

VSC-MTDC 系统变截距直流电压下垂控制策略

张海波¹, 袁志昌¹, 赵宇明², 刘国伟², 姚森敬²

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518048)

摘要: 针对用于风电场并网的多端柔性直流输电系统, 提出一种变截距直流电压下垂控制策略。该策略通过设定新的功率参考值改变截距实现直流电压-有功功率特性调节曲线的平行移动, 进行电压的调整, 可将系统的直流电压控制在允许的运行范围内。若风电功率在一段时间内保持平稳, 系统达到稳定运行的状态, 该策略可消除电压偏差, 将直流电压调节回额定值。以一典型的五端直流输电系统为例, 利用 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真验证了该控制策略的正确性, 结果表明所提控制策略适用于功率频繁变化的含风电场的 VSC-MTDC 系统。

关键词: 风电场; 电压源换流器; 直流输电; 直流电压下垂控制; 变截距

中图分类号: TM 614; TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.009

0 引言

进入 21 世纪, 能源已成为推动人类社会飞速发展的强劲动力, 煤炭、石油等化石能源日渐枯竭, 风能、太阳能等可再生能源得到国际社会的广泛关注和大力开发。风能是一种可再生的清洁能源, 资源丰富, 其中大规模近海风电场的建设已成为风能利用的一个重要方面。由于海上风电场远离海岸, 以及随着风电场装机容量的不断扩大, 风电并网采用传统的交流输电接入时, 将会对所连接电网的稳定性及电能质量等产生较大影响^[1-3]。风电功率的随机波动性制约了其直接接入电网的容量, 柔性直流输电提供了一种全新的解决思路。通过柔性直流输电将风电场接入交流电网, 可以利用交流侧换流站的无功能力平滑风电功率波动对交流电压的影响, 还可以隔离交流侧的故障防止其影响风电场运行。由于直流输电单回线路输电容量高于交流输电, 在海上风电等线路施工困难的领域, 柔性直流输电可节省大量投资。此外, 柔性直流输电可以方便地构成直流电网, 非常适用于多个海上风电平台的汇集和接入。因此基于电压源换流器的高压直流 (VSC-HVDC) 输电技术成为目前最适合也是运用最多的风电并网技术^[4-7]。当大规模地开发海上风电时, 需要采用基于电压源换流器的多端直流 (VSC-MTDC) 输电系统^[8-11]。

与双端直流系统相比, 多端直流系统运行更加灵活、可靠, 但其控制也更加复杂。文献[12]提出了直流电压偏差控制策略, 即主导站停运引起的直流电压偏差大于一定值后, 备用站进入直流电压控制模

式, 该策略需要备用站具有足够大的备用容量, 这在实际中很难实现。文献[13]提出了基于直流电压下降特性的多点直流电压控制策略, 用于主导站与辅助站间的有功功率分配, 避免了单个换流站过载情况的发生, 并能维持换流站停运故障后系统的直流电压控制。文献[14]将多点直流电压控制策略运用到适用于风电场并网的 VSC-MTDC 系统, 提高了系统的可靠性, 但同一时刻只有单个换流站参与功率调节, 导致系统的响应速度较慢; 该方法另外一点不足之处在于多个备用 VSC 控制器需要多个定电压的优先级, 控制器的设计显得冗余和复杂, 这限制了 VSC 的数目。文献[15]提出一种适用于风电场并网的点点直流电压自适应控制策略, 该策略保证了功率裕度较小的换流站分担较少的功率变化量, 功率裕度较大的换流站分担较多的功率变化量, 实现风电功率变化量的合理分配, 但是该策略并未考虑系统会出现直流电压偏差过大的情况。

风电场发出的功率具有随机性、间歇性和波动性等特点, 本文提出一种变截距直流电压下垂控制策略, 该策略通过设定新的功率参考值改变截距实现下垂特性曲线的平行移动, 进行电压调整, 将系统的直流电压控制在允许的运行范围内, 若系统能够达到稳定运行的状态, 该策略可消除电压偏差, 将电压调节回额定值; 最后利用 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真验证了该控制策略的可行性和准确性。

1 VSC-MTDC 系统结构及建模

图 1 是某一 VSC-MTDC 系统应用于海上风电场并网的拓扑结构示意图, 本文以该系统为例进行控制策略的研究。

该环状系统由 5 个电压源换流站组成: VSC₁ 和 VSC₂ 分别与各自的有源交流网络相连, 采用电压

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2016-08-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2015AA050103)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA-050103)

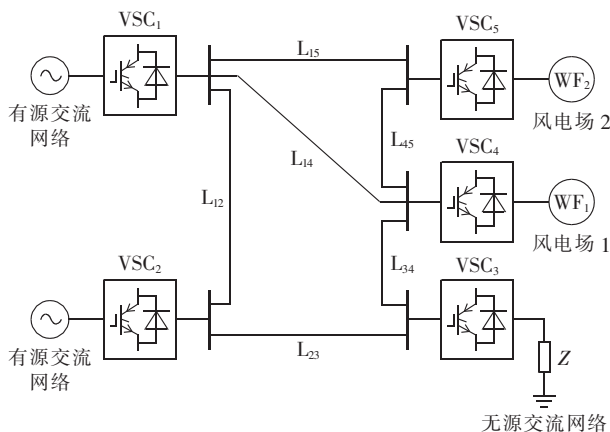


图 1 海上风电场经 VSC-MTDC 系统并网的原理图

Fig.1 Schematic diagram of offshore wind farms connected to grid via VSC-MTDC system

下垂控制策略,实现直流电压的控制以及功率的分配;VSC₃ 与无源交流网络相连,向无源网络供电;VSC₄ 和 VSC₅ 分别连接风电场 1 和 2,用以采集风电场发出的有功功率,采用定交流频率和定交流电压控制。以注入直流网络为功率正方向。电压源换流器和风电场的建模方法见文献[15]。

2 传统的直流电压下垂控制策略

传统的直流电压下垂控制策略是定直流电压控制和定有功功率控制模式的结合,其优点在于各换流站之间无需通信,常用于潮流频繁变化的风电场并网系统中,其基本原理和外环控制器分别如图 2 和图 3 所示。

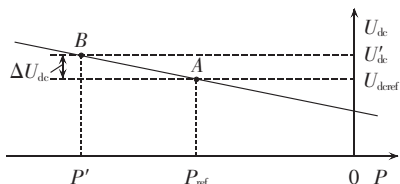


图 2 直流电压下垂控制基本原理

Fig.2 Basic principle of DC-voltage droop control

传统的直流电压下垂控制特性曲线满足:

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

其中, $U_{dc\text{ref}}$ 为直流电压的额定值; P_{ref} 为功率参考值; K 为下垂斜率。

当换流站从 A 点运行到 B 点,直流电压偏离额定值,电压偏差为:

$$\Delta U_{dc} = K(P_{\text{ref}} - P') \quad (2)$$

不同的下垂斜率 K 对系统的影响很大。若 K 值过小,则直流系统的电压质量较好,但功率分配性能较差,易发生功率振荡;若 K 值过大,则直流系统具

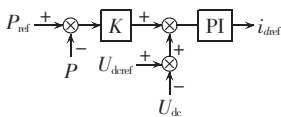


图 3 直流电压下垂控制器
Fig.3 DC-voltage droop controller

有良好的功率分配特性,但直流电压质量较差。因此需选择合适的下垂斜率来兼顾系统的功率分配特性和电压质量。传统的直流电压下垂控制策略通过让不同的换流站选择不同的下垂斜率 K 来实现有功功率的分配。在功率频繁变化的风电场并网系统中,采用下垂控制会出现直流电压偏差,在运行工况恶劣的情况下甚至会出现直流电压偏离额定值较大的情况。

3 变截距直流电压下垂控制策略

当采用直流电压下垂控制的系统出现电压偏差时,首先考虑消除电压偏差,如图 4 所示。

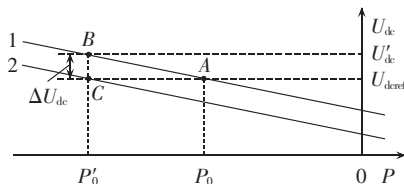


图 4 直流电压的初步调整

Fig.4 Preliminary DC-voltage adjustment

该换流站的初始运行点为 A,直流电压运行在额定值。当风电场的输出功率增大时,换流站的运行点沿着下垂曲线 1 转移到稳定点 B,即电压将上升为 U'_{dc} ,功率增加至 P'_0 ,电压偏差为 ΔU_{dc} 。此时将 P'_0 设定为新的功率参考值,则直流电压-有功功率特性曲线将向下平行移动,下垂曲线的截距发生改变,得到新的下垂曲线 2,系统的运行点将最终稳定在 C 点,电压偏差被消除,直流电压恢复到额定值。调整功率参考值改变截距实现直流电压-有功功率特性的平行移动可消除因功率变化引起的电压偏差,该过程类似于电力系统中频率的二次调整(二次调频),这里可以称为直流系统的电压调整。

电压的调整需要在系统达到新的稳定运行点之后进行,该条件必不可少。若系统在未达到稳定运行的情况下修改功率参考值,则系统会失去稳定,发生功率振荡,进而产生更恶劣的后果。为防止在功率频繁变化的过程中无法实现电压的调整,导致电压偏离额定值较大,设定系统电压的正常运行范围,上限为 $U_{dc\text{max}}$,下限为 $U_{dc\text{min}}$ 。当系统直流电压运行到上限或下限时,同样进行电压的调整。

由图 5 进行分析,系统初始运行点为 A,若风电场输出功率增大,当换流站沿着下垂曲线 1 运行到 D 点时,功率增加至 P'_0 ,电压上升到运行范围的上限 $U_{dc\text{max}}$,此时进行调压,将 P'_0 设定为新的功率参考值,下垂曲线截距减小同时平行向下移动至曲线 3,换流站将在新的下垂曲线 3 上运行,并且在达到新的稳定点时进行电压调整,消除电压偏差。同理当换流站沿着下垂曲线 1 运行到 F 点时,功率减小至 P''_0 ,

电压下降到运行范围的下限 $U_{d\min}$, 同样进行功率参考值的修改得到下垂曲线 4, 并且在曲线 4 上按照同样的规律运行。

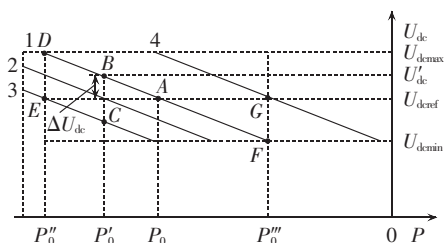


图 5 变截距直流电压下垂控制
Fig.5 Variable intercept DC-voltage droop control

本文提出的变截距直流电压下垂控制策略所采用的外环控制器如图 6 所示。该控制基于换流站本地控制, 无需上层控制器。其中功率参考值指令控制器输出不同的功率参考值可以改变直流电压-有功功率特性曲线的截距, 实现下垂特性曲线的平行移动, 达到调整电压的效果。功率参考值指令控制器的工作流程如图 7 所示。

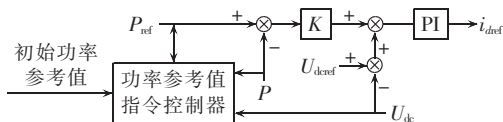


图 6 变截距直流电压下垂控制器
Fig.6 Variable intercept DC-voltage droop controller

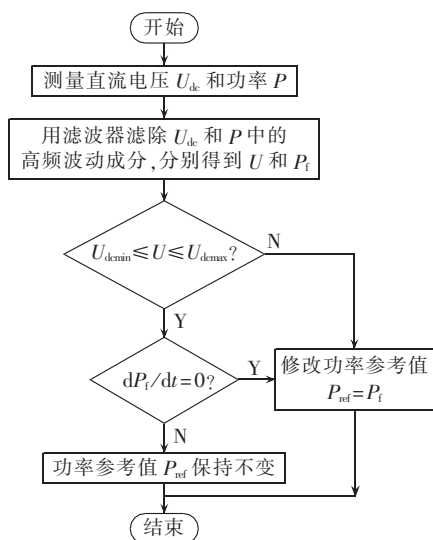


图 7 功率参考值指令控制器工作流程
Fig.7 Flowchart of power reference controller

首先采集直流电压 U_{dc} 和换流站的有功功率 P , U_{dc} 和 P 中均含有高频波动分量, 采用滤波器滤除高频波动分量之后分别得到 U 和 P_f ; 判断 U 是否在系统电压的正常运行范围 $[U_{d\min}, U_{d\max}]$ 之内。若不是, 设定新的功率参考值为 P_f , 改变截距, 系统进行调压,

将电压调节在允许运行的范围之内。若是, 再判断 P_f 是否达到稳态值, 即系统是否达到新的稳定运行点, 若是, 则设定新的功率参考值为 P_f , 改变截距, 系统进行调压, 消除电压偏差, 电压被调节回额定值; 否则功率参考值保持不变, 下一个采样步长以相同的步骤操作。

判断 P_f 是否达到了稳态值, 即判断微分计算 dP_f/dt 是否为 0。微分计算采用数字方法, 设 Δt 为采样步长, t 时刻的 P_f 为 $P_f(n)$, $t - \Delta t$ 时刻的 P_f 为 $P_f(n-1)$, $t + m\Delta t$ 时刻的 P_f 为 $P_f(n+m)$ 。为避免个别点的扰动引起微分计算结果产生较大误差, dP_f/dt 的计算采用多点微分再取平均值的方法, 计算公式为:

$$\frac{dP_f}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{P_f(n+m+i) - P_f(n+i)}{m} \quad (3)$$

由于采样步长 Δt 一般设置为微秒级, dP_f/dt 很难达到零值, 在这里只需满足 $|dP_f/dt| \leq M$ (在 EMTDC/PSCAD 平台中 M 的取值范围一般在 1~20 MW/s 之间), 即可判断功率达到稳态值。

经过上述分析, 系统的直流电压只有在允许的运行范围 $[U_{d\min}, U_{d\max}]$ 内, 且在系统达到稳态运行时, 才会通过设定新的功率参考值改变截距以实现下垂曲线的平行移动, 消除电压偏差, 将电压调节回额定值; 而一旦电压达到上限或下限就设定新的功率参考值改变截距以实现下垂曲线的平行移动, 进行调压, 以确保电压运行在 $[U_{d\min}, U_{d\max}]$ 内。

4 算例分析

为了验证本文所提出的控制策略的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中对如图 1 所示的五端 VSC-MTDC 输电系统进行仿真研究。系统的部分仿真参数如下: 正负极直流电压参考值为 400 kV, VSC₁、VSC₂、VSC₄ 容量均为 300 MW, VSC₃ 容量为 100 MW, VSC₅ 容量为 250 MW, R_{L13} 、 R_{L25} 、 R_{L24} 、 R_{L12} 均为 0.1 Ω , R_{L34} 、 R_{L45} 均为 0.5 Ω , VSC₁ 的斜率 K_1 为 0.2, VSC₂ 的斜率 K_2 为 0.4, $U_{d\max}$ 为 405 kV, $U_{d\min}$ 为 395 kV。

仿真时间设定为 15 s。风电场 2 通过换流站 VSC₅ 并入直流母线, 15 s 内输出功率保持不变, 为 230 MW。风电场 1 通过换流站 VSC₄ 并入直流母线, 15 s 内的输出功率一直处于频繁变化之中。换流站 VSC₃ 向无源交流网络供电, 15 s 内的负荷一直维持在 25 MW。换流站 VSC₂ 和 VSC₁ 的初始功率参考值分别为 -124 MW 和 -173 MW。

初始时刻, 直流电压稳定在额定值 400 kV。由于各换流站之间的阻抗非常小, 各个换流站输出端口的直流电压几乎一样, 为方便分析, 仿真结果中只采用换流站 VSC₁ 的端口电压来说明。

(1)采用传统的直流电压下垂控制策略,风电场输出功率的变化量将由换流站 VSC_1 和 VSC_2 按照下垂斜率之比 1:2 进行分配,如图 8(a)所示。

换流站 VSC_1 和 VSC_2 的运行点将在下垂曲线上不断变化,直流系统的电压也将偏移额定值 400 kV,甚至出现较大的偏差,如图 8(b)所示。1.5 s 左右,风电场 1 输出功率几乎为 0,换流站 VSC_1 和 VSC_2 的输出功率也随之降低,直流电压降低到 385 kV 左右,偏离额定值约 3.75%。在 7~11 s 时间段内,风电场输出功率较大,达到 260 MW 左右,换流站 VSC_1 和 VSC_2 的输出功率增大,直流电压上升到 420 kV 左右,偏离额定值约 5%。

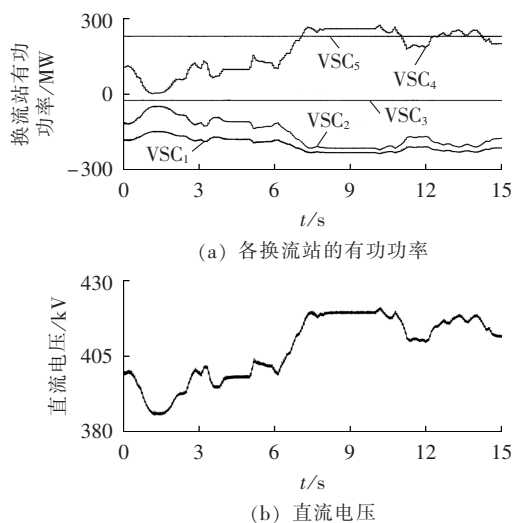


图 8 直流电压下垂控制策略下的仿真结果

Fig.8 Simulative results of DC-voltage droop control

(2)采用本文所提出的变截距直流电压下垂控制策略的仿真结果如图 9 所示。设定系统运行时的电压上限值为 405 kV,下限值为 395 kV。

仿真结果表明系统的直流电压得到明显改善,始终被限制在允许的运行范围[395,405] kV,如图 9(b)所示。该策略下各换流站的输出功率如图 9(a)所示。随着风电场输出功率的变化,直流电压一旦达到电压上限或下限,功率参考值将被设定为当前时刻换流站的输出功率采样值,直流电压-有功功率特性曲线截距发生改变,曲线平行移动,进行调压,系统的工作点将在新的曲线上运行,直流电压会一直被维持在运行范围内。从图 9(a)中可以看出,4~5 s 和 8~10 s 这 2 个时间段内,风电场 1 的输出功率为恒定值,换流站 VSC_1 和 VSC_2 的输出功率也为恒定值,满足 $|dP_i/dt| \leq M$ 的条件,换流站 VSC_1 和 VSC_2 的功率参考值被设定为当前时刻换流站的输出功率采样值,系统进行调压,电压偏差被消除,直流电压被调节回额定值 400 kV。整个过程中,换流站 VSC_1 和 VSC_2 的功率参考值变化情况如图 9(c)所示。

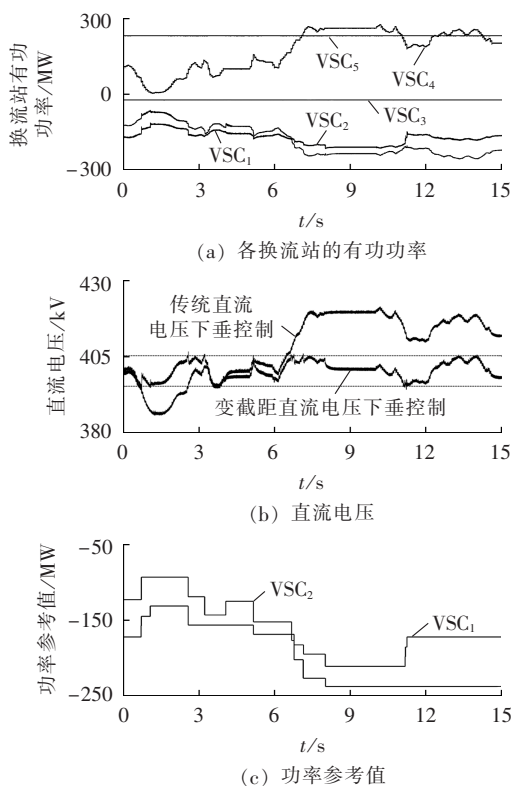


图 9 变截距直流电压下垂控制策略下的仿真结果

Fig.9 Simulative results of variable intercept DC-voltage droop control

5 结论

风电场输出功率是频繁变化的,这造成采用传统直流电压下垂控制策略的风电并网 VSC-MTDC 系统的直流电压也频繁发生变化,与额定值存在偏差,在恶劣的运行工况下,甚至会出现偏差较大的情形。本文提出变截距直流电压下垂控制策略,并利用 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真验证了该控制策略的正确性和可行性。得出以下结论:当系统的直流电压在允许的运行范围内时,若系统能够达到稳定运行的状态,该策略通过设定新的功率参考值改变截距实现下垂特性曲线的平行移动,消除电压偏差,将电压调节回额定值;当系统的电压运行到上限或者下限时,同样设定新的功率参考值改变截距实现下垂特性曲线的平行移动进行调压,确保电压运行在允许的运行范围之内,保证了系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 魏晓光,汤广福,魏晓云,等. VSC-HVDC 控制器抑制风电场电压波动的研究[J]. 电工技术学报,2007,22(4):150-156.
WEI Xiaoguang,TANG Guangfu,WEI Xiaoyun,et al. Study of VSC-HVDC controller to mitigate voltage fluctuation caused by wind farm integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(4):150-156.
- [2] FLOURENTZOU N,AGELIDIS V G,DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems:an overview[J]. IEEE

- Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [3] 章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 138-143.
ZHANG Xinyin, HU Mingqiang, WU Zaijun, et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 138-143.
- [4] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applicaitons of VSC HVDC[J]. High Voltage Engeering, 2007, 33(1): 1-10.
- [5] 杨思祥, 李国杰, 阮思焯, 等. 应用于 DFIG 风电场的 VSC-HVDC 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 64-67.
YANG Sixiang, LI Guojie, RUAN Siye, et al. Control strategies for VSC-HVDC applied to DFIG based wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 64-67.
- [6] 潘伟, 李勇, 曹一家, 等. 用于大规模集中式风电并网的 VSC-HVDC 频率控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 94-99.
PAN Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 94-99.
- [7] 魏晓光, 汤广福. 电压源换相高压直流输电对改善风电场电压稳定性的作用[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 27-31.
WEI Xiaoguang, TANG Guangfu. Effect of VSC-HVDC applied on improving wind farm voltage stability[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 27-31.
- [8] FELTES C, WREDE H, KOCH F W, et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1537-1546.
- [9] XU Lie, YAO Liangzhong, SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.
- [10] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 130-136.
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Coordinated power control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 130-136.
- [11] 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, 2013, 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, 2013, 37(15): 125-132.
- [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] 阮思焯, 李国杰, 孙元章. 多端电压源型直流输电系统的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 57-60, 96.
RUAN Siye, LI Guojie, SUN Yuanzhang. A control strategy for multi-infeed VSC-HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 57-60, 96.
- [14] 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.
- [15] 陈实, 朱瑞可, 李兴源, 等. 基于 VSC-MTDC 的风电场并网控制策略研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 147-152.
CHEN Shi, ZHU Ruike, LI Xingyuan, et al. Research on control strategy for interconnection of wind farm by VSC-MTDC[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(2): 147-152.

作者简介:



张海波

张海波(1990—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输配电(E-mail: zhb727@zju.edu.cn);

袁志昌(1980—), 男, 江西吉安人, 副教授, 博士, 主要研究方向为柔性交直流输电技术(E-mail: yuancz@mail.tsinghua.edu.cn)。

Variable intercept DC-voltage droop control for VSC-MTDC system

ZHANG Haibo¹, YUAN Zhichang¹, ZHAO Yuming², LIU Guowei², YAO Senjing²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shenzhen Power Supply Company, Shenzhen 518048, China)

Abstract: A strategy of variable intercept DC-voltage droop control is proposed for the VSC-MTDC (Voltage Source Converter-based Multi-Terminal HVDC) system used in the grid-connection of wind farm, which changes the intercept by modifying the power reference to parallel move the characteristic curve of DC voltage vs. active power for the DC-voltage adjustment to control the DC-voltage of system within the allowable range. If the wind power remains stable for a certain period and the system operates in a stable condition, the voltage deviation will be eliminated by the proposed control strategy and the DC-voltage adjusted to the rated value. With a typical five-terminal DC transmission system as an example, the EMTDC/PSCAD simulation verifies the correctness of the proposed strategy, suitable for the VSC-MTDC system containing the wind farm with frequent power change.

Key words: wind farms; voltage source converter; HVDC power transmission; DC voltage droop control; variable intercept