

DOI: 10.7667/PSPC170187

# 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统 自适应下垂控制研究

徐进<sup>1</sup>, 金逸<sup>2</sup>, 胡从川<sup>3</sup>, 张广洲<sup>4</sup>, 刘飞<sup>4</sup>, 王龙<sup>5</sup>, 陈霞<sup>5</sup>

(1. 鲁能新能源(集团)有限公司, 北京 100020; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210000;  
3. 鲁能集团有限公司, 北京 100020; 4. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074;  
5. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 多端柔性直流输电技术适用于大规模海上风电场并网, 维持直流电压稳定是多端柔性直流输电系统协调控制的主要任务。传统下垂控制采用固定下垂系数, 在复杂工况下灵活性较差, 为此提出一种自适应下垂控制策略。通过检测换流站的直流电压偏差和功率裕度, 采用模糊逻辑推理调整下垂系数。基于 PSCAD/EMTDC 仿真研究表明: 所提自适应下垂控制策略, 在换流站功率裕度允许范围内, 能够减小传输功率变化造成的直流电压偏差, 提高系统运行特性。

**关键词:** 多端柔性直流输电; 海上风电场; 自适应下垂控制; 直流电压偏差; 功率裕度; 模糊逻辑

## DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration

XU Jin<sup>1</sup>, JIN Yi<sup>2</sup>, HU Congchuan<sup>3</sup>, ZHANG Guangzhou<sup>4</sup>, LIU Fei<sup>4</sup>, WANG Long<sup>5</sup>, CHEN Xia<sup>5</sup>

(1. Luneng New Energy (Group) Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China; 3. Luneng Group Co., Ltd., Beijing 100020, China; 4. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 5. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Multi-terminal HVDC transmission technology using voltage source converters is suitable for integrating large off-shore wind farms. DC voltage stability is the main problem for coordinated control of Voltage Source Converter based Multi-Terminal High Voltage Direct Current (VSC-MTDC) transmission system. The fixed droop coefficient of the traditional droop control leads to poor flexibility under severe disturbance. On this basis, this paper proposes an adaptive droop control method. By detecting the DC voltage deviation and the power margin, the fuzzy logic control is intended to adjust droop coefficient adaptively. Simulation results in PSCAD/EMTDC show that the proposed adaptive droop control strategy can reduce DC voltage deviation caused by the transmission power change and improve system operating performance within the allowable power margin range.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607075).

**Key words:** VSC-MTDC; offshore wind farms; adaptive droop control; DC voltage deviation; power margin; fuzzy logic

## 0 引言

大规模海上风电场将成为未来清洁能源的主要来源, 海上风电场往往具有离岸距离远、分布范围广的特点<sup>[1-5]</sup>。直流输电技术由于不受输电距离的

限制, 特别是基于电压源换流器的高压直流输电 (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 系统具有独立地控制有功功率和无功率、不需要送端电网有无功支撑的特点, 成为近年来大规模、大范围海上风电场接入的关键技术之一<sup>[6-9]</sup>。在解决多个海上风电场接入的问题上, 多端直流输电 (Multi-terminal HVDC, MTDC) 系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51607075)

统由于具有更高的供电可靠性和灵活的潮流控制而成为目前的研究热点<sup>[10]</sup>。MTDC 系统接线方式主要采用并联式, 因此控制直流母线电压稳定是系统稳定运行的关键<sup>[11-12]</sup>。

下垂控制策略可实现功率在多个换流站之间的分配, 不需要换流站之间的通信, 系统可靠性较高<sup>[13-17]</sup>。传统下垂控制由于采用固定下垂系数, 在复杂工况下的灵活性和经济性较差<sup>[18-23]</sup>。针对这些问题, 文献[20]提出一种根据换流站额定容量与实际传输容量差值调整下垂系数的方法, 该方法使得各个换流站可以根据当前运行状态自适应参与系统功率调节。文献[21]提出一种引入功率影响因子的自适应下垂控制策略, 实现了 V-I 特性曲线的闭环控制。文献[22]引入一个公共直流参考电压, 参与换流站下垂控制的功率调整, 按照容量等比例承担系统功率缺额的调节方法欠缺对换流站实际运行状态的考虑。文献[23]提出了一种适用于功率共享的自适应下垂控制方法, 根据直流电压变化的大小和方向, 实时调节下垂系数, 但始终以最大电压偏差来计算下垂系数, 一定程度上限制了下垂系数的调节范围。

本文基于模糊逻辑控制提出一种自适应下垂控制策略。采用模糊逻辑推理调整下垂系数, 能够兼顾换流站直流电压和功率分配特性, 减小传输功率变化造成的直流电压偏差, 提高系统运行特性。结合定直流电压控制和自适应下垂控制, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建了六端柔性直流输电仿真模型, 验证了所提自适应控制方法的有效性。

## 1 海上风电经多端柔性直流并网模型

对于实际的多端柔性直流输电系统而言, 其拓扑结构的确定需要考虑海上风电场的位置以及交流接入点等因素。图 1 所示为典型的六端星型结构的多端直流系统, 三个风电场通过多端直流系统与三个受端电网相连。模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)由于采用阶梯波逼近正弦波的调制方式, 极大地降低了开关损耗, 从而在实际工程中得到了广泛应用。

### 1.1 MMC 数学模型

图 2 所示为三相 MMC 的拓扑结构, 每个相单元包括一个上桥臂、一个下桥臂和两个桥臂电感  $L_0$ , 每个桥臂由多个子模块(Sub-Module, SM)串联而成。 $d$ 、 $q$  旋转坐标系下的 MMC 的数学模型为<sup>[24]</sup>

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q - v_d + u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d - v_q + u_q \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  分别为公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)处电网电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $v_d$ 、 $v_q$  分别为换流器交流侧电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为电网电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $R$ 、 $L$  是桥臂等效电阻及等效电感;  $\omega$  为同步旋转角速度。

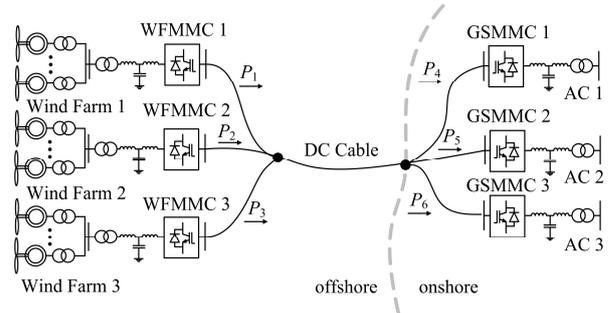


图 1 海上风电场并网的 MTDC 系统拓扑  
Fig. 1 Topology of MTDC system for offshore wind farms integration

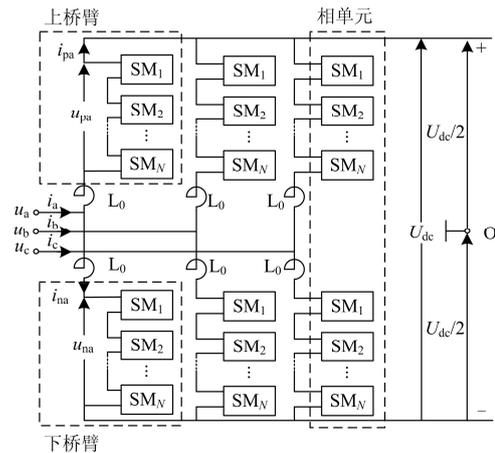


图 2 MMC 换流器拓扑结构  
Fig. 2 Topology of MMC

### 1.2 MMC 控制策略

海上风电并网系统中, 为给风电场提供稳定的交流电源, 风电场侧换流站(Wind Farm Modular Multilevel Converter, WFMFC)采用定交流电压控制。多端柔性直流输电系统的直流电压控制由电网侧换流站(Grid Side Modular Multilevel Converter, GSMMC)承担。由于下垂控制策略无需通信, 可靠性较高, 能够快速响应系统功率变化, GSMMC 的外环功率控制策略可采用直流电压下垂控制。

以换流站 GSMMC1、GSMMC2、GSMMC3 均采用直流电压下垂控制为例，其控制策略如图 3 所示。本文规定功率从交流系统注入直流电网的方向为正方向。

如图 3 所示，采用直流电压下垂控制的换流站中任一换流站因故障退出运行后，所引起的功率缺额由其他换流站共同承担。对于向直流电网注入功率的整流站，直流电压上升(下降)时，为满足直流电网功率平衡的要求，其功率则会下降(上升)；对于从直流电网吸收功率的逆变站，直流电压上升(下降)时，为满足直流电网功率平衡的要求，其功率则会上升(下降)。构成一个稳定的功率-直流电压负反馈系统。

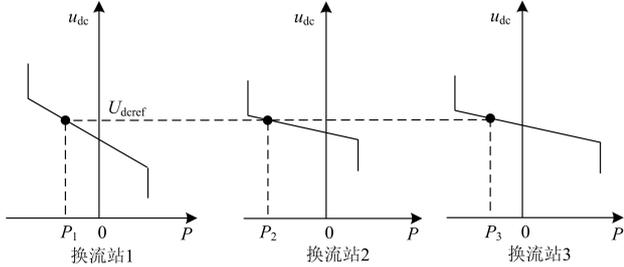


图 3 直流电压下垂控制策略

Fig. 3 Voltage-power droop control strategy

采用直流电压下垂控制的 GSMMC 外环控制器框图如图 4 所示。 $k$  为下垂系数，表征换流站输出功率值对直流电压变化的响应速率，通常根据各个换流站的容量来选取，换流站容量越大，下垂系数越大<sup>[22-23]</sup>。 $e$  为控制输出的误差信号，可表示为

$$e = P_{ref} - P + k(U_{dcref} - U_{dc}) \quad (2)$$

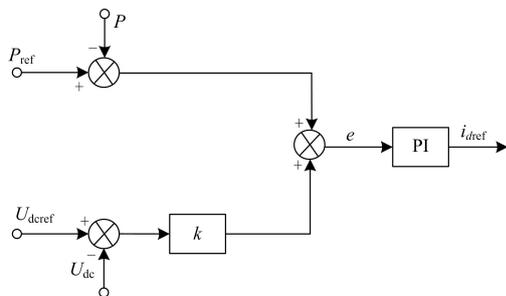


图 4 下垂控制框图

Fig. 4 Block diagram of droop control

在稳态情况下，直流电压下垂控制器的误差信号  $e=0$ ，可得系统直流电压和换流器功率的关系式，如式(3)。

$$U_{dc} = U_{dcref} + \frac{(P_{ref} - P)}{k} \quad (3)$$

式中： $P$  为换流站的实际功率值； $U_{dc}$  为换流站端口

直流电压实际测量值； $U_{dcref}$ 、 $P_{ref}$  分别为换流站直流电压和有功功率的参考值。

由式(3)可以得到如图 5 所示的三种控制模式。其中：当下垂系数  $k=0$  时，电压下垂控制特性相当于定功率控制；当下垂系数  $k=\infty$  时，电压下垂控制特性相当于定直流电压控制。因此，需要选择合适的下垂系数，保证系统直流电压质量和功率分配特性良好。

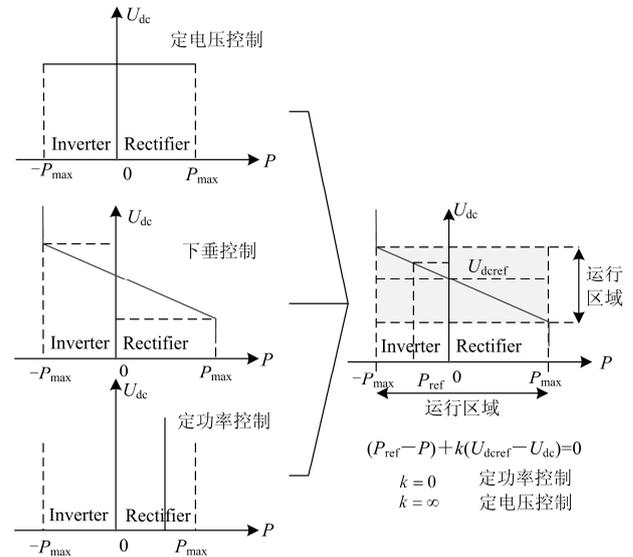


图 5 下垂特性的三种控制模式

Fig. 5 Voltage-power droop characteristics with three control modes

## 2 基于模糊逻辑的自适应下垂控制

下垂系数的大小决定了下垂控制特性的优劣：若下垂系数较大，则电压质量特性较好，但是功率分配特性较差；反之，若下垂系数较小，则功率分配特性较好，不易发生功率振荡，但是电压质量较差。由于模糊逻辑善于处理界限不清晰的定性问题，因此可以在设计下垂控制系数时，引入模糊逻辑控制理论。根据系统的运行工况，检测换流站直流电压偏差和功率裕度，调整下垂系数，使得系统在换流站功率裕度较大时，保证直流电压的控制精度；在换流站功率裕度较小时，保证功率分配特性良好。

为了使下垂系数能够随着系统运行工况的变化进行调整，通过检测直流电压偏差和换流站功率偏差，采用如图 6 所示的模糊推理的方法确定下垂系数。换流站功率裕度用实际传输功率与功率极限的差值表示，功率偏差用实际传输功率与功率指令的差值表示，功率偏差越大表示换流站功率裕度越小。

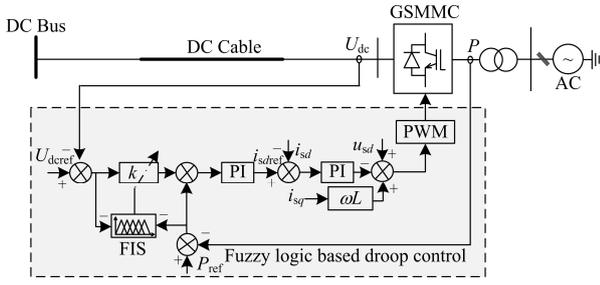


图6 模糊逻辑控制框图

Fig. 6 Block diagram of fuzzy logic control

本文设计的模糊逻辑推理控制器的输入为直流电压偏差( $\pm 5\%U_{dc}$ )和换流站功率偏差, 输出为下垂系数。输入和输出变量的隶属度函数如图7所示, 其中NL(负大)、NM(负中)、NS(负小)、Z(零)、PS(正小)、PM(正中)、PL(正大)分别表示7个模糊子集。

本文中输入变量的模糊化和输出变量的解模糊采用Z形隶属度函数和三角形隶属度函数的组合形式表示<sup>[25]</sup>。以直流电压偏差输入变量为例进行说明, 其他输入变量和输出变量的隶属度函数可参考直流电压偏差输入变量的隶属度函数表示形式。直流电压偏差指标对应为NL(负大)时的隶属度函数为Z形隶属度函数, 其表达式为

$$f(\Delta U_{dc}; a, b) = \begin{cases} 1, & \Delta U_{dc} \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{\Delta U_{dc} - a}{b - a}\right)^2, & a \leq \Delta U_{dc} \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{\Delta U_{dc} - b}{b - a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq \Delta U_{dc} \leq b \\ 0, & \Delta U_{dc} \geq b \end{cases} \quad (4)$$

直流电压偏差指标对应为NM(负中)的隶属度函数为三角形隶属度函数, 其表达式为

$$f(\Delta U_{dc}; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \Delta U_{dc} \leq a \\ \frac{\Delta U_{dc} - a}{b - a}, & a \leq \Delta U_{dc} \leq b \\ \frac{c - \Delta U_{dc}}{c - b}, & b \leq \Delta U_{dc} \leq c \\ 0, & \Delta U_{dc} \geq c \end{cases} \quad (5)$$

式中, 参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  根据电压偏差或功率偏差的范围以及模糊子集的个数进行选取, 总的范围除以模糊子集的个数得到单个模糊子集的范围, 即可得到每个子集的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值的大小。结合图7, 电压偏差为  $-0.05 \sim 0.05$  p.u., 式(4)中,  $a = -0.0375$ 、 $b = -0.025$ , 式(5)中,  $a = -0.0375$ 、 $b = -0.025$ 、 $c = -0.0125$ 。

模糊逻辑推理结果决定了下垂系数指令, 不同

的模糊逻辑推理规则会导致不同的下垂控制效果。综合考虑直流电压特性与功率分配特性, 其基本的推理规则是: 当电压偏差较大、功率裕度充足时, 增大下垂系数; 当功率裕度不足时, 降低下垂系数。依据此规则可以得到逻辑推理表如表1所示, 其推理结果如图8所示。当系统送端功率小于受端所需功率时, 直流电压小于参考值, 下垂控制使得逆变方向上的吸收功率减少, 防止直流电压进一步下降。由于此方向上功率裕度较大(功率裕度大约是功率指令的两倍), 下垂系数可根据直流电压偏差进行调节, 以保证直流电压的调节精度。例如, 当输入变量  $\Delta U_{dc}$  为NL(负大)时, 输出变量  $k$  取PL(正大)。当系统送端功率大于受端所需功率时, 直流电压大于参考值, 下垂控制使得逆变方向上的吸收功率增加, 防止直流电压进一步上升。由于此方向上功率裕度较小(通常功率指令值接近最大传输功率值), 下垂系数根据直流电压偏差和换流站功率裕度进行调节, 保证直流电压调节精度的同时保证换流站功率分配特性良好。例如, 当输入变量  $\Delta U_{dc}$  为PL(正大)和输入变量  $\Delta P$  为PS(正小)时, 输出变量  $k$  取PM(正中); 当输入变量  $\Delta U_{dc}$  为PL(正大)和输入变量  $\Delta P$  为PM(正中)时, 输出变量  $k$  取PS(正小)。这是由于此时换流站功率偏差  $\Delta P$  更大(功率裕度更小), 为了保证系统功率分配特性, 下垂系数取值减小。

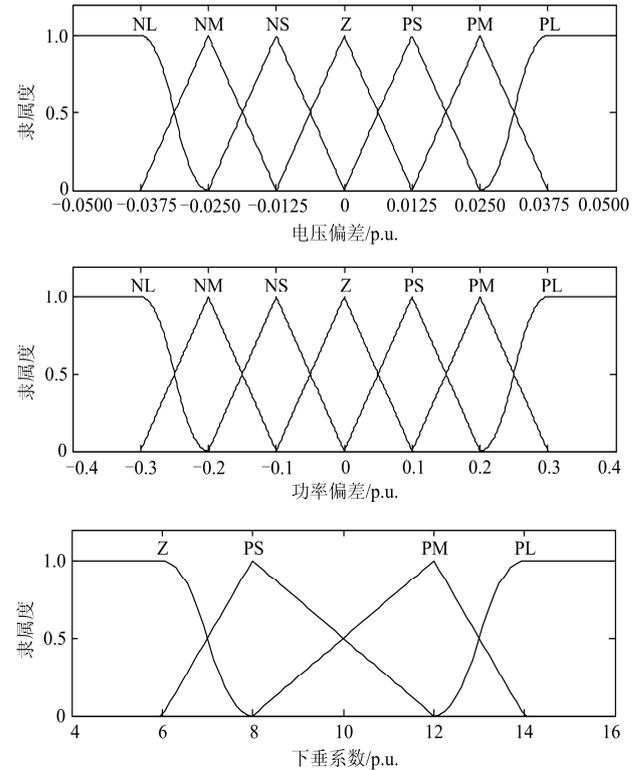


图7 输入和输出变量隶属度函数

Fig. 7 Membership function of input and output variables

表 1 模糊逻辑推理表

Table 1 Fuzzy logic rules for controller

下垂系数	电压偏差						
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	PL	PM	PS	Z	Z	Z	Z
NM	PL	PM	PS	Z	Z	Z	Z
NS	PL	PM	PS	Z	Z	Z	Z
Z	PL	PM	PS	Z	PS	PM	PL
PS	Z	Z	Z	Z	Z	PS	PM
PM	Z	Z	Z	Z	Z	Z	PS
PL	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z

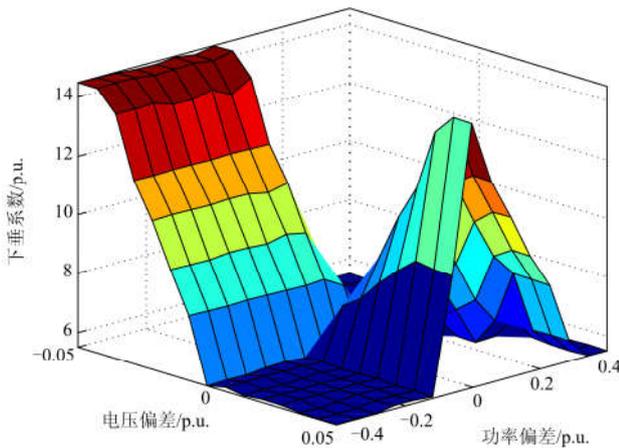


图 8 模糊逻辑推理结果

Fig. 8 Result of fuzzy logic inference

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真系统

基于图 1 所示的单线图，在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建六端 MMC-MTDC 仿真模型。其中 WFMMC 采用定交流电压控制，GSMC3 作为主站采用定直流电压控制，GSMC1 和 GSMC2 采用下垂控制，额定直流电压为±320 kV，系统仿真参数如表 2 所示。

表 2 MMC-MTDC 仿真参数

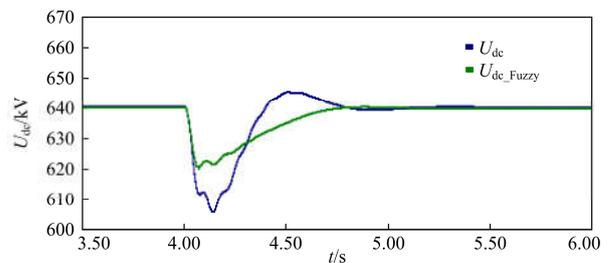
Table 2 Simulation parameters of MMC-MTDC

换流站	换流器容量/	初始输出功率/	下垂系数/
	MVA	MW	p.u.
WFMMC1	1000	900	—
WFMMC2	1000	900	—
WFMMC3	1000	900	—
GSMC1	1400	-1000	4.0
GSMC2	700	-600	4.0
GSMC3	1400	-1100	—

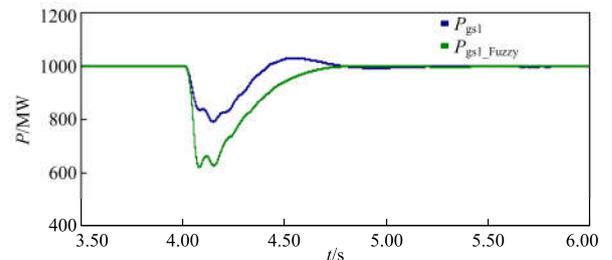
#### 3.2 风电场侧 WFMMC1 退出运行

考虑海上风电场侧换流站 WFMMC1 于 4.0 s 退出运行，系统出现大功率缺额的情况。在此暂态过程中，主站 GSMC3 和采用下垂控制的 GSMC1 和 GSMC2 都参与功率平衡的调节。随着系统直流电压的逐渐恢复，GSMC1 和 GSMC2 承担的功率缺额逐渐减小，当直流电压恢复到额定值后，GSMC1 和 GSMC2 的传输功率也都回到初始值，系统功率缺额全部由主站 GSMC3 承担。系统仿真波形如图 9 所示。

从图 9(a)可以发现，采用传统下垂控制时，暂态最大直流电压偏差为35 kV；采用自适应下垂控制时，暂态最大直流电压偏差为18 kV。采用自适应下垂控制可以有效地减小暂态过程中的直流电压偏差。从图 9(b)和图 9(c)可知，相比于传统下垂控制，采用自适应下垂控制时 GSMC1 和 GSMC2 更多地参与功率平衡的调节，有助于系统从暂态到稳态的恢复过程。如图 9(d)所示，采用自适应下垂控制，减小了主站 GSMC3 在暂态过程中的最大功率偏差，使主站的定直流电压调节过程更加平稳。从图 9(e)下垂系数的变化曲线可知，当出现功率减小的情况时，GSMC1 和 GSMC2 由于功率裕度较大，下垂系数主要根据直流电压偏差大小进行调整。当直流电压偏差逐渐变大时，下垂系数随之增大，使换流站更多地参与功率调节，从而减小直流电压偏差，当直流电压逐渐恢复至额定值时，下垂系数也回到初始值。



(a) 直流电压



(b) GSMC1 传输功率

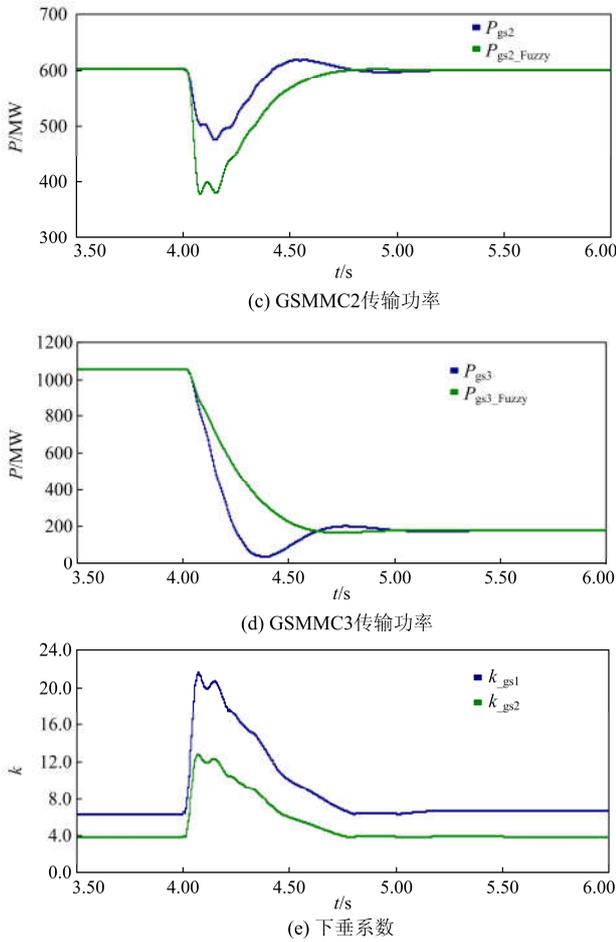


图9 WFMMC1退出运行时仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms when WFMMC1 is outage

由仿真结果可知, 采用自适应下垂控制相比于传统下垂控制, 在暂态过程中可以有效地减小直流电压偏差, 同时也可以减小主站在暂态过程中的最大功率偏差, 使其调节过程更加平稳。

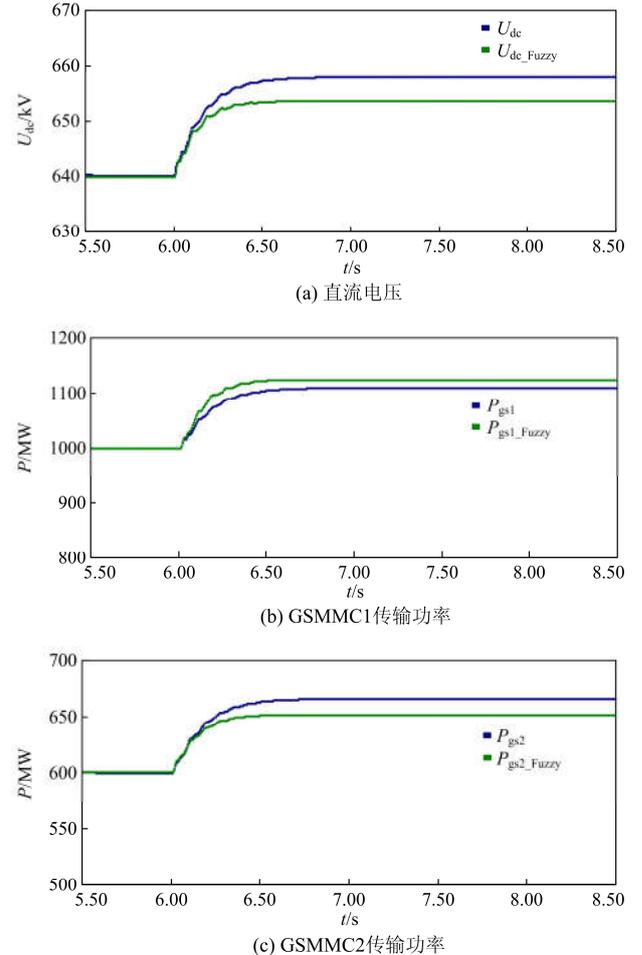
### 3.3 风电场侧 WFMMC1 退出运行

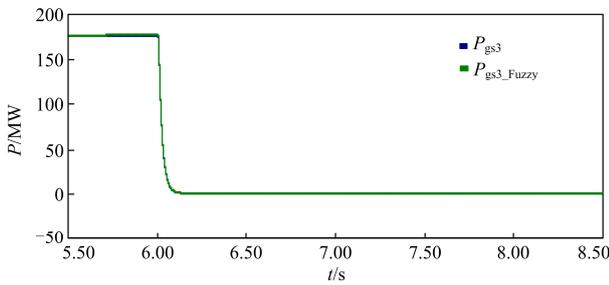
主站退出运行属于最严重的运行工况, 对控制器性能要求更为苛刻。在 6.0 s 时, 设置主站 GSMMMC3 因故障退出运行, GSMMMC3 的有功功率降为零, 如图 10(d)所示, 由 GSMMMC1 和 GSMMMC2 共同承担 GSMMMC3 退出运行后产生的功率偏差。GSMMMC1 和 GSMMMC2 的功率指令分别为 1000 MW 和 600 MW, 风电场输送总功率为 1800 MW, 由于送端功率大于受端功率, 系统直流电压会上升。仿真结果如图 10 所示。

从图 10(a)可以看到, 采用本文所提控制方法, 稳态直流电压为 653 kV, 采用传统下垂控制, 稳态直流电压为 658 kV。由此可知, 采用本文所提控制方法时, 直流电压控制精度相对较高。从图 10(b)

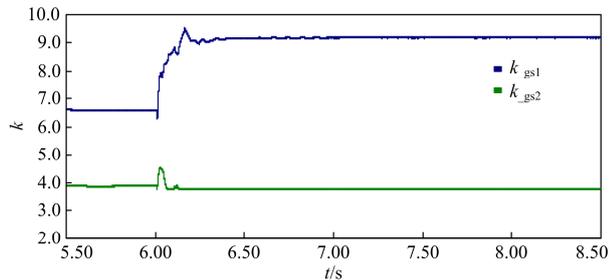
和图 10(c)可以发现, 采用本文所提控制方法相比于传统下垂控制方法, 功率裕度相对较大的 GSMMMC1 会承担更多的功率, 使得功率裕度相对较小的 GSMMMC2 具有较好的功率分配特性。从图 10(e)中 GSMMMC1 和 GSMMMC2 的下垂系数变化曲线可知, 由于 GSMMMC1 的功率裕度相对较大, 在故障初期, 随着直流电压偏差的增大, 其下垂系数随之增大, 但随着 GSMMMC1 传输功率的逐渐增大, 其功率裕度逐渐减小, 通过模糊逻辑控制使得下垂系数有所回落, 最后稳定于 9.0 左右。故障初期, GSMMMC2 具有一定的功率裕度, 其下垂系数随着直流电压偏差增大而有所增大, 但随着传输功率的增加, 其功率裕度逐渐减小, 下垂系数在模糊逻辑控制作用下逐渐减小, 最终稳定在初值 4.0 左右。

仿真结果表明, 所提自适应下垂控制方法能够根据直流电压偏差大小以及换流站的功率裕度大小, 调整下垂系数。在换流站功率裕度允许范围内, 可以减小稳态直流电压偏差, 获得较好的直流电压质量, 同时对换流站的功率分配特性有一定程度的改善。





(d) GSMCC3传输功率



(e) 下垂系数

图 10 GSMCC3 退出运行时仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms when GSMCC3 is outage

### 4 结论

1) 传统下垂控制中下垂系数固定，在复杂运行工况下灵活性较差，采用自适应下垂控制可以根据系统运行工况调整下垂系数，能够减小传输功率变化造成的直流电压偏差，提高系统运行特性。

2) 通过检测直流电压偏差和换流站功率裕度，采用逻辑推理调整下垂系数，可满足在换流站功率裕度较大时，保证直流电压调节精度，获得较好的直流电压控制特性；换流站裕度较小，接近于最大传输容量时，侧重于功率分配以避免 MMC 换流站越限，保证较好的功率分配特性。

### 参考文献

[1] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-26.  
WANG Zhixin, WU Jie, XU Lie, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14-26.

[2] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.  
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016,

44(21): 1-8.

[3] 李芃达, 李东东. 海上风电场集电系统拓扑结构优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 102-107.  
LI Pengda, LI Dongdong. Study on topology optimization of electrical collector system for offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 102-107.

[4] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.  
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.

[5] XU L, WILLIAMS B W, YAO L Z. Multi-terminal DC transmission systems for connecting large offshore wind farms[C] // Power and Energy Society General Meeting — Conversion and Delivery of Electrical Energy in the Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 1-7.

[6] 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.

[7] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.  
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.

[8] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.

[9] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.  
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.

[10] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.  
WEN Jiali, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.

[11] 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.
- [12] 陈海荣, 徐政. 适用于 VSC—MTDC 系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 28-33.  
CHEN Hairong, XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 28-33.
- [13] 辛俊峰, 韩金铜, 康金良. 基于直流电压下降特性的 VSC-MTDC 控制策略研究[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(8): 42-46.  
XIN Junfeng, HAN Jintong, KANG Jinliang. Research on the control strategy for VSC-MTDC based on the DC voltage drop characteristics[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(8): 42-46.
- [14] PRIETO-ARAUJO E, BIANCHI F D, JUNYENT-FERRE A, et al. Methodology for droop control dynamic analysis of multiterminal VSC-HVDC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2476-2485.
- [15] PRIETO-ARAUJO E, EGEA-ALVAREZ A, FEKRIASL S, et al. DC voltage droop control design for multi-terminal HVDC systems considering AC and DC grid dynamics[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, USA: 1-1.
- [16] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 PV 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 408-415.  
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Time-domain analysis of PV characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 408-415.
- [17] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [18] DIAZ N L, DRAGIĆEVIĆ T, VASQUEZ J C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids — a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2476-2485.
- [19] ABDEL-KHALIK A S, MASSOUD A M, ELSEROUGI A A, et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3401-3409.
- [20] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 21-29.
- [21] 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 system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2588-2599.
- [22] 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.
- [23] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.  
LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.
- [24] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 64-68.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [25] 苏海滨, 王光政, 王继东. 基于模糊逻辑双环控制的光伏发电系统最大功率跟踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 215-218.  
SU Haibin, WANG Guangzheng, WANG Jidong. The maximum power point tracking algorithm for photovoltaic power system based on fuzzy logic double loop control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 215-218.

收稿日期: 2017-02-14; 修回日期: 2017-05-22

作者简介:

徐进(1975—), 男, 硕士, 主要从事电网和新能源规划与技术管理方面的研究工作; E-mail: 1937502948@qq.com

王龙(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为直流电网运行与控制理论分析。E-mail: wang\_long@hust.edu.cn

(编辑 魏小丽)