

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.002

# 背靠背输电系统中柔性直流与常规直流的 协调控制策略

许树楷, 罗雨

(南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

**摘要:** 在云南电网与南网主网鲁西背靠背直流异步联网工程中, 柔性直流与常规直流背靠背系统处于同一换流站内, 共享同一站级控制系统。在柔性直流与常规直流的协调控制策略方面, 以往工程无可供参考的设计经验。文章从有功协调控制和无功协调控制策略两方面进行了探讨, 并给出了部分协调控制策略的仿真实验结果。

**关键词:** 背靠背直流系统; 柔性直流输电; 协调控制;

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0009-07

## Study on Coordination Control Strategy of VSC/LCC BtB HVDC

XU Shukai, LUO Yu

(Electric Power Research Institute Co., Ltd., CSG, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** In the Yunnan grid and CSG main grid Luxi BtB (Back to Back) HVDC system, VSC (Voltage Sourced Converter) and LCC (Line Commutation Converter) operate in parallel and share the same centralized station control system. Thus the VSC/LCC BtB HVDC coordination control strategy problem is introduced. This paper studies the coordination control strategy from the active and reactive aspects, and gives the partial simulation results of the proposed strategies.

**Key words:** BtB HVDC; VSC-HVDC; coordination control strategy

柔性直流输电技术近年来发展迅速, 由于柔性直流输电在控制特性上较为灵活, 在输送有功功率的同时还具备无功功率的补偿功能, 特别适用于新能源接入、多端直流系统组网、异步电网互联等应用场合<sup>[1-4]</sup>。

云南电网与南网主网鲁西背靠背直流异步联网工程本期额定输送功率为 2 000 MW, 由一个 1000 MW 常规直流单元和一个 1 000 MW 柔性直流单元组成, 常规直流单元额定直流电压为  $\pm 160$  kV, 柔性直流单元额定直流电压为  $\pm 350$  kV。工程可实现直流功率正向和反向输送、柔直单元 STATCOM、柔直单元黑启动等运行方式。本工程采用了柔性直流和常规直流背靠背单元组合运行的建设方案, 其控制保护策略, 特别是在柔直单元背靠背控制保护

策略以及双单元的协调控制策略方面, 以往工程中无可供参考的设计经验。

本文从有功协调控制和无功协调控制策略两方面进行了探讨, 并给出了部分协调控制策略的仿真实验结果。

### 1 控制策略

柔性直流与常规直流的协调控制包括有功协调控制功能、无功协调控制功能和启停协调控制。其中大部分功能由站控系统实现, 少部分功能由单元控制实现, 并将控制结果通知站控系统。

有功协调控制主要包括定功率控制, 功率转移控制和附加控制; 无功协调控制包括电压控制模式的协调配合、无功控制模式的协调配合和暂态无功协调控制。

#### 1.1 有功协调控制

有功协调控制包括定功率控制、功率转移控制、附加控制功能等。

收稿日期: 2016-06-02

作者简介: 许树楷(1978), 男, 广东揭阳人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事直流输电技术研究的工作(e-mail) xusk@csgrid.com.cn。

定功率控制是主要的控制方式,柔直单元控制系统和常规直流控制系统接收直流站控的定功率指令,整定直流传输功率在功率定值上。同时将其功率调节信号叠加在功率定值上,以实现有功功率调节功能。

功率转移控制是当某一直流单元的输电能力下降,导致实际的直流传输功率减少时,站控系统能够增大另一直流单元的输送功率,自动而快速地把直流传输功率恢复到尽可能接近运行人员下发功率定值的水平。

功率附加控制功能包括功率回降或者提升、阻尼自同步振荡、交流电压和频率异常控制等。在系统发生异常工况时,直流站控系统快速完成响应,用预定控制策略降低系统扰动,以改善交流系统性能。

### 1.1.1 定功率控制

定功率控制通常有手动和自动两种控制方式。

手动控制下运行人员手动给定功率定值和功率升降速率,柔直控制单元和常规直流控制单元按照给定的功率定值和速率线性变化到功率预定值。此外中止功率升降功能可以在功率升降过程中中止功率升降,使功率定值停留在执行中止功能的时刻所达到的数值。

自动控制下柔直单元和常规直流单元按照预先编排好的直流传输功率日负荷曲线自动变化,运行人员还可以临时修改已经整定的负荷曲线,功率曲线的修改不对直流传输功率产生任何扰动。

定功率控制分为以下几种功率分配模式:平均分配模式、柔直系统优先模式、常规直流系统优先模式、按比例传输模式、柔直系统独立控制模式和常规直流系统独立控制模式。功率分配模式在自动和手动控制下均起作用。

1)平均分配模式:根据设置的功率指令,进行平均分配后作为柔直和常规直流的功率参考指令发送到柔直和常规直流单元控制系统。

2)柔直系统优先模式:根据设置的功率指令,优先柔直系统功率传输,柔直系统到达额定输出后,剩余功率作为常规直流功率指令发送到其单元控制器。

3)常规直流系统优先模式:根据设置的功率指令,优先常规直流系统功率传输,常规直流到达额定输出后,剩余功率作为柔直功率指令发送到其单元控制器。

4)按比例传输模式:根据设置的功率指令和比例系数分配功率,生成柔直和常规直流单元的功率参考指令达到对应的单元控制器。

5)柔直系统独立控制模式:当常规直流单元退出运行的时候,采用柔直单元独立控制模式,设置的功率指令为柔直功率参考指令。

6)常规直流系统独立控制模式:当柔直单元退出运行的时候,采用常规直流单元独立控制模式,设置的功率指令为常规直流功率参考指令。

### 1.1.2 功率转移控制

功率转移控制实现常规直流和柔直单元的功率互补,当某一直流单元的输电能力下降,导致实际的直流传输功率减少,另一直流单元会增加功率指令,自动而快速地把直流传输功率恢复到尽可能接近功率定值的水平。为了防止该控制模式下直流单元功率指令由于功率转移功能产生频繁波动,该功率补偿量设置有功率死区。

### 1.1.3 附加控制功能

换流站的直流站控系统包含附加的调制控制,以提高整个交直流并联输电系统的性能。无论是在常规直流单元还是柔直单元,以下所列的附加控制功能均能起作用。附加控制功能的输出以调制的方式叠加到常规直流单元和柔直单元的功率指令上,指令的分配按照事先设定的原则进行。换流单元的附加控制是否启动及相关的启动定值由直流站控统一协调发出。

#### 1.1.3.1 功率提升(或回降)

当受端(或送端)交流电网发生严重故障时,可能要求直流系统迅速增大(或减小)输送的直流功率,支援受端(或送端)电网以便尽快回复正常运行。这种调制功能也称为紧急功率支援。功率提升(或回降)具有多个功率级别的功率提升(或回降)功能。功率提升(或回降)功能可以作用于功率指令或电流指令。直流站控系统具有安稳接口,能接收外部信号,去起动任何一个提升(或回降)级别。

#### 1.1.3.2 阻尼次同步振荡

当背靠背换流站所连接的交流系统发生次同步振荡时,可在控制系统中配置阻尼次同步振荡功能。通常次同步振荡多发生在以背靠背换流站为整流侧电网,次同步振荡现象的产生与交流电网构成和负荷条件有关。

#### 1.1.3.3 频率控制

利用直流输电系统快速可控性,调节所连一端或者两端交流系统的频率,共同利用两端交流系统热备用容量,调节方法包括:

1) 将某一端交流系统频率保持在额定值上,此方法适用于另一端交流系统容量较大的情况。

2) 按照两端交流系统频率偏差比例调节,此方法合适两端交流系统容量差不多的情况。

在设计频率控制时,不仅考虑了如何帮助故障侧交流系统从频率偏移状态下恢复正常,还确保在实际运行中,不会出现非故障系统因对故障系统进行事故支援而影响本系统安全运行的情况。同时设计中实现了控制参数可调,既可以适应未来电网电能质量标准的提高的要求(例如将非故障系统的频率限定在 $50 \pm 0.1$  Hz内),也便于在交流电网达成事故支援协议的情况下,放宽频率限制要求(例如将故障系统的频率限定在 $50 \pm 0.5$  Hz内),以充分利用直流频率控制的功能,发挥大电网互联的优势。

## 1.2 无功协调控制

无功协调控制功能包括四个方面的内容:

1) 全站慢速无功控制——滤波器及电容器投切控制。

2) 常规直流单元快速无功控制——常规直流的无功功率调节(RPC)和熄弧角 Gamma Kick 功能。

3) 柔直单元快速无功控制——柔直单元换流站定交流母线电压(U-Control)和定无功功率(Q-Control)功能。

4) 常规直流滤波器投切时柔直单元无功协调控制。

基于经济性和设备容量利用率的角度考虑,各部分功能的优先级从高到低依次为:全站慢速无功控制、柔直单元快速无功控制、常规直流滤波器投切时柔直单元无功协调控制、常规直流单元快速无功控制。即优先使用滤波器组和电容器组来提供换流站所需无功功率,其无功控制的目标是将换流站的交流母线电压或换流站与系统交换的无功控制在给定的区间内;其次是柔直单元的快速无功控制,柔直单元的 U-Control 和 Q-Control 功能通过快速、精确的无功调节,使得换流站的交流母线电压或换流站与系统交换的无功功率准确的维持在设定值;最后,当柔直单元达到其输出容量限值或其快速无功控制功能不可用时,常规直流单元可启用其无功辅助控制功能——RPC 和 Gamma Kick 功能。

上述无功协调控制策略和优先级设置,主要实现以下目标:

1) 优先使用滤波器组和电容器组提供换流站所需的静态无功功率,提高柔直和常规直流的容量利用率。

2) 利用柔直单元快速、精确的无功调节能力,实现 U-Control 或 Q-Control 的无差控制。

3) 通过柔直系统的快速无功控制能力,完成常规直流无功辅助控制功能中的 RPC 和 Gamma Kick 功能,避免常规直流换流站调节触发角和熄弧角对直流系统运行性能的影响。

### 1.2.1 全站慢速无功控制

#### 1.2.1.1 滤波器投切的控制模式

全站慢速无功控制功能具备以下控制模式<sup>[4]</sup>:

1) 手动模式:为满足系统的绝对最小滤波器组要求、最大及最小电压限制,以及最大无功交换等边界条件,绝对最小滤波器组、最小无功需求、最大无功需求等控制功能对于滤波器的控制仍为自动模式。对于最小滤波器组和定电压控制、定无功控制等较低优先级的无功控制功能控制的滤波器小组投切操作,由运行人员根据提示手动完成。

2) 自动模式:所有滤波器组的投切操作都由站控自动完成。

3) 关闭模式:站控不进行任何滤波器组的操作,由运行人员手动对滤波器小组进行投切操作。

#### 1.2.1.2 滤波器投切的控制功能

常规直流单元运行时,无论是整流侧还是逆变侧都要消耗一定的无功功率,其数值不但与其输送的直流功率大小有关,也与运行方式和控制方式有关。直流站控通过控制滤波器组的投切控制满足常规直流单元工作时的无功需求和谐波滤除需求。常规直流无功控制功能由多个子功能组成,包括:绝对最小滤波器组控制、极限电压控制、最大无功限制、最小滤波器组控制、电压控制和无功控制。

### 1.2.2 柔直单元快速无功控制

柔直单元的快速无功控制包括 U-Control 和 Q-Control,其控制功能在柔直单元控制的无功外环中实现。为了实现对全站无功协调控制,控制对象为整站公共联结点(PCC)处的无功功率和交流电压。

#### 1.2.3 常规直流的无功辅助控制

##### 1.2.3.1 RPC 功能

RPC 功能模块的输入为 PCC 处的无功输出测

量值, 输出为触发脉冲角度<sup>[5-6]</sup>。

当慢速无功控制无法切除无功单元, 造成换流站容性无功功率过剩时, RPC 功能通过增大触发角或熄弧角增加换流器的无功消耗, 从而改善系统的无功平衡。

### 1.2.3.2 Gamma Kick 功能

滤波器小组的投切会造成换流站交流母线电压的波动, 在弱系统连接条件下尤为明显, 严重时可能导致逆变侧的换相失败。因此, 逆变侧的常规直流单元控制系统通常需要配置 Gamma Kick 功能<sup>[7]</sup>。该功能在滤波器投入前关断角  $\gamma$  参考值提高一定角度, 滤波器投入后  $\gamma$  参考值恢复到滤波器投入前的参考值; 在滤波器切除前  $\gamma$  参考值提高一定角度, 滤波器切除后  $\gamma$  参考值恢复到滤波器切除前的参考值。

如图 1 所示, 当投入滤波器组的  $t_1$  时刻, Gamma Kick 控制器的输出在  $T_{short}$  时间内, 从 0 增大到  $\gamma_{max}$ 。当控制器的输出达到  $\gamma_{max}$  后, 将在随后的相对较长的  $T_{long}$  时间内, 从  $\gamma_{max}$  回降至 0。

在切除滤波器的  $t_2$  时刻, 先将 Gamma Kick 控制器的输出在  $T_{long}$  的时间内增大至  $\gamma_{max}$ , 在切除滤波器组的瞬间, 控制器的输出在  $T_{short}$  时间内从  $\gamma_{max}$  下降至 0。

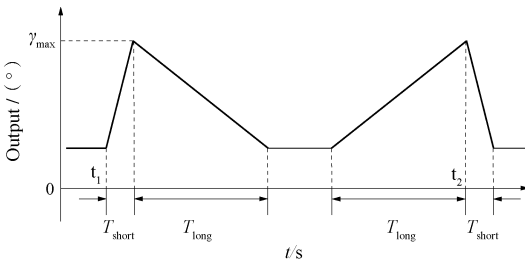


图 1 Gamma Kick 与投/切滤波器的配合

Fig. 1 Gamma Kick Strategy

### 1.2.4 无功协调配合

滤波器投切造成的电压动态变化可能会超过工程的允许值, 严重时可能导致逆变侧的换相失败。常规直流极控通过增大逆变侧的  $\gamma$  角增加换流系统无功吸收抑制电压波动, 但是  $\gamma$  增加会使逆变器维持的直流电压降低, 从而减少可能输出的直流功率, 降低了设备的利用率。鉴于柔直单元可实现无功的连续调节, 控制同侧的柔直换流站无功输出抑制滤波器投切造成的电压动态变化, 提高系统稳定性和可用率。当系统处于协调控制模式下, 直流系

统稳定运行时, 柔直系统无功输出保持为零。当直流站控投切滤波器的瞬间, 直流站控协调柔直系统输出, 用于稳定滤波投切导致的电压波动, 当滤波器投切完成后, 柔直系统无功输出值恢复到零, 以此模拟常规直流的 Gamma Kick 过程。

如图 2 所示, 当投入滤波器组投入瞬间  $t_1$ , 稳态无功协调控制在  $T_{short}$  时间内, 无功参考值  $Q_{ref\_MMC}$  从 0 增大到 60 Mvar; 当柔直单元无功输出达到 60 Mvar 后, 将在随后的相对较长的  $T_{long}$  时间内, 从 60 Mvar 回降至 0。

切除滤波器组时, 在切除滤波器组的瞬间  $t_2$ , 稳态无功协调控制在  $T_{short}$  时间内, 无功参考值  $Q_{ref\_MMC}$  从 0 变到 -60 Mvar, 当柔直单元无功输出达到 -60 Mvar 后, 将在随后的相对较长的  $T_{long}$  时间内, 从 -60 Mvar 回降至 0。

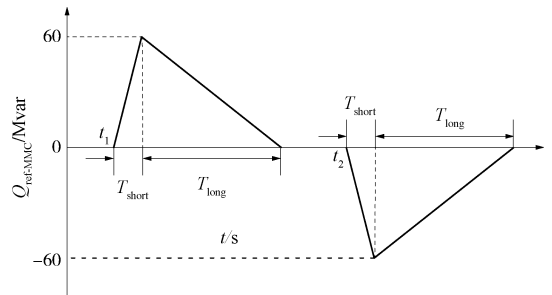


图 2 柔直无功输出与投/切滤波器的配合

Fig. 2 Reactive Output Strategy of VSC

### 1.2.5 暂态无功协调控制

在交流系统暂态故障下, 柔直系统作为换流站主要的调节手段为交流电网提供紧急无功支撑, 维持交流电压稳定, 对于不同严重等级的交流系统暂态故障采取不同程度的无功补偿策略。常规直流单元与柔性直流单元在暂态下的无功控制相对独立, 由于柔直无功支撑作用, 能够有效减小常规直流单元的换相失败风险<sup>[4]</sup>。

## 2 仿真验证

### 2.1 有功协调控制

#### 2.1.1 功率分配仿真

在 PSCAD 中验证定功率控制的有效性, 仿真条件为: 禁止功率转移功能, 总有功参考值为 1 200 MW, 分配系数  $P_{ratio}$  = 常规直流/柔性直流 = 0.5, 在 2 s 时刻, 分配系数变为 0.8。云南侧(送端)和广西侧(受端)的仿真结果分别如图 3 所示,

从仿真结果可以看出, 柔直和常规直流发出的功率与预期值基本一致。

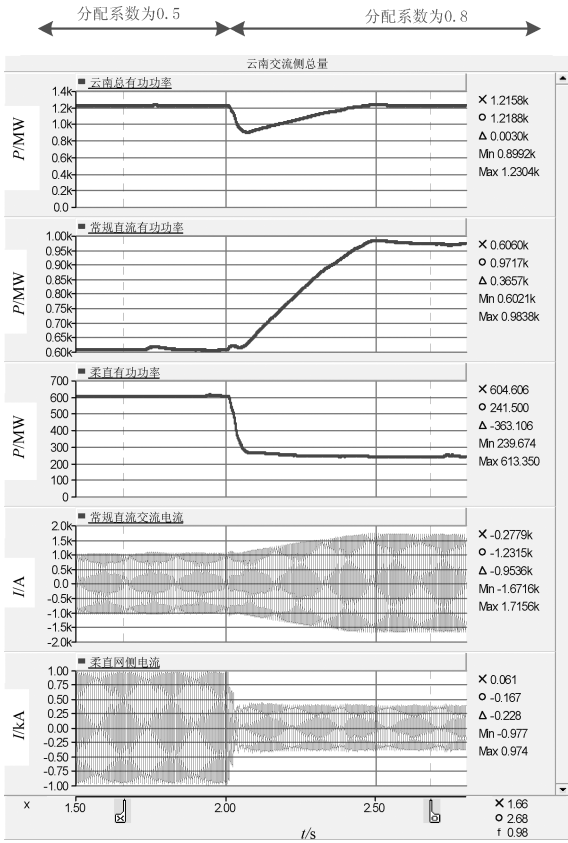


图 3 功率分配仿真波形

Fig. 3 Power Distribution Strategy

### 2.1.2 功率转移控制

仿真条件: 总有功参考值由 600 MW 增大到 1 200 MW, 按比例传输模式, 分配系数  $P_{ratio} = \text{常规直流} / \text{柔性直流} = 0.5$ , 将常规直流输出的最大功率限制在 300 MW。

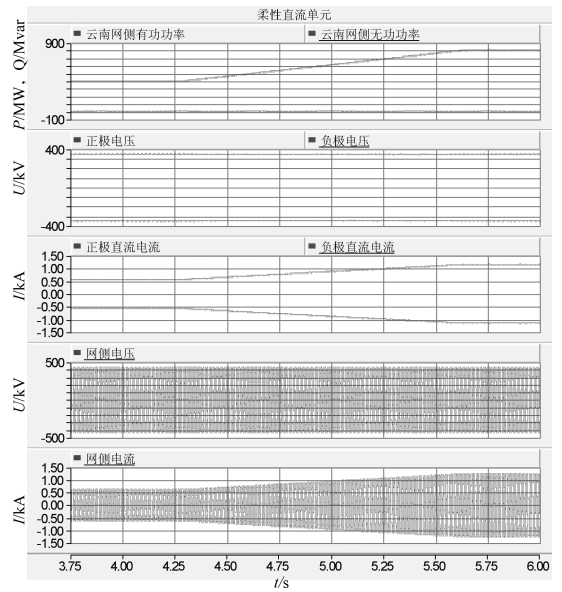
根据分配比例, 常规直流的有功指令由 200 MW 增大到 400 MW, 柔直的功率指令由 400 MW 增大到 800 MW。然而常规直流的有功限幅为 300 MW, 且常规直流的功率转移控制使能, 因此实际的有功指令为 300 MW。常规直流剩余的 100 MW 由柔性直流承担, 则柔直实现的有功指令为 900 MW。

从图 4 的仿真结果可以看到, 柔直和常规直流实际发出的功率与参考功率基本相同。

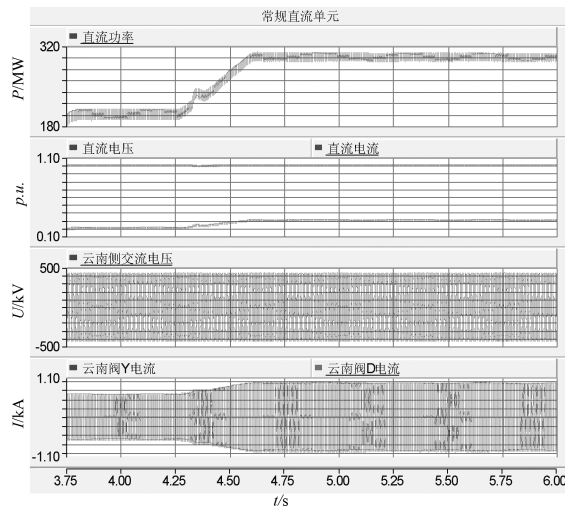
## 2.2 无功协调控制

### 2.2.1 稳态无功协调控制

仿真条件为: 总参考功率为 2 000 MW, 常规



(a) 柔直单元



(b) 常规单元

图 4 功率转移控制仿真波形

Fig. 4 Power Shift Strategy

直流和柔直按照 1 : 1 进行分配。在 3.6 s 时刻, 总参考功率由 2 000 MW 阶跃到 1 000 MW。相应的仿真结果如图 5 所示。

常规直流消耗的无功随着有功的升高逐渐增大, 相应地, 投入滤波器的数量也根据无功消耗的增加而增加。为抵消滤波器投入时刻带来的无功冲击对系统的影响, 柔直单元接收到滤波器投入信号后, 在 2 ms 内, 柔直单元消耗的无功由 0 增加到 60 Mvar, 然后再 200 ms 内由 60 Mvar 减小到 0, 模拟类似常规直流中的 Gamma Kick 功能。

在 3.6 s 时刻, 有功功率参考值减小, 常规直

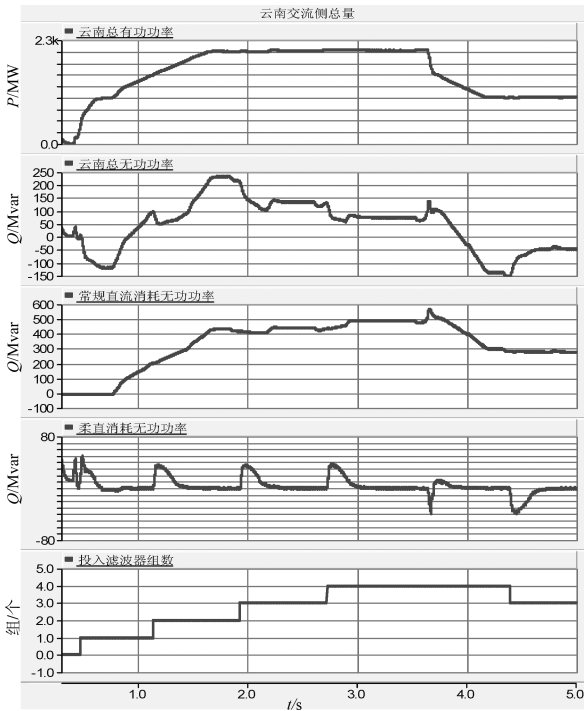


图5 稳态无功协调控制仿真波形

Fig. 5 Steady State Reactive Power Coordination Strategy

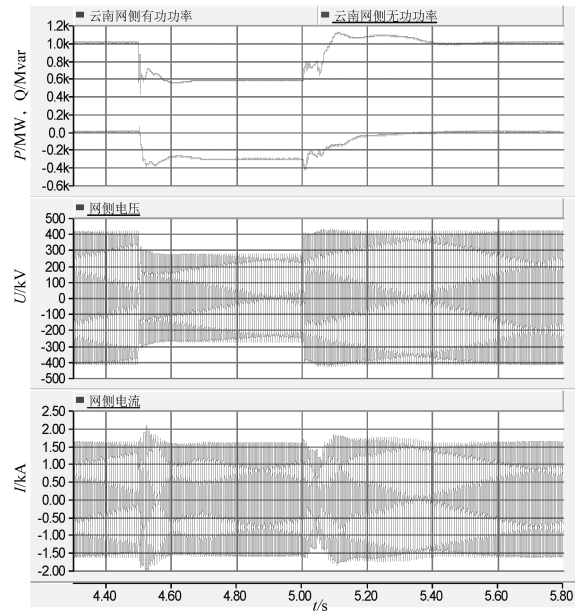
流消耗的无功减小,从而切除一定数量的滤波器,以防止过补偿。为抵消滤波器切除带来的无功冲击对系统的影响,柔直单元接收到滤波器投入信号后,在2 ms内,柔直单元消耗的无功由0减小到-60 Mvar,然后再200 ms内由-60 Mvar增加到0,模拟类似常规直流中的Gamma Kick功能。从仿真结果中可以看出,由于柔直和滤波器的无功协调作用,使得系统总无功在滤波器投切时并未出现较大的冲击。

### 2.2.2 暂态无功协调控制

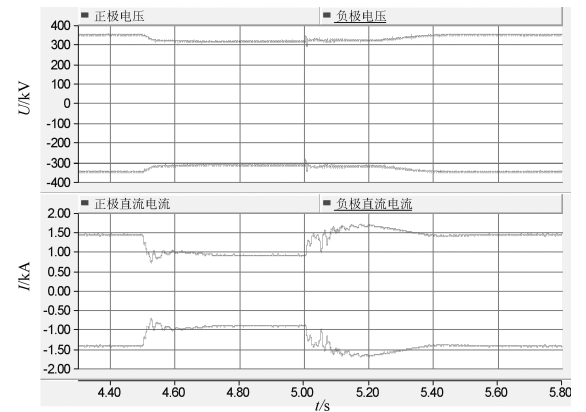
云南侧交流系统发生三相短路故障,接地阻抗0.06 H,交流系统电压跌落到0.6 p. u.。从仿真结果可以看到,见图6和图7。在系统故障期间,柔直发出大量的无功功率,直流电压下降到电压裕度控制值0.9 p. u.。常规直流输出的有功功率和消耗的无功功率均大幅下降,直流电压下降到0.6 p. u.左右。常规直流和柔性直流均实现了故障期间的稳定穿越。

## 3 结论

本文研究了柔性直流与常规直流在背靠背输电系统中的协调控制策略,并通过了PSCAD仿真验



(a) 柔性直流单元交流侧波形



(b) 柔性直流单元直流侧波形

图6 柔性直流单元暂态无功协调控制仿真波形

Fig. 6 Transient State Reactive Power Coordination Strategy of VSC-HVDC

证了所设计的控制保护策略的正确性。

通过本文的研究,主要结论如下:

- 1) 常规直流单元和柔直单元接入同一交流系统中,必须在站控中采取协调控制。协调控制包括有功协调控制和无功协调控制。
- 2) 有功功率比例分配模式可通过设定常规直流单元功率占总功率的比例,可灵活实现常规直流优先,柔直单元优先,平均分配,按比例分配等多种有功功率分配。
- 3) 双单元功率转移功能可保证当某一直流单元的输电能力下降,导致实际的直流传输功率减少,另一直流单元会增加功率指令,自动而快速地把直

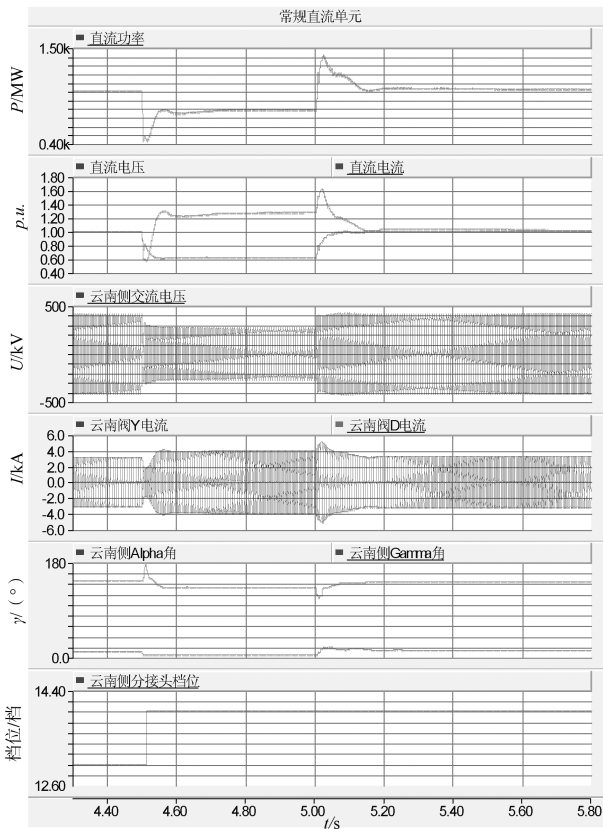


图7 常规直流单元暂态无功协调控制仿真波形

Fig. 7 Transient State Reactive Power Coordination Strategy of Conventional DC

流传输功率恢复到尽可能接近功率定值的水平。

4) 通过柔直系统的快速无功控制能力, 在直流站控投切滤波器的瞬间, 协调柔直系统无功输出, 用于稳定滤波投切导致的电压波动, 代替常规直流无功辅助控制功能中的 RPC 和 Gamma Kick 功能, 避免常规直流换流站调节触发角和熄弧角对直流系统运行性能的影响(设备承受的应力大、损耗大、谐波分量大等)。

5) 在交流系统出现对称或者非对称故障下, 通过采取特殊的穿越控制策略, 利用换流器的快速响应能力, 可以提高柔性直流输电系统的故障穿越能力。

#### 参考文献:

- [1] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.  
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC Transmission Technology: Application, Advancement and Expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [2] 刘大鹏, 程晓绚, 苟锐锋, 等. 异步联网工程柔性直流换流站过电压与绝缘配合 [J]. 高压电器, 2015, 51(4): 104-108.  
LIU Dapeng, CHENG Xiaoxuan, GOU Ruifeng, et al. Over-voltage and Insulation Coordination for MMC-HVDC Asynchronous Project [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 104-108.
- [3] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.  
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The Integrated System Design Scheme of Nan'ao VSC-MTDC Demonstration Project [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, Application and Development of VSC-HVDC Engineering Technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [5] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72-76.
- [6] 戴国安, 周君文, 王亚非. 特高压直流无功控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 48-51.
- [7] 吴晔, 殷威扬. 逆变侧熄弧角 Gamma-Kick 控制仿真计算 [J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 31-32.

(责任编辑 郑文棠)

## 《南方能源建设》3 篇文章荣获第四届广东省期刊优秀作品奖

2015年6月6日, 广东省期刊协会公布第四届广东省期刊优秀作品评选结果, 《南方能源建设》杂志共有3篇文章获奖, 分别是: 《世界能源新格局下中国的能源安全问题》(2014年第1期, 作者: 孙小兵, 编辑: 张春文) 获优秀文章二等奖; 《发展碳捕集、利用与封存对广东的产业机会》(2014年第1期, 作者: 陈澜、梁希、周蒂, 编辑: 张春文) 和《广东能源消费碳排放趋势与前景展望》(2015年第1期, 作者: 匡耀求, 编辑: 郑文棠) 获优秀文章三等奖。

(责任编辑 郑文棠)