基于改进电压下垂控制的MMC-MTDC系统协调控制策略

宋汶秦[1]，柴文博[2]，杨婷婷[1]， 赵玲霞[2]，王兴贵[2]

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院，甘肃 兰州 730000；
2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院，甘肃 兰州 730050)

摘要：在基于MMC的新能源多端柔性直流并网系统（Multi-Terminal Flexible DC Transmission System，MTDC）中，传统下垂控制的下垂系数单一，难以适应复杂的扰动工况，影响系统运行的稳定性。因此，以直流电压裕度跟踪为基础，对传统下垂控制进行改进。通过在下垂系数中加入直流电压裕度校正因子，利用换流站实时直流电压偏差数据进行自适应调节，使系统直流电压在接近电压裕度上限时自动减小，保证系统在受到功率扰动或者换流站故障时直流电压稳定分布及有功功率合理分配。最后，建立四端新能源柔性直流并网系统仿真模型，并通过算例验证了控制策略在“*N* − 1”故障下的有效性。

关键词：MMC-MTDC；换流站；电压下垂控制；直流电压裕度跟踪

Coordinated control strategy of MMC-MTDC system based on improved voltage droop control

SONG Wenqin[1], CHAI Wenbo[2], YANG Tingting[1], ZHAO Lingxia[2], WANG Xinggui[2]

(1. State Grid Gansu Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Lanhzou 730000, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In the new energy Multi-Terminal Flexible DC Transmission System (MTDC) based on MMC, the traditional droop control has a single droop coefficient, which makes it difficult to adapt to complex disturbance conditions and affects the stability of the system. Therefore, this article uses DC voltage margin tracking as the basis to improve the traditional droop control. By adding the DC voltage margin correction factor to the droop coefficient, the real-time DC voltage deviation data of the converter station is used for adaptive adjustment, so that the system DC voltage is automatically reduced when it approaches the upper limit of the voltage margin, ensuring that the system has stable distribution of DC voltage and reasonable distribution of active power in the event of power disturbance and converter station failure. Finally, a four-terminal new energy flexible DC grid-connected system simulation model is established, and the effectiveness of the control strategy under the “*N*-1” failure is verified through a calculation example.

Key words: MMC-MTDC; converter station; voltage droop control; DC voltage margin tracking

0 引言

随着新能源发电与电力电子技术的快速发展，国家对可再生能源的大力开发与应用，各地方政府积极推进优化能源结构，新能源发电逐渐

国网甘肃电力公司经济技术研究院项目（SGGSJYOOPSJS2000193）；国网总部科技项目（52273019000T）

成为电力系统的重要发电形式之一[1]。我国新能源基地主要分布在东部沿海以及西部内陆等较偏远地区。

柔性直流输电技术(Voltage-Sourced Converter Based HVDC，VSC-HVDC)可控性强，功率潮流翻转迅速，不受距离限制，无须交流侧提供换相电流。在远距离传输时可实现送端与受端的解耦，减小新能源并网对输电系统的影响[2-3]。因此，成为新能源接入电网的理想传输方式。

然而，新能源通过柔直技术与交流系统并网时会影响交流电网与新能源电场的频率联系，对电网频率变化体现无阻尼特性。当新能源出力不平衡时，其频率稳定性很低，接入电网会影响新能源系统和交流系统的运行稳定性[4]。文献[5]通过考虑本地负荷提出一种直流电压下垂系数的计算方法，实现了系统最小铜耗以及站间协调控制。文献[6]在功率和电压影响因子的基础上，提出通过改变下垂控制斜率实现直流电压良好分布和功率的合理分配。文献[7]针对功率越限以及下垂系数计算复杂，改进了有功功率-电压曲线斜率，优化了换流站功率溢出问题，实现了功率合理分配。因此，柔性直流并网系统需要利用具有换流站间协调运行能力的动态控制策略，使新能源并网更加稳定。

基于MMC的新能源多端柔性直流并网系统（Multi-Terminal Flexible DC Transmission System，MTDC）采用电压源型多电平换流器，其最终的控制信号主要由系统参考电压决定。因此，本文从MTDC系统网侧换流站直流电压偏差与功率最优分配的角度出发，对传统的下垂控制策略进行改进。通过在下垂系数中加入直流电压裕度校正因子，利用换流站实时直流电压偏差数据进行自适应调节。当系统直流电压在接近电压裕度上限时自适应减小，以保证系统在功率扰动或换流站故障时直流电压稳定分布及有功功率合理分配。最后，搭建四端新能源柔性直流并网系统仿真模型，验证控制策略的正确性和有效性。

1　MMC-MTDC并网系统数学模型

本文以四端MMC直流输电并联系统为例，其结构如图1所示。u_{sn}为交流系统电压，其中，n=1、2、3、4表示换流站的端数；L_n为交流侧电感；v_n为换流站入口处电压；R_{dln}、L_{dln}分别为直流电缆的电阻、电感；i_{sn}为换流站交流侧电流；R_n为系统交流侧等效电阻。

系统由四个MMC换流站构成，站内MMC拓扑结构如图2所示。

依据基尔霍夫电压环路定理，图1中四端MMC-MTDC系统换流站方程为

$$L_n\frac{\mathrm{d}i_{sn}}{\mathrm{d}t}=(\boldsymbol{u}_{sn}-\boldsymbol{v}_n)-R_n\boldsymbol{i}_n \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{u}_{sn}$、$\boldsymbol{v}_n$、$\boldsymbol{i}_n$为矩阵向量。

$$\boldsymbol{u}_{sn}=[u_{s1},u_{s2},u_{s3},u_{s4}]=\begin{bmatrix}u_{s1}\cos(\omega t)\\u_{s2}\cos(\omega t-\pi/4)\\u_{s3}\cos(\omega t-\pi/2)\\u_{s4}\cos(\omega t-3\pi/4)\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{i}_n=[i_{s1},i_{s2},i_{s3},i_{s4}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$v_n=[v_1,v_2,v_3,v_4]=\begin{bmatrix}K_mU_{dcn}\cos(\omega t+\delta_m)\\K_mU_{dcn}\cos(\omega t-\pi/4+\delta_m)\\K_mU_{dcn}\cos(\omega t-\pi/2+\delta_m)\\K_mU_{dcn}\cos(\omega t-3\pi/4+\delta_m)\end{bmatrix} \tag{4}$$

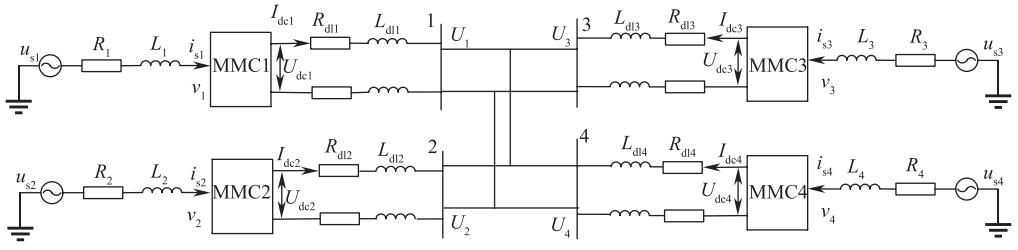

图 1　四端 MMC-MTDC 输电系统结构

Fig. 1 Structure of four terminal MMC-MTDC transmission system

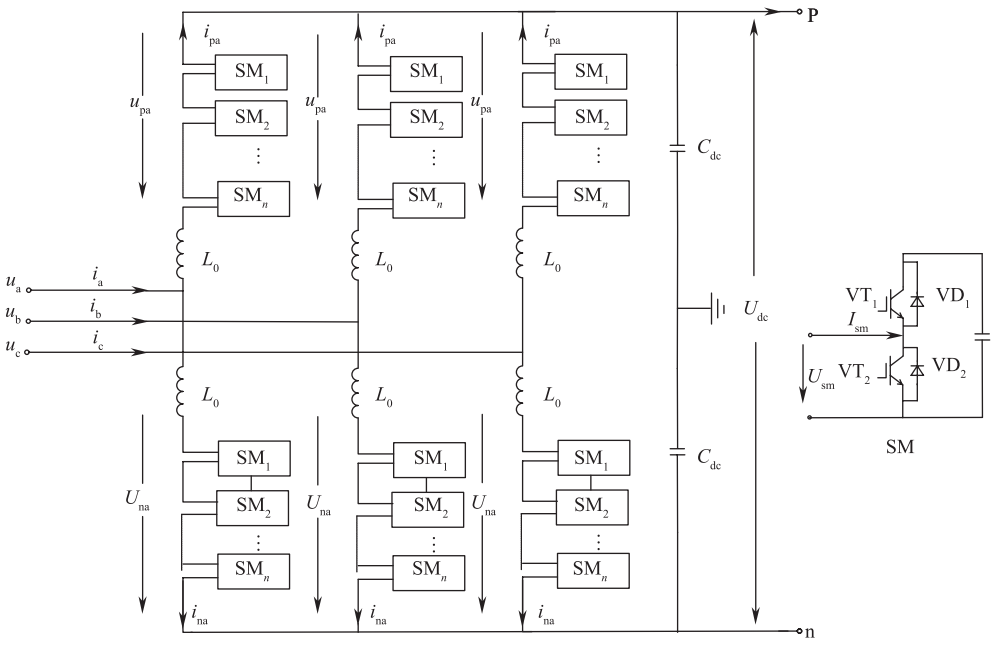

图 2　MMC 拓扑结构

Fig. 2 MMC topology

式中，δ_m为MMC入口处电压与交流系统电压的夹角；K_m为电压利用率；$\boldsymbol{U}_{dcn}$为系统额定电压且表示为矩阵向量，即$\boldsymbol{U}_{dcn}=[U_{dc1}, U_{dc2}, U_{dc3}, U_{dc4}]^T$。

将式（1）进行派克变换，得到第n端输电系统的数学模型表达式如下

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix} i_{dn} \\ i_{qn} \end{bmatrix}=\frac{1}{L_n}\begin{bmatrix} -R_n & \omega L_n \\ -\omega L_n & -R_n \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{dn} \\ i_{qn} \end{bmatrix}+\frac{1}{L_n}\begin{bmatrix} u_{dn}-v_{dn} \\ u_{qn}-v_{qn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

根据基尔霍夫定律，得到四端MMC-MTDC输电系统直流侧电压、电流满足如下表达式

$$I_{s1}+I_{s2}+I_{s3}+I_{s4}=0 \tag{6}$$

$$U_{dc1}=U_{dc2}=U_{dc3}=U_{dc4} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{U}_x=U_{dcn}-L_{dln}\frac{\mathrm{d}i_{sn}}{\mathrm{d}t}-i_{dcn}R_{dln} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{U}_x$为MMC-MTDC系统各换流站直流侧电压且表示为矩阵向量，即$\boldsymbol{U}_x=[U_1, U_2, U_3, U_4]^T$。

不考虑换流器损耗和谐波含量，系统有功功率和无功功率在dq坐标下表示为

$$\begin{cases} P_s=1.5\,(u_d i_d+u_q i_q) \\ Q_s=1.5\,(u_d i_q-u_q i_d) \end{cases} \tag{9}$$

式中，P_s为系统的有功功率；Q_s为系统无功功率。当系统稳定运行时，直流电压处于d轴，因此$u_q=0$，MMC换流站的有功和无功功率可以表示为

$$\begin{cases} P_s=1.5u_d i_d \\ Q_s=1.5\,u_d i_q \end{cases} \tag{10}$$

依据系统功率守恒，换流站交、直流侧功率相等，即

$$P_{dc}=U_{dc}I_{dc}=1.5u_d i_d \tag{11}$$

式中，P_{dc}为各换流站直流侧功率；U_{dc}、I_{dc}分别为系统直流电压和直流电流。

综合式（9）～式（11）可得到四端MMC-MTDC系统中电网侧各换流站的功率，用直流电压表示如下

$$\begin{cases} P_s=1.5u_d i_d=1.5K_m U_{dc}(i_d\cos\delta_m+i_q\sin\delta_m) \\ Q_s=1.5u_d i_q=1.5K_m U_{dc}(i_q\cos\delta_m-i_d\sin\delta_m) \end{cases} \tag{12}$$

2　MMC-MTDC交流网侧换流站控制策略及改进

MMC-MTDC系统控制主要包括上层控制（系统级控制）、换流站站级控制以及换流器阀级控制三个部分，本文主要对换流站站级控制策略进行研究与改进。

网侧换流站作为新能源经柔直系统并入电网的受端，其主要目标是提高直流电压的稳定性、

新能源能够稳定接入以及有功功率的合理分配[8]。目前，柔直系统多采用单点直流电压控制，包括主从控制和直流电压裕度控制。而多点直流电压控制作为常用的协调控制策略主要采用直流电压下垂控制，本文MMC-MTDC系统拟采用多点直流电压控制。

2.1 传统下垂控制

电压下垂控制无须通信，且当系统受到扰动时，所有换流站可同时快速进行功率调节以及模块化拓展，适用于多端柔性直流系统的场合[9-10]。

根据前文中对MMC-MTDC系统数学模型的分析，结合直流电压控制和有功功率控制，即可得到直流电压下垂控制。下垂控制器模型可以表示为

$$E = k(U_{\mathrm{dcref}} - U_{\mathrm{dc}}) + P_{\mathrm{ref}} - P \tag{13}$$

式中，E为误差信号；k为下垂系数；P_{ref}和U_{dcref}分别为有功功率和直流电压参考值；P和U_{dc}分别为换流站有功功率和直流电压的实际值。

电流参考值$i_{d\mathrm{ref}}$由限幅控制器和PI调节得到。控制器结构图和运行特性如图3所示。

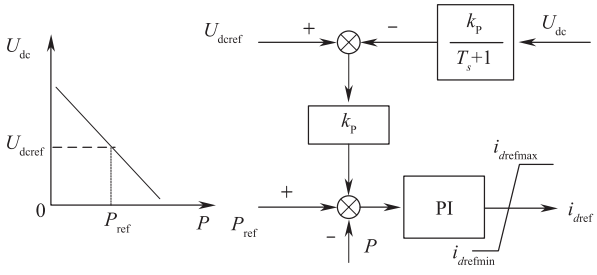

图 3　下垂控制运行特性和控制器结构

Fig. 3 Droop control operation characteristics and controller structure

对于四端MMC-MTDC系统，在电压下垂控制策略中，当系统处于稳定状态时，换流站MMC的有功功率和直流电压的关系如下

$$U_{x,i} = -k_i(P_{x,i} - P_{\mathrm{ref},i}) + U_{\mathrm{ref},i} \tag{14}$$

式中，k_i为下垂系数；$P_{x,i}$、$U_{x,i}$分别为第i个换流站的有功功率和参考电压；$P_{\mathrm{ref},i}$、$U_{\mathrm{ref},i}$分别为有功功率和直流电压参考值。

以图1中的四端网络为例，假设站1和站2为送端，均采用直流电压下垂控制。站3和站4为受端，并且站3采用定有功功率控制。则依据功率平衡方程，可以得到站4的有功功率与直流电压表达式为

$$P_4 = \frac{U_1}{k_1} + \frac{U_2}{k_2} - \left(\frac{U_{\mathrm{ref}1}}{k_1} + \frac{U_{\mathrm{ref}2}}{k_2}\right) + (P_3 - P_4 - P_{\mathrm{ref}1} - P_{\mathrm{ref}2}) \tag{15}$$

$$U_4 = (P_4 - P_{\mathrm{ref}4})/k_4 \tag{16}$$

式中，站1和站2的控制参数k_1、k_2、P_{ref1}、P_{ref2}、U_{ref1}和U_{ref2}是恒定的。

2.2 直流电压裕度跟踪（VMT）下垂控制策略

传统下垂控制策略初始状态下每个换流站在其参考点（P_{ref}, I, U_{ref}, I）运行，参见图3。当系统受到扰动时，每个换流站将按其固定下垂系数的比例承担该功率与直流电压偏差，并自动移动到新的工作点（P_x, I_x, U_x, I_x）。换流站下垂系数k_i时通常根据其参考点电压和换流站额定容量设定，即

$$k_i = (U_{x,i}^{\max} - U_{\mathrm{ref},i})/(P_{x,i}^{\max} - P_{\mathrm{ref},i}) \tag{17}$$

式中，$U_{x,i}^{\max}$、$P_{x,i}^{\max}$分别为换流站的额定电压与额定功率。该控制策略可以实现有功功率和电压间的比例调节，保持MMC-MTDC系统电压稳定，对新能源的输出波动有一定的调节能力。

当系统受到不同程度的扰动时，单一的下垂系数难以适应复杂的功率扰动与直流电压变化工况，导致直流电压严重偏差，影响MMC-MTDC系统的运行稳定性。

针对该问题，本文对传统直流电压下垂控制策略进行改进，采用直流电压裕度跟踪（VMT）控制策略。通过引入直流电压裕度校正因子ζ_i来修正固定下垂系数k_i，即

$$\zeta_i = \left|U_{x,i} - U_{\mathrm{re},i}\right| / (M_i - U_{\mathrm{re},i}) \tag{18}$$

$$M_i = \xi_i - (U_{x,i} - U_{\mathrm{dc}n,i}) \tag{19}$$

$$U_{\mathrm{re},i} = U_{\mathrm{dc}n,i} - (M_i/\xi_i) \tag{20}$$

式中，ξ_i为电压裕度限幅系数，一般情况下$0.05 \leqslant \xi_i \leqslant 0.1$；$M_i$为直流电压限幅因子，表示系统的直流电压裕度；$U_{\mathrm{dc}n,i}$为系统的额定电压；$0 \leqslant \zeta_i \leqslant 1$。实际输出$U_{x,i}$越接近电压上限，直流电压裕量越小，$\zeta_i$则越大。直流电压裕度跟踪（VMT）下垂控制由下式给出

$$P_{x,i}=P_{\mathrm{re},i}-\frac{\xi_i}{\zeta_i\ k_i}(U_{x,i}-U_{\mathrm{re}\,i}) \tag{21}$$

式（21）表明第i个换流站实际电压$U_{x,i}$和有功功率$P_{x,i}$之间的关系呈二次分布，不再是线性的。当直流电压$U_{x,i}$接近电压的上限时，电压裕度校正因子ζ_i不断减小，则参考直流电压$U_{\mathrm{re},i}$进行自我调节以防止直流电压越限。改进的直流电压裕度跟踪（VMT）下垂控制策略框图与运行特性如图4所示。

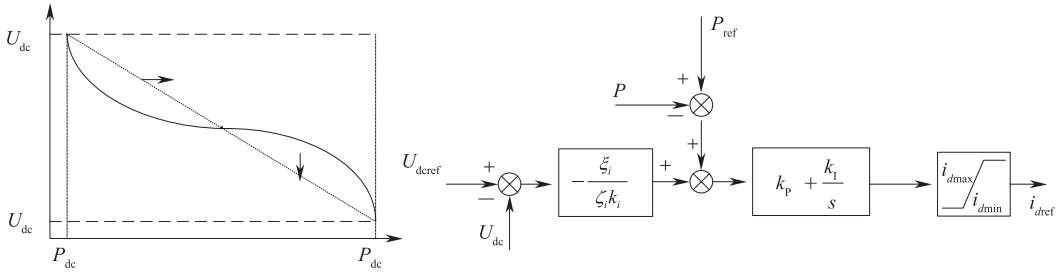

图 4　VMT 下垂控制运行特性和控制器结构

Fig. 4 Operation characteristics and controller structure of VMT droop control

3　仿真分析

为了验证本文提出的改进下垂控制策略的可行性，以四端柔性直流并网系统为例搭建仿真模型，仿真过程中的数值均设为标幺值。系统主要的参数设定如下表所示。

表　MMC-MTDC 系统参数

Tab. MMC-MTDC system parameters

类型	参数	数值
交流系统参数	额定电压 /kV	330
	额定功率 /MW	400
	基波频率 /Hz	50
	等效电阻 / Ω	1
MMC 换流器参数	换流站额定容量 /MW	400
	直流电压 /kV	±320
	桥臂电感 /H	0.125
	电容 /mF	1.1
	桥臂电阻 / Ω	0.88
直流线路参数	横向长度 /km	100
	纵向长度 /km	60
	电阻 /（Ω/km）	0.013 2
	电感 /（mH/km）	0.306
	电容 /（μF/km）	0.33

3.1　系统稳定运行情况下

MMC1、MMC2为送端换流站采用定有功功率控制，MMC3和MMC4为受端换流站并分别采用定直流电压下垂控制与直流电压裕度跟踪（VMT）下垂控制。当系统稳定运行时，MMC-MTDC系统换流站直流电压分布和有功功率分配仿真波形如图5和图6所示。

对比图5和图6可以看出，当系统处于稳定运行工况时，传统电压下垂控制的电压幅值要远高于VMT策略。而VMT控制保证了系统出现不稳定工况时的直流电压裕度冗余，有足够的裕度来确保下垂控制的直流电压自适应调节。由于稳定工况下有功功率趋于稳定，因此，两种控制策略下的有功功率的分配策略大致相同。

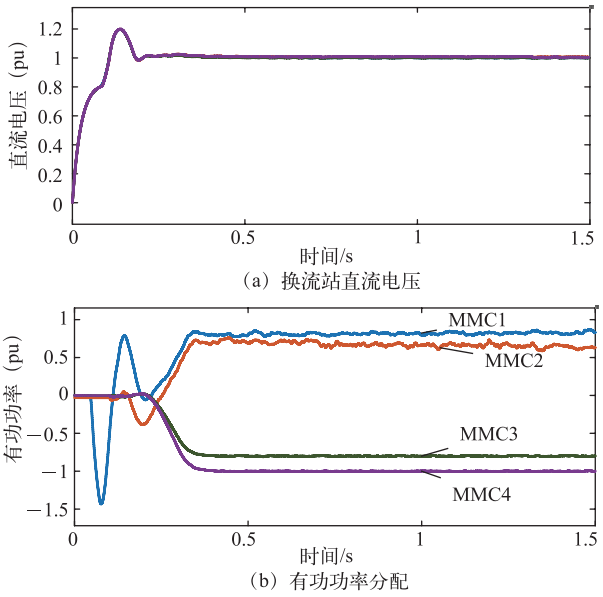

图 5　系统稳定运行时的传统下垂控制仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of traditional droop control during stable operation of the system

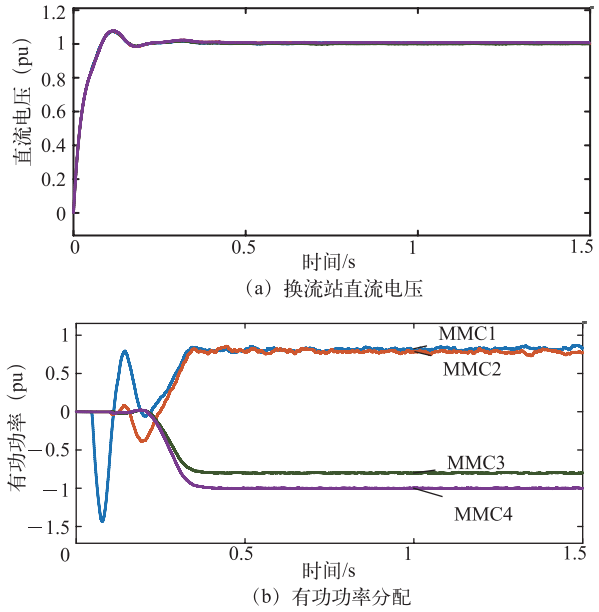

图 6　系统稳定运行时的 VMT 控制策略仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of VMT control strategy during stable operation of the system

3.2　换流站MMC1退出运行

任何MMC-MTDC系统都要符合$N-1$原则，即任意换流站的退出都不会影响系统的稳定运行。因此，设定主换流站MMC1退出运行。稳态情况下，直流电压的指令值为320 kV，MMC1和MMC2的有功功率指令值分别为0.8（pu）与0.7（pu），MMC3和MMC4的有功功率指令值分别为－0.8（pu）与－1（pu）。MMC1故障下传统下垂控制和VMT控制仿真波形如图7、图8所示。

t=1 s时，MMC1退出运行，系统电压由于注入有功功率过剩，导致直流电压上升。由图7可知，传统下垂控制直流电压达到了很高的幅值，甚至超过直流电压裕度限定值，并在1.5 s的运行时间内系统都没有达到平衡。对于有功功率的分配，由于传统的下垂控制下垂系数固定，当系统中有功率冗余时，各换流站按照固定的下垂系数承担不平衡的有功功率。

由图8可见，VMT控制策略的换流站直流电压的幅值明显小于传统下垂控制的电压幅值。传统下垂控制达到了2.2（pu），甚至超过了预设的直流电压裕度，而VMT控制为1.6（pu）。同时在系统受到扰动时其直流电压偏差相对较小，且其参考电压随着本站直流电压偏差而自我调节。在整个过程中换流站直流电压都没有超过电压裕度限定值。在有功功率的分配中，MMC1退出后，MMC2自适应减小承担冗余的有功功率，同时MMC3和MMC4分配的功率逐渐增大，最后达到系统的平衡。

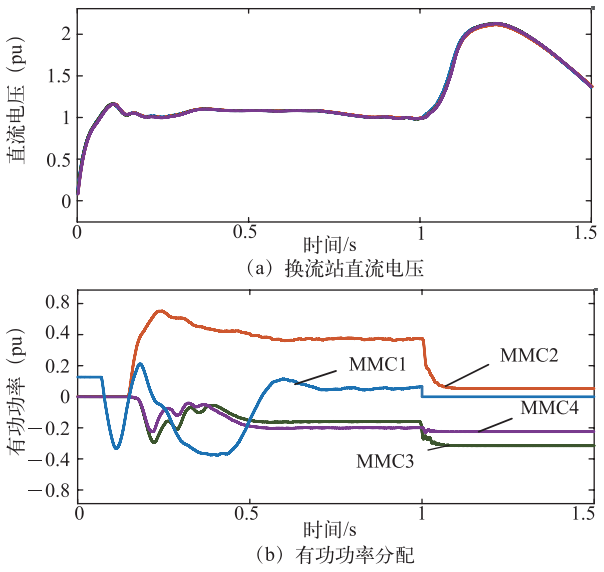

图 7　MMC1 故障下传统下垂控制仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of traditional droop control under MMC1 fault

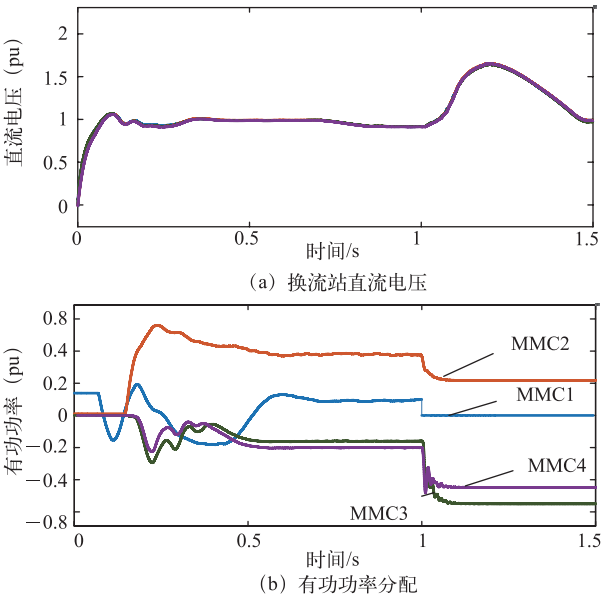

图 8　MMC1 故障下 VMT 控制仿真波形

Fig. 8 VMT control simulation waveform under MMC1 fault

3.3 负载功率波动

稳定状态与上述算例相同，在t=1 s时向MMC1注入负载功率波动，输入功率为200 MW。负载功率波动时传统下垂控制和VMT控制仿真波形如图9、图10所示。

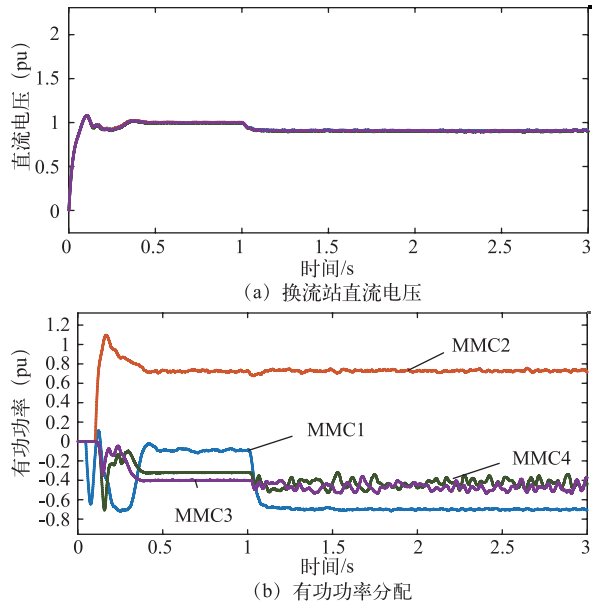

图 9 负载功率波动时传统下垂控制仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of traditional droop control when load power fluctuates

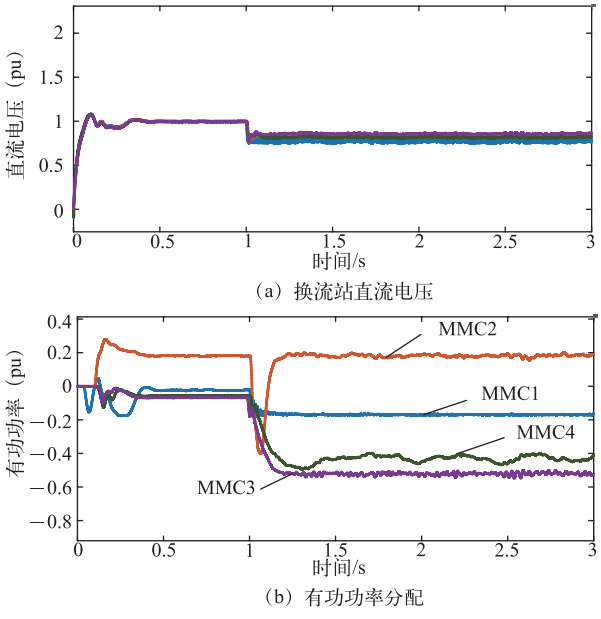

图 10 负载功率波动时 VMT 控制仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of VMT control when load power fluctuates

对比图9a和图10a可以看出，系统内部存在有功功率波动时，如有功功率增加，系统会根据变化情况减小直流电压使系统达到平衡。传统下垂控制的直流电压进行很平滑的过渡，并且过渡的裕度值较小。而VMT控制在MMC1退出运行的瞬间系统直流电压过渡迅速，平缓下降至0.7（pu）附近，延续了不到0.02 s系统恢复平衡。

而针对有功功率分配，对比图9b和图10b可知，传统的下垂控制在MMC1注入有功功率后，MMC3和MMC4都采用下垂控制来承担多余的有功功率，按照固定的系数来增大功率裕度。而VMT控制在功率波动时，MMC2先根据下垂系数减小有功功率分配，同时MMC3和MMC4增大有功功功率分配。当直流电压减小后，通过MMC2自适应的增大来维持系统平衡。

4 结束语

为保障MMC-MTDC系统的直流电压稳定分布和有功功率合理分配，综合系统直流电压影响因素，结合直流电压偏差提出了一种带直流电压裕度校正因子的电压下垂控制策略。换流站可以根据其运行状态进行自适应调节，以灵活响应系统不同程度波动。通过建立的四端新能源柔性直流并网系统仿真模型，对所提出的控制策略进行仿真验证。将传统下垂控制与VMT控制策略进行比较，结果表明所提出的控制策略有效提升了换流站之间的协同运行，缓解了新能源并网扰动，减小了直流电压偏差，保证了MMC-MTDC系统稳定。此外，在“$N-1$”故障下系统同样实现了鲁棒运行和自适应调节。**EA**

参考文献

[1] 袁志昌，郭佩乾，刘国伟，等．新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]．高电压技术，2020，46(5)：1460-1475．

[2] 梅念，苑宾，李探，等．接入孤岛新能源电场的双极柔直换流站控制策略[J]．电网技术，2018，42(11)：3575-3582．

[3] 徐殿国，刘瑜超，武健．多端直流输电系统控制研

究综述[J]．电工技术学报，2015，30(17)：1-12．

[4] WANG Yizhen，WEN Weijie，WANG Chengshan，et al．Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC-HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing[J]．IEEE Transaction on Power Delivery，2019，34(1)：169-176．

[5] 冉晓洪，苗世洪，吴英杰，等．基于最优功率分配的多端直流网络改进下垂控制策略[J]．电工技术学报，2016，31(9)：16-24．

[6] 江斌开，王志新，邹建龙，等．计及不平衡功率最优分配的直流电压斜率控制策略研究[J]．中国电机工程学报，2017，37(12)：3383-3390，3665．

[7] 陈大鹏，陈朋，李梅航，等．适用于多端柔性直流输电系统的优化下垂控制策略[J]．电力系统自动化，2017，41(9)：194-199．

[8] 胡静，赵成勇，翟晓萌．适用于MMC多端高压直流系统的精确电压裕度控制[J]．电力建设，2013，34(4)：1-7．

[9] 董飞飞．MMC-MTDC输电系统协调控制策略研究[D]．吉林：东北电力大学，2019．

[10] 严铭，蔡晖，谢珍建，等．适用于多端柔性直流输电系统的分布式直流电压控制策略[J]．电力自动化设备，2020，40(3)：134-140．

作者简介

宋汶秦

宋汶秦（1983—），女，高级工程师，工程硕士，从事电力系统规划、能源研究。

(收稿日期：2021-05-28)

国家出版基金项目 NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

新书推荐

机械工业出版社 China Machine Press

中国战略性新兴产业研究与发展系列丛书

智能制造

Smart manufacturing

本书系统研究了智能制造的内涵、特征，回顾了我国智能制造发展的历程，剖析了我国智能制造发展情况及存在的短板，同时充分研究了主要工业发达国家智能制造发展态势及趋势，对比提炼出推动我国智能制造向纵深发展的对策建议。通过分析新形势下我国在智能制造方面的发展机遇及面临的挑战，提出我国智能制造发展的总体思路、发展重点和政策措施等。本书适合政府部门和行业决策机构在制定相关政策法规、规划研究方向时参考，也适合企业决策者、技术及管理人员，以及从事与智能制造相关工作的各界人士阅读。

作者：左世全

工业和信息化部装备工业发展中心政策规划处处长，兼任北京艾迪智联科技有限公司执行董事、总经理，中国增材制造产业联盟副秘书长。

长期从事装备制造业、智能制造和先进制造业等产业战略、规划和政策研究，负责或参与研究并起草《增材制造产业发展行动计划（2017—2020年）》《智能制造发展规划（2016—2020年）》《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》《"十四五"重大技术装备高质量发展规划》《制造强国战略研究》《"十四五"智能制造发展规划》等20余项。在《学术前沿》《经济纵横》《科学管理研究》等期刊发表学术文章40余篇。参编和翻译出版《中国装备工业蓝皮书》《新工业革命》《3D打印》等图书。

扫码看详情 购买有优惠

八折包邮

原价 98元

现价 78元