

DOI: 10.7667/PSPC161882

基于高阶系统模型的 VSC-MTDC 下垂控制策略研究

洪莎莎¹, 武迪², 吕宏水², 朱金大², 俞拙非²

(1. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏 南京 210000;

2. 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 210006)

摘要: 多端柔性直流输电(VSC-MTDC)基于柔性直流技术及多站协调控制策略。首先, 设计了适于 VSC-MTDC 的 $P-U_{dc}/U_{ac}-Q$ 下垂策略及控制系统架构。其次, 提出基于 LCL 高阶一次系统模型的电流内环、直流电压外环及下垂环控制器架构, 并形成了优化控制参数的设计方法。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 10 kV 4 端 VSC-MTDC 的仿真模型并进行控制参数优化, 基于启动控制、稳态控制及临界阶跃响应 3 种暂态工况进行仿真分析。仿真结果表明, 所提策略可实现各站直流母线电压的独立控制基础上的下垂式有功潮流控制, 提升了 VSC-MTDC 系统的安全稳定性, 且多种暂态工况下响应特性良好。

关键词: VSC-MTDC; $P-U_{dc}$ 下垂; 高阶系统模型; 优化控制参数; 暂态工况

Droop control strategy research of VSC-MTDC based on high-order system model

HONG Shasha¹, WU Di², LÜ Hongshui², ZHU Jinda², YU Zhuofei²

(1. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210000, China;

2. Nari Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210006, China)

Abstract: Voltage Source Converter based Multi-terminal Distribution (VSC-MTDC) is based on flexible-HVDC and multi-stations coordinated control strategy. First, $P-U_{dc}/U_{ac}-Q$ droop strategy and control system architecture are designed. Then, based on LCL high-order primary system model, control system architecture of inner current loop, outer DC-voltage loop and droop loop is proposed, and a design method of optimized control parameter is made. Finally, simulation model of 4-terminal 10 kV VSC-MTDC is built and control parameters are selected. Starting control, steady-state control and critical step response are analyzed. Simulation results show that adopting the proposed control strategy, each converter could achieve droop control of active power flow upon maintaining stability of DC bus voltage. Security and stability of VSC-MTDC is improved and response characteristics are good upon multi transient conditions.

This work is supported by National Science and Technology Major Project (No. 2016YFB0901805) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 524606150161).

Key words: VSC-MTDC; $P-U_{dc}$ droop; high-order system model; optimized control parameter; transient conditions

0 引言

多端柔性直流输电^[1-2](Voltage Source Converter based Multi-terminal Distribution, VSC-MTDC)以柔性直流技术为基础, 可将多个 VSC 送端站的有功潮流以柔性灵活可控的方式送至 VSC 受端站。VSC-MTDC^[3-4]具有易于潮流调控和组网方式灵活等优

点, 其系统架构相比两端柔直更复杂, 系统控制策略的设计对安全性极为重要。

当前多端柔直的控制策略主要有 3 种: 主从式控制、电压偏差控制以及下垂(Droop)控制。主从式控制和电压偏差控制均难以实现各 VSC 换流站独立控制直流母线电压, 只能实现直流电压后备控制, 安全稳定性较差。相比这两种控制策略, 下垂控制可实现各 VSC 换流站独立控制各自直流母线电压, 站间不需要通信即实现系统调度, 容易实现且任意 VSC 换流站的退出不会影响系统的继续运行, 系统安全稳定性高。在无站间通信的情况下, 潮流送端根

基金项目: 国家重大科技专项(2016YFB0901805); 国家电网公司科技项目(524606150161); 南京南瑞集团公司科技项目(524606150143)

据发送潮流采用有功-直流电压下垂控制,潮流受端采用定直流电压控制,即实现送端输送潮流的自动均衡。如果多端柔直的内环控制参数设置不合理,或者下垂系数未达优化,柔直系统可能在扰动或控制方式切换时存在失稳的风险。

文献[5-10]提出 VSC-MTDC 的下垂控制策略,分析了下垂控制策略的影响机理和约束条件,但没有提出适用于 VSC-MTDC 的下垂控制架构;文献[11-12]提出下垂控制架构并进行仿真算例分析,但只考虑低阶一次系统而非实际高阶一次系统进行内外环控制器的设计及控制参数的选取,而基于高阶一次系统下的下垂控制环的引入会增大系统失稳的风险。本文首先提出基于高阶 LCL 一次系统模型的 VSC 电流内环控制器架构及优化控制参数的选取,然后提出平均值直流电压外环控制器架构及优化控制参数选取,同时提出适用于多换流站互联的 $P-U_{dc}/U_{ac}-Q$ 的下垂控制策略及其控制器,可提高多端系统运行稳定性。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 10 kV 等级的 VSC-MTDC 的 4 端仿真模型,并对本文所提控制策略进行算例分析及仿真验证^[13-14]。

1 MTDC 的系统模型及主参数

VSC-MTDC 通过直流输电线路将多个换流站(VSC)相连,从而实现有功潮流的传输及无功支撑。VSC-MTDC 的 4 端典型系统架构如图 1 所示,包含 2 个送端换流站、2 个受端变流站。

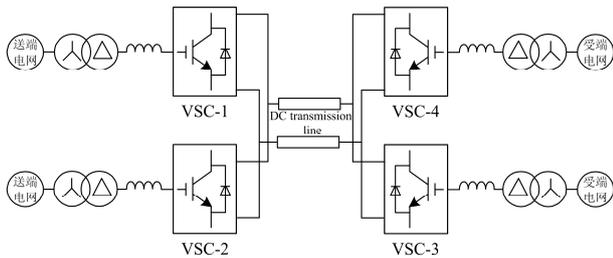


图 1 VSC-MTDC 的典型系统组网架构

Fig. 1 Typical networking architecture of VSC-MTDC

VSC 换流站拓扑结构参见图 2。其中 L_1 为网侧

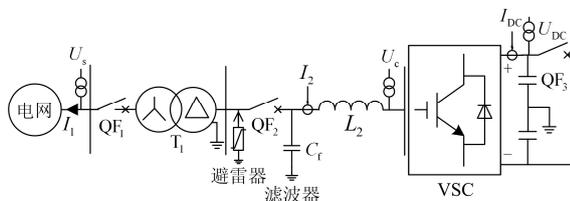


图 2 VSC 换流站主电路拓扑结构

Fig. 2 Main circuit topology of VSC

阻抗(电网短路阻抗与换流变漏抗之和), L_2 为换流变电抗, C_d 为直流支撑电容。 U_{s-abc} 、 U_T 和 U_{c-abc} 分别为系统侧、滤波器并接处及阀侧基波电压; I_1 、 I_2 和 I_{DC} 分别为网侧、阀侧基波电流及直流负载电流。

设开关函数 S_k 为

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ 0 & \text{下桥臂导通} \end{cases} \quad (k=a, b, c) \quad (1)$$

利用傅氏分解得到 S_a 、 S_b 和 S_c 低频基波分量为

$$\begin{cases} s_a = \frac{1}{2}(1 + M \sin(\omega t_d + \delta)) \\ s_b = \frac{1}{2}\left(1 + M \sin(\omega t_d + \delta - \frac{2\pi}{3})\right) \\ s_c = \frac{1}{2}\left(1 + M \sin(\omega t_d + \delta + \frac{2\pi}{3})\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_d = kT_s$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, T_s 为开关周期; M 为调制度。

根据 PWM 调制原理, VSC 阀侧相电压为

$$\begin{cases} U_{ca} = s_a \cdot U_{dc} + U_{NO} \\ U_{cb} = s_b \cdot U_{dc} + U_{NO} \\ U_{cc} = s_c \cdot U_{dc} + U_{NO} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{NO} 为 VSC 中点电压; U_{DC} 为直流电压。

得出三相静止坐标下 VSC 的交直流侧数学模型^[7]为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = U_{sa} - s_a \cdot U_{dc} + U_{NO} \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = U_{sb} - s_b \cdot U_{dc} + U_{NO} \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = U_{sc} - s_c \cdot U_{dc} + U_{NO} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_{sa} + s_b i_{sb} + s_c i_{sc} - i_L \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 分别为网侧三相相电压。

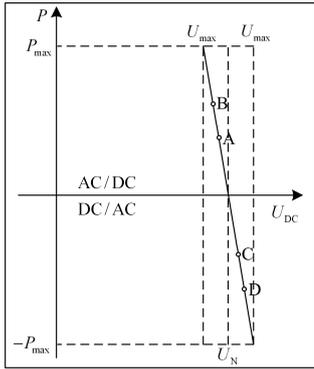
在三相对称 VSC-MTDC 中, $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$, $U_{sa} + U_{sb} + U_{sc} = 0$, 结合式(3)可得

$$U_{NO} = -\frac{U_{dc}}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k \quad (5)$$

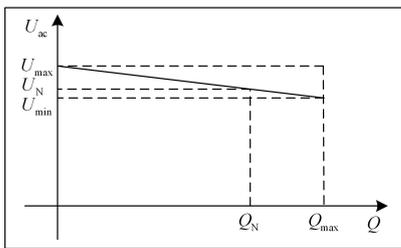
2 VSC-MTDC 下垂控制策略及其控制器

VSC-MTDC 在特定工况下需进行有功潮流的反转控制, 本文所提 $P-U_{dc}$ 下垂控制策略针对有功双向流通的 VSC。下垂自变量为 U_{dc} , 因变量为有功潮流 P , 在有功潮流控制目标调整时, 改变直流母线电压水平以实现瞬时有功和直流电压的重新平衡。工况 1: 如图 3 第一象限所示, 此时 VSC 交流

侧为负载端, VSC 从直流侧向交流侧输送有功功率(逆变状态), 当 VSC 向交流侧输送的有功功率增大时, 控制系统根据下垂特性降低直流电压以保障有功出力, 最终达到新的有功功率-直流电压平衡。工况 2: 如图 3 第四象限所示, 此时 VSC 交流侧为电源端, VSC 将交流侧有功潮流向直流侧输送(整流状态), VSC 向直流侧输送有功功率增大时, VSC 系统根据下垂特性(负向)抬高直流电压以减缓有功出力, 最终达到新的有功功率-直流电压平衡。

图 3 $P-U_{dc}$ 下垂控制策略Fig. 3 $P-U_{dc}$ droop control strategy

在 VSC-MTDC 与弱电网相连时, 当交流侧无功负荷增加时, 造成交流侧电压幅值降低的风险增强。本文所提 $U_{ac}-Q$ 下垂控制策略侧重在交流侧电压降低时, VSC 通过增大向交流侧输送的无功功率以提升交流侧电压水平, 在下垂控制器的作用下达到新的无功功率-交流电压平衡, 如图 4 所示。

图 4 $U_{ac}-Q$ 下垂控制策略Fig. 4 $U_{ac}-Q$ droop control strategy

为实现图 3 和图 4 的下垂控制策略, 本文在直流电压外环增加一个利用瞬时有功功率偏差比例控制直流电压偏差的比例下垂控制器, 无功功率下垂控制与直流电压下垂控制相似。所设计 $P-U_{dc}$ 及 $U_{ac}-Q$ 下垂控制器架构如图 5 所示。

以 $P-U_{dc}$ 下垂控制器为例, 下垂系数的选取可根据下垂控制策略(图 3)及 VSC 最大允许有功功率(P_{max})、最大允许直流电压(U_{dcmax})进行基准值计算。从图 3 可得

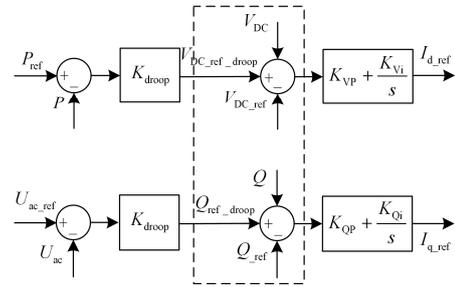


图 5 下垂控制器架构

Fig. 5 Architecture of droop control

$$(P_{ref} - P_{max})K_{droop} = U_{dcref} - U_{dcmax} \quad (6)$$

因此, K_{droop} 可以通过式(7)计算。

$$K_{droop} = \frac{U_{dcref} - U_{dcmax}}{P_{ref} - P_{max}} \quad (7)$$

式中: U_{dcmax} 为最大允许直流电压; P_{max} 为最大允许有功功率限值。

在实际工程及仿真验算中, 优化下垂系数的选取需均衡考虑控制量的快速阶跃响应和趋稳振荡程度(避免失稳工况)。同时, 由于下垂控制为单一比例环节, 其目标量反馈控制为有静差状态。以 $P-U_{dc}$ 下垂控制器为例, 如图 3 所示, 当输出有功在第一象限上升时, 直流电压略有下降, 此时 U_{dc} 和 U_{dcref} (目标值)存在一定偏差, 反映到图 5 的控制器框图的虚线部分就意味着 P_{ref} 和 P 的偏差经下垂系数加乘后必须有一定的电压辅助参考值偏差, 也就是瞬时有功和目标值存在静差。

3 基于高阶函数模型的控制系统设计

3.1 基于 LCL 高阶特性的电流内环控制器

为抑制对电网的谐波污染, VSC-MTDC 系统中每个 VSC 站的换流变压器和换流电抗器间通常安装交流滤波器。滤波器的引入将 VSC 系统的阻频特性由一阶 L 变为三阶 LCL, 系统谐振和失稳的风险有一定的提高。若 VSC 控制参数不合理, 则极大地降低了 VSC-MTDC 的安全稳定性。忽略交直流母线电压波动和死区时间等因素, 设 VSC 工作在线性区, 由图 2 可得到

$$\begin{cases} L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = U_f(t) - U_s(t) \\ C \cdot \frac{dU_f}{dt} = I_2(t) - I_1(t) \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} = U_c(t) - U_f(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中, U_f 为滤波器母线电压。

根据线性叠加定理, 分别考虑 U_s 和 U_c 对 VSC 阀侧交流电流 I_2 的作用, 通过公式推演依次消去网侧电流 I_1 及滤波器母线电压 U_T , 可得

$$\begin{cases} \frac{U_s(s)}{I_2(s)} = -[L_1 L_c C s^3 + (L_1 + L_c) s] \\ \frac{U_c(s)}{I_2(s)} = \frac{L_1 L_c C s^3 + (L_1 + L_c) s}{L_1 C s^2 + 1} \end{cases} \quad (9)$$

利用 PI 控制实现电流内环控制, 取 I_2 为反馈控制分量, 得到内环控制框图如图 6 所示。

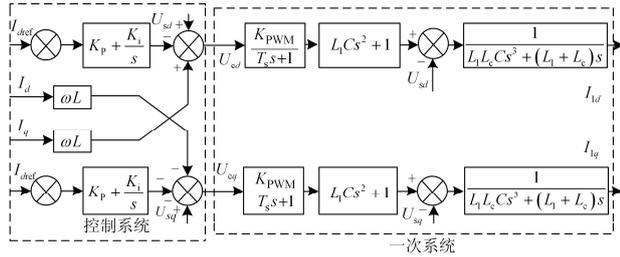


图 6 dq 电流内环控制器的控制框图

Fig. 6 dq inner current control system

根据式(9)及图 6, 得到基于 LCL 高阶特性的电流内环的开环传递函数为

$$C(s) = \frac{K_{ip}s + K_{ii}}{s} \cdot \frac{K_{PWM}(L_2 C_f s^2 + 1)}{\frac{L_1 L_2 C_f s^4}{f_{PWM}} + L_1 L_2 C_f s^3 + \frac{(L_1 + L_2) s^2}{f_{PWM}} + (L_1 + L_2) s} \quad (10)$$

电流控制内环的闭环传递函数为

$$C_i(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)} \quad (11)$$

LCL 系统的转折频率为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} \quad (12)$$

将 PI 控制器的零点与 $C(s)$ 的极点对消以提高系统稳定性, 考虑抑制 f_n 处 PI 控制器的频域响应、响应速度及系统稳定性, 取系统传递函数的穿越频率^[7] f_c 为转折频率的 1/10, 得到电流内环 PI 参数的计算式为

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K_{ii}}{K_{ip}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} \\ \left| \frac{K_{ii}s + K_{ip}}{s} \cdot \frac{L_2 C s^2 + 1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_1) s} \cdot \frac{K_{PWM}}{1 + T_s s} \right|_{s=j \cdot f_c} = 1 \end{cases} \quad (13)$$

3.2 基于高阶电流内环的直流电压外环控制器

三相平衡 VSC-MTDC 中 VSC 交流基波电流为

$$\begin{cases} I_{2a} = I_m \cos(\omega t + \theta) \\ I_{2b} = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ I_{2c} = I_m \cos(\omega t + 2\pi/3 + \theta) \end{cases} \quad (14)$$

式中, θ 为电流基波初始相位角。

将式(5)、式(2)代入式(4), 简化可得

$$I_{DC} = C \frac{dU_{dc}}{dt} = 0.75M \cdot I_m \cos \theta \quad (15)$$

基于 3.1 节中电流内环的闭环传递函数 $C_i(s)$, 得出基于 LCL 高阶特性的直流电压控制器架构如图 7 所示。

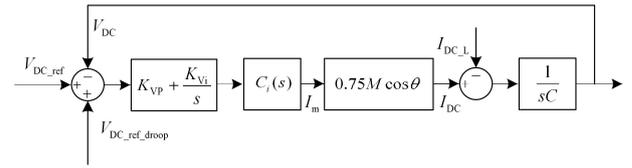


图 7 直流电压外环控制器的控制框图

Fig. 7 Outer DC voltage control system

设定初始相位为 0, 根据图 7 的外环控制策略, 得到基于 LCL 高阶系统的直流电压控制外环的开环传递函数 $V(s)$ 为

$$V(s) = \frac{K_{VP}s + K_{Vi}}{s} \cdot \frac{C_i(s) \cdot 0.75M}{sC} \quad (16)$$

与电流内环控制参数的整定不同, 直流电压外环的整定不能简单采用零极点对消的方式提高跟踪速率。本文基于提升直流电压幅频及相频稳定性的原则进行直流电压外环控制参数的整定, 选取穿越频率为 10 Hz, 相位稳定裕度为 70°。综上, 得到电压内环 PI 控制参数的计算式为

$$\begin{cases} \left| \frac{K_{Vi}s + K_{Vp}}{s} \cdot \frac{C_i(s) \cdot 0.75M}{sC} \right|_{s=j \cdot f_c} = 1 \\ \varphi \left(\frac{K_{Vi}s + K_{Vp}}{s} \cdot \frac{C_i(s) \cdot 0.75M}{sC} \right)_{s=j \cdot f_c} = -180^\circ + 70^\circ \end{cases} \quad (17)$$

4 仿真算例

4.1 系统参数设置

以 4 端有源 VSC-MTDC 为例, 在 PSCAD/EMTDC 中建立基于本文控制策略的 10 kV VSC-MTDC 模型。4 个 VSC 换流站额定容量均为 10 MVA, 交流线电压 $U_s=10$ kV, 直流电压 $U_{dc}=20$ kV, 换流电抗器为 5 mH(0.158 p.u.), 直流支撑电容为 2000 μ F。

控制参数: 设定 P_{max} 为 1.1 p.u., U_{dcmax} 为 1.025 p.u., 基于下垂系数公式、动态响应特性及下垂稳定性优化, 得出下垂控制器下垂参数为 0.5e-3。基于本文设计的电压外环、电流内环及下垂环进行控制

参数优化, 得出电压外环 PI 参数为 0.17/5.6, 得出电流内环 PI 参数为 3/20。

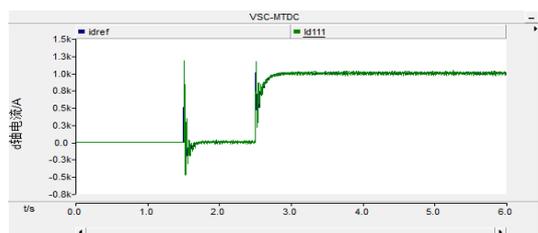
4.2 VSC-MTDC 启动及输送有功潮流稳态工况

VSC-1—VSC-4 通过启动策略建立各站的直流母线电压: 首先通过不控整流进行直流升压, 1.25 s 切除启动电阻继续升压, 1.5 s 时 VSC 阀组启动直流电压控制并达到额定值。启动时 VSC-1 及 VSC-2 的下垂控制环节不投入, 仅采用定直流电压控制。

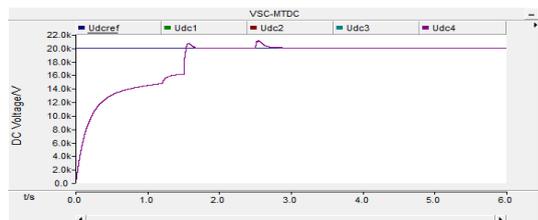
系统稳态运行方式设定: VSC-1、VSC-2 采用下垂控制策略进行有功输出; VSC-3、VSC-4 采用定直流电压控制策略接收 VSC-1、VSC-2 输出的有功功率。在启动至直流电压稳定后, 设定 2.5 s 时 VSC-1 及 VSC-2 分别向各自直流侧输送功率为 10 MW/0 Mvar 及 8 MW/2 Mvar, VSC-3 及 VSC-4 通过直流线路接收 VSC-1 及 VSC-2 的有功潮流(有功潮流为直流侧流向交流侧)。

图 8(a)为 d 轴暂态跟踪电流的暂态特性图, 从该图可以看出, d 轴(有功)电流在启动及功率输送等暂态过程确保了快速跟踪性, d 轴跟踪电流保持稳定, 未出现振荡失稳状况。图 8(b)为 VSC-1—VSC-4 的直流母线电压, 从该图可看出, 4 台区直流电压在启动后快速达到额定电压(20 kV), 暂态过压程度小于 10%, 不影响保护系统动作。VSC-1 输送额定有功潮流时, 直流电压经历短时暂态过冲后快速达到稳定工况, 且不存在振荡失稳问题。

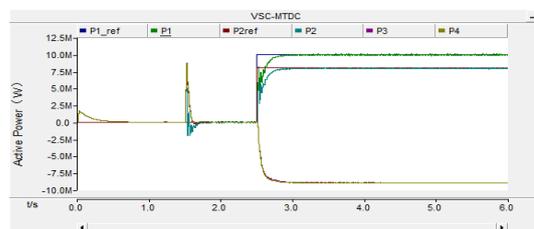
图 8(c)为 VSC-1、VSC-2 采用 $P-U_{dc}$ 下垂控制策略时, VSC-1—VSC-4 的瞬时有功功率。可以看出, 在 VSC-1、VSC-2 输送有功潮流时, VSC-1、VSC-2 可在各站独立直流稳压的基础上准确跟踪有功控制指令。VSC-3、VSC-4 接收的有功潮流相同, 即为 VSC-1 和 VSC-2 有功潮流的 1/2, 由于其有功功率方向为直流侧向交流侧注入, 其瞬时有功功率为负值。



(a) VSC1 换流站的 d 轴跟踪电流



(b) VSC1—VSC4 的直流母线电压



(c) VSC1—VSC4 的瞬时有功功率

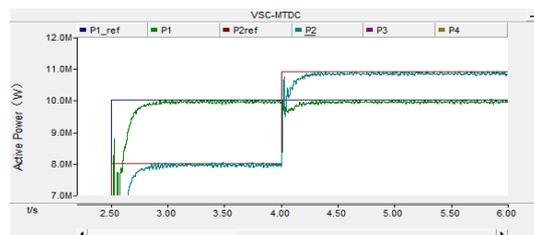
图 8 VSC-MTDC 启动及潮流输送稳态工况

Fig. 8 Start and steady-state flow transmission of VSC-MTDC

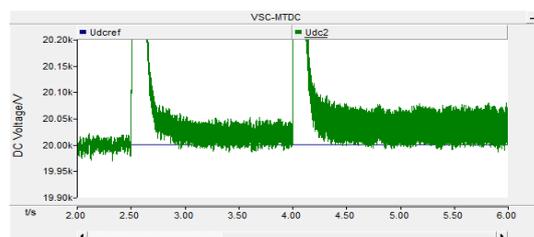
4.3 VSC-MTDC 临界阶跃响应及下垂特性分析

设定 VSC-1 及 VSC-2 有功潮流为交流侧流向直流侧, VSC-2 的输送有功由 8 MW 阶跃至 10.9 MW (超额定容量 9%), VSC-1 及 VSC-2 的瞬时有功及直流电压如图 9(a)、图 9(b)所示。可以看出, 在临时提供临界限值下有功输送时, VSC-2 换流站的瞬时功率保持较好的响应特性, 实现了功率的快速跟踪和直流电压的快速稳定。可以看出, 由于有功潮流方向为交流侧电网向直流侧输送, 即此时有功潮流下垂调节过程位于图 3 下垂控制的下部, 即当控制有功潮流上升时, 直流电压相比额定电压略有上升(幅值为 40 V)。

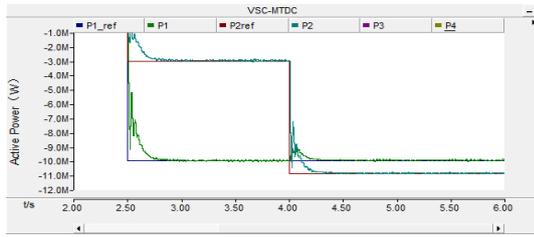
设定 VSC-1 及 VSC-2 有功潮流为直流侧流向交流侧, VSC-2 同样从 8 MW 阶跃至 10.9 MW, 图 9(c)、图 9(d)为 VSC-1、VSC-2 的瞬时有功和直流电压。可以看出, 当 VSC-1 及 VSC-2 潮流发生反转, 两 VSC 站工作在图 3 下垂控制的下部, 即当控制有功潮流上升时, 直流电压略有下降。



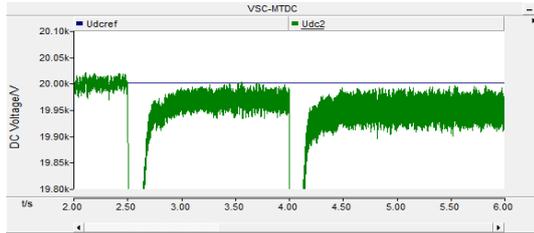
(a) 有功方向从交流至直流时 VSC-1 及 VSC-2 的瞬时有功



(b) 有功方向从交流至直流时 VSC-2 的直流电压



(c) 有功方向从直流至交流时 VSC-1 及 VSC-2 的瞬时有功



(d) 有功方向从直流至交流时 VSC-2 的直流电压

图 9 潮流双向时 VSC-1 及 VSC-2 瞬时有功及直流电压

Fig. 9 Instantaneous active power and DC voltage of VSC-1 and VSC-2 in opposite direction

5 结论

本文设计了适用于 VSC-MTDC 的 $P-U_{dc}$ 下垂控制策略及其控制器, 可实现 VSC 换流站独立控制直流母线电压基础上的有功潮流控制。考虑 LCL 高阶系统进行 VSC 电流内环控制器的设计及控制参数优化, 利用 VSC 一次系统模型、所推导 VSC 开关数学模型及电流闭环传递函数进行直流电压外环控制器及控制参数优化。

在 PSCAD/EMTDC 中基于本文控制策略建立 10 kV VSC-MTDC 的 4 端仿真模型并基于上文所述控制策略进行仿真验算。仿真结果表明: VSC-HVDC 系统可实现小暂态过冲下的快速启动, 各站 VSC 可实现有功潮流反馈控制基础上的直流电压下垂控制, 验证了本文所提下垂控制策略的可靠运行及基于高阶一次系统的控制器参数设计方法, 同时 VSC 站发生临界有功阶跃动作时系统暂态特性良好。

参考文献

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 崔亚辉, 张俊杰, 赵宗彬, 等. 高压直流输电超临界

600 MW 机组次同步振荡扭振模型及仿真[J]. 热力发电, 2016, 45(6): 106-110.

CUI Yahui, ZHANG Junjie, ZHAO Zongbin, et al. Subsynchronous oscillation torsional vibration model and simulation for a supercritical 600 MW unit with high voltage direct current transmission[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(6): 106-110.

- [3] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.

WU Junhong, AI Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27.

- [4] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

- [5] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 37(15): 125-132.

TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 37(15): 125-132.

- [6] 唐昆明, 王俊杰, 张太勤. 基于自适应下垂控制的微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 68-74.

TANG Kunming, WANG Junjie, ZHANG Taiqin. Research on control strategy for microgrid based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 68-74.

- [7] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.

CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.

- [8] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2588-2599.

LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2588-2599.

- [9] 王印松, 曲晓荷, 邓天白, 等. 基于反步法的燃气轮机功率控制器设计[J]. 热力发电, 2016, 45(7): 67-71.

WANG Yinsong, QU Xiaohu, DENG Tianbai, et al. Design of gas-turbine controller based on backstepping method[J].

- Thermal Power Generation, 2016, 45(7): 67-71.
- [10] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
- YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [11] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 高强, 吴华华, 陈楚楚, 等. 舟山多端柔性直流系统环流抑制和交流故障穿越能力分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 62-67.
- GAO Qiang, WU Huahua, CHEN Chuchu, et al. Circulating current suppressing and AC faults ride-through capability analysis of zhoushan mmc-mtde system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 62-67.
- [13] 杨峰, 徐习东, 裘愉涛. 交流电压不对称下柔性直流配网换流站功率传输极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 86-93.
- YANG Feng, XU Xidong, QIU Yutao. Research on transmission power limit of flexible DC distribution converters under unbalanced AC voltages[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 86-93.
- [14] 薛阳, 时宇飞, 阚东跃, 等. 基于自抗扰的微电网下垂控制[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 25-30.
- XUE Yang, SHI Yufei, KAN Dongyue, et al. Control strategy for microgrid droop control based on ADRC[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 25-30.

收稿日期: 2016-11-11; 修回日期: 2017-02-24

作者简介:

洪莎莎(1984—), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化及 FACTS; E-mail: 315893603@qq.com

武迪(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力电子及其在电力系统中的应用。E-mail: wdsjtu@163.com

(编辑 魏小丽)