

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.007

# 适合风电接入的 VSC-MTDC 系统协调控制策略

邹朋, 李文帆, 伍文城

(西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

**摘要:**对于具有小集中、大分散特点的内陆风电,交流并网存在电能质量下降、经济性差等诸多问题,两端柔直并网也无法满足要求。使用多端柔直是未来风电并网的发展方向,文中提出一种适合风电接入的多端柔直系统协调控制策略。该策略综合考虑直流电压改变的方向、电压改变的大小以及换流站功率裕度等因素,自适应实时调节下垂系数,优化换流站之间功率分配,避免不当下垂系数造成的系统损耗增加、部分换流站功率过载。引入附加频率控制与自适应下垂控制协调,可充分利用系统调频容量,改善系统频率稳定性。控制器参数易于整定,结构简单。在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中搭建了嵌入多端柔直系统的四机两区域模型,验证了所提策略的有效性和可行性。

**关键词:**自适应;多端柔直;直流电压下垂控制;附加频率控制;协调控制

**中图分类号:** TM711

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)01-0051-06

## 0 引言

风电通常采用交流并网,技术成熟、结构简单,但距离负荷中心较远时,输电成本较高,同时会出现电能质量下降的问题,从而限制了交流并网的发展。基于电压源型换流器的高压直流(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)输电控制特性灵活,能提供动态无功补偿<sup>[1]</sup>,是风电并网中的较优选择之一。同时,VSC-HVDC 还易于扩展,形成多端直流输电系统(multi-terminal VSC-HVDC, VSC-MTDC),可以实现多点供电和受电,运行控制也更加灵活<sup>[2]</sup>,可为多区域、大规模风电并网提供有力支撑<sup>[3-4]</sup>。

VSC-MTDC 系统稳定运行的重要前提是直流电压运行在系统允许的区间内<sup>[5-6]</sup>。目前,VSC-MTDC 的直流电压控制方法主要有主从控制、下垂控制及裕度控制等。主从控制是利用一个换流站作为松弛节点控制系统直流电压,其他换流站采用定功率控制,实现简单、直流电压控制效果好,但对通信有较高的要求<sup>[7]</sup>;下垂控制、裕度控制不需要通信联系,但裕度控制对参数选择的准确性有严格的要求,参数不合理易引发系统震荡<sup>[8]</sup>。选择直流电压下垂控制,不存在上述缺陷,各换流站无需通信,动态调节性好,但对于潮流变化频繁的风电场接入的 VSC-MTDC 系统,下垂系数选取困难,且换流站重载时还需及时调整送端风电场侧换流站的下垂系数,避免其电压过高<sup>[9]</sup>。传统下垂控制采

用固定的下垂系数,难以实现功率分配和电压波动之间的权衡<sup>[10]</sup>。针对这些问题,文献[11]引入一个公共直流参考电压,参与下垂控制换流站的功率调整,提高了系统的暂态稳定性。文献[12]所提出的自适应下垂控制,可灵活参与功率调节,达到功率最优分配,但未充分考虑直流电压波动的影响。文献[13]提出了一种可有效避免固定系数设置不合理的灵活下垂控制策略。文献[14]对比、总结了下垂控制改进方法,具有一定的借鉴意义。

基于已有研究,文中针对风电接入的 VSC-MTDC 系统,综合考虑直流网络电压偏差和功率偏差自适应修正下垂系数,协调利用互联交流电力系统的调频容量,提出一种自适应直流电压下垂控制与附加频率控制的协调控制策略,并在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中进行仿真实验,验证了策略的有效性。

## 1 典型 VSC-MTDC 系统结构

我国风能资源储量十分丰富,但风能与负荷中心的分布通常极不均衡,具有小集中、大分散的特点,极易造成“窝电”现象,从而导致资源极大浪费。利用 VSC-MTDC 输电系统更为灵活的功率控制特性,可为风电的汇集、并网提供一种更为合适的输电方式。输电系统结构示例见图 1,在四机两区域模型中嵌入三端 VSC-MTDC 系统,并在区域 1 和区域 3 分别接入风电场。其中,VSC-MTDC 系统采用并联型接线方式,较串联型接线方式更易于控制,也有利于系统的进一步扩展,同时也能规避混合型接线方式控制复杂、实际应用中可靠性低的问题。

收稿日期:2019-07-22;修回日期:2019-08-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901001)

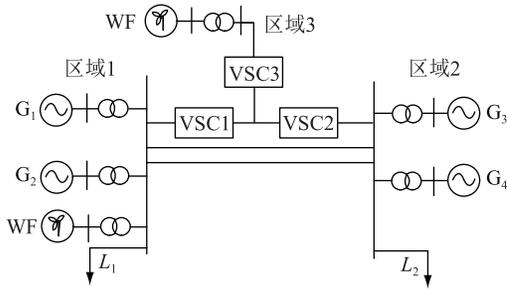


图 1 三端柔性直流输电风电外送系统结构

Fig.1 The structure of wind power delivery system

## 2 VSC-MTDC 系统的协调有功功率控制策略

### 2.1 自适应直流电压下垂控制

直流电压下垂控制是定有功功率和定直流电压控制的结合,无需控制模式的切换即能快速调整直流功率,VSC 换流站处于直流电压下垂控制模式时的控制特性如图 2 所示,直流电压下垂控制器结构如图 3 所示。图中, $P, P_{ref}$  分别为直流功率的实际运行值和参考值; $U_{dc}, U_{dcref}$  分别为直流电压的实际运行值和参考值; $i_{dref}$  为换流站外环控制生成的  $d$  轴分量参考值。直流电压和直流功率之间满足关系式:

$$U_{dc} = U_{dcref} + \frac{1}{K}(P - P_{ref}) \quad (1)$$

式中: $K$  为下垂系数。

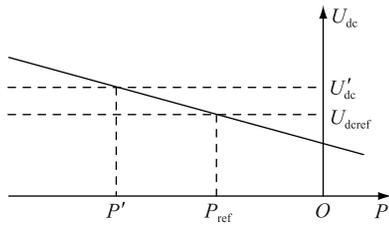


图 2 控制特性曲线

Fig.2 Control characteristic curve

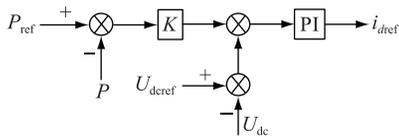


图 3 直流电压下垂控制

Fig.3 DC voltage droop control

传统的直流电压下垂控制一般采用固定的下垂系数  $K$ ,并没有充分考虑各个换流站的功率裕度以及运行工况。若  $K$  值过大,较小的电压变化也将导致很大的功率波动,系统受扰动时容易导致功率裕度较少的换流站过载;若  $K$  值过小,系统受扰动

后对电压的控制能力减弱,即  $K$  值过大或过小都将影响整个系统的稳定运行<sup>[15]</sup>。因此改进下垂控制策略,使  $K$  值能够根据直流功率和直流电压自适应变化,使换流站充分利用其功率裕度,而不至于满载或过载。

系统稳态运行时,直流功率和直流电压都在微小的范围内波动,可能引起  $K$  值频繁的波动,因此设置直流电压偏差 ( $\Delta U_{dc}$ ) 死区范围为  $-U_{dm} \leq \Delta U_{dc} \leq U_{dm}$  ( $U_{dm} > 0$ ),  $\Delta U_{dc}$  在此范围内时,  $K$  值保持为固定值 0,即此时 VSC 换流站运行于定功率控制模式。

当  $\Delta U_{dc} > U_{dm} > 0$  时,VSC-MTDC 系统直流电压水平偏高,表明换流站吸收的有功功率小于系统发出的有功功率,处于直流电压下垂控制的换流站需减小有功功率,此时由式(1)可定义直流电压偏高时的初始下垂系数  $K_H$  为:

$$K_H = \frac{P_{ref}}{\Delta U_{dcref}} \quad (2)$$

式中: $\Delta U_{dcref}$  为允许的直流电压最大偏差。

当  $\Delta U_{dc} < -U_{dm} < 0$  时,VSC-MTDC 系统直流电压水平偏低,表明换流站吸收的有功功率大于系统发出的有功功率,处于直流电压下垂控制的换流站的有功功率应增大,根据换流站功率裕度情况,同样由式(1)可定义直流电压偏低时的初始下垂系数  $K_L$  :

$$K_L = \frac{P_{imax} - P_{ref}}{\Delta U_{dcref}} \quad (3)$$

式中: $P_{imax}$  为第  $i$  个换流站最大运行功率。

由上述 VSC-MTDC 系统的运行特性和直流电压下垂控制特性,  $K$  值自适应变化的原则主要有:(1) 当  $\Delta U_{dc}$  较小且接近死区范围时,  $K$  值应维持在较小水平而不至于过小,定有功功率控制处于主导控制地位;(2) 当  $\Delta U_{dc}$  较大时,  $K$  值应迅速增大,定直流电压控制处于主导控制地位,以保证直流电压的快速稳定,但  $K$  值应受到换流站实时功率裕度的限制。由此,针对初始下垂系数  $K_H, K_L$ ,引入按抛物线函数变化的权重系数:

$$\alpha = m \Delta U_{dc}^2 \quad (4)$$

其中,定义  $\alpha$  取值范围为  $(0, 2/3)$ ;  $m$  为常数,  $m = \alpha_{max} / \Delta U_{dcref}^2$ 。

自适应下垂系数写为:

$$K_H^* = \alpha \frac{P_i}{\Delta U_{dcref}} + \frac{K_H}{3} \quad (5)$$

$$K_L^* = \alpha \frac{P_{imax} - P_i}{\Delta U_{dcref}} + \frac{K_L}{3} \quad (6)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个换流站实际运行功率。

由式(5)和式(6)可知,自适应下垂系数由两部分组成:第一部分可看作是由换流站功率裕度确定的下垂系数和权重系数  $\alpha$  的加权,确保下垂系数受到换流站功率裕度的约束;第二部分是初始下垂系数的  $1/3$ ,避免下垂系数过小引起直流电压得不到有效控制、达到稳定点过慢,利于各换流站的协调。

综上所述,自适应下垂系数可定义为:

$$K^* = \begin{cases} \alpha \frac{P_i}{\Delta U_{d\max}} + \frac{K_H}{3} & \Delta U_{dc} > U_{dm} \\ 0 & -U_{dm} \leq \Delta U_{dc} \leq U_{dm} \\ \alpha \frac{P_{i\max} - P_i}{\Delta U_{d\max}} + \frac{K_L}{3} & \Delta U_{dc} < -U_{dm} \end{cases} \quad (7)$$

## 2.2 附加频率控制

对于图 1 所示的 VSC-MTDC 输电系统,区域 1 中风电机组与本地电网中的火电机组接入同一交流母线,并经交流线路和直流线路向区域 2 传输有功功率,即风电场配置有一定比例的火电机组调频容量以平抑风电出力波动;区域 3 中风电场风电功率则经直流线路通过 VSC2 站汇入区域 2。为保证 VSC-MTDC 输电系统的稳定运行,设置 VSC1 站采用定有功功率控制,VSC2 站、VSC3 站采用自适应直流电压下垂控制以满足风电场潮流的频繁变化。

考虑在采用定有功功率控制模式的 VSC1 站引入直流附加频率控制辅助系统调频<sup>[16]</sup>,频率附加控制器如图 4 所示。图中,  $P_{vscref}$ ,  $P_{vsc}$  分别为换流站有功参考值和实际值;  $i_{dref}$  为换流站外环控制生成的  $d$  轴分量参考值;  $i_{d\max}$ ,  $i_{d\min}$  分别为  $d$  轴分量的上下限幅值。Butterworth 环节为截止频率为 60 Hz 的低通滤波器,滤除高频信号,为避免控制器在微小范围内频繁动作,在频率附加控制器输入信号后加入死区环节  $[-\Delta f_0, \Delta f_0]$ ,  $G_c(s)$  为附加控制器的传递函数。

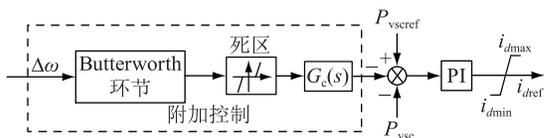


图 4 VSC-HVDC 频率附加控制器

Fig.4 Frequency additional controller of VSC-HVDC

当风电出力的随机波动导致交流电网频率上升或者下降时,频率附加控制器响应,输出有功功率调制信号,快速增加或者减少直流线路功率,缓解系统的有功功率不平衡状况。同时 VSC-MTDC 系统中,采用自适应直流电压下垂控制的换流站可

通过直流线路功率的变化即时感知系统中的功率不平衡状况,并自适应调节下垂系数,根据各换流站直流电压、功率裕度等分配不平衡功率,从而通过附加频率控制与自适应下垂控制之间的协调,使系统维持平衡状态,频率、功率调节能力得以提升。

附加频率控制器采用工程实践中广泛应用的根轨迹法设计。如图 5 所示,  $u(s)$ ,  $y(s)$  分别为输入量和输出量,根轨迹法的基本原理则是在开环系统  $G(s)$  根轨迹的基础上,选取系统在所期望动态特性时的主导极点,利用图解法确定校正环节  $G_c(s)$  的参数,通过校正环节  $G_c(s)$  增加系统开环传递函数的零点和极点,使闭环系统根轨迹经过该特征根<sup>[17-18]</sup>。开环系统  $G(s)$  为附加频率控制输出调制信号到系统频率偏差信号的开环传递函数,利用较传统辨识算法更有的抗噪、抗干扰的 TLS-ESPRIT 算法辨识得到<sup>[19]</sup>,根据根轨迹图以及幅值、幅角条件等,选取期望的主导极点,确定校正环节  $G_c(s)$ ,即附加频率控制器的传递函数。

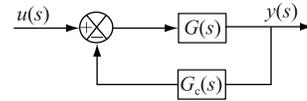


图 5 控制系统框图

Fig.5 Block diagram of control system

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建如图 1 所示的输电系统。直流电压的额定值为  $\pm 400$  kV,取极限波动范围为  $\pm 5\%$ ; VSC1 站采用定功率控制,同时装设直流附加频率控制,额定容量为 350 MW; VSC2 站采用自适应直流电压下垂控制,额定容量为 500 MW; VSC3 站采用自适应直流电压下垂控制,额定容量为 150 MW。区域 1 和区域 2 的风电场额定容量分别为 500 MW, 200 MW。

考虑 VSC 换流站的满载功率均为额定运行功率的 1.1 倍,根据式(5)和式(6)计算 VSC2 站和 VSC3 站的初始下垂系数,分别可得:  $K_{H2} = 25$ ,  $K_{L2} = 2.5$ ;  $K_{H3} = 7.5$ ,  $K_{L3} = 1.5$ 。另外,对于 VSC2 和 VSC3 站,式(7)中的常数  $m$  均取为 0.007。

利用基于 TLS-ESPRIT 算法的系统辨识方法辨识开环系统  $G(s)$ ,可得:

$$(-0.0002945s^6 - 0.005022s^5 - 0.1092s^4 - 0.3268s^3 - 3.308s^2 - 0.3438s)(s^6 + 3.581s^5 + 87.53s^4 + 208.2s^3 + 1833s^2 + 2815s + 215.7)^{-1} \quad (8)$$

期望主导闭环极点的阻尼比为  $\zeta = 0.5$ , 且无阻尼自然振荡频率为  $\omega_n = 2 \text{ rad/s}$ , 闭环主导极点的位置确定为  $s_d = -1 \pm 1.732 \text{ i}$ , 可得控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{280s + 996.7}{s + 0.971} \quad (9)$$

在我国实际工程中应用的多端直流输电多采用主从控制策略, 如南澳和舟山直流工程<sup>[20-21]</sup>。因此选择采用主从控制(后文中称为“传统控制”)与协调控制策略进行仿真对比。具体的主从控制策略为: VSC1 站采用定电压控制, VSC2、VSC3 站采用定功率控制。

### 3.2 风速持续波动

设置区域 1 中风电场的风速出现持续波动, 风速变化情况如图 6 所示, 以系统频率和各换流站功率为观测对象, 仿真结果如图 7 和 8 所示。

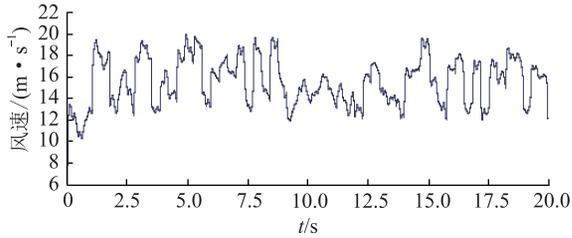
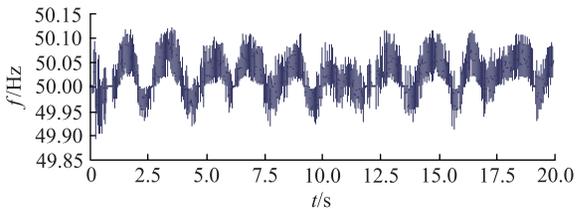
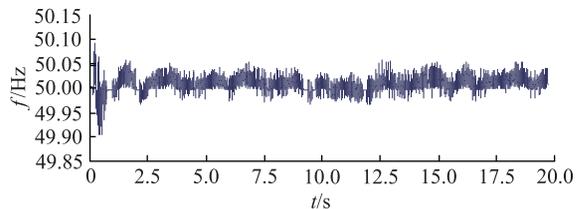


图 6 风速变化情况

Fig.6 Wind speed change



(a) 传统控制

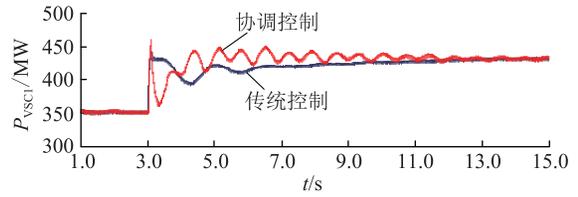


(b) 协调控制

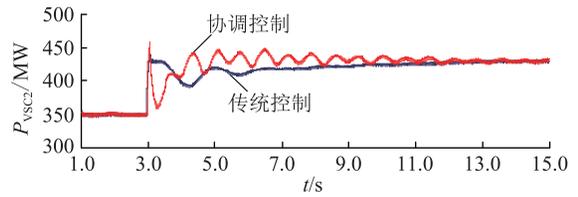
图 7 算例 1 系统频率变化

Fig.7 System frequency change of case 1

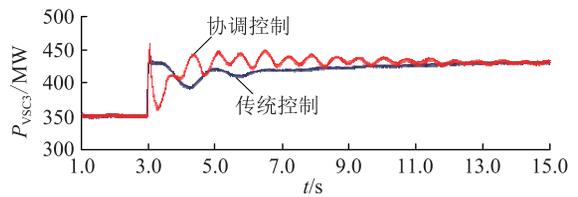
采用传统控制策略时, 系统频率出现约  $\pm 0.1 \text{ Hz}$  的持续波动, 而采用自适应直流电压下垂控制与附加频率控制的协调控制策略时, 风速持续波动过程中, 系统频率的波动得到有效抑制, 始终保持在约  $50 \text{ Hz}$ , 主要原因是, 采用自适应电压下垂控制的 VSC2 站、VSC3 站对该直流电压变化进行响应, 根据自身调节容量以及电压波动情况, 自适应实时调



(a) VSC1 站有功功率



(b) VSC2 站有功功率



(c) VSC3 站有功功率

图 8 算例 1 换流站有功功率变化

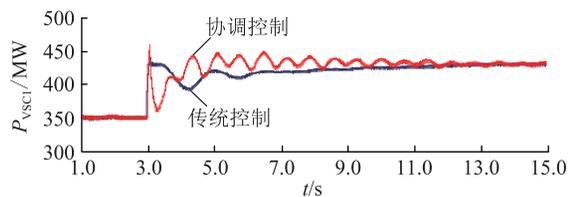
Fig.8 Active power change of converter station of case 1

节下垂系数, 从而调整换流站有功功率, 使区域 2 交流系统和区域 3 风电场均参与功率调节, 且避免了 VSC2、VSC3 站满载运行失去对 VSC-MTDC 不平衡功率的响应能力, 充分利用了 VSC-MTDC 有功功率快速可控的优势, 使系统频率稳定性得以增强。

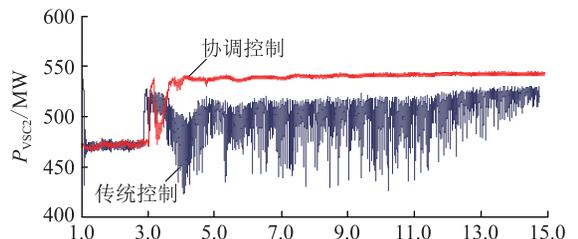
### 3.3 VSC1 站功率突增

设置系统在 3 s 时刻, VSC1 站整定功率增加 80 MW, 约为额定运行功率的 22%, 比较 VSC-MTDC 系统出现较大不平衡功率时的调节能力。主要观察换流站有功功率的变化, 结果如图 9 所示。

VSC1 站功率增加所引起的 VSC-MTDC 直流电压出现变化, 采用传统控制策略的 VSC2 站和 VSC3



(a) VSC1 站有功功率



(b) VSC2 站有功功率

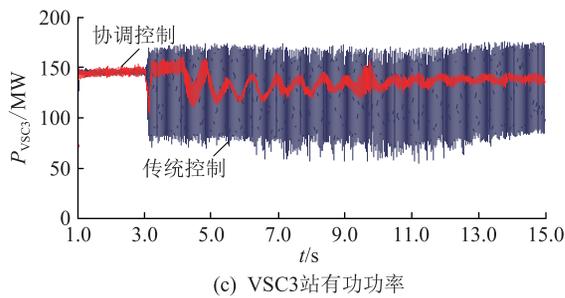


图9 算例2换流站有功功率变化

Fig.9 Active power change of converter station of case 2

站功率出现了剧烈的振荡,无法恢复至稳定运行点,实际运行中将导致风电场电气设备的损害以及风电场的脱网。而采用协调控制策略时,VSC1站增加80 MW后,VSC2站经约1.6 s的短时调整即达到稳态范围,之后只进行小幅度的微调,与此同时VSC1经附加频率控制器响应调节功率,VSC3站则持续对电压波动响应调节功率,持续时长约8 s即进入稳态范围。

#### 4 结论

文中以风电接入的VSC-MTDC系统为研究对象,改进传统下垂控制,同时引入附加频率控制与其协调的控制策略,并通过仿真得到以下结论:

(1) 下垂系数依据电压波动情况和换流站动态有功功率裕度自适应实时改变的直流电压下垂控制方法,使各换流站灵活参与系统功率调节,有效避免了换流站满载运行甚至过载运行、直流电压失去控制等工况的出现。

(2) 附加频率控制基于TLS-ESPRIT算法的系统辨识,采用根轨迹法设计,能有效改善系统动态调节性能,控制器结构简单,容易实现,对工程实践具有一定的参考价值。

(3) 所提出的协调控制策略能有效抑制风电出力变化引起的系统频率波动;相比于传统控制策略,针对VSC-MTDC较大潮流变化的情况具有更有效、可靠的调节能力。

#### 参考文献:

- [1] 王渝红,陈勇,曾琦,等. 适用于VSC-MTDC的改进下垂控制[J]. 高电压技术,2018,44(10): 3190-3196.  
WANG Yuhong, CHEN Yong, ZENG Qi, et al. Improved droop control strategy for VSC-MTDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3190-3196.
- [2] 王渝红,李天泽,曾琦,等. 实际运行点动态修正的VSC-MTDC改进下垂控制策略[J]. 高电压技术,2018,44(7): 2133-2142.  
WANG Yuhong, LI Tianze, ZENG Qi, et al. Novel droop control

- strategy with dynamically corrected operating point for VSC-MTDC system [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44 (7): 2133-2142.
- [3] 江浩,孙瑜,刘辉,等. 风电经柔性直流输电系统接入电网研究综述[J]. 华北电力技术,2017(1):1-7.  
JIANG Hao, SUN Yu, LIU Hui, et al. Literature review of wind power intergrated into power systems with HVDC-flexible [J]. North China Electric Power, 2017(1):1-7.
- [4] 陈树勇,徐林岩,孙栩,等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报,2014,32(25):32-38.  
CHEN Shuyong, XU Linyan, SUN Yu, et al. The control of wind power integration based on multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 32(25):32-38.
- [5] XU L, YAO L. DC voltage control and power dispatch of a multi-terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(3): 223-233.
- [6] GOMIS-BELLMUNT O, LIANG J, EKANAYAKE J, et al. Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 271-281.
- [7] 刘天琪,陶艳,李保宏. 风电场经MMC-MTDC系统并网的几个关键问题[J]. 电网技术,2017,41(10): 3251-3260.  
LIU Tianqi, TAO Yan, LI Baohong. Critical problems of wind farm integration via MMC-MTDC system [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3251-3260.
- [8] 李梅航,刘喜梅,陈朋. 适用于多端柔性直流输电系统的快速电压裕度控制策略[J]. 电网技术,2016,40(10): 3045-3051.  
LI Meihang, LIU Ximei, CHEN Peng. Fast voltage margin control strategy for VSC-MTDC systems [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3045-3051.
- [9] 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.
- [10] BEDDARD A, BARNES M, PREECE R. Comparison of detailed modeling techniques for MMC employed on VSC-HVDC schemes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 579-589.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈朋,李梅航,严兵,等. 适用于多端柔性直流输电系统的灵活下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3433-3439.  
CHEN Peng, LI Meihang, YAN Bing, et al. Flexible droop control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3433-3439.
- [14] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [15] 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.  
RAN Xiaohong, MIAO Shihong, WU Yingjie, et al. An improved droop control strategy for multi-terminal DC grids based on optimal active power allocation[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 16-24.
- [16] 朱琳,贺之渊,吴学光,等. 渝鄂背靠背柔性直流附加控制对系统稳定性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2519-2527.  
ZHU Lin, HE Zhiyuan, WU Xueguang, et al. Influence of additional control strategy of back-to-back VSC-HVDC on system stability[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2519-2527.
- [17] VRANA T K, BEERTEN J, BELMANS R, et al. A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 103(8): 137-144.
- [18] DIERCKXSENS C, SRIVASTAVA K, REZA M, et al. A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1): 54-58.
- [19] 胡楠,李兴源,李宽,等. 基于 CCF-TLS-ESPRIT 算法的低频振荡在线辨识[J]. 物理学报, 2014, 63(6): 316-324.  
HU Nan, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. On-line identification for low frequency oscillation based on CCF-TLS-ESPRIT algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(6): 316-324.
- [20] 凌卫家,孙维真,张静,等. 舟山多端柔性直流输电示范工程典型运行方式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1751-1758.  
LING Weijia, SUN Weizhen, ZHANG Jing, et al. Analysis of typical operating modes of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC pilot project[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1751-1758.
- [21] FU J, YUAN Z, WANG Y, et al. Control strategy of system coordination in Nanao multi-terminal VSC-HVDC project for wind integration[C]//2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. IEEE, 2014: 1-5.

#### 作者简介:



邹朋

邹朋(1991),男,硕士,工程师,从事电力系统规划、稳定与控制相关工作(E-mail: zoupeng09@163.com);

李文帆(1987),男,硕士,工程师,从事电力系统规划、稳定与控制相关工作;

伍文诚(1977),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划、稳定与控制相关工作。

## Coordinated control strategy for VSC-MTDC systems with wind power integration

ZOU Peng, LI Wenfan, WU Wencheng

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, China)

**Abstract:** For inland wind power, there are many problems with AC interconnection, and the double terminal voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) system can not satisfy the requirements. Multi-terminal VSC-HVDC (VSC-MTDC) is the tendency of wind power integration. The coordination of adaptive DC voltage droop control and HVDC additional frequency control was proposed. The droop coefficient varies adaptively according to the value and direction of DC voltage change and the power margin of the converter station, optimizing power distribution between converter stations. And the additional frequency control is introduced into VSC-MTDC. Taking full advantage of frequency adjustment capacity. Controller parameters are easy to set and simple. The simulation results show the effectively of coordinated control strategy.

**Keywords:** adaptive; multi-terminal voltage source converter based high voltage direct current (VSC-MTDC); DC voltage droop control; supplementary frequency control; coordinated control

(编辑 钱悦)