

# 整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败的机理分析

马星, 李凤婷, 尹纯亚, 解超

(可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心  
(新疆大学), 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047)

**摘要:**交直流系统中整流侧换流母线电压恢复会引起直流电流增大,从而导致逆变器换相失败。为了解决该问题,文中首先以 CIGRE HVDC 标准测试系统为例,分析了电压恢复期间逆变器侧控制系统的控制特性,发现由定电流控制切换为定关断角控制瞬间及之后一段时间内,直流电流较大及增速过快而引起电流偏差控制输出较小且快速降低是诱发换相失败的重要原因。其次,提出了一种通过改进定关断角控制器以改善整流侧换流母线电压恢复导致关断角过小的控制方法。最后,在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中利用 CIGRE HVDC 标准测试模型仿真验证了所提方法的有效性,由仿真结果可知该方法能有效抑制由整流侧换流母线电压恢复导致的逆变器换相失败。

**关键词:**换相失败; 电流偏差控制; 直流电流指令值; 高压直流输电; 关断角

**中图分类号:** TM732

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)04-0083-06

## 0 引言

我国能源中心与负荷中心相距较远,具有大容量、远距离输电优势的高压直流输电系统得到广泛应用<sup>[1]</sup>。由于结构复杂,仍存在较多的问题。换相失败是其主要故障之一,成为近期研究的热点<sup>[2-3]</sup>。

目前针对换相失败的研究大多基于逆变侧交直互关系展开<sup>[4-7]</sup>。文献[8]分析了逆变侧交流系统不对称故障引发直流系统连续换相失败的机理,指出故障后实际越前触发角具有周期性波动的特征,极易在系统恢复阶段引发连续换相失败。文献[9]基于实际案例,分析了导致多馈入直流系统同时换相失败的影响因素,并给出了优化措施。文献[10]针对受端交流系统两相故障,分析了过渡电阻和故障时刻对换相电压的影响,并提出了临界电压降的计算方法。文献[11]针对多馈入直流系统,将采用临界多馈入交互作用因子判断换相失败的方法进一步推广到了受端交流系统任意母线。上述研究都基于逆变侧交流系统故障展开,而未考虑整流侧换流母线电压变化对逆变器换相的影响。文献[12]针对多馈出直流系统,推导了关断角与换流母线电压的关系式,指出整流侧换流母线电压升高可能导致逆变器换相失败,但其未考虑直流控制系统的影响。文献[13]推导了整流侧换流母线电压不同程度跌落时的关断角表达式,指出电压恢复会引起直流电流增大导致逆变器关断角减小,严重

时会发生换相失败,并提出了有效的改善方法,但其并未深入研究控制器在电压恢复过程中的控制特性,所提方法也不够完善。

鉴于此,文中以 CIGRE HVDC 标准测试系统为例,研究整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败机理。基于直流系统控制原理分析整流侧换流母线电压恢复过程中控制系统的动作特性,探寻诱发换相失败的原因并提出有效的抑制措施。该方法通过在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中仿真验证。

## 1 换相失败的影响因素

换相结束时,退出导通的阀在反向电压作用期间内未能完全关断,或在反向电压作用期间换相过程未能结束,致使本应关断的阀在正向电压作用下重新导通,这一现象称为换相失败<sup>[14]</sup>。当关断角  $\gamma$  小于临界关断角  $\gamma_{\min}$  时,可认为换相失败<sup>[2]</sup>。考虑换相期间直流电流变化量的关断角表达式为<sup>[15]</sup>:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{2I_d + \Delta I_d}{\sqrt{2}NU_{Ll}}X_{cl}T_l + \cos\beta\right) \quad (1)$$

式中: $U_{Ll}$ ,  $T_l$ ,  $X_{cl}$ ,  $\beta$  分别为逆变侧换流母线电压、换流变压器变比、换相电抗和越前触发角; $N$  为 6 脉动换流器的个数; $I_d$  为直流电流; $\Delta I_d$  为换相期间直流电流变化量。

由式(1)可知, $\gamma$  与多种影响因素有关,这些因素可以划分为电气量( $U_{Ll}$ ,  $I_d$  等)和控制量( $\beta$  等)两类。目前针对换相失败的研究大多基于逆变侧交流故障展开,当故障发生时,电气量变化较控制量

更快<sup>[16]</sup>,  $U_{LI}$  的跌落及  $I_d$  的增大共同导致  $\gamma$  减小。但其忽略了整流侧换流母线电压  $U_{LR}$  的变化,  $I_d$  增大的实质是由直流线路两端电压差引起,  $U_{LR}$  升高引起  $I_d$  增大同样会导致  $\gamma$  减小。

## 2 电压恢复影响关断角的机理

### 2.1 电压跌落时控制系统的响应

CIGRE HVDC 标准测试模型的整流侧控制方式有定最小触发角  $\alpha_{min}$  控制和定电流 (constant current, CC) 控制, 逆变侧有 CC 控制、定关断角 (constant extinction angle, CEA) 控制、电流偏差控制 (current error controller, CEC) 以及低压限流控制 (voltage-dependent current order limiter, VDCOL)<sup>[17-18]</sup>。系统运行过程中, CEA 及 CC 控制器取其中输出较大者投入; 直流电流指令值由 VDCOL 或主控制级提供, 取其中最小值; 当直流电流的实测值小于指令值时, CEC 启动, 电流偏差量乘一个固定系数后作为 CEC 的输出。

根据  $U_{LR}$  跌落程度的不同, 整流及逆变器所采用的控制方式见表 1<sup>[19]</sup>。

表 1 CIGRE HVDC 标准测试模型控制方式  
Table 1 Control mode of CIGRE HVDC benchmark model

电压跌落程度	整流器控制方式	逆变器控制方式
正常运行	CC 控制	CEA 控制
轻微跌落	CC 控制	CEA 控制
较严重跌落	定 $\alpha_{min}$ 控制	CEC
严重跌落	定 $\alpha_{min}$ 控制	VDCOL
极严重跌落	定 $\alpha_{min}$ 控制	CC 控制

当  $U_{LR}$  严重跌落后, 整流侧定  $\alpha_{min}$  控制, 逆变侧 VDCOL 投入, 此时直流电压  $U_d$  越小, 电压恢复时逆变器越易发生换相失败<sup>[13]</sup>。因此, 取  $U_d = U_1$  (未发生换相失败) 及  $U_d = U_2$  (发生换相失败) 2 点分析  $U_{LR}$  恢复时直流系统电气量及控制量的变化特性, 其中  $U_2 < U_1$ 。

### 2.2 电压恢复导致逆变器换相失败的机理

$U_{LR}$  跌落及恢复时,  $\beta$  与  $\gamma$  波形如图 1 所示。可知,  $\beta$  与  $\gamma$  因  $U_{LR}$  在  $t=t_0$  时刻的跌落而增大, 在  $t_1$  时刻达其稳态值, 之后又因  $U_{LR}$  在  $t=t_2$  时刻的恢复而减小,  $\gamma$  在  $t_3$  时刻达其最小值。在  $t_2$  至  $t_3$  时间段内,  $\gamma$  随  $\beta$  减小。在电压恢复初期,  $\gamma - \gamma_{min}$  较大, 换相裕度较大。但在电压恢复后期, 随着  $\gamma$  逐渐减小直至达到其最小值,  $\gamma - \gamma_{min}$  较小, 换相裕度较小, 结合式 (1) 可知, 若此时  $I_d$  及  $\Delta I_d$  过大, 换相所受影响较电压恢复初期更大。

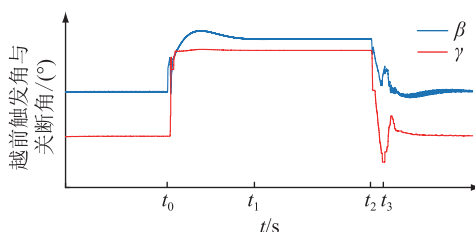
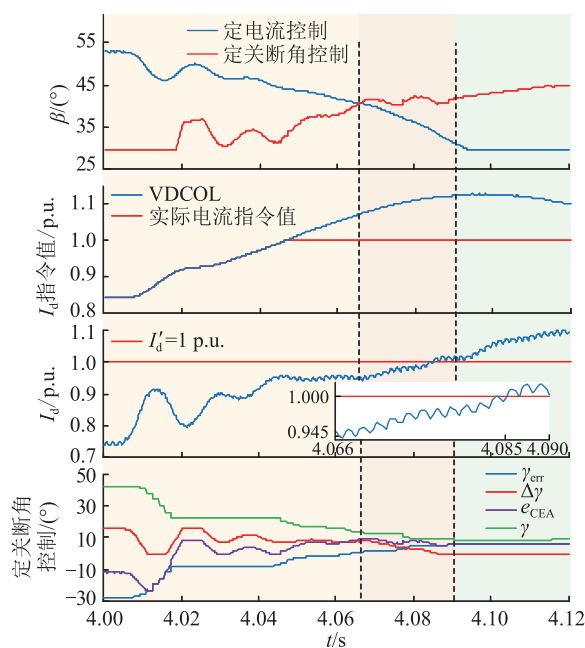


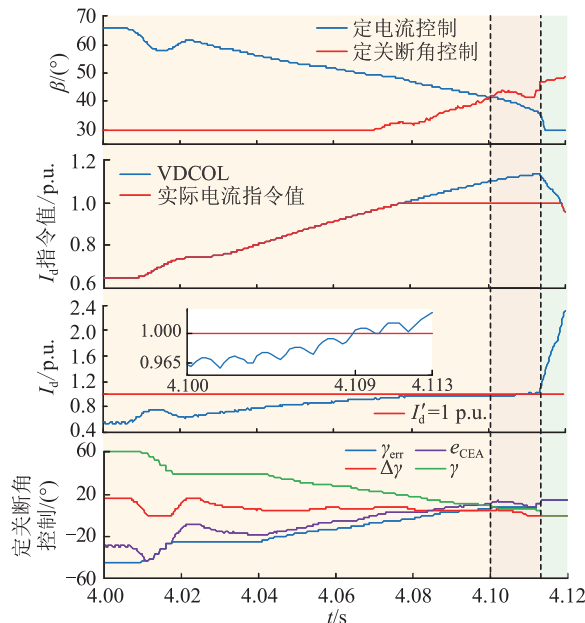
图 1 超前触发角与关断角波形

Fig.1 Waveforms of the leading firing angle and extinction angle

当  $U_{LR}$  恢复时, 各电气量及控制量波形见图 2。



(a) 案例 1:  $U_d = U_1$



(b) 案例 2:  $U_d = U_2$

图 2 电压恢复时电气量及控制量波形  
Fig.2 Waveforms of electric quantity and control quantity during voltage recovery

图2中,  $U_{LR}$  于  $t=4$  s 开始恢复, 以逆变侧控制方式发生切换及  $\gamma$  达其最小值为节点将  $U_{LR}$  恢复过程分为3个部分:  $\Delta\gamma$  为 CEC 输出;  $\gamma_{err}$  为实测关断角偏差;  $e_{CEA}$  为其二者之和。

由图2可知: 案例1中, 电压恢复时, 逆变侧 CC 控制输出不断降低, 控制方式于  $t=4.066$  s 由 CC 控制切换为 CEA 控制, 此时  $I_d$  指令值由主控级提供为 1 p.u., 且  $I_d=0.945$  p.u., 于  $t=4.085$  s 达到 1 p.u.; 案例2中, 逆变侧控制方式于  $t=4.1$  s 由 CC 控制切换为 CEA 控制, 此时  $I_d$  指令值由主控级提供为 1 p.u., 且  $I_d=0.965$  p.u., 于  $t=4.109$  s 达到 1 p.u.。值得注意的是, 逆变侧控制方式发生切换后, 案例2中  $\gamma$  达其最小值所用时间较案例1中更短, CEA 控制输入及输出量波形如图3所示。

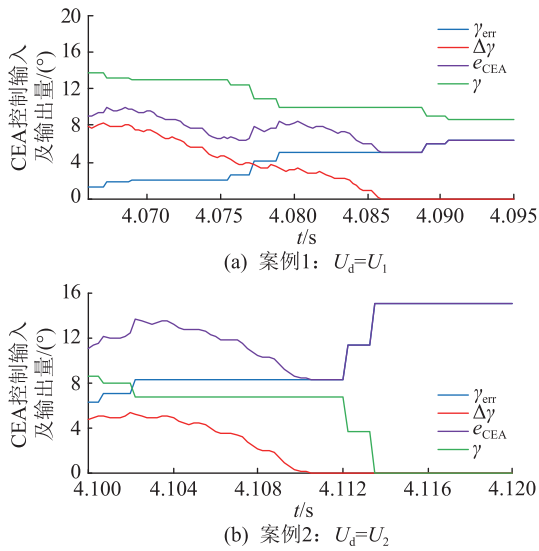


图3 定关断角控制输入及输出量波形

Fig.3 Input and output waveforms of constant extinction angle control

案例1中: 逆变侧控制方式切换为 CEA 控制时,  $\gamma_{err}=1^\circ$ ,  $\Delta\gamma=8^\circ$ ,  $e_{CEA}=9^\circ$ ,  $\gamma=14^\circ$ 。随后  $\Delta\gamma$  在  $t=4.086$  s 减小为零, 历经 0.02 s。

案例2中: 逆变侧控制方式切换为 CEA 控制时,  $\gamma_{err}=6^\circ$ ,  $\Delta\gamma=5^\circ$ ,  $e_{CEA}=11^\circ$ ,  $\gamma=9^\circ$ 。随后  $\Delta\gamma$  在  $t=4.11$  s 减小为零, 历经 0.01 s。

由图3可知, 逆变侧控制方式切换为 CEA 控制后,  $\Delta\gamma$  随  $I_d$  增大而减小, 而控制系统对于  $\gamma$  的采集配有最小值保持环节, 导致  $\gamma_{err}$  阶段性保持不变, 从而使得  $e_{CEA}$  减小,  $\beta$  减小<sup>[20]</sup>。又有  $\beta=\gamma+\mu$ ,  $\mu$  为逆变器换相角。当  $U_{Li}$  不变时,  $\mu$  与  $I_d$  正相关<sup>[21]</sup>。因此  $\beta$  的减小及  $\mu$  随  $I_d$  的增大共同导致  $\gamma$  减小。由于逆变侧控制方式切换为 CEA 控制时, 案例2中  $I_d$  较案例1中更大且增速更快, 引起  $\Delta\gamma$  较小且迅速降低, 导致  $\gamma < \gamma_{min}$ , 逆变器于 4.113 s 换相失败。

综上所述,  $U_{LR}$  恢复导致逆变器换相失败时, 直流系统电气量及控制量的变化特性如下:

(1) 逆变侧控制方式由 CC 控制切换至 CEA 控制时,  $I_d$  较大, 而  $I_d$  指令值由主控级提供为 1 p.u., 使得  $\Delta\gamma$  较小。

(2) 逆变侧控制方式切换为 CEA 控制后,  $I_d$  增速较快, 使得  $\Delta\gamma$  迅速降低。由于控制系统对  $\gamma$  的采集配有最小值保持环节, 使得  $\gamma_{err}$  不变, 故  $e_{CEA}$  随  $\Delta\gamma$  减小,  $\beta$  减小。由于  $\beta=\mu+\gamma$ ,  $\mu$  与  $I_d$  正相关, 故  $\gamma$  随  $\beta$  减小,  $\gamma < \gamma_{min}$ , 逆变器换相失败。

### 3 控制器改进措施

由第2章分析可知,  $U_{LR}$  恢复时,  $I_d$  的变化特性是影响逆变器换相的重要因素。 $I_d$  的变化特性与逆变侧 CC 及 CEA 控制有关。

因此, 可通过改善 VDCOL 及 CEC 控制特性以抑制  $U_{LR}$  恢复时逆变器换相失败的发生。由于直接改变 VDCOL 及 CEC 的参数势必会影响逆变侧控制系统在其他工况下的响应, 因此文中提出了一种在 CEC 动作期间对 CEA 输入进行补偿, 以抑制  $U_{LR}$  恢复时  $I_d$  增速较快导致逆变器换相失败的方法。其结构框图如图4所示。

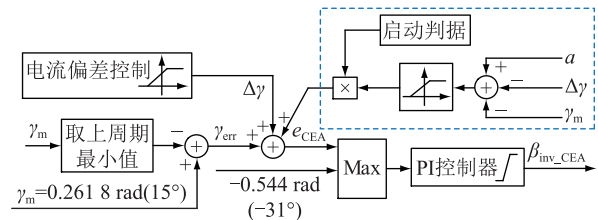


图4 改进的定关断角控制

Fig.4 Improved constant extinction angle control

图4中, 蓝色虚线框内为文中所提的改进装置;  $a$  为改进装置退出阈值。CEC 动作期间  $\gamma$  的采集配有最小值保持环节, 会阶段性保持不变, 而  $\beta$  随  $\Delta\gamma$  减小, 使得  $\gamma$  有减小趋势。可认为  $\gamma$  与  $\Delta\gamma$  正相关, 可用  $\Delta\gamma$  的升降表示短期内  $\gamma$  的变化趋势。可得到该改进装置的投入条件为:

(1) 接收到整流侧的启动信号 ( $U_{LR}$  低于设置的启动阈值  $b$ );

(2)  $\gamma_m + \Delta\gamma \leq c$ ,  $c$  为改进装置的启动阈值;

当该改进装置同时满足投入条件(1)和(2)后, 将计算后得到的差值输入斜坡函数, 函数关系如图5所示。

图5中,  $d$  为改进装置的输出值, 即补偿量。  $d$  随输入值增大, 即  $\gamma_m + \Delta\gamma$  越小, 补偿量越大。当  $\gamma_m + \Delta\gamma \geq a$  时, 退出该装置。

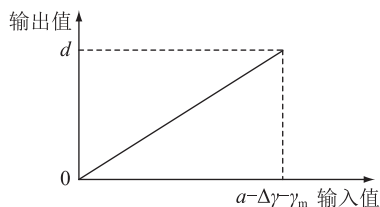
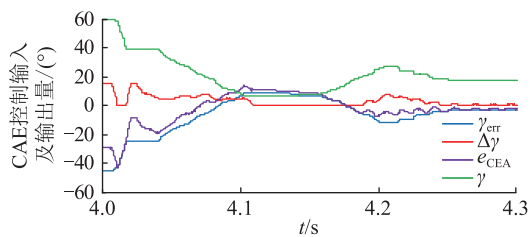


图5 改进装置中的斜坡函数关系

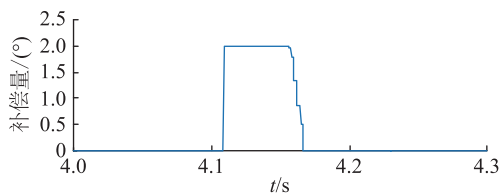
Fig.5 Slope function diagram in improved device

### 4 仿真验证

文中采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件利用 CIGRE HVDC 标准测试模型进行仿真验证。设置  $t_0=2\text{ s}$ ,  $t_2=4\text{ s}$ ,  $U_{\text{LR}}$  跌落时  $U_d=U_2=0.5\text{ p.u.}$ 。系统额定运行时,  $\gamma=15^\circ$ , 为能有效抑制换相失败并在改进装置切出时减少系统的波动, 取  $a=10^\circ$ 。设置改进装置启动阈值  $b=0.6\text{ p.u.}$  [13]。文中以  $\gamma_{\text{min}}=7^\circ$  作为换相失败判据, 预留裕度取  $c=8^\circ$ ;  $d=a-c=2^\circ$  为改进装置最大补偿量。逆变侧控制系统新增改进装置后, CEA 控制输入输出及补偿量波形如图 6 所示,  $U_d=U_2$ 。



(a) 定关断角控制输入及输出量波形



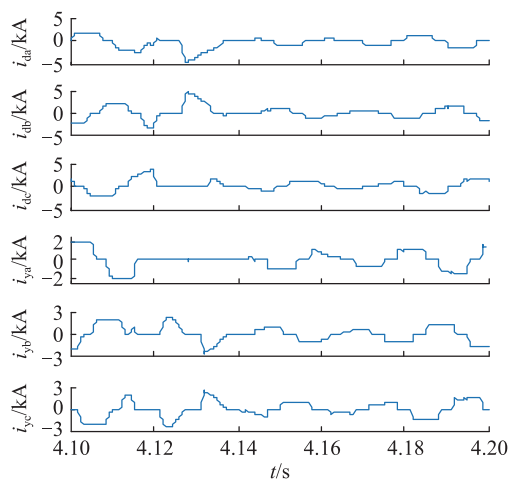
(b) 补偿量波形

图6 定关断角控制输入输出及补偿量波形

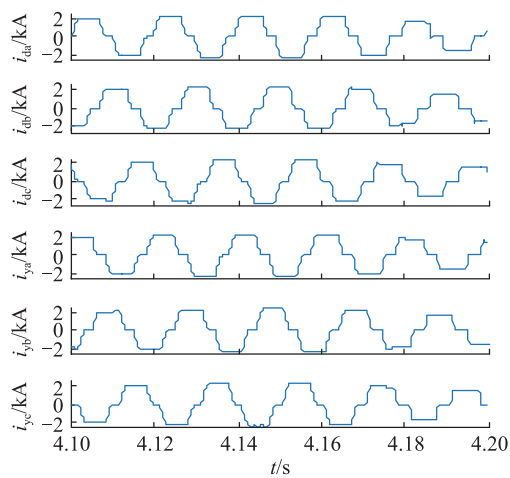
Fig.6 Waveforms of input and output of constant extinction angle control and compensation

由图 6 可知, 不等式  $\gamma_m+\Delta\gamma\leq 8^\circ$  于 4.11 s 成立, 随后改进装置投入, 补偿值为  $2^\circ$ , 持续至 4.16 s 后逐步降低至 0。改进装置切出后, 系统在原控制系统作用下趋向额定运行点。

逆变侧控制系统改进前后换流变压器阀侧电流及  $\gamma$  波形如图 7、8 所示,  $U_d=U_2$ 。图 7 中,  $i_{\text{da}}, i_{\text{db}}, i_{\text{dc}}$  为 Y/ $\Delta$  接线方式换流变压器阀侧三相电流;  $i_{\text{ya}}, i_{\text{yb}}, i_{\text{yc}}$  为 Y/Y 接线方式换流变压器阀侧三相电流。由图 8 可知, 逆变侧控制系统改进前, 换流变压器阀侧电流满足换相失败特征, 且  $\gamma<\gamma_{\text{min}}$ , 逆变器换相失败 [7]。控制系统改进后逆变器未发生换相失败。



(a) 改进前



(b) 改进后

图7 阀侧电流波形

Fig.7 Waveforms of valve-side current

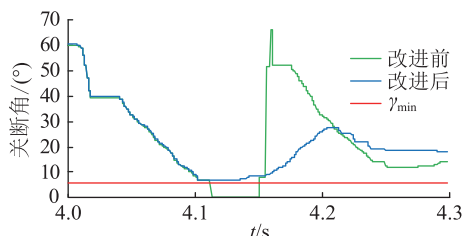


图8 关断角波形

Fig.8 Waveforms of extinction angle

由上述仿真可知, 改进装置能够有效抑制由  $U_{\text{LR}}$  恢复导致的逆变器换相失败。另外, 由于改进装置需将整流侧的信息传输至逆变站, 而直流线路一般较长, 信号传输存在延时, 通常耗时  $20\sim 30\text{ ms}$  [17] (当直流线路为 1 000 km 时)。为验证通信延时对改进装置有效性的影响, 在仿真模型中增加模拟通信延时环节, 延时时长取 25 ms, 分别对控制器改进前、控制器改进后、控制器改进后且考虑通信延时 3 种情况进行不同工况下的仿真测试, 仿真结果表明通信延时对改进装置影响较小。

## 5 结论

文中以 CIGRE HVDC 标准测试系统为例,针对整流侧换流母线电压恢复可能导致逆变器换相失败的现象,分析其机理并提出了有效的抑制措施,得出以下结论:

(1) 电压恢复后期,逆变侧控制方式由定电流控制切换为定关断角控制后,电流偏差控制输出随直流电流增大而减小,而控制系统对于关断角的采集配有最小值保持环节,导致定关断角控制输出随电流偏差控制输出减小,关断角亦减小,具有换相失败风险。

(2) 电压恢复时,直流电流变化特性是诱发逆变器换相失败的重要原因。逆变侧控制方式由定电流控制切换为定关断角控制时,直流电流较大,或在随后一段时间内,直流电流增速过快是导致逆变器换相失败的 2 个主要因素。

(3) 针对整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败提出了一种抑制措施。在不改变原控制系统参数的基础上增加了改进装置,仿真验证了控制系统改进后的有效性。

由于文中所提改进方法需将整流侧信息传输至逆变站,若通信通道发生故障,则该方法失效。此外,该方法仅适用于实测型关断角控制,而针对预测型关断角控制的改进还需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1893-1904, 2205.
- [2] 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):499-513,647.  
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2):499-513, 647.
- [3] 冯长有,姚伟锋,江叶峰,等. 特高压直流运行风险评估技术研究及应用[J]. 智慧电力,2020,48(7):30-37.  
FENG Changyou, YAO Weifeng, JIANG Yefeng, et al. Study and application of UHVDC operation risk evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(7):30-37.
- [4] 刘席洋,王增平,乔鑫,等. 交直流混联电网换相失败分类及抑制措施研究综述[J]. 智慧电力,2020,48(6):1-7,34.  
LIU Xiyang, WANG Zengping, QIAO Xin, et al. Review on classification and mitigation measures of commutation failures in AC-DC hybrid power grids[J]. Smart Power, 2020, 48(6):1-7, 34.

- [5] 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.
- [6] 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):13-17,34.  
RUAN Siye, XU Kai, LIU Dan, et al. Statistical analysis and suggestions on resistance measures for commutation failures of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18):13-17, 34.
- [7] 陈光侵,傅闯,张勇军. 基于阀电流特征的高压直流换相失败检测方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):86-91,119.  
CHEN Guangqin, FU Chuang, ZHANG Yongjun. Detection method of HVDC commutation failure based on characteristic of valve current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23):86-91, 119.
- [8] 曾亮,李永丽,张云柯,等. 逆变侧交流系统不对称故障引发 HVDC 系统连续换相失败的机理及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(11):3159-3168.  
ZENG Liang, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Research on mechanism and control strategy of continuous commutation failures in HVDC system caused by asymmetrical fault in inverter-side AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11):3159-3168.
- [9] 王晶,梁志峰,江木,等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):141-146.  
WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu, et al. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4):141-146.
- [10] SONG J Z, LI Y L, ZHANG Y K, et al. Influence of transition resistance and fault moment on DC system commutation process caused by two-phase fault of AC system[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16):1306-1312.
- [11] SHAO Y, TANG Y. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1):646-653.
- [12] 尹纯亚,李凤婷,宋新甫,等. 多馈出直流系统换相失败快速判别方法[J]. 电网技术,2019,43(10):3459-3465.  
YIN Chunya, LI Fengting, SONG Xinfu, et al. A fast detection method of commutation failure in multi-outfeed DC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3459-3465.
- [13] 马星,李凤婷,尹纯亚. 整流侧换流母线电压恢复对逆变器换相的影响[J]. 电网技术,2020,44(8):2950-2960.  
MA Xing, LI Fengting, YIN Chunya. Impact of voltage restoration of commutation bus on rectifier side on commutation of inverters[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):2950-



- 2960.
- [14] 张勇军. 高压直流输电原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2012.  
ZHANG Yongjun. High voltage direct current transmission; theory and practice [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [15] 周博昊,李凤婷,宋新甫,等. 基于直流电流变化量的换相失败预测判别与控制系统优化[J]. 电网技术,2019,43(10):3497-3504.  
ZHOU Bohao, LI Fengting, SONG Xinfu, et al. Commutation failure prediction and control system optimization based on DC current variation [J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3497-3504.
- [16] LIU L, LIN S, SUN P Y, et al. A calculation method of pseudo extinction angle for commutation failure mitigation in HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2):777-779.
- [17] 李瑞鹏,李永丽,陈晓龙. 一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(17):5029-5042,5300.  
LI Ruipeng, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A control method for suppressing the continuous commutation failure of HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17):5029-5042,5300.
- [18] 袁阳,卫志农,王华伟,等. 基于直流电流预测控制的换相失败预防方法[J]. 电网技术,2014,38(3):565-570.  
YUAN Yang, WEI Zhinong, WANG Huawei, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure [J]. Power System Technology, 2014, 38(3):565-570.
- [19] 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,2004:61-66.  
XU Zheng. Dynamic analysis of AC/DC power systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2004:61-66.
- [20] 刘磊,林圣,刘健,等. 控制器交互不当引发后续换相失败的机理分析[J]. 电网技术,2019,43(10):3562-3568.  
LIU Lei, LIN Sheng, LIU Jian, et al. Mechanism analysis of subsequent commutation failures caused by improper interaction of controllers [J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3562-3568.
- [21] 夏海涛,周小平,洪乐荣,等. 一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4345-4356.  
XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, HONG Lerong, et al. An adaptive current deviation control method for suppressing following commutation failures [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15):4345-4356.

作者简介:



马星

马星(1996),男,硕士在读,研究方向为交直流系统稳定与控制(E-mail:maxemoji@163.com);

李凤婷(1965),女,博士,教授,研究方向为电力系统运行控制与继电保护;

尹纯亚(1994),男,博士在读,研究方向为交直流系统稳定与控制。

### Mechanism analysis of inverter commutation failure caused by voltage recovery of commutation bus at rectifier side

MA Xing, LI Fengting, YIN Chunya, XIE Chao

(Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology (Xinjiang University), Ministry of Education, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The voltage recovery of commutation bus on the rectifier side in AC/DC system always leads to the increases of DC current, thus resulting in the inverter commutation failure. In order to solve this problem, the CIGRE HVDC benchmark model is firstly taken as an example to analyze the control characteristics of control system on the inverter side during voltage recovery. The main reason of commutation failure is that the value of output current error control is small and rapidly reduces due to the large and fast increase of DC current after the control mode is switched from constant current control to constant extinction angle control. The extinction angle is small and always affected by the voltage recovery of commutation bus on the rectifier side, so that a control method is proposed to increase the extinction angle by improving the current error controller. Finally, the CIGRE HVDC benchmark model is used in PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation software to verify the effectiveness of the proposed method. The simulation results show that the proposed method effectively suppresses the commutation failure caused by the voltage recovery of commutation bus on the rectifier side.

**Keywords:** commutation failure; current error controller; DC current order value; high voltage direct current; extinction angle

(编辑 李栋)