

基于谐波电压补偿的混合直流连续换相失败抑制策略

何晓峰¹, 李成翔^{2,3}, 夏成军², 程韧俐¹, 姚文峰³, 黄东启³

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要:针对混合直流发生连续换相失败的现象,首先对直流换相过程和连续换相失败进行了分析,确定了该试验工况下谐波是直流在故障恢复期间发生连续换相失败的原因之一。接着基于含模块化多电平柔性直流输电(MMC-HVDC)的多馈入直流输电系统仿真模型,提出抑制直流连续换相失败的策略,通过对多条常规高压直流输电(LCC-HVDC)恢复期间逆变侧换流母线谐波电压的检测,在MMC-HVDC逆变侧的无功功率控制环节附加上谐波电压补偿分量,可提高恢复期间MMC-HVDC对交流系统的无功功率支撑,减少谐波的影响,从而抑制连续换相失败的发生。最后基于PSCAD/EMTDC平台仿真验证了该换相失败抑制策略的有效性。

关键词:多馈入直流输电系统;模块化多电平柔性直流输电;常规高压直流输电;谐波;连续换相失败

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0112-06

0 引言

我国的能源分布具有不均衡、区域差异大等特点,而且负荷中心通常远离能源中心,直流输电在大容量远距离输电及区域电网互联等领域具有一定的优势^[1-5]。目前国内南方电网、华东电网已经形成了多条常规高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)和模块化多电平柔性直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)馈入同一交流系统的雏形^[6-7]。南方电网利用鲁西背靠背直流输电工程来实现云南电网与南方电网主网的异步联网,提高对电网事故影响的可控性^[8-9]。未来随着乌东德混合多端直流工程的投产,在珠三角地区将会出现MMC-HVDC和LCC-HVDC接入相邻落点的场景。

针对直流连续换相失败的研究,文献[10]通过分析得出了谐波是LCC-HVDC在故障切除后发生连续换相失败的原因,但没有给出抑制连续换相失败的方法。对于混合直流输电系统,文献[11-15]提出将柔性直流引入到多馈入直流输电系统中,用以改善整个系统的稳定性,并在VSC-HVDC稳态运行点附近近似估算其等效阻抗,进行系统阻抗阵计算并评估VSC-HVDC接入后对有效短路比的影响,但该研究是在稳态情况下求得的交流系统等效强度,没有对故障情况下的混合直流系统的稳定性进行验证。

收稿日期:2019-01-11;修回日期:2019-03-13

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(090000K-K52170161)

针对混合直流连续换相失败抑制策略的研究,文献[16]提出了通过提升并联混合直流中VSC-HVDC逆变侧换流母线电压来抑制LCC-HVDC换相失败的发生。文献[17]分析了交流系统故障情况下STATCOM对直流逆变站母线电压和直流功率的影响,并且提出了利用STATCOM降低LCC-HVDC换相失败概率的方法。文献[18-20]研究了短路故障下VSC-HVDC与LCC-HVDC的故障恢复特性,证明了VSC-HVDC在一定程度上可以减少LCC-HVDC的故障恢复时间,改善LCC-HVDC的恢复特性,但没有考虑应对恢复过程中可能发生连续换相失败。

文中对含MMC-HVDC的多馈入直流输电系统连续换相失败进行了分析,确定了谐波是故障恢复期间直流发生连续换相失败的原因之一,提出了基于谐波电压补偿的混合直流连续换相失败抑制策略,在PSCAD/EMTDC平台上验证了相同工况下该连续换相失败抑制策略的有效性,增强了含MMC-HVDC的多馈入直流输电系统运行的可靠性与稳定性。

1 连续换相失败分析

1.1 换相过程分析

图1为LCC-HVDC 6脉动逆变器原理图, V_{T1} — V_{T6} 为6个阀臂,数字1—6表示阀臂的导通顺序,图2以阀 V_{T4} 向阀 V_{T6} 的换相过程为例来说明逆变器换相过程。在只考虑基波电压的情况下:

$$U_{ab} = \sqrt{2} U_L \sin(\omega t) = -2X_c \frac{di_4}{d(\omega t)} \quad (1)$$

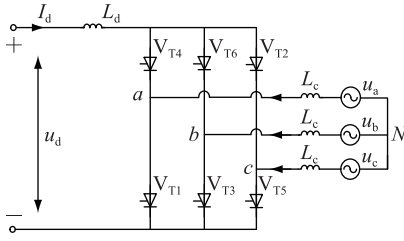


图1 6脉动逆变器原理

Fig.1 Six schematic diagram of pulsating inverter

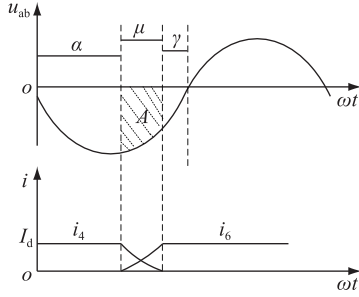


图2 逆变器换相过程

Fig.2 Diagram of inverter phase change process

式中: U_L 为交流线电压的有效值。在换相过程中流过阀 V_{T4} 的电流由 I_d 降为 0, 对式(1)左右两边进行积分可得阀在正常工况下完成换相所需的临界换相电压时间面积^[16]:

$$A_{\min} = - \int_{\alpha}^{\pi-\gamma} - 2X_c \frac{di_4}{d(\omega t)} d(\omega t) = 2I_d X_c \quad (2)$$

由式(2)可知换相过程所需的换相电压时间面积是由 I_d 决定的, 因为直流侧有一个较大的平波电抗器 L_d , I_d 可认为恒定, 所以换相所需的是固定的。在 $\omega t_2 = \alpha + \mu$ 时刻, 阀 V_{T4} 退出导通后仍需要一定时间完成载流子复合和建立 PN 结的过程以恢复其正向阻断能力, 这一过程所需时间用固有极限关断角 γ_{\min} 表示。如果直流自身故障或交流系统故障导致 γ 小于 γ_{\min} , V_{T4} 尚未恢复正向阻断能力, 则在过了自然换相点后加在 V_{T4} 上的电压由负变正, 导致 V_{T4} 不加触发脉冲而再次导通, 而 V_{T6} 承受反向电压而被迫关断, 就会发生换相失败。

1.2 谐波对逆变器换相影响分析

系统在故障恢复期间, 随着有功功率传输的恢复, LCC-HVDC 对无功功率的需求增大, 而且断路器开断、直流电流上升引起换流变压器饱和、大量电力电子元件的异常运行等都会导致谐波的产生, 此时换流母线电压不再是标准的正弦波。考虑谐波的影响, 线电压可表示为:

$$U_{ab} = \sqrt{2} U_L \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N \sqrt{2} U_{Ln} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3)$$

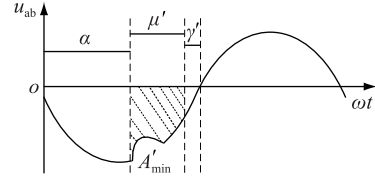


图3 考虑谐波的逆变器换相过程分析

Fig.3 Analysis of phase change process of inverter considering harmonics

$$A' = - \int_{\alpha}^{\pi-\gamma'} \left[\sqrt{2} U_L \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N \sqrt{2} U_{Ln} \sin(n\omega t + \varphi_n) \right] d(\omega t) \quad (4)$$

在 $\omega t_2 = \alpha + \mu$ 时刻, 谐波电压分量使换流母线电压畸变, μ 增加至 μ' 使得在 $\omega t'_2 = \alpha + \mu'$ 时刻最小换相面积 $A'_{\min} = A_{\min}$, 如果 $\omega t'_2$ 过大导致关断角 $\gamma = \pi - \omega t_2$ 小于固有极限关断角 γ_{\min} , 将导致换相失败。

n 次谐波的换相时间面积为:

$$A_n = - \int_{\alpha}^{\pi-\gamma'} [\sqrt{2} U_{Ln} \sin(n\omega t + \varphi_n)] d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_{Ln}}{n} \{ \cos(n\alpha + \varphi_n) - [\cos(n\pi - n\gamma) + \varphi_n] \} \quad (5)$$

2 连续换相失败抑制策略

2.1 混合直流输电系统模型

在 PSCAD 中搭建如图 4 所示的含 MMC-HVDC 的多馈入直流输电系统模型。LCC-HVDC 子系统由送端等值交流系统 S_{S1} , 等值系统阻抗 Z_{S1} , 整流侧变压器 T_{S1} , 整流器和逆变器, 直流输电线路和逆变侧变压器 T_{R1} 组成, 其额定直流电压为 500 kV, 额定功率为 1 000 MW, 额定直流电流为 2 kA, 整流侧采取定直流电流控制, 逆变侧采取定关断角控制; MMC-HVDC 子系统由送端等值交流系统 S_{S2} , 等值系统阻抗 Z_{R2} , 整流侧变压器 T_{S2} , 基于晶闸管的整流器和逆变器, 直流输电线路和逆变侧变压器 T_{R2} 组成, 受端交流系统 S_R , 系统等值阻抗为 Z_R , 额定直流电压为 400 kV, 额定功率为 400 MW, 整流侧采取定有功功率和定无功功率控制, 逆变侧采取定直流电压和定无功功率控制, 无功功率参考值为零, 并与 LCC-HVDC 馈入同一交流系统内, 受端交流系统为弱交流系统, 短路比为 2.75。

2.2 换相过程分析

由 1.2 的分析可知, LCC-HVDC 在恢复过程中对无功功率的需求增大, 且换流母线谐波电压的存在是导致连续换相失败的原因之一。MMC-HVDC

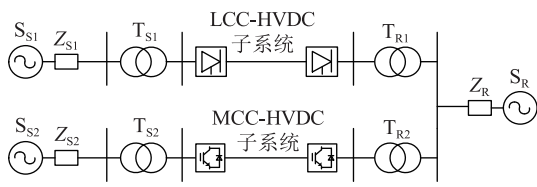


图4 含 MMC-HVDC 的多馈入直流输电系统模型

Fig.4 Model of MIDC transmission system with MMC-HVDC

采取定无功功率控制方式,会导致故障切除后逆变侧从交流系统吸收无功功率而不是提供无功功率,进而放大了谐波的影响。由于 MMC-HVDC 的有功功率和无功功率可以解耦控制,根据故障切除后换流母线电压的谐波畸变率来定量地增加 MMC-HVDC 逆变侧无功功率的输出,从而减少谐波的影响,进而抑制连续换相失败的发生。针对图 4 的混合直流输电系统,提出如图 5 所示的含 MMC-HVDC 的多馈入直流输电系统连续换相失败抑制策略。

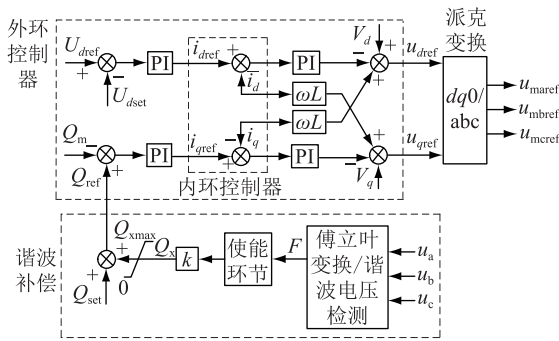


图5 连续换相失败抑制策略

Fig.5 Continuous phase change failure suppression strategy

图 5 中, Q_x 为无功功率补偿值; k 为比例系数; Q_{set} 为柔直原无功功率参考定值; Q_{ref} 柔性直流为无功功率参考值; Q_m 为常规直流无功功率实测值; U_{dm} 为常直电压实测值; U_{dset} 为常直电压参考值; L 为滤波电感; V_d, u_{dref} 分别为 d 轴电压的测量值与输出值; V_q, u_{qref} 分别为 q 轴电压的测量值与输出值。MMC-HVDC 的逆变侧外环控制器采用定直流电压和定无功功率控制,内环控制器采用 PI 控制,根据外环控制器输出的电流参考值 i_{dref}, i_{qref} 调节 dq 轴的电流分量 i_d, i_q ,通过派克变换得到柔直逆变侧换流母线交流电压参考值 $U_{mabcref}$ 。

谐波电压畸变率 F 为:

$$F = \sqrt{\sum_{i=2}^N \left(\frac{U_L(i)}{U_L} \right)^2} \quad (6)$$

式中: U_L 为基波电压的有效值; $U_L(i)$ 为第 i 次谐波电压的有效值。

由式(6)可得:

$$FU_L = \sqrt{\sum_{i=2}^N (U_L(i))^2} \quad (7)$$

$$\text{令 } U_x = \sqrt{\sum_{i=2}^N (U_L(i))^2} \text{ 可得:} \\ U_x = FU_L \quad (8)$$

稳态运行时:

$$Q_{ac} = \sqrt{3} U_N I_N \sin \varphi_n \quad (9)$$

由式(3)、式(9)可得故障恢复期间所需无功功率为:

$$Q_M + Q_x \approx \sqrt{3} (U_L + U_x) I_d \sin \varphi_n \quad (10)$$

故障切除后直流电流迅速恢复,故障恢复期间 $I_d \approx I_N$,推导可得:

$$Q_x \propto U_x \propto F \quad (11)$$

$$Q_x = kF \quad (12)$$

故障过程中 MMC-HVDC 逆变侧无功功率参考值为:

$$Q_{ref} = Q_{set} + Q_x = Q_{set} + kF \quad (13)$$

式(7)中,逆变侧换流母线电压畸变率 F 由式(6)可以计算得出,经过比例环节得到 Q_x (将换流母线电压提升到 0.9 p.u.,针对文中混合直流的运行工况,比例系数 k 值取为 1400),叠加到 Q_{set} 上,得到 Q_{ref} 。该值与 Q_m 作差后,再经过 PI 环节计算得出 i_{dref} ;内环电流控制器的输出得到 dq 轴电压的参考值 u_{dref} 和 u_{qref} ,经过派克变换后得到逆变侧换流母线电压的参考值 u_{maref}, u_{mbref} 和 u_{mcref} ,并作为换流站阀组控制的输入,最后通过换流站阀组控制模块控制使得 MMC-HVDC 对谐波电压所造成的无功功率缺额进行补偿,从而减少谐波的影响,进而抑制连续换相失败的发生。

3 仿真实验

在 PSCAD 中对文中的连续换相失败抑制策略进行仿真实验。

3.1 策略投入前

2 s 时逆变侧换流母线上发生三相高阻接地故障,接地电阻为 70 Ω ,2.1 s 时故障切除,换相失败抑制策略投入前的系统响应如图 6 所示。由图 6 可知,故障期间(2~2.1 s)由于逆变侧交流电压降低,发生了持续 0.04 s 左右的换相失败,随后直流电流缓慢恢复,到 2.1 s 故障结束时,直流电压和电流已经恢复到正常,2.16 s 时 A 相向 B 相换相过程中发生了连续换相失败。

第二次换相失败发生时交流电压和直流电流值都已恢复到额定值左右,换相所需的 I_d 与正常运行时交流母线电压所能提供的换相面积相符。但

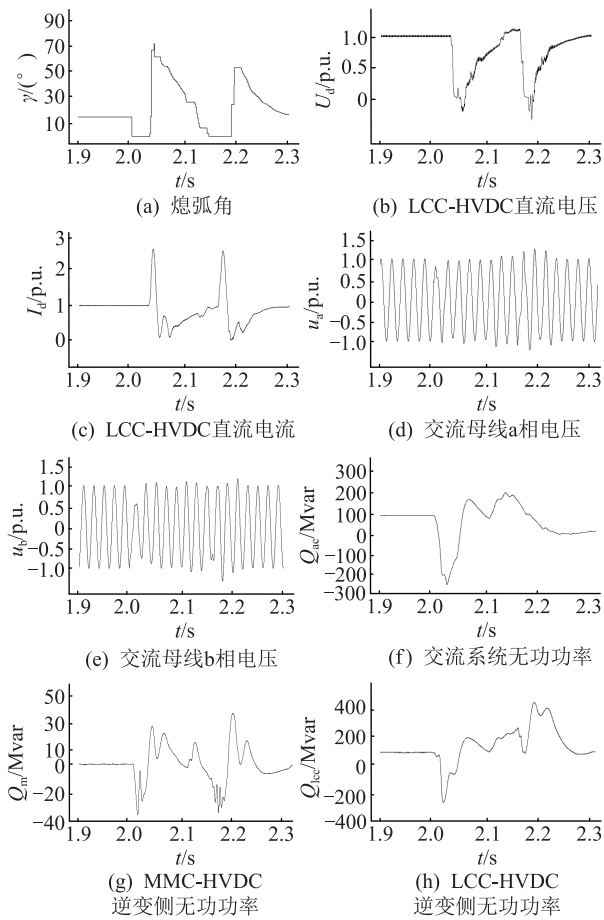


图6 故障后系统响应

Fig.6 System response after failure

MMC-HVDC 在故障恢复期间不向逆变侧交流系统提供无功功率反而吸收无功功率,而且交流瞬时电压波形有明显的畸变,导致交流母线电压所提供的换相面积减少,因此可以初步判断本试验中连续换相失败发生可能是谐波引起的电压畸变造成的。

对故障过程中逆变侧换流母线电压进行傅立叶分解,并计算其谐波畸变率,如图7所示。短路故障发生时,常规直流发生换相失败,换流母线电压发生了很大的谐波畸变,畸变率达到30%;故障结束后,换流母线电压出现了第二次较大的谐波畸变,畸变率达到了15%导致连续换相失败,连续换相失败期间谐波畸变率达到了30%。

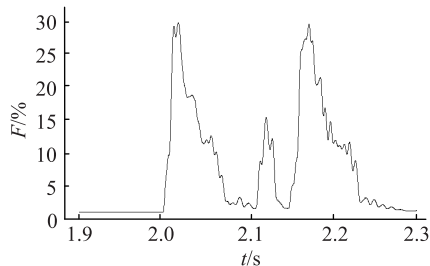


图7 谐波电压畸变率

Fig.7 Distortion rate of harmonic voltage

故障切除后随着有功功率传输的恢复,断路器开断、直流电流上升引起换流变压器饱和、大量电力电子元件的异常运行等都会导致谐波的产生,LCC-HVDC 对无功功率的需求增大。在 MMC-HVDC 逆变侧采取定无功功率控制的情况下,故障恢复期间 MMC-HVDC 逆变侧向交流系统提供的无功功率不足,逆变侧换流母线电压谐波畸变率增大,换相面积减少,可能会导致连续换相失败。当 MMC 运行在定交流电压方式,受换流器输出无功功率容量的限制,某些工况下也会发生连续换相失败。文中后续分析主要针对 MMC 运行在定无功功率的控制方式。

3.2 策略投入后

与3.1节相同的试验工况下,换相失败抑制策略投入后的系统响应如图8所示。

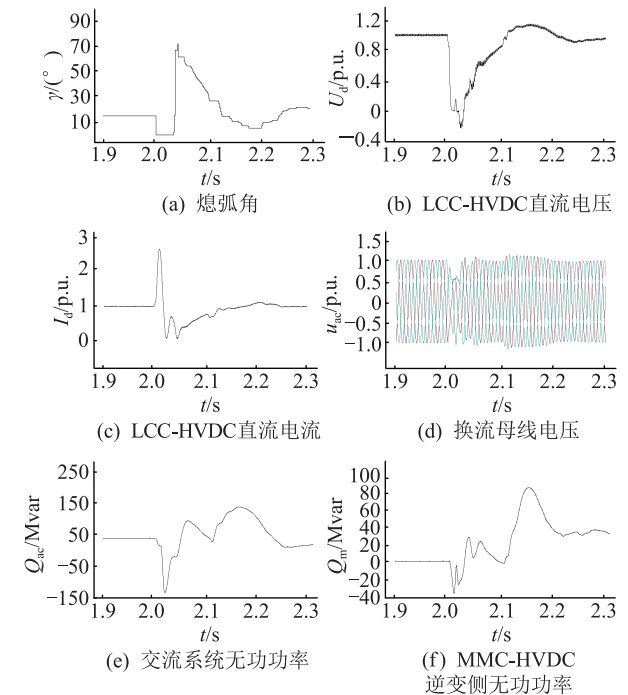


图8 策略投入后的系统响应

Fig.8 System response after optimization

策略优化后的逆变侧换流母线电压谐波畸变率如图9所示。

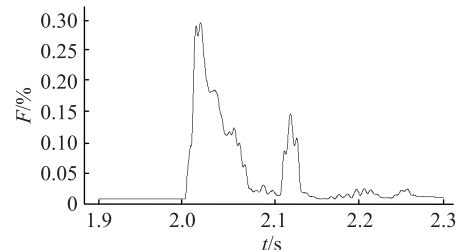


图9 策略投入后谐波电压畸变率

Fig.9 Distortion rate of harmonic voltage after optimization

对比图 6 和图 8 可以看出连续换相失败抑制策略投入后,故障切除后系统恢复过程正常,没有发生连续换相失败,MMC-HVDC 逆变侧无功功率在故障切除后的恢复期间有较大的提升。对比图 7 和图 9 可以看出测量投入后谐波电压畸变率有了一定的下降,说明连续换相失败抑制策略起了显著作用。

4 结论

文中对混合直流发生连续换相失败的原因进行了深入分析,认为谐波是试验工况下直流在故障恢复期间发生连续换相失败的原因之一,提出了基于谐波电压补偿的混合直流连续换相失败抑制策略,最后通过仿真试验验证了该策略的有效性。主要结论如下:

(1) 文中试验工况下,换流母线上的谐波电压是混合直流在故障恢复期间发生连续换相失败的原因之一;

(2) 文中所提出的换相失败抑制策略通过附加的谐波电压补偿分量环节来提高恢复期间 MMC-HVDC 对交流系统的无功功率支撑,进而减少谐波的影响,从而抑制连续换相失败的发生;

(3) 比例系数 k 的取值由将换流母线电压提升到 0.9 p.u.所需的无功功率确定,兼顾谐波电压补偿以及提升电压幅值的需要。针对文中混合直流的运行工况,比例系数 k 值取为 1 400。

参考文献:

[1] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. Voltage source converter based HVDC power transmission systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[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 Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46.

[3] 李新年,刘耀,朱艺颖,等. 华北电网直流多馈入系统动态特性实时仿真[J]. 电网技术, 2011,35(8): 75-80.
LI Xinnian, LIU Yao, ZHU Yiyong, et al. Real-time simulation of dynamic performance of multi-infeed HVDC transmission system to be connected to north china power grid before 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 75-80.

[4] 肖浩,朱佳,李银红,等. 多馈入直流系统换相失败免疫水平快速确定方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(11): 2711-2717.
XIAO Hao, ZHU Jia, LI Yinrong, et al. Study on rapid determination method of commutation failure immunity levels for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the

CSEE, 2015, 35(11): 2711-2717.

[5] THOMAS J L, POUILLAIN S, BENCHAI B A. Analysis of a robust DC-bus voltage control system for a VSC transmission scheme[C]//IEEE Xplore, 2001: 119-124.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 赵利刚,赵勇,洪潮,等. 基于实际录波的南方电网多回直流换相失败分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 42-46.
ZHAO Ligang, ZHAO Yong, HONG Chao, et al. Analysis on commutation failure of the csg's HVDC systems based on actual waves[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 42-46.

[9] 许树楷,罗雨. 背靠背输电系统中柔性直流与常规直流的协调控制策略[J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 9-15.
XU Shukai, LUO Yu. Study on coordination control strategy of VSC/LCC BtB HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 9-15.

[10] 王峰,刘天琪,周胜军,等. 谐波对 HVDC 系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(19): 4888-4894.
WANG Feng, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894.

[11] 郭春义,倪晓军,赵成勇. 混合多馈入直流输电系统相互作用关系的定量评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1772-1780.
GUO Chunyi, NI Xiaojun, ZHAO Chengyong. A quantitative evaluation method on interaction analysis of hybrid multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1772-1780.

[12] 倪晓军,赵成勇,郭春义,等. 混合双馈入直流系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 受端系统强度的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4052-4061.
NI Xiaojun, ZHAO Chengyong, GUO Chunyi, et al. The effects of VSC-HVDC on the system strength of LCC-HVDC in dual-infeed hybrid HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4052-4061.

[13] YAN L, ZHE C. A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio

- in a hybrid multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1568-1581. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6341872>.
- [14] GUO C, ZHANG Y, GOLE A, et al. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1529-1537.
- [15] 赵成勇,孙营,李广凯. 双馈入直流输电系统中 VSC-HVDC 的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 97-103.
ZHAO Chengyong, SUN Ying, LI Guangkai. Control strategy of VSC-HVDC in dual-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 97-103.
- [16] DURRANT M, WERNER H, ABBOTT K. Model of a VSC HVDC terminal attached to a weak AC system[C]// IEEE Conference on Control Applications. 2003.
- [17] 赵勇,洪潮,曾勇刚,等. 多直流馈入系统电压支撑强度指标及其在南方电网 STATCOM 配置方案研究的应用[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 22-26.
ZHAO Yong, HONG Chao, ZENG Yonggang, et al. The voltage support strength factor (VSF) for multi-infeed HVDC systems and its application in CSG's STATCOM allocation scheming[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 22-26.
- [18] 郭利娜,刘天琪,李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 95-99.
GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 95-99.
- [19] 李猛,夏成军,杜兆斌. 混合直流双桥换相失败机理及抑制措施研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 47-53.
LI Meng, XIA Chengjun, DU Zhaobin. Research on the mechanism and suppression method of double bridge discontinuous commutation failure in hybrid-HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 47-53.
- [20] 刘颖,戴栋,汪娟娟,等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.
LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Study on steady-state and transient response characteristics of HVDC system based on constant voltage control on inverter side [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.
- [21] 齐国强,王增平. 基于 Hilbert-Huang 变换的 HVDC 突变方向纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 92-99.
QI Guoqiang, WANG Zengping. HVDC mutation direction longitudinal protection method based on Hilbert-Huang transform [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 92-99.
- [22] 蒋炮炮. VSC-HVDC 和 LCC-HVDC 混合高压直流输电系统协调控制策略研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.
JIANG Paopao. Research of coordinated control strategy on VSC-HVDC and LCC-HVDC hybrid-HVDC system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

作者简介:



何晓峰

何晓峰(1980),男,博士,高级工程师,从事电力系统运行调度工作(E-mail: hxf303@163.com);

李成翔(1994),男,硕士,研究方向为高压直流输电;

夏成军(1974),男,博士,副教授,研究方向为电力系统规划运行与控制。

Control strategy to suppress hybrid HVDC continuous commutation failure by harmonic voltage compensation

HE Xiaofeng¹, LI Chengxiang^{2,3}, XIA Chengjun², CHENG Renli¹, YAO Wenfeng³, HUANG Dongqi³

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China;

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

3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In view of the failure of continuous commutation of hybrid HVDC in the experiment, the of commutation process and continuous commutation failure of HVDC are analyzed firstly. Under this test condition, harmonic is one of the reasons for the continuous commutation failure of HVDC during restoration. Then the control strategy to suppress hybrid HVDC continuous commutation failure by harmonic voltage compensation is proposed. The harmonic voltage compensation component is added to the link to improve the reactive power support of the MMC-HVDC to the AC system during recovery. The reactive power control on the inverter side of the MMC-HVDC can help reduce the influence of harmonics, thereby suppressing the continuous commutation failure, the reliability and stability of MIDC Transmission System with MMC-HVDC is enhanced. At last, the effectiveness of coordinated control strategy is verified on PSCAD/EMTDC under the same test condition.

Keywords: MIDC; MMC-HVDC; LCC-HVDC; harmonic; continuous commutation failure

(编辑 钱悦)