

混合双馈入直流输电系统无功协调控制研究

杨明权¹, 刘静佳², 王雨鑫³, 向权舟¹, 刘思远¹

(1. 中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 3. 中国南方电网贵州电网公司乌当供电局, 贵州 贵阳 520001)

摘要: 常规直流输电中常配置功能复杂的辅助无功控制, 如Gamma-Kick和QPC功能, 通过调节系统触发角、直流电压等运行参数, 以牺牲系统特性为代价改善系统无功平衡; 而柔性直流可实现有功和无功解耦控制, 在输送直流功率的同时, 仍具有灵活的无功输送能力。因此, 在混合双馈入直流输电系统中, 完全可以用柔性直流的无功协调控制功能取代常规直流辅助无功控制。以南方电网鲁西异步联网工程为研究对象, 通过现场试验验证柔性直流输电无功协调功能代替常规直流辅助无功的可行性。此外, 通过PSCAD/EMTDC仿真研究柔性直流无功协调功能对常规直流换相失败的影响, 结果表明: 灵活的柔性直流无功协调功能可以显著缩短常规直流换相失败时间, 避免长时间换相失败引起的直流停运。

关键词: 混合双馈入系统; 辅助无功控制; 无功协调; 换相失败

Study on reactive power coordinated control in double-infeed HVDC system

YANG Mingquan¹, LIU Jingjia², WANG Yuxin³, XIANG Quanzhou¹, LIU Siyuan¹

(1. Tianshengqiao Bureau, China Southern Power Grid EHV Power Transmission Company, Xingyi 562400, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China; 3. Wudang Power Supply Company, China Southern Power Grid Guizhou Power Grid Corporation, Guiyang 520001, China)

Abstract: Traditionally, complex auxiliary reactive power control are usually used in LCC-HVDC, such as Gamma-Kick and QPC, to improve system reactive power balance, by adjusting the operating parameters, include fire-angle and DC-voltage, but operating performance will be ingored. MMC-HVDC has the flexible reactive power control capability while delivering DC-power. Therefore, in hybrid double-fed HVDC system, The auxiliary reactive power control of LCC-HVDC can completely replaced by flexible reactive power control of MMC-HVDC. Research on Luxi asynchronous interconnection project of Southern Power Grid is done, reactive power coordinate of MMC-HVDC replacing the auxiliary reactive power control in LCC-HVDC is verified to be practical. Further more, results of PSCAD/EMTDC simulation proved that flexible reactive power coordination function of MMC-HVDC can significantly shorten time of the commutation failure in LCC-HVDC, avoiding the shutting caused by long-time commutation failure in LCC-HVDC.

Key words: hybrid double-fed HVDC system; auxiliary reactive power control; reactive power coordination; commutation failure

0 引言

常规高压直流输电系统(LCC-HVDC)以其技术上和经济上的独特优势, 在高压大容量远距离输电方面占据重要地位。我国存在电网潮流方

向单一、直流输电落点集中等特殊情情况, 当多条LCC-HVDC系统落点于同一交流系统, 形成多馈入直流输电系统时, 该系统存在一系列特殊问题, 其中最严重的是某一直流系统的交流侧发生严重电

磁暂态过程时会导致多个换流器同时或级联换相失败,甚至会使LCC-HVDC系统出于自我保护而紧急闭锁,给整个电力系统带来巨大冲击,导致事故扩大,甚至难以短时间内恢复功率^[1-2]。例如在南方电网辖区下的广东电网内,包含有±800 kV直流输电系统的直流多落点电网,而且各个直流逆变站间的电气距离都很小,交流与直流、直流与直流之间有很强的耦合。因而在某些情况下,有可能存在多个直流系统同时发生换相失败,且难以恢复的可能性,给系统安全稳定带来不可估量的危害。因此,无论是目前还是不远的未来,如何克服LCC-HVDC存在的不足,提高LCC-HVDC子系统的独立运行能力,均具有重大的研究价值。

众所周知,常规直流换流站正常运行时需要消耗相当大的无功功率,因此工程中常需要大量的无功补偿和滤波装置,在系统运行中通过频繁投切滤波器,以补偿换流器的无功消耗。据文献[3-4]所述,受端交流系统电压波动是常规直流输电系统发生换相失败故障的最常见诱因,如果没有辅助的控制措施,投切滤波器造成的电压动态变化将会超过工程的允许值,特别是在弱交流系统下,严重时可能导致逆变侧的换相失败^[5]。为抑制滤波器投切对交流系统的影响,现有的传统直流输电工程多配有辅助无功功能(Gamma-Kick和QPC)^[6],但其调节能力有限,且以牺牲常规直流运行的经济性为代价。

就无功控制功能而言,与LCC-HVDC系统相比,柔性直流输电(VSC-HVDC)技术具有以下明显技术优势^[7]:

1)可以同时且相互独立地控制有功和无功,而LCC-HVDC中控制量只有触发角,仅可控制有功功率,对无功功率的调节能力则很弱。

2)可以工作在无源逆变方式,不需要外加换相电源,对受端交流系统的依赖性低。

3)能够起到无功补偿的作用,动态补偿交流母线的无功功率,稳定交流母线电压。

鉴于柔性直流输电系统的上述优势,结合我国已建立了多条VSC-HVDC系统,在落点处形成了混合多馈入直流输电系统的现实情况,本文提

出一种适用于混合双馈入直流输电系统的无功协调控制策略,将电网中落点位置相近的常规直流和柔性直流通过配对并联改造,利用柔性直流输出无功功率来帮助维持交流系统电压稳定,减少常规直流系统因受端交流系统波动引起的换相失败及故障闭锁。

已于2016年6月投入运行的鲁西云南电网与南方电网主网异步联网工程,采用常规直流和柔性直流并联的输电架构。此工程的混合并联结构为本文的无功协调研究提供了契机和有利条件。

1 常规直流辅助无功控制原理介绍

为了避免滤波器投切瞬间引起交流系统波动,常规直流单元配置了Gamma-Kick功能;当滤波器小组投入无功过剩,而又由于其他方面要求不能切除滤波器小组时,配置了QPC功能调节系统无功平衡。

换流器消耗无功的计算公式如下

$$Q = \frac{1}{4} I_d U_{d10} \frac{2(180 - \alpha - \gamma) + \sin 2\alpha - \sin 2(180 - \gamma)}{\cos \alpha - \cos(180 - \gamma)} \quad (1)$$

式中, I_d 、 U_{d10} 分别为直流电流和交流系统电压包络线值。由此可知,在 U_{d10} 和 I_d 不变的情况下,改变 γ 角,可以调节换流器消耗的无功功率。

Gamma-Kick功能为在投切滤波器的瞬间调节逆变侧的熄弧角,改变换流器的无功消耗抑制交流电压的动态变化。其控制示意图如图1所示。

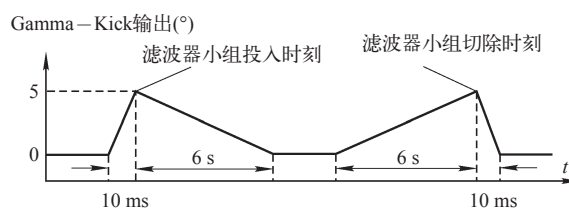


图1 Gamma-Kick功能示意图

Fig.1 Gamma-Kick diagram

投入滤波器前,使熄弧角(Gamma)的设定值迅速(10 ms)增大5°,滤波器投入后使Gamma角设定值缓慢(6 s)恢复至原设定值;切除滤波器前使Gamma角的设定值缓慢(6 s)增大5°,滤波器切除后使Gamma角设定值迅速(10 ms)恢复至原设定值。通过调节Gamma角,调节换流器消

耗的无功功率,使滤波器投切对交流系统的冲击由瞬时被拉伸至相对较长时间,平滑滤波器投切对交流系统的影响。

QPC功能为由于某些原因(如稳态需求等)造成无法切除多余的滤波器时,换流站容性无功超过设定值,QPC功能通过增大触发角(整流侧)或熄弧角(逆变侧)增加换流器的无功消耗,从而改善系统的无功平衡。其控制示意图及流程如图2所示。

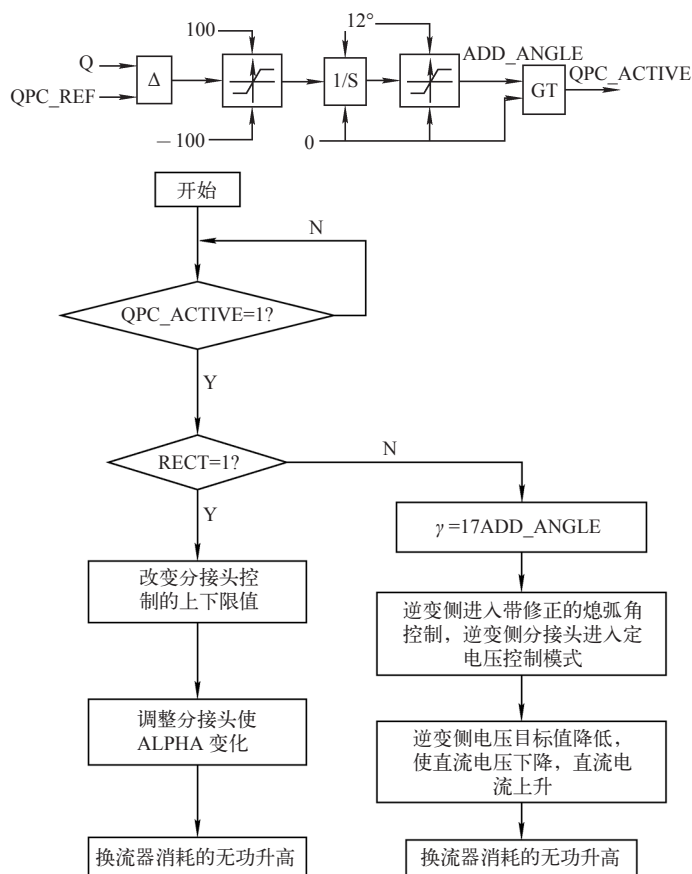


图2 QPC控制示意图及流程

Fig.2 QPC diagram and flow chart

QPC功能输出值ADD_ANGLE作为触发脉冲角度的增加值。该角度值将抬升整流侧分接头控制中ALPHA角的稳定区间,使分接头上升,增加整流侧换流器自身消耗的无功。同时,该角度值将增加逆变侧最小熄弧角定值,使逆变侧分接头进入定电压控制模式;逆变侧分接头控制收到QPC_ACTIVE信号后,降低直流电压参考值,使直流电压下降、直流电流上升,增加逆变侧换流

器的无功消耗。

综上所述,两种功能均需要改变系统运行触发角,以牺牲常规直流单元的经济性为代价,且其无功调节能力非常有限。

2 柔直无功功率控制原理

将VSC换流器看作一个相位和幅值可调的交流电压源。其中电抗(Reactance)为桥臂电抗与换流变漏抗的等效电抗,其传输原理如图3所示。

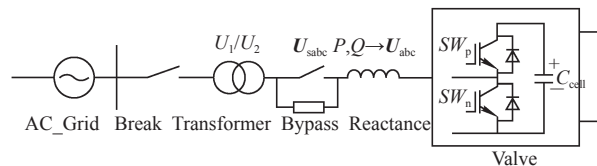


图3 柔性直流输电功率传输原理图

Fig.3 Power transmission schematic diagram of VSC-HVDC

设电抗两侧交流电压分别为 U_{sabc} 和 U_{abc} ,传输的功率为 $S(PQ)$,方向由交流侧指向直流侧,等效电抗大小为 X_c ,易得

$$\begin{aligned}
 S &= U_{sabc} \angle 0^\circ \left(\frac{U_{sabc} \angle 0^\circ - U_{abc} \angle \theta}{jX_c} \right)^* \\
 &= -\frac{U_{sabc} U_{abc}}{X_c} \sin \theta + j \frac{U_{sabc} (U_{sabc} - U_{abc} \cos \theta)}{X_c} \\
 P &= -\frac{U_{sabc} U_{abc}}{X_c} \sin \theta \\
 Q &= \frac{U_{sabc} (U_{sabc} - U_{abc} \cos \theta)}{X_c}
 \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知,有功大小主要取决于 U_{abc} 相对 U_{sabc} 电角度; θ 为正,则换流器发出有功, θ 为负,则换流器吸收有功;而无功主要取决于 $U_{sabc} - U_{abc} \cos \theta$,为正,则换流器吸收感性无功,为负则发出感性无功。由此可以看出,通过控制 θ 和 U_{abc} 即可实现对有功和无功的独立控制^[7]。

柔性直流输电采用基于直接电流控制的矢量控制方法,具有快速的电流响应特性和良好的限流能力。其矢量控制示意图如图4所示。

矢量控制由外环控制策略和内环控制策略组成。外环控制主要包括有功功率类控制和无功功率类控制;内环控制采用正序电流和负序电流分解独立控制。有功类外环控制包括有功功率控

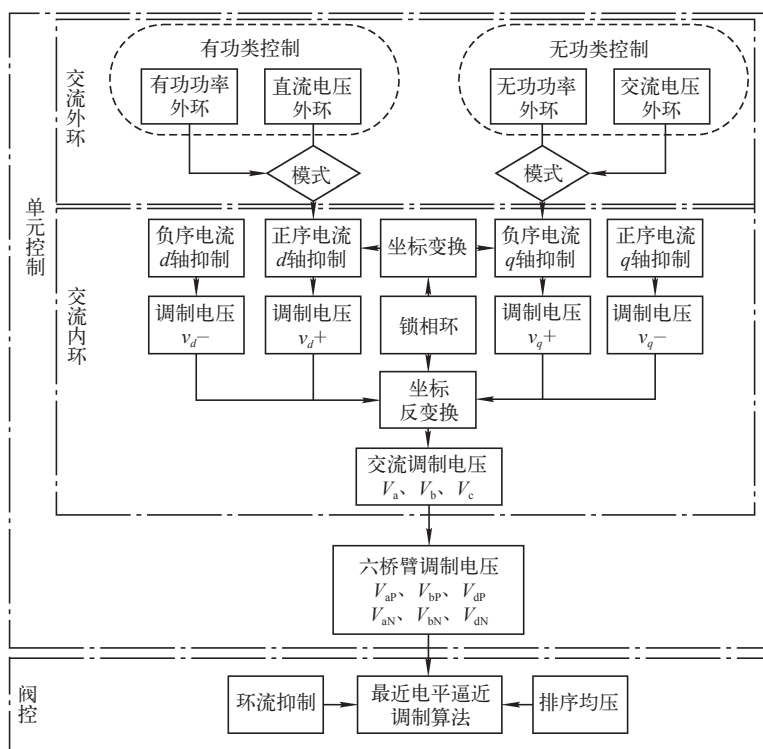


图4 柔性直流输电矢量控制示意图

Fig.4 Vector control diagram of VSC-HVDC

制、直流电压控制。

3 混合多馈入无功协调控制

柔性直流可实现有功和无功的解耦控制，在输送有功功率的同时，也可实现无功的连续调节。鉴于此，本文利用柔性直流的无功功率控制，实现对其并联LCC-HVDC系统的无功协调控制，具体包括以下内容：

1) 代替常规直流单元的辅助无功控制功能，与常规直流站的交流滤波器投切配合，调节柔性直流单元瞬时无功输出，维持系统无功平衡。在常规直流投切滤波器瞬间，使柔性直流单元快速响应，调节其无功输出，代替常规直流的Gamma-Kick功能，以补充相反方向的无功来抑制滤波器投切瞬间系统电压的波动；其次，当常规直流单元因某些原因导致无法依靠投切滤波器实现无功平衡时，柔性直流单元调节其无功输出，取代常规直流的QPC功能。

2) 当交流系统发生故障或扰动时，紧急提升柔性直流单元的无功出力，即暂态调压功能；当交

流进线电压低于预设值时，根据当前交流电压幅值进行PI控制，迅速调节无功输出，为交流系统提供无功支撑，加速发生故障后电压的恢复，防止连接于同一交流系统的常规直流单元换相失败。

4 鲁西异步联网工程现场测试

下文将借助鲁西异步联网工程现场测试结果，证实无功协调控制的可行性。鲁西异步联网工程系统示意图如图5所示。

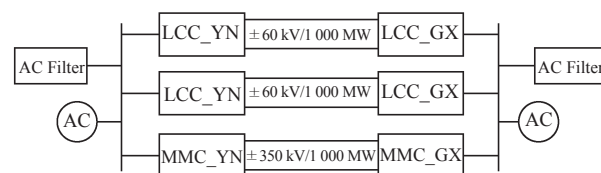


图5 鲁西异步联网工程系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of Luxi asynchronous networking engineering system

其中，两个LCC-HVDC单元采用完全相同的控制系统，三个输电单元共用一个直流站控，本文论述的无功协调控制逻辑放置在直流站控中。

4.1 常规直流辅助无功功能试验波形

(1) Gamma-Kick功能

投切滤波器小组时Gamma-Kick功能的试验波形如图6、图7所示。

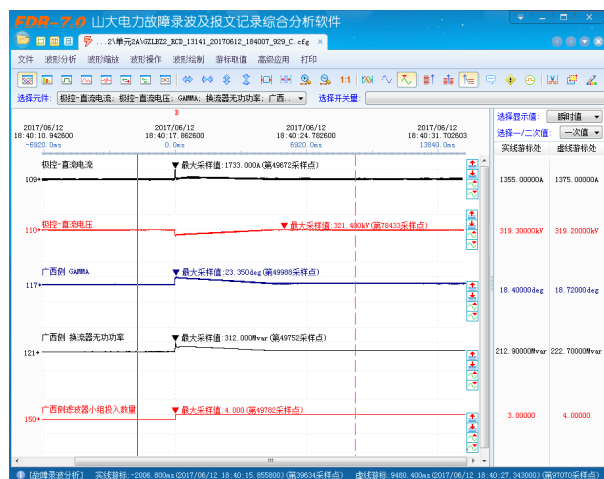


图6 投入滤波器时, Gamma-Kick的试验波形

Fig.6 Test wave form of Gamma-Kick when connect filter

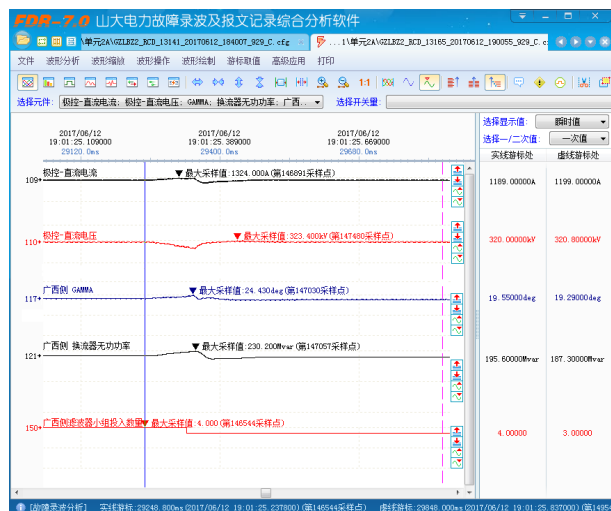


图7 切除滤波器时, Gamma-Kick的试验波形

Fig.7 Test wave form of Gamma-Kick when disconnect filter

图6中,在投入滤波器小组前,常规直流单元控制迅速将Gamma角参考值由 17° 增大到 22° ,之后将Gamma角参考值由 22° 缓慢降低至 17° 。

图7中,收到切除滤波器小组指令后,Gamma-Kick控制先缓慢将Gamma角参考值由 17° 增大到 22° ,当滤波器小组切除瞬间,Gamma-Kick迅速将Gamma角参考值由 22° 降低至 17° 。

(2) QPC功能

设置常规单元的功率目标值为100 MW (此时按照稳态性能要求,需投入两组滤波器,约200 Mvar的过剩无功功率,流入交流系统)。系统运行稳定后投入QPC功能。QPC的试验波形如图8所示。



图8 QPC功能的试验波形

Fig.8 Test wave form of QPC

图8中,广西侧滤波器输出无功功率过剩,向系统侧输送无功220 Mvar。投入QPC功能后,QPC功能使Gamma角增大。广西侧进入定熄弧角控制,分接头控制直流电压,通过降低直流电压参考值降低直流电压,升高直流电流,使逆变侧消耗的无功功率增多,从而改善系统的无功平衡。

由上述现场试验测试波形可以看出,常规直流的辅助无功控制均改变了运行触发角,降低了系统的经济性。

4.2 柔性直流快速无功协调

退出常规直流单元的Gamma-Kick功能,使能柔性直流无功协调控制(DCC_ON)。柔性直流无功协调代替常规Gamma-Kick功能试验波形如图9所示。

图9中,投入滤波器小组前,无功协调控制迅速将柔性直流的无功参考值从0增大到60 Mvar。当柔性直流单元的无功输出达到60Mvar后,缓慢将无功参考值从60 Mvar回降至0。切除滤波器小组

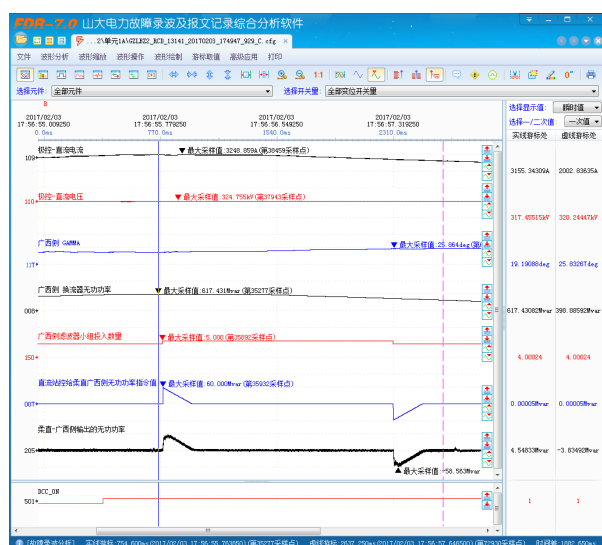


图9 柔直无功协调(替代Gamma-Kick)的试验波形

Fig.9 Test wave form of MMC reactive power coordinate(replace Gamma-Kick)

前,无功协调控制迅速将柔性直流的无功参考值从0增大到-60 Mvar;当柔性直流单元的无功输出达到60 Mvar后,缓慢将无功参考值从60 Mvar回降至0,使柔性直流单元输出的无功抑制常规直流单元投切滤波器组引起的系统波动。

当常规直流单元向系统流入无功功率时,QPC功能使柔性直流输出反向无功功率,最终使流向交流系统的无功功率降至0,平衡常规直流单元与交流系统的无功交换,如图10所示。

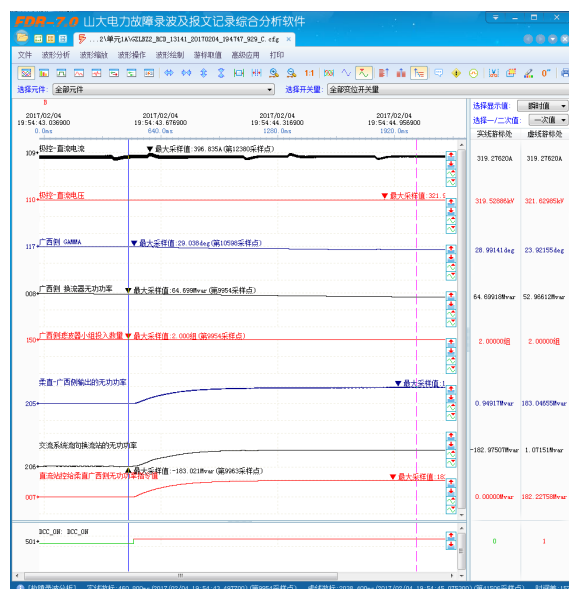


图10 柔性直流无功协调(替代QPC)的试验波形

Fig.10 Test wave form of MMC reactive power coordinate(replace QPC)

对比上述试验结果可见,柔性直流单元能够快速、准确地完成无功协调控制任务,替代常规直流的Gamma-Kick、QPC功能,试验结果与预期一致。鉴于此,当柔性直流单元与常规直流单元并联运行时,常规直流单元的辅助无功控制功能完全可以由柔性直流单元取代。

5 柔性直流无功协调功能对常规直流换相失败的影响

换相失败是常规直流输电中最为常见的故障。换相失败会引起直流电压下降和直流电流短时增大等影响系统运行的不利因素,甚至造成阀组闭锁或极闭锁。由文献[8-9]可知,避免换相失败的方式通常有:利用无功补偿维持换相电压稳定;采用较大的平波电抗器;减小换流变压器的短路电抗;采用适当的控制方式;人工换相。主回路参数(平波电抗器、变压器短路阻抗等)和控制策略在工程投运时已基本确定,仅第一条“利用无功补偿维持换相电压稳定”的方法可通过后期改造实现。

鲁西异步联网工程为常规和柔性直流混合双馈入系统,鉴于柔性直流灵活的无功输出能力,在此将柔性直流单元视为无功补偿装置,研究柔性直流单元输出无功功率,维持交流系统电压稳定,避免常规直流换相失败的可行性^[10-11]。鉴于鲁西异步联网工程投运后不能频繁地人为制造交流系统故障,下面将通过鲁西异步联网工程PSCAD/EMTDC仿真模型,研究柔性直流无功协调对常规直流换相失败的影响。该模型的总体示意图如图11所示,本模型与实际控制系统的控制逻辑保持高度一致。

在同一工况下进行逆变站交流系统三相交流电压跌落故障测试,对比柔性直流无功协调控制投入/退出时,常规直流单元换相失败情况。仿真波形如图12、图13所示。

由图12、图13可以看出,逆变侧交流电压跌落期间,未投入柔性直流无功协调功能时,常规直流单元发生换相失败直至交流系统电压恢复;而当无功协调投入时,柔性直流单元能够迅速输出无功功率,提升交流系统电压,常规直流单元换相失败时

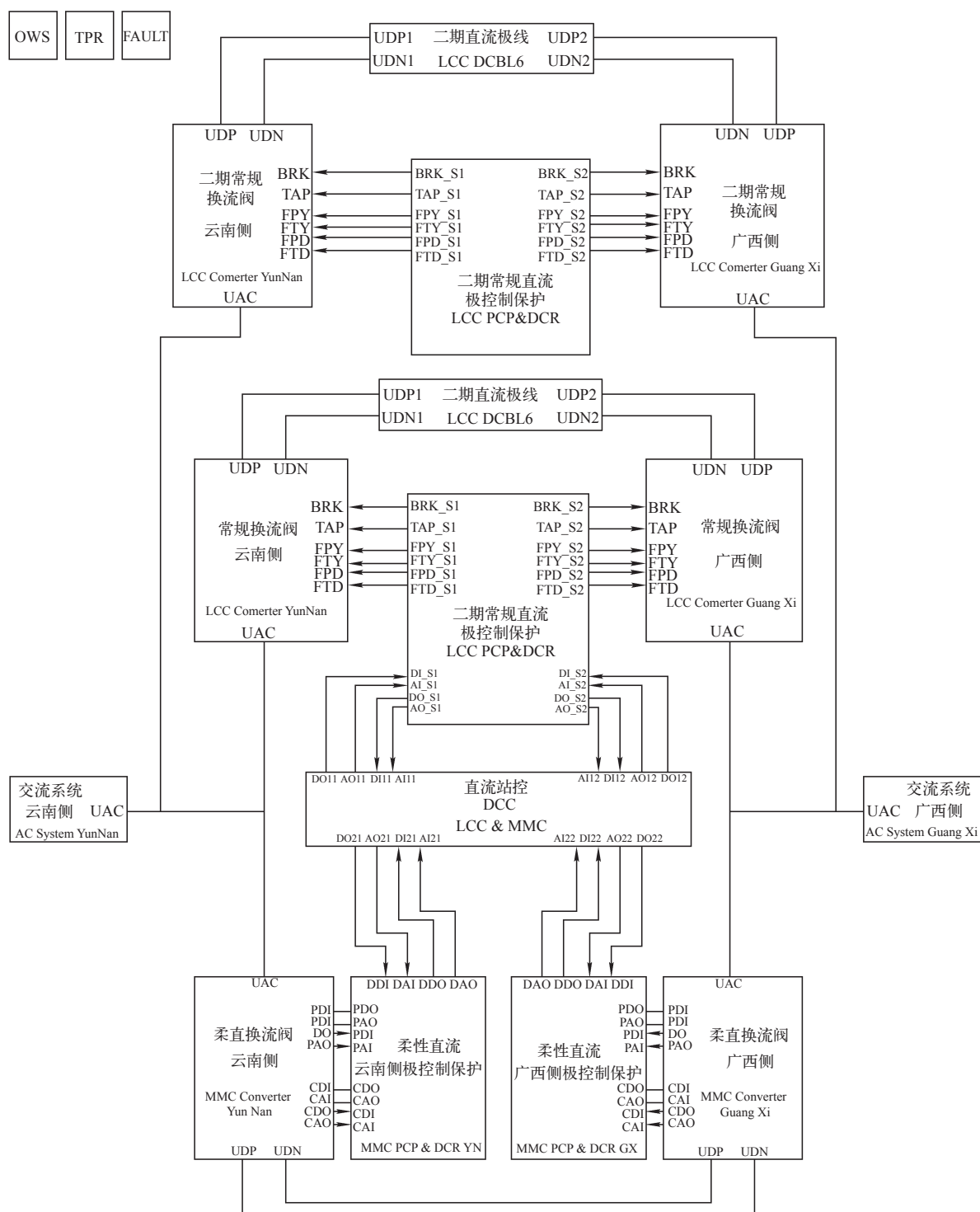


图11 PSCAD/EMTDC仿真模型

Fig.11 PSCAD/EMTDC simulation model

间仅为200 ms,显著缩短了换相失败时间。

6 结束语

1) 理论说明及现场试验波形足以证明,柔

性直流单元在输送有功功率的同时,协调自身的无功功率替代常规辅助无功控制功能是切实可行的。可以实现无功辅助控制功能,同时又不影响

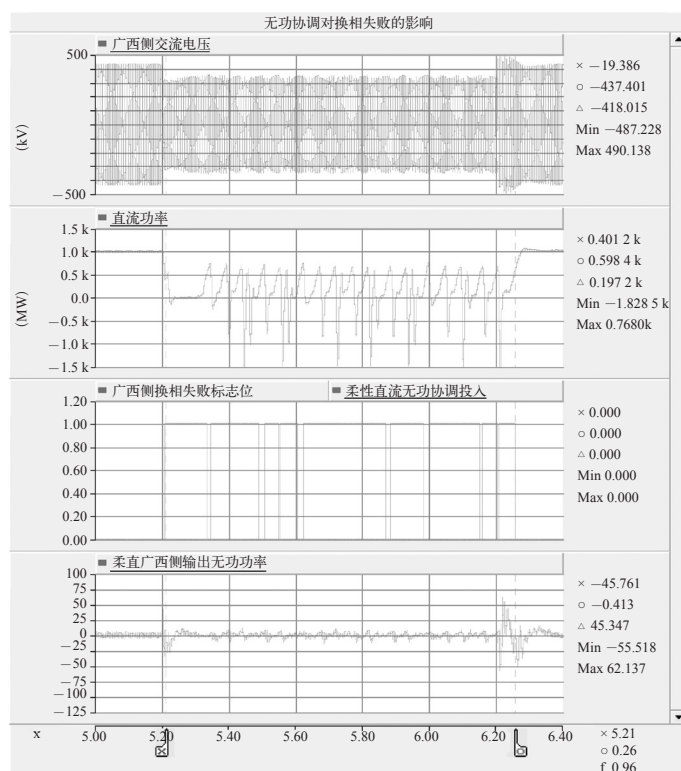


图12 无功协调退出、交流系统电压跌落25%

Fig.12 AC system voltage drop 25% without reactive power coordinate

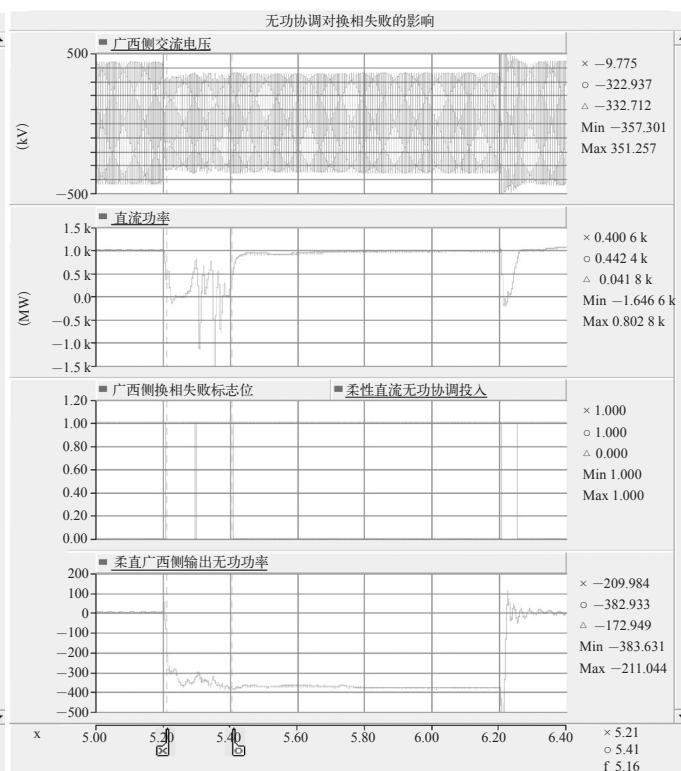


图13 无功协调投入、交流系统电压跌落25%

Fig.13 AC system voltage drop 25% with reactive power coordinate

常规直流单元的运行经济性。

2) 通过仿真验证, 柔性直流单元快速有效的动态无功支撑能力, 能够在交流系统故障时显著缩短常规直流单元换相失败持续时间, 避免了长时间换相失败引起的LCC-HVDC停运事件, 在减小停电事故范围和提高故障后恢复速度时起到重要作用。

参考文献

- [1] 周保荣, 洪潮, 金小明, 等. 南方电网同步运行网架向异步运行网架的转变研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2084-2092.
ZHOU Baorong, HONG Chao, JIN Xiaoming, et al. Study of Backbone structure change from synchronous to asynchronous in China southern power grid[J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2016, 36(8): 2084-2092.
- [2] 周保荣, 洪潮, 饶宏, 等. 广东多直流输电换相失败对电网稳定运行的影响[J]. 南方电网技术,

2017, 11(3): 18-24.

ZHOU Baorong, HONG Chao, RAO Hong, et al. The influence of commutation failure of Guangdong multi-direct current transmission on stable operation of power grid[J]. Southern Power Grid Technology, 2017, 11(3): 18-24.

- [3] 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): 40-45.
LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Summary of commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power Grid Technology, 2006, 30(17): 40-45.
- [4] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一) 换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-25.
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Study on commutation failure of HVDC transmission system part I: analysis of factors affecting commutation

- failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-25.
- [5] 任景, 李兴源, 金小明, 等. 多馈入高压直流输电系统中逆变器滤波器投切引起的换相失败仿真研究[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 17-22.
- REN Jing, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation study on commutation failure caused by inverter station filter switching in multi-feed HVDC system[J]. Power Grid Technology, 2008, 32(12): 17-22.
- [6] 戴国安, 周君文, 王亚非. 特高压直流输电系统无功控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 51-54.
- DAI Guoan, ZHOU Junwen, WANG Yafei. Research on reactive power control strategy of UHVDC transmission system[J]. Southern Power Grid Technology, 2008, 2(4): 51-54.
- [7] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [8] 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 Kaijian, JING Hong. Study on commutation failure of HVDC transmission system part II: measures to avoid commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 6-9.
- [9] 倪晓军, 赵成勇, 许韦华, 等. 降低直流输电换相失败概率的改进拓扑及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 811-820.
- NI Xiaojun, ZHAO Chengyong, XU Weihua, et al. Improved topology and control strategy for reducing commutation failure probability of HVDC transmission[J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2015, 35(4): 811-820.
- [10] 王艺璇. 静止同步补偿器对降低对馈入直流换相失败的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- WANG Yixuan. Application of static synchronization compensator in reducing commutation failure of feed-in DC[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [11] WANG Xuan, WANG Yuhong, YAN Hui, et al. Research on influences to reduce the commutation failure of different topology structures of STATCOM[J]. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific(ITEC), 2016, June 1-4: 470-473.

作者简介



杨明权

杨明权(1988—),男,大学本科,工程师,从事高压常规直流、柔性直流输电系统运行与维护。

(收稿日期:2017-12-16)EA