_{\min}$  定值的配合,AMIN 总是下发最迟触发时刻,实际脉冲触发则依据稳态触发时刻。故障情况下,AMIN 计算结果

提前满足定值,紧急触发能否达到预期效果取决于式(1)的计算准确度和与式(2)的比较。根据以上推导过程,总结如下:

(1) 假设换相过程中  $i_{dpu}$  保持不变,直流电流的快速上升会增加换相叠弧的电压-时间面积,从而迅速减小换相裕度真实换相裕度面积。

(2)  $u_{ACpu}$  和  $i_{dpu}$  的采样值是否为当前时刻一次回路的瞬时值决定了换相裕度面积能否反映当前时刻的面积。

(3) 当前执行周期式(1)的计算结果与式(2)比较,程序计算执行周期为  $75 \mu s$  (电角度为  $1.35^\circ$ )。故障时,由于交流电压、直流电流剧烈变化,当前计算周期计算结果满足定值,下一个执行周期有可能远小于定值。如果等待下一个执行周期进行提前触发,可能无法保证换相裕度,因此可提前预测下一个执行周期的计算结果。

### 3 改进型 AMIN 控制策略

#### 3.1 考虑换相过程中的直流电流变化

定义直流电流变化率为:

$$D_{tpu} = \frac{i_{dpu}(t) - i_{dpu}(t - T_1)}{T_1} \quad (3)$$

式中:  $T_1$  为 AMIN 程序页面执行周期。

假设换相过程中直流电流以固定斜率变化,换相完成时,阀 1 的电流为:

$$i_{1pu} = i_{dpu}(t) + \frac{\mu}{\omega} D_{tpu} \quad (4)$$

结合式(4),则式(1)可表示为:

$$G_{pu}(t) = \frac{u_{ACpu}(t)}{\sin\omega t} \times \left[ \cos\omega t - \frac{2d_x}{U_{di0pu}} \left( i_{dpu}(t) + \frac{\mu}{\omega} D_{tpu} \right) + 1 \right] \quad (5)$$

对比式(1),则式(5)的增加项为  $\mu D_{tpu}/\omega$ 。 $\omega$  保持不变,分别分析  $\mu$ ,  $D_{tpu}$  对换相裕度面积的影响。

##### 3.1.1 $\mu$ 对换相裕度面积的影响

$\mu$  通过式(6)实时计算得到。

$$\mu = \arccos \left( \cos\gamma_{\min} - \frac{2d_x}{U_{di0pu}} i_{dpu}(t) \right) - \gamma_{\min} \quad (6)$$

取  $\gamma_{\min}$  为  $13^\circ$ ,  $d_x$  为 0.1。当  $i_{dpu}(t)$  为 0.1 时,  $\mu$  为  $4.4^\circ$ ;当  $i_{dpu}(t)$  为 0.5 时,  $\mu$  增至  $16^\circ$ ;当  $i_{dpu}$  为 1.0 时,  $\mu$  增至  $26^\circ$ 。随着故障发展,  $i_{dpu}(t)$  进一步增大,  $\mu$  将进一步增加,增加项随之增大,相较于式(1),计算得到的换相裕度面积将更小。

定义图 1 中  $t_1 \sim t_2$  期间的  $D_{tpu}$  为  $D$ 。将式(5)和

式(1)在  $D_{\text{ipu}}$  为  $D$ 、不同  $i_d$  情况下计算得到的换相裕度面积- $\alpha$  曲线进行比较,如图 5 所示。

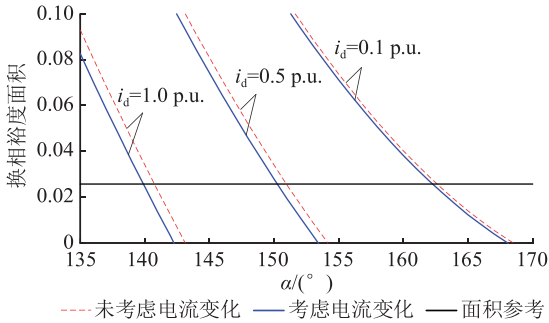


图 5 换相裕度面积- $\alpha$  曲线(不同  $i_d$ )

Fig.5 Commutation margin area- $\alpha$  curve (different  $i_d$ )

由图 5 可知,以达到面积参考为例,式(5)的触发角小于式(1),即能提前判断出换相裕度不足。当  $i_d$  为 1.0 p.u.时,约提前  $1^\circ$  左右。随着故障发展,  $i_d$  持续增大,式(5)触发角将提前更多。

### 3.1.2 $D_{\text{ipu}}$ 对换相裕度面积的影响

图 2 中的极 1 直流电流波形从  $t_2$  时刻至电流最大值对应的时刻,  $D_{\text{ipu}}$  接近  $4D$ 。当  $i_d$  为 0.5 p.u.时,不同  $D_{\text{ipu}}$  对应的换相裕度面积- $\alpha$  曲线对比见图 6。

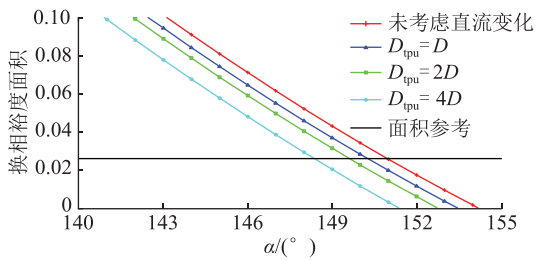


图 6 换相裕度面积- $\alpha$  曲线(不同  $D_{\text{ipu}}$ )

Fig.6 Commutation margin area- $\alpha$  curves (different  $D_{\text{ipu}}$ )

由图 6 可知,  $D_{\text{ipu}}$  越大,考虑直流变化的触发角提前越多。当  $D_{\text{ipu}}$  为  $4D$  时,触发角比未考虑直流变化的触发角提前约  $2.5^\circ$  判断出换相裕度不足。

综合图 5、图 6 可知,初始运行直流电流越大,故障时  $D_{\text{ipu}}$  越大,式(5)的触发角相比式(1)提前的越多,可越早判断出换相裕度不足。

### 3.2 考虑采样延时影响

式(5)中  $u_{\text{ACpu}}$ ,  $i_{\text{dpu}}$  可表示为  $u'_{\text{ACpu}}$ ,  $i'_{\text{dpu}}$ 。

$$u'_{\text{ACpu}}(t) = u_{\text{ACpu}}(t) + [u_{\text{ACpu}}(t) - u_{\text{ACpu}}(t - T_1)] \frac{t_u}{T_1} \quad (7)$$

$$i'_{\text{dpu}}(t) = i_{\text{dpu}}(t) + [i_{\text{dpu}}(t) - i_{\text{dpu}}(t - T_1)] \frac{t_i}{T_1} \quad (8)$$

式中:  $t_u$ ,  $t_i$  分别为电压、电流采样延时。

用当前时刻采样量减去上一执行周期采样得到电压、电流的变化量,预估当前时刻流过阀的电压、电流大小,补偿采样延时造成的影响。实际系统的采样延时包括 A/D 转换延时、采样装置接收和转发数据的通信延时、各装置间时钟异步和程序的不同执行周期引入的误差延时等。工程系统可对各个环节进行理论估算,总的采样延时一般为  $50 \sim 100 \mu\text{s}$ ,实际执行可取中间值。

### 3.3 预测型计算

式(5)中  $u_{\text{ACpu}}$ ,  $i_{\text{dpu}}$  均用下一个执行周期的采样值进行计算。

$$u_{\text{ACpu}}(t + T_1) = u_{\text{ACpu}}(t) + [u_{\text{acpu}}(t) - u_{\text{acpu}}(t - T_1)] \quad (9)$$

$$i_{\text{dpu}}(t + T_1) = i_{\text{dpu}}(t) + [i_{\text{dpu}}(t) - i_{\text{dpu}}(t - T_1)] \quad (10)$$

当交流电压无畸变、 $D_{\text{ipu}}$  较小时,相比原程序,预测型计算最大能提前一个执行周期(电角度为  $1.35^\circ$ )判断出换相裕度是否满足条件。当交流电压畸变严重或  $D_{\text{ipu}}$  较大,能提前电角度则更多。

综合以上改进措施,将式(7)一式(10)代入式(5),并用改进的式(5)代替图 4 中的式(1),得到改进的 AMIN 执行逻辑。

## 4 仿真实验

采用与实际控制保护程序一致的昌吉—古泉直流工程 PSCAD/EMTDC 仿真模型对所提改进型策略进行测试,一次主回路参数采用实际工程参数。模型无 A/D 转换、采样装置接收/转发数据等环节,只考虑仿真步长和程序执行周期的配合误差延时,考虑一个仿真步长 ( $50 \mu\text{s}$ ) 的延时。昌吉—古泉直流工程受端交流电网采用分层结构<sup>[18-19]</sup>,高端换流器接入 525 kV 电网,低端换流器接入 1 050 kV 电网。保持 1 050 kV 电网系统短路容量不变,通过改变 525 kV 电网系统短路比测试改进策略不同强弱交流系统下的效果。表 1 为测试算例工况说明。

表 1 测试算例工况说明  
Table 1 Test case description

算例	短路比	运行功率/p.u.	故障类型
1	5.0	0.1,0.5,1.0	极 2 直流线路近逆变侧接地
2	3.5	0.5	极 2 直流线路近逆变侧接地
3	5.0	0.5	极 2 直流高压母线接地

### 4.1 算例 1

图 7 为运行功率 0.1 p.u.的改进前后波形对比。改进前,17.015 s 时,CFP\_IND 延时置位;发生换相



失败,电流最大上冲至 6.5 kA。改进后,未发生换相失败,电流最大上冲至 4 kA,电流波动大幅减小。对比改进前后触发角和关断角可知,改进后比改进前更早触发,关断角稳定,保证了换相裕度。

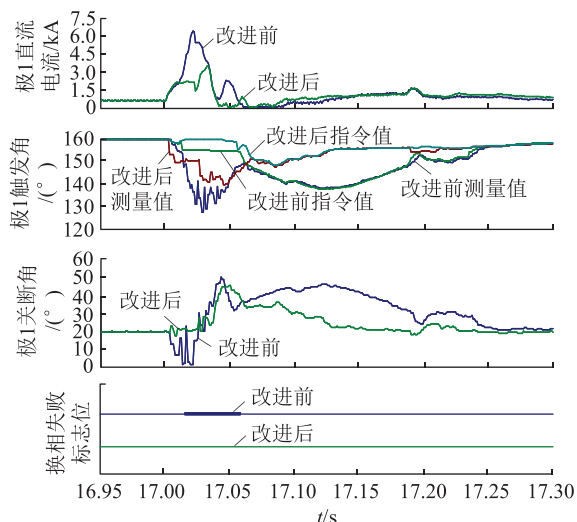


图7 逆变侧故障波形(算例1,运行功率 0.1 p.u.)

Fig.7 The inverter side fault waveforms (case 1, operating power 0.1 p.u.)

运行功率为 0.5 p.u.的改进前后波形对比如图 8 所示。

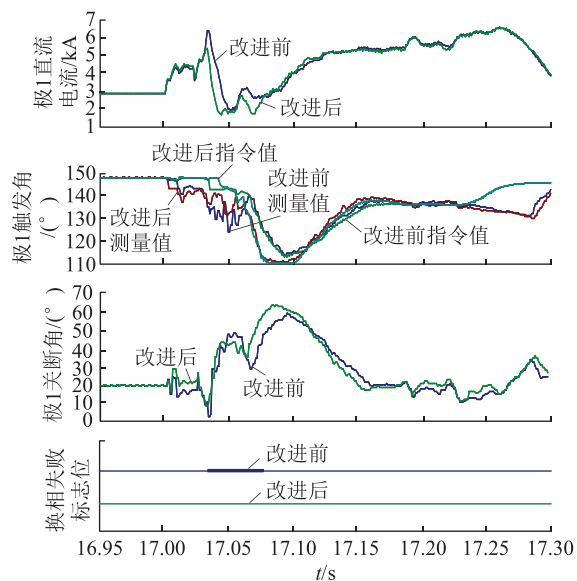


图8 逆变侧故障波形(算例1,运行功率 0.5 p.u.)

Fig.8 The inverter side fault waveforms (case 1, operating power 0.5 p.u.)

图 8 中,改进前 17.015 s 时,CFP\_IND 延时置位;发生换相失败,电流最大上冲至 6 kA。改进后,未发生换相失败,电流最大上冲至 5 kA。对比改进前后触发角和关断角可知,改进后比改进前更早触发,关断角稳定,保证了换相裕度。

图 9 为运行功率 1.0 p.u.的改进前后波形对比。

改进前后,电气量波动基本一致。电流最大上冲至 7.5 kA,均未发生换相失败。对比改进前后触发角和关断角,改进后更早触发,系统未受到较大扰动。

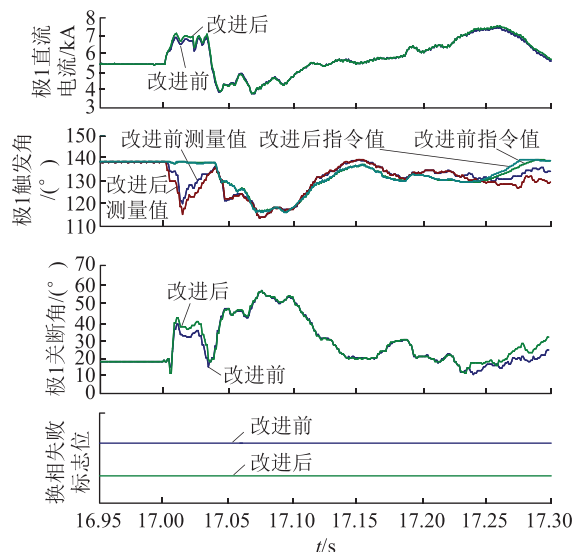


图9 逆变侧故障波形(算例1,运行功率 1.0 p.u.)

Fig.9 The inverter side fault waveforms (case 1, operating power 1.0 p.u.)

#### 4.2 算例 2

改进前后的波形对比如图 10 所示。

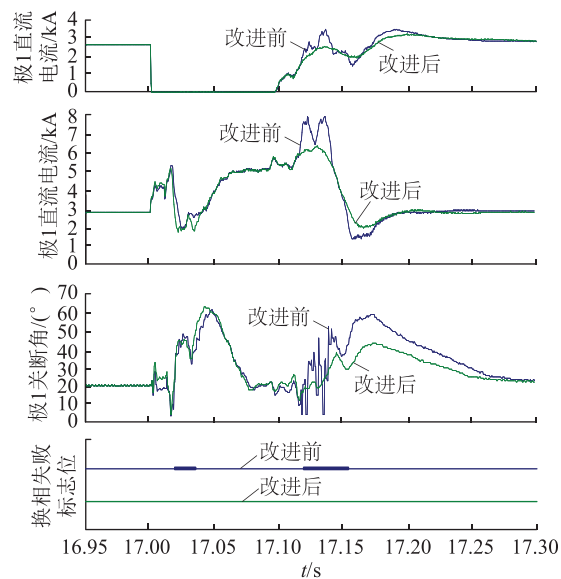


图10 逆变侧故障波形(算例2)

Fig.10 The inverter side fault waveforms (case 2)

改进前,故障期间发生换相失败,电流最大上冲至 6 kA;故障消失后,极 2 功率恢复再次引起非故障极发生换相失败,电流最大上冲至 8 kA。改进后,故障期间和故障消失后的功率恢复,均未发生换相失败;故障期间,电流最大上冲至 6 kA;17.1 s 故障消失后,电流最大上冲至 5 kA,平稳恢复。对比改进前后可知,关断角稳定,保证了换相裕度。

### 4.3 算例 3

图 11 为改进前后的波形对比。改进前,发生换相失败,电流最大上冲至 6 kA。改进后,未发生换相失败,电流最大上冲至 5 kA。对比改进前后关断角可知,关断角稳定,保证了换相裕度。

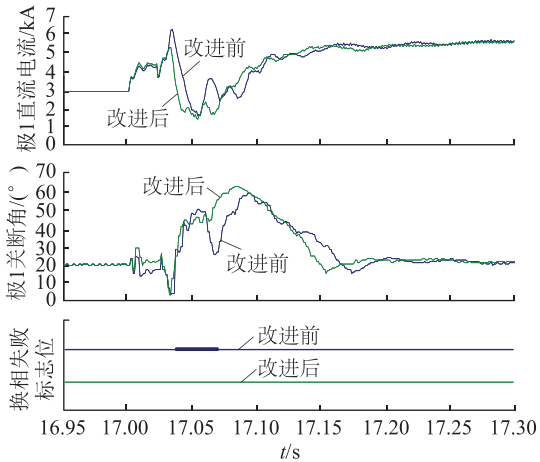


图 11 高压母线故障波形(算例 3)

Fig.11 High voltage bus fault waveforms (case 3)

## 5 结语

文中针对单极故障引起另一极因直流电流剧烈增加而发生换相失败的现象,根据现有 AMIN 控制策略的理论推导,得到其未达到预期效果的原因有:(1) 未考虑换相过程直流电流变化;(2) 未对电压、电流采样值进行延时补偿和差值计算;(3) 未考虑程序执行周期的影响。

针对以上 3 个原因,分别提出了对应的改进措施。通过 5 个不同工况,基于 PSCAD/EMTDC 仿真模型对改进型 AMIN 控制策略进行测试。测试结果表明:(1) 改进型 AMIN 控制能有效避免因单极直流侧故障(如线路故障、高压母线接地故障、单换流器故障等)导致的非故障极换相失败;(2) 改进型 AMIN 控制适用于不同的运行功率点;(3) 改进型 AMIN 控制适用于不同强弱的交流系统。

文中所提改进策略,对直流侧故障的换相失败抑制研究具有借鉴意义,但仍需进行工程适用性系统验证。

### 参考文献:

[1] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京:水利水电出版社,1985:240-260.  
HVDC Transmission Research Group, Zhejiang University. HVDC transmission[M]. Beijing:Water Resources and Hydro-power Press,1985:240-260.

[2] ZHAO Q, WANG S, QIN X, et al. Simulation and analysis of UHV half wavelength and DC hybrid transmission system[J].

Global Energy Interconnection,2018,1(3):366-375.

- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:2-30.  
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing:China Electric Power Press,2004:2-30.
- [4] 李新年,陈树勇,庞广恒,等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):134-140.  
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for east china multi-infeed high-voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.
- [5] 王玉,侯玉强,刘福锁,等. 考虑多直流协调恢复的换相失败预测控制启动值优化方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):85-90.  
WANG Yu, HOU Yuqiang, LIU Fusuo, et al. Optimization method for startup threshold of commutation failure prediction control considering coordinated recovery of multi-infeed HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):85-90.
- [6] 吕思卓,杨滢,郑超,等. 改善多直流馈入系统稳定性的 VDCOL 参数优化[J]. 电力建设,2016,37(9):79-85.  
LYU Sizhuo, YANG Ying, ZHENG Chao, et al. VDCOL parameter optimization to improve multi-infeed HVDC system stability[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9):79-85.
- [7] 阮思焯,徐凯,刘丹,等. 直流输电系统换相失败统计分析及抵御措施建议[J]. 电力系统自动化,2019,43(18):13-17.  
RUAN Siye, XU Kai, LIU Dan, et al. Statistical analysis and suggestions on resistance measures for commutation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18):13-17.
- [8] 汤奕,郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):499-513.  
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2):499-513.
- [9] 李程昊,刘旸,张振安,等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):56-63.  
LI Chenghao, LIU Yang, ZHANG Zhen'an, et al. Analysis of commutation failure in HVDC power transmission system considering prediction control of commutation failure and initial fault angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 56-63.
- [10] 郭春义,赵剑,刘炜,等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(S1):1-10.  
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1):1-10.
- [11] 王海军,黄义隆,周全. 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[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(21):124-130.

- WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21):124-130.
- [12] 王德林,吕鹏飞,阮思焯,等. 特高压直流双极输电线路互感影响扩对策研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4353-4360.
- WANG Delin, LYU Pengfei, RUAN Siye, et al. Effect of mutual inductance between bipolar transmission lines of UHVDC and proposal of countermeasure [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4353-4360.
- [13] 张福轩,邹强,赵森林,等. 特高压直流双极线路间互感影响及控制策略改进[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3547-3552.
- ZHANG Fuxuan, ZOU Qiang, ZHAO Senlin, et al. Effect of mutual inductance between bipolar UHVDC transmission lines and control strategy improvement[J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3547-3552.
- [14] 周全,别睿,涂莉,等.  $\pm 800$  kV 直流线路故障过程中电磁耦合特性与保护研究[J]. 电网技术, 2014, 38(8):2133-2140.
- ZHOU Quan, BIE Rui, TU Li, et al. Research on electromagnetic coupling characteristics during fault process in  $\pm 800$  kV UHVDC transmission line and its protection strategy [J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2133-2140.
- [15] 王亚涛,吴彦维,李俊霞,等. HVDC 中直流线路的互感机理及其对控制系统影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12):28-33.
- WANG Yatao, WU Yanwei, LI Junxia, et al. Mechanism of DC transmission line's mutual inductance in HVDC and its effect on the control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12):28-33.
- [16] 李思思,白仕雄,丁志林,等. 基于换相电流时间面积的换相失败判别方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2):98-102.
- LI Sisi, BAI Shixiong, DING Zhilin, et al. Current-time area method for the identification of commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(2):98-102.
- [17] 彭忠,李少华,李泰,等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17):75-80.
- PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17):75-80.
- [18] 卢东斌,王永平,王振曦,等. 分层接入方式下的特高压直流输电逆变侧最大触发角延迟角控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7):1808-1816.
- LU Dongbin, WANG Yongping, WANG Zhenxi, et al. Inverter maximum alpha control in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1808-1816.
- [19] 王永平,卢东斌,王振曦,等. 适用于分层接入的特高压直流输电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21):59-65.
- WANG Yongping, LU Dongbin, WANG Zhenxi, et al. Control strategies for UHVDC with hierarchical connection mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21):59-65.

作者简介:



肖建民

肖建民(1987),男,硕士,工程师,从事高压直流输电控制保护及电力系统仿真建模、分析工作(E-mail:xiaojm@nrec.com);

宋胜利(1975),男,硕士,高级工程师,从事特高压直流输电技术及工程建设管理工作;

卢亚军(1982),男,硕士,高级工程师,从事特高压直流输电工程成套设计及仿真工作。

### Improved AMIN control strategy of HVDC system

XIAO Jianmin<sup>1</sup>, SONG Shengli<sup>2</sup>, LU Yajun<sup>3</sup>, ZHANG Yunxiao<sup>3</sup>, ZOU Qiang<sup>1</sup>, WANG Junsheng<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** When a unipolar fault occurs on the direct current(DC) side, the DC current of the non-fault pole increases which is caused by the fault pole. In severe cases, commutation failure of the non-fault pole can be caused. When the DC current increases, the existing area-minimum(AMIN) control cannot start an effective emergency trigger at the first time to avoid commutation failure. For the question that the existing strategy cannot accurately calculate real-time commutation margin area, based on theoretical derivation of the existing strategy, the influencing factors that do not achieve the expected effect are analyzed. Then, according to analysis results, improved AMIN control strategy considering DC current change, electric sampling delay compensation and predictive control during commutation is proposed. Finally, based on the PSCAD/EMTDC model which is consistent with actual control and protection procedures, the improved strategy is tested and analyzed. The test results show that the improved strategy can effectively avoid non-fault pole commutation failure caused by the single-pole fault on DC side.

**Keywords:** high voltage direct current(HVDC); commutation failure; area-minimum(AMIN) control; commutation margin area; extinction angle

(编辑 吴楠)