

# 柔性直流输电系统的自适应下垂反馈控制方法

王珂, 刘建涛, 李亚平, 曾丹

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 提出一种柔性直流输电系统的自适应下垂反馈控制方法, 通过利用柔性直流(VSC-HVDC)的灵活可控性为弱交流电网的频率和电压提供辅助支撑能力。首先, 分析了柔性直流控制系统的工作原理, 建立了VSC双环解耦控制的数学模型; 在此基础上, 提出了一种改进的双环PI解耦控制系统, 分别设计了带有频率附加控制的有功功率控制器和带有电压附加控制的无功功率控制器, 能够有效改善弱交流系统频率和电压的稳定性; 采用了带功率偏差补偿的下垂反馈控制, 改善了系统的动态响应, 扩大了柔性直流的稳定运行范围。时域仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 柔性直流; 协调控制; 频率控制; 电压控制; 下垂特性

## An adaptive power control strategy based droop feedback for VSC-HVDC

WANG Ke, LIU Jian-tao, LI Ya-ping, ZENG Dan

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Based on the novel and controllable characteristics of VSC-HVDC, an improved double close-loop decoupling control strategy is proposed to utilize the supporting capability of VSC-HVDC for frequency and voltage of weak AC systems. A power outer-loop with AC frequency and voltage additional control functions is designed to help the fast recovery of AC frequency and voltage after disturbances. Then, an adaptive droop control with power deviation feedback is adopted to improve stable operation range of VSC-HVDC. As an example, a typical weak AC system fed by a VSC-HVDC link, including a synchronous generator with an exciter, a governor and a turbine is simulated. The time-domain simulation results demonstrate that the proposed control strategy can seamlessly handle transitions between different control modes and effectively enlarge the stability operation extent of VSC-HVDC systems.

**Key words:** VSC-HVDC; coordinated control; frequency control; voltage control; droop characteristic

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0048-06

## 0 引言

电压源换流器高压直流输电<sup>[1-8]</sup>(Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current Transmission, VSC-HVDC)能够独立灵活地控制其传输的有功功率和发出(或吸收)的无功功率<sup>[9]</sup>, 非常适合应用于可再生能源并网、孤岛供电、城市电网扩容以及异步交流电网互联等输电领域。随着相关技术的发展, 在未来电网中具有广泛的应用前景。

尽管VSC-HVDC能够连接弱交流系统甚至无源系统, 但其连接弱交流系统的控制策略与同强交流系统相连接时不一样, 主要表现在以下几点:

1) 一般弱交流系统中发电机数目有限, 调频能力不足, 应充分利用VSC-HVDC的灵活调节能力参与系统频率调节。

2) 弱交流系统通常地理覆盖面积较小, 发电机、负荷与换流站的距离较近, 三者间的交互影响较大, 无功调节能力有限, 出现电压越限的风险较大。

3) 在某些故障情况下, 由于一些重要交流线路的开断可能导致交流系统更趋弱化, 必要时需要进行VSC控制策略间的无缝切换以增强弱交流系统抵抗故障的支撑能力。

目前对于柔性直流输电系统的控制研究, 归纳起来主要分为两类: 1) 基于“电压幅值和相位控制”的间接电流控制<sup>[10]</sup>; 2) 基于同步旋转坐标系下的直流电流控制<sup>[11]</sup>。控制结构也是多种多样, 除了传统的PI双环解耦控制<sup>[12-13]</sup>外, 还有模糊自适应控制<sup>[14]</sup>、最优控制、直接功率控制<sup>[15]</sup>以及无差拍解耦控制<sup>[16]</sup>等。各种新型控制策略虽从不同角度改善了



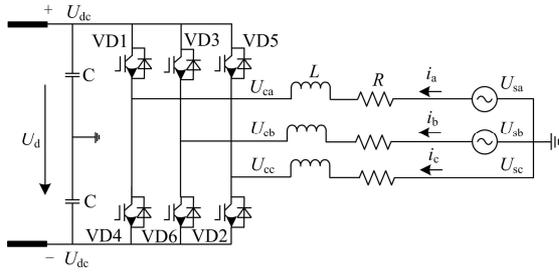


图2 电压源换流器电路结构

Fig. 2 Circuit structure of voltage source converter

当 d 轴以电网电压向量定位时，即  $v_q=0$ ，则上式又可写为

$$\begin{aligned} p_s &= v_d i_d \\ q_s &= v_d i_q \end{aligned} \quad (3)$$

因而在 (d, q) 坐标系下，基于双环控制的电流内环的参考量可表示为

$$\begin{aligned} i_{dref} &= \frac{p_{sref}}{v_d} \\ i_{qref} &= \frac{q_{sref}}{v_d} \end{aligned} \quad (4)$$

## 2 改进双环控制系统

本文在传统 PI 解耦控制的基础上提出了一种柔性直流输电系统的自适应下垂反馈控制方法，其控制系统结构如图 3 所示。

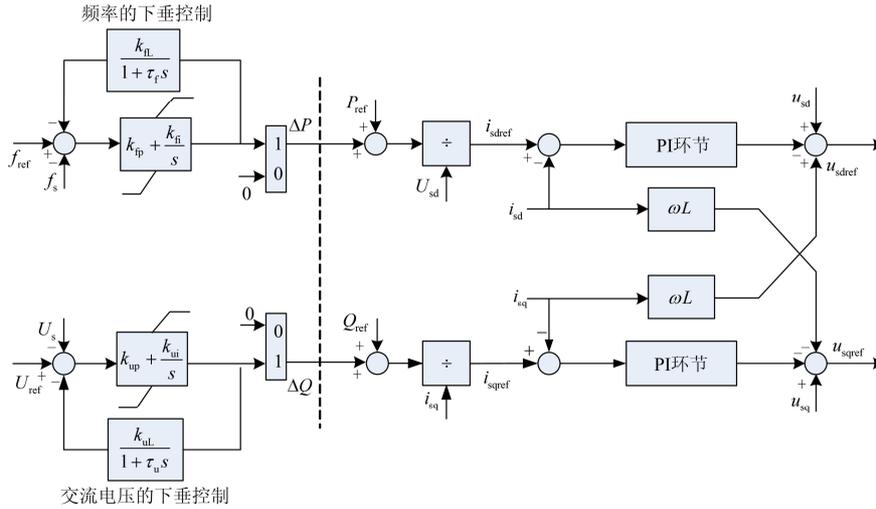


图3 带有自适应下垂反馈功能的功率控制器

Fig. 3 Power controller with droop feedback

### 2.1 有功功率和无功功率控制器设计

控制系统的有功控制器由有功设定值和采用 PI 控制的频率偏差控制器组成，其中  $f_{ref}$  为交流频率设定值， $f_s$  为 VSC 所联交流系统实际频率， $\Delta P$  为频率偏差控制输出的功率偏差量， $k_{fp}$ 、 $k_{fi}$  为 PI 环节的比例和积分常数，则有

$$\Delta P = (k_{fp} + \frac{k_{fi}}{s})(f_{ref} - f_s) \quad (5)$$

当交流系统受到扰动频率低于（高于）频率设定值时，将产生一个正（负）的有功频率叠加到功率设定值上，通过调节控制器 d 轴电流分量进而调节柔性直流的输送功率，帮助交流系统将频率恢复至设定值。当柔性直流输送有功需维持恒定时，将

功率偏差取为 0 即可。

同样地，无功控制器由无功设定值和采用 PI 控制的交流电压偏差控制器组成，其中  $U_{ref}$  为交流系统 PCC 点处交流电压设定值， $U_s$  为 PCC 点处交流电压测量值， $k_{up}$ 、 $k_{ui}$  分别为 PI 环节的比例和积分常数，则有

$$\Delta Q = (k_{up} + \frac{k_{ui}}{s})(U_{ref} - U_s) \quad (6)$$

将该无功偏差分量叠加到无功功率参考值上，通过调节控制器 q 轴电流分量进而调节柔性直流输出的无功以促进交流电压的恢复。

需要指出的是，功率控制器的控制目标是实现频率和电压的无差调节，通过调节 d 轴或 q 轴电流

分量来协助维持交流系统的频率或(和)电压稳定, 如果交流系统频率或电压偏离设定值过多时, 可能导致 d 轴或 q 轴电流分量参考值增加过多, 容易造成控制系统的调节容量不足, 严重情况下可能恶化柔性直流的运行性能。

## 2.2 带功率偏差补偿的自适应下垂控制

带功率补偿的下垂控制模式可以提高控制系统的响应速度<sup>[4]</sup>, 允许所联交流系统的频率和母线电压存在一定幅值的波动, 如图 3 所示。 $k_{fl}$  和  $k_{ul}$  分别为频率和交流电压的下垂因子, 根据系统所需下垂特性确定, 频率下垂因子可定义为

$$k_{fl} = \frac{\Delta f_{\max}}{\Delta P_{\max}} = k_s \quad (7)$$

其中:  $\Delta f_{\max}$  是交流系统频率允许的最大偏差,  $\Delta P_{\text{vsc\_max}}$  表示当频率变化为  $\Delta f_{\max}$  时有功功率参考值的期望变化;  $k_s$  为交流系统的频率偏差系数。

$k_{ul}$  是电压下垂因子, 定义为

$$k_{ul} = \frac{\Delta U_{\max}}{\Delta Q_{\text{vsc\_max}}} \quad (8)$$

式中:  $\Delta U_{\max}$  是交流系统电压允许的最大偏差;  $\Delta Q_{\text{vsc\_max}}$  表示当电压变化为  $\Delta U_{\max}$  时无功功率参考值的期望变化; 当交流系统需要快速电压动态响应时,  $k_{ul}$  可被设为相对较大的值。

## 3 算例分析

### 3.1 仿真系统介绍

在 PSCAD/EMTDC 上按照图 4 构建了仿真系统。其中交流系统 1 含有 2 台同步发电机, 每一台发电机的额定容量为 900 MVA; 交流系统 2 含有 1 台同步发电机, 额定容量为 400 MW。柔性直流的额定电压为  $\pm 100$  kV, 额定输送功率为 100 MW, 直流电缆长度为 100 km, 连接电抗器为 0.023 9 H, 换流器等效损耗电阻为 0.075  $\Omega$ , 直流电容为  $C1=C2=160 \mu\text{F}$ , 换流变压器的变比为 230 kV/100 kV, 系统参数如表 1 所示。

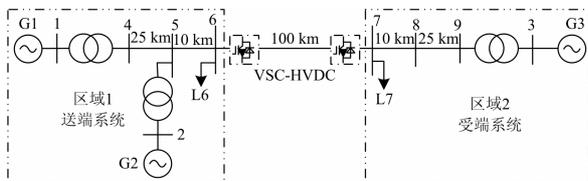


图 4 仿真系统模型

Fig. 4 Model of the studied system

表 1 仿真算例系统参数

Table 1 System parameters

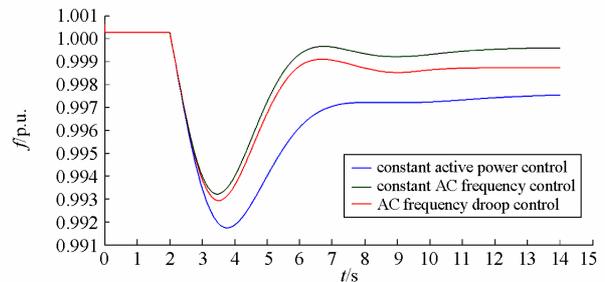
| 元件         | 参数                 | 数值                                                                                                       |
|------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 交流系统 1 和 2 | 线路电压               | 230 kV/100 kV                                                                                            |
|            | 系统额定频率             | 50 Hz                                                                                                    |
|            | 线路 $r$ 、 $x$ 、 $b$ | $r=0.0529 \Omega/\text{km}$<br>$x=0.529 \Omega/\text{km}$<br>$b=3.31 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ |
| 直流系统       | 直流额定电压             | $\pm 100$ kV                                                                                             |
|            | pi 线路频率            | 50 Hz                                                                                                    |
|            | Pi 线路长度            | 100 km                                                                                                   |
|            | 换流站开关频率            | 1 350 Hz                                                                                                 |
|            | 直流电容器              | 160 $\mu\text{F}$                                                                                        |
|            | 连接电抗器              | 0.023 9 H                                                                                                |

### 3.2 有功功率的阶跃响应

在  $t=2$  s 时, 节点 7 处的有功负荷增加 75 MW, 在有功负载发生变化后, 受端交流系统 (区域 2) 的频率发生波动。由图 5 可以看出, 这三种控制策略对交流系统频率的影响明显不同。当采用恒功率控制器时, 尽管传输功率恒定但交流频率快速下降至 0.991 5 p.u.(49.575 Hz)。同时, 当采用带有频率附加控制的有功控制器时, 交流频率下降能明显减少 (最小频率约为 0.993 2 p.u., 49.66 Hz), 然后逐步返回到设定值。频率附加控制器将增加 d 轴直流电流以输送更多的有功功率, 因此可能趋向于接近甚至达到 VSC 的物理极限。我们可以看到当采用频率下垂反馈控制时, 尽管在频率测量值和设定值之间有一个较小的偏差, d 轴直流电流的增幅降低了。

### 3.3 无功功率的阶跃响应

图 6 给出节点 7 处的无功负荷从 0 增加到 75 Mvar 时的响应曲线。同样地, 可以看出, 当采用带有电压附加控制的无功控制器时, 交流电压下降能明显减少, 然后逐步返回到设定值。当采用电压下垂反馈控制时, 尽管在电压测量值和设定值之间有一个较小的偏差, 但 q 轴直流电流的增幅降低了。



(a) 交流系统频率

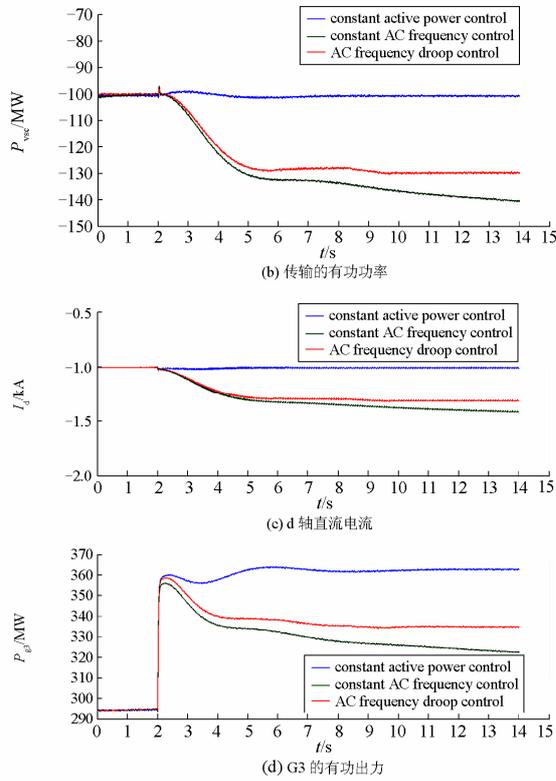


图 5 有功负荷变化响应曲线

Fig. 5 Response curves in case of active load changes

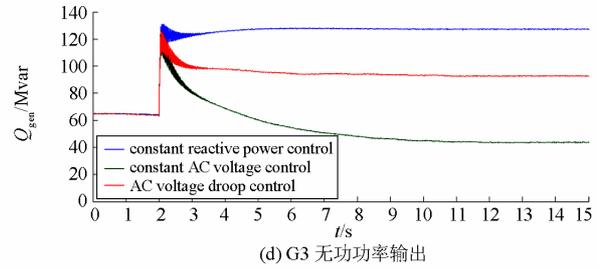
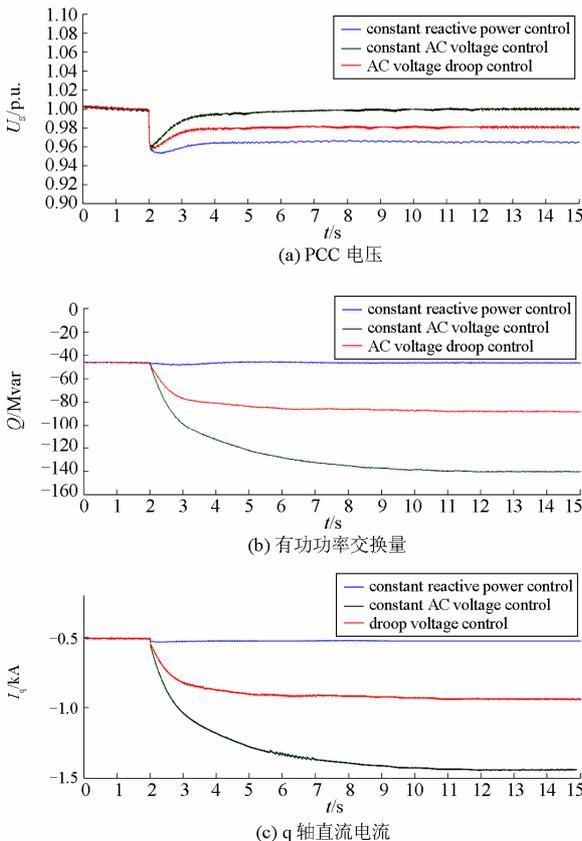


图 6 无功负荷变化响应曲线

Fig. 6 Response curves in case of reactive load changes

为了防止换流器在某些极端情况下电流越限的发生，当外环控制产生的电流参考值幅值接近或达到最大限值时应将 d 轴或 q 轴电流参考值设置为可调节。因为，当电流参考值幅值接近甚至超过 VSC 的物理限值时，可能会出现一些不可控的现象<sup>[7-8]</sup>。因而，本文提到的带有下垂反馈环节的功率控制能有效扩大 VSC 的有效运行范围。

### 4 结语

本文介绍了柔性直流控制器的数学模型和运行原理，提出了一种柔性直流输电系统的自适应下垂反馈控制方法，有功类控制能在有功控制和频率控制间平滑切换，无功类控制能在无功控制和交流电压间自适应灵活切换，考虑了功率的下垂反馈控制能够提高系统的调节速度，扩大了系统安全运行的范围，有利于提高交直流系统的动态性能和稳定性。

### 参考文献

- [1] NOJTABA N, ABDEL-ATY E, DAVID K, et al. The potential use of voltage sourced converter based back-to-back tie in load restoration[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1416-1421.
- [2] 包宗贤, 邹超. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的新型控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 22-27.  
BAO Zong-xian, ZOU Chao. New control design for VSC-HVDC supplying passive networks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 22-27.
- [3] 解大, 解蕾, 张延迟, 等. 连接海上风电场的基于直接功率控制的三电平 VSC-HVDC[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 98-103, 152.  
XIE Da, XIE Lei, ZHANG Yan-chi, et al. Three-level VSC-HVDC based on direct power control connecting offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 98-103, 152.
- [4] 刘建涛, 王治华, 王珂. 不同结构电压源换流器损耗

- 对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 105-110.
- LIU Jian-tao, WANG Ye-hua, WANG Ke. Comparative analysis of losses of voltage source converters with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 105-110.
- [5] 李爽, 王志新, 王国强. 海上风电柔性直流输电变流器 P-DPC 控制研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 264-270.
- LI Shuang, WANG Zhi-xin, WANG Guo-qiang. Predictive direct power control strategy for offshore wind power VSC-HVDC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 264-270.
- [6] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
- TU Qing-rui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [7] 郭春义, 赵成勇, 王晶. 新型双馈入直流输电系统供电无源网络的运行特性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 211-218.
- GUO Chun-yi, ZHAO Cheng-yong, WANG Jing. Operation characteristic research on novel double-infeed HVDC system supplying passive network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 211-218.
- [8] 王珂, 骆健, 杨胜春, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 启动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 211-218.
- WANG Ke, LUO Jian, YANG Sheng-chun, et al. Startup procedures for the VSC-HVDC system supplying power to passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S): 277-281.
- [9] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2009, 24(3): 592-602.
- [10] DIXON J W, OOI B T. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier[J]. IEEE Trans on Power Electron, 1998, 35(4): 508-515.
- [11] KAZMIERKOWSKI M P, MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey[J]. IEEE Trans on Ind Electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [12] XU Ling, LI Shu-hui. Analysis of HVDC light control using conventional decoupled vector control technology[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE Power and Energy Society, July 25-29, 2010.
- [13] LI Shu-hui, HASKEW T A, XU Ling. Control of HVDC light system using conventional and direct-current vector control approaches[J]. Power Electronics, 2010, 25(12): 3106-3118.
- [14] LI Sheng, ZHANG Jian-hua, SHANG Jing-fu, et al. A VSC-HVDC fuzzy controller for improving the stability of AC/DC power system[C] // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Industry Applications Society, Wuhan, China, October 17-20, 2008.
- [15] XIE Lei, XIE Da, ZHANG Yan-chi. Three-level inverter based on direct power control connecting offshore wind farm[C] // 2009 Sustainable Power Generation and Supply, The UK-China Network of Clean Energy Research, Nanjing, China, April 6-7, 2009.
- [16] OUQUELLE H, DESSAINT L A, CASORIA S. An average value model-based design of a deadbeat controller for VSC-HVDC transmission link[C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, IEEE Power and Energy Society, Calgary, USA, July 26-30, 2009.
- [17] ZHANG Li-dong, HARNEFORS L, NEE H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 783-793.
- [18] DU Cui-qing, AGNEHOLM E, OLSSON G. VSC-HVDC system for industrial plants with onsite generators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(3): 1359-1366.
- [19] DU Cui-qing, AGNEHOLM E, OLSSON G. Use of VSC-HVDC for industrial systems having onsite generation with frequency control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 2233-2240.
- [20] DU Cui-qing, AGNEHOLM E, OLSSON G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC supplied system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 2224-2231.
- [21] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

收稿日期: 2013-07-18; 修回日期: 2013-10-06

作者简介:

王珂(1980-), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 长期从事交直流电力系统的分析与控制、高级应用软件开发和工程化工作。E-mail: wangke@epri.sgcc.com.cn