

基于模最优与对称最优的轻型直流 PI 参数整定

许可, 鲜杏, 程杰, 陶芬

(湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 轻型直流输电(VSC-HVDC)控制系统的 PI 参数会对其运行性能产生较大影响, 因此需要选择合适的控制参数以适应多种运行条件。针对 VSC-HVDC 普遍采用的直接电流控制, 提出了一种模最优与对称最优相结合的参数整定方法。利用具有快速响应和简便性的模最优法, 整定内环控制 PI 参数, 使得控制单元具有快速的电流响应和鲁棒性。利用可以保证最大相角裕度的对称最优法, 整定外环控制 PI 参数, 达到较好的稳定性和抗干扰性能。最后, 基于 PSCAD/ EMTDC 建立相应的数学模型, 仿真结果证明 PI 调节器可以使实际值迅速跟踪参考值的变化, 验证了方法的正确性和有效性。

关键词: 电压源换流器; 直接电流控制; PI 参数; 模最优; 对称最优

Tuning method of PI controller of VSC-HVDC based on modulus and symmetrical optimum

XU Ke, XIAN Xing, CHENG Jie, TAO Fen

(Hubei Electric Power Survey & Design Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: PI parameters of the control system in VSC-HVDC will have a great impact on its operating performance, so it is necessary to select the appropriate control parameters to meet the demand of a variety of operating conditions. Direct current control widely used by VSC-HVDC is adopted. A parameter tuning method combining of modulus optimum and symmetrical optimum is proposed. The inner loop is tuned according to modulus optimum with a fast response and simplicity, making the control unit have a fast current response and robustness. The outer loop is tuned according to symmetrical optimum which can ensure the maximum phase margin, achieving better stability and disturbance rejection. Finally, mathematical models based on PSCAD/EMTDC are built. Simulation results show that the PI controller can quickly track changes of the reference value, demonstrating the correctness and effectiveness of the method.

Key words: VSC; direct current control; PI parameter; modulus optimum; symmetrical optimum

中图分类号: TM721

文章编号: 1674-3415(2015)02-0122-06

0 引言

轻型直流输电(VSC-HVDC)技术是一种新型的直流输电技术, 又称柔性直流输电技术。随着电力电子器件和控制技术的不断发展, 相比交流输电技术和传统的直流输电技术, 采用 VCS-HVDC 技术在技术、经济上具有更多的优势。适合应用于可再生能源并网、孤岛供电、交流电网互联、城市电网供电。但是 VSC-HVDC 的运行性能和换流器的控制策略好坏紧密联系, 而控制策略的优良最终又是和控制的参数息息相关的。因此合适的控制参数对于控制策略的实现具有很重要的作用。

VSC-HVDC 的换流器控制方式主要分为间接电流控制和直接电流控制, 但间接电流控制存在着

换流器交流侧电流动态响应慢、对系统参数变化灵敏、难以实现过电流控制等缺点, 所以本文选择直接电流控制。直接电流控制策略即内环加外环的双闭环控制器结构, 具有快速的电流响应和鲁棒性, 同时能够实现限流控制, 有效地避免 VSC 换流装置的过流问题, 因此其很适合用于高压大功率场合的 VSC-HVDC 系统。针对直接电流控制里内、外环的 PI 参数整定, 很少有文献专门讨论研究^[1-2]。文献[3]采用典型的环节设置整定控制系统的 PI 参数, 基于模最优和对称最优方法在整定 VSC-HVDC 控制系统参数中, 它的优势在于从稳态误差、快速性、抗干扰性能三个指标充分考虑了 VSC-HVDC 控制系统的特点: 内环要求电流响应的快速性, 外环更注重稳定性和抗干扰性。因此, 相比典型环节

设置参数的方法, 基于模最优和对称最优的方法更适合 VSC-HVDC 控制系统参数的整定。

本文首先介绍了直接电流控制方式, 并据此提出了其中的 PI 调节器参数设置方法, 然后基于仿真软件 PSCAD/EMTDC 建立相应的数学模型, 最终结果验证了方法的正确性和有效性。

1 直接电流控制及其模型

直接电流控制是轻型直流输电系统广泛采用的控制方式, 有内环控制和外环控制两部分。外环控制有定直流电压、定交流电压、定有功功率、定无功功率、定频率控制五种基本策略, 用来跟踪给定的参考信号。内环控制用来快速跟踪由外环控制器提供的参考电流, 同时产生换流器交流侧预期输出

波形信号的信息。然后再由该信息通过触发脉冲生成环节产生换流器各桥臂的触发脉冲。图 1 和图 2 是系统一侧换流站的直接电流控制结构图及其模型

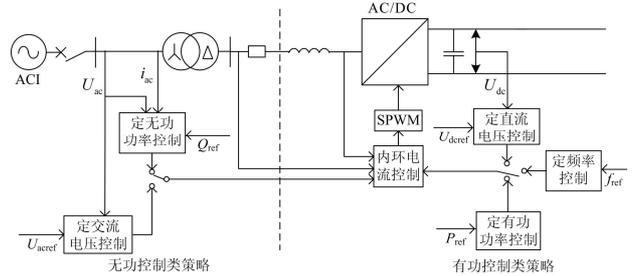


图 1 VSC-HVDC 换流站的直接电流控制结构图
Fig. 1 VSC-HVDC converter, direct current control structure

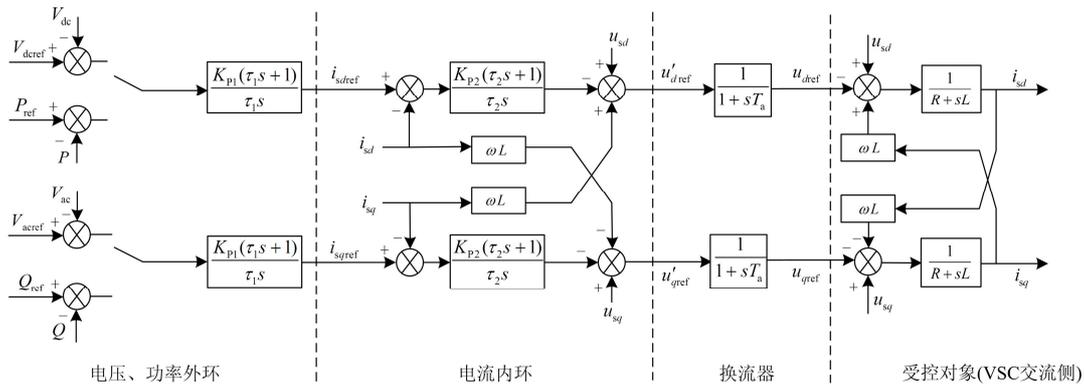


图 2 VSC-HVDC 换流站的直接电流控制模型

Fig. 2 Direct current control model of VSC-HVDC converter station

2 控制器模型 PI 参数的整定

2.1 内环控制器 PI 参数设计

设置图 2 中的内环模型参数, 其中电流内环、换流器及受控对象解耦后可以简化为如图 3^[6-8]。

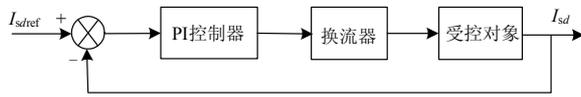


图 3 内环控制框图

Fig. 3 Control block diagram in inner loop

2.1.1 环节介绍

传递函数里面分为三部分: PI 调节器、换流器、受控对象。

(1) 代表 PI 调节器的传递函数如下, 其中比例系数为 K_p , 积分时间常数为 $T_i = K_p / K_i$ 。

$$R_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \cdot \left(\frac{1 + T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \right) \quad (1)$$

(2) 理想情况下只考虑 PWM 换流器有 T_a 的延

时, 即为一阶惯性环节, 其传递函数如下, 其中 $T_a = T_{switch} / 2$ 。

$$Y_1(s) = \frac{1}{1 + T_a \cdot s} \quad (2)$$

(3) 受控对象即 VSC 交流侧模型的传递函数如下, 其中 R 和 L 分别是换流器和电网(或者电厂)之间的电阻和电抗, $\tau = L / R$ 。

$$G_1(s) = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau} \quad (3)$$

2.1.2 模最优整定

模最优方法的核心思想是在尽可能宽的频域范围内维持闭环传递函数的模值为 1, 使其具有快速性和简便性。控制器参数整定中使用模最优方法的, 其传递函数通常是低阶、没有延时的。该方法令(n 尽可能大)

$$G(0) = 1, \text{ 当 } \omega=0 \text{ 时, } d^n |G(j\omega)| / d\omega^n = 0 \quad (4)$$

因为电流内环的主要目的是使得控制单元具有

快速的电流响应和鲁棒性，因为模最优方法的快速响应和简便性，故选择该方法。当控制系统具有一个占主导地位的时间常数和其较小时间常数时，为了实现该方法，需要消去其中的最大时间常数，进而将控制系统传递函数化为实现该方法的标准形式。

从图 3 得到该控制环节的开环传递函数：

$$G_{O1} = K_p \cdot \left(\frac{1+T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \right) \cdot \frac{1}{1+T_a \cdot s} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1+\tau \cdot s} \quad (5)$$

通过控制器的零点消去最大的时间常数 τ ($\tau > T_a$)，即令 $T_i = \tau = L/R$ ，将传递函数化为实现模最优的标准形式。得到控制环节的闭环传递函数为

$$G_{C1} = \frac{K_p / (\tau \cdot R \cdot T_a)}{s^2 + s/T_a + K_p / (\tau \cdot R \cdot T_a)} \quad (6)$$

因 $G(0)=1$ ，再通过选择 $K_p = \tau R / 2T_a$ ，则 $|G_C(j\omega)|$ 的前三阶倒数为 $0^{[7]}$ ，整定后的闭环传递函数为

$$G_{C1}(s) = \frac{1}{2T_a^2 \cdot s^2 + 2T_a \cdot s + 1} \quad (7)$$

因此由模最优方法确定的电流内环 PI 参数为

$$T_i = \tau = L/R \text{ 和 } K_p = \tau R / 2T_a \quad (8)$$

电流内环 PI 参数的整定主要考虑快速性，上升时间约为 $4.4T_i$ 。而且，由式(7)的传递函数可知，经过 PI 参数整定后系统的稳态误差为零。

2.2 外环控制器 PI 参数设计

内环设计完毕后，再将外环和相应的系统传递函数加入构成一个完整的闭环，从而进行外环控制器的 PI 参数设计。完整的控制框图如图 4^[9-11]。



图 4 外环控制框图

Fig. 4 Control block diagram in outer loop

相比内环的主要目的是快速性，外环则是为了达到较好的稳定性和抗干扰性能，考虑到不同外环控制的系统传递函数不同，下面以外环控制有功功率为例来说明，其他的控制方式方法类似。

2.2.1 环节介绍

外环控制框图包括三部分：PI 控制器、内环控制器和系统传递函数。

(1) 代表 PI 调节器的传递函数如下，其中比例系数为 K_p ，积分时间常数为 $T_i = K_p / K_i$ 。

$$R_2(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \cdot \left(\frac{1+T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \right) \quad (9)$$

(2) 内环控制器的传递函数可以由式(7)得到，可以看出是一个闭环二阶传递函数，为了外环参数整定的简便性，可以用一个一阶传递函数 $G'_C = 1/(T_{eq} \cdot s + 1)$ 等效，等效的原则是对于阶跃输入，二者响应的误差 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 是相同的，即

$$\int_0^{\infty} E_1(t) dt = \int_0^{\infty} E_2(t) dt \quad (10)$$

式(10)等价于

$$\lim_{s \rightarrow 0} E_1(s) = \lim_{s \rightarrow 0} E_2(s) \quad (11)$$

$E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 二者进行拉普拉斯变换即为 $E_1(s)$ 、 $E_2(s)$ 。

$$\begin{aligned} Err_1(s) &= \frac{1}{s} - \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{2T_a^2 s^2 + 2T_a \cdot s + 1} = \frac{2T_a^2 s + 2T_a}{2T_a^2 s^2 + 2T_a \cdot s + 1} \\ Err_2(s) &= \frac{1}{s} - \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{T_{eq} \cdot s + 1} = \frac{T_{eq}}{T_{eq} \cdot s + 1} \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)：

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{2T_a^2 s + 2T_a}{2T_a^2 s^2 + 2T_a \cdot s + 1} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{T_{eq}}{T_{eq} \cdot s + 1} \quad (13)$$

因此

$$2T_a = T_{eq} \quad (14)$$

内环控制器的传递函数简化为

$$Y_2(s) = \frac{1}{2T_a \cdot s + 1} \quad (15)$$

(3) 系统传递函数

控制器设计是在 d - q 同步旋转坐标系下，当 d 轴电压以电网电压向量定位即 $U_{sq} = 0$ ， U_{sd} 为相电压幅值。直流侧注入有功功率 P 和送入交流侧的无功功率 Q 为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \\ Q = \frac{3}{2} U_{sd} i_q \end{cases} \quad (16)$$

电流内环的输出为 i_d 、 i_q ，系统的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{3}{2} U_{sd} \quad (17)$$

2.2.2 对称最优整定

对称最优方法的核心思想是使得控制系统的相角裕度在给定频率处最大，从而承受更大的延时，且在扰动输入时优化控制系统的行为。

从 2.2.1 节讨论可知，加入外环控制的系统开环传递函数为

$$G_{O2}(s) = K_p \cdot \left(\frac{1+T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \right) \cdot \frac{1}{2T_a \cdot s + 1} \cdot \frac{3}{2} U_{sd} \quad (18)$$

当控制系统有一个占主导地位的时间常数和其
其他较小时间常数时, PI 调节器可以用模最优方法
进行整定。但是在外环整定中若仍用模最优的方法,
那么唯一的极点等于零, 系统将不稳定。而且考虑
到外环的目的是达到稳定性和抗干扰性, 所以此处
用对称最优的方法。

$$\angle G_{O2}(j\omega) = -90^\circ + \arctan(\omega T_i) - \arctan(\omega T_{eq}) =$$

$$-180^\circ + \varphi$$

其中, φ 就是相角裕度, 令 $\partial\varphi/\partial\omega=0$ 则保证了在
 ω_d 处相角裕度取到最大。得到

$$\omega_d = \frac{1}{\sqrt{T_i T_{eq}}} \quad (19)$$

最大相角裕度 φ_m 为

$$\varphi_m = \arctan(\sqrt{T_i/T_{eq}}) - \arctan(\sqrt{T_{eq}/T_i}) \quad (20)$$

令

$$T_i = a^2 T_{eq} \quad (21)$$

a 的取值建议在[2,4]范围内^[7]。 a 的值越小则相
角裕度越小, 但是 a 的值越大则响应速度越慢。因
为外环的设置主要考虑稳定性和抗干扰性, 所以此
处选择 $a=4$ 。而且, 功率外环的稳态误差也为零。

令 $|G_{O2}(j\omega_d)|=1$, 得到

$$K_p = \frac{2}{3U_{sd} T_i^2} = \frac{2}{3a^4 U_{sd} T_{eq}^2} \quad (22)$$

外环为直流电压的整定方法同上, 主要是系统
传递函数不同, 当传递函数取定后, 相应的参数也
就确定, 此处不再赘述。

3 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中建立 VSC-HVDC 系统,
其中左端 VSC 换流站采用定有功功率和定无功功
率的控制策略, 而右端 VSC 换流站采用定直流电压
和定无功功率的控制策略^[11-12]。

3.1 参数计算

这个系统的参数为: $L=18.7$ mH, $R=1.37$ Ω ,
基准频率 $f=50$ Hz, 换流器开关频率 $f_1=1650$ Hz,
换流器出口交流线电压 $v_d=62.5$ kV, 直流电压
 $V_{dc}=140$ kV, 直流电容 $C=500$ μ F, 则 $T_a=1/(2 \times$
 $1650)=3.03 \times 10^{-4}$ 。

3.1.1 内环 PI 参数

$$T_i = L/R = 0.0187/1.37 = 0.014$$

$$K_p = L/2T_a = 18.7 \times 10^{-3} / (2 \times 3.03 \times 10^{-4}) = 62.3$$

$$K_i = K_p / T_i = 62.3 / 0.014 = 4450$$

3.1.2 外环 PI 参数

(1) 有功功率、无功功率外环

$$T_i = a^2 T_{eq} = 9.7 \times 10^{-3}, \quad K_p = \frac{2}{3a^4 U_{sd} T_{eq}^2} = 219.88,$$

$$K_i = K_p / T_i = 22668.$$

(2) 直流电压外环

$$T_i = a^2 T_{eq} = 9.7 \times 10^{-3}, \quad K_p = \frac{2C \cdot V_{dc}}{3a \cdot v_d \cdot T_{eq}} = 0.616,$$

$$K_i = T_i / K_p = 63.5.$$

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 有功功率阶跃变化

从图 5 可以看出, 采用 3.1 节的参数可以实现
定有功功率、定无功功率、定直流电压的控制策略。
而且当有功功率参考值在 2 s 减小 20 MW 时, 受端
和送端的实际有功功率都能迅速减小 20 MW 以保
持功率的平衡, 同时直流电流变小以保持直流电压
的恒定。PI 调节器能迅速跟踪参考值的变化^[13-16]。

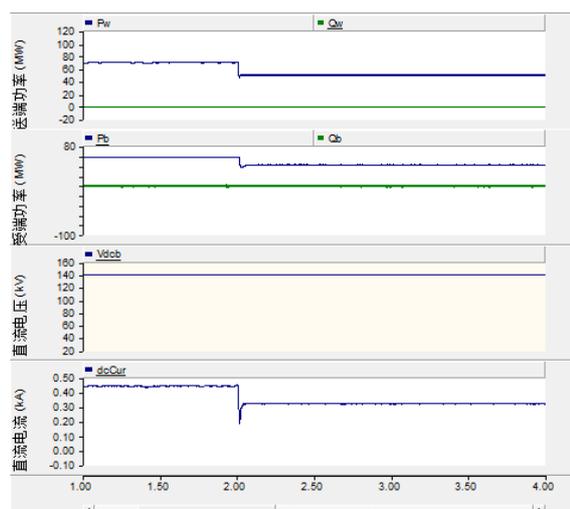


图 5 有功功率阶跃变化仿真结果

Fig. 5 Active power simulation results

3.2.2 无功功率阶跃变化

由图 6 可知, 当送端的无功功率参考值在 2 s
时增加 20 MW 时, 实际的无功功率值能迅速跟踪
变化。但是该无功的变化对该端有功以及另一端的
有功、无功均无影响, 说明可以实现两端换流站的
独立控制和每一侧有功、无功的解耦控制。

3.2.3 直流电压阶跃变化

由图 7 可知, 当直流电压参考值在 2 s 减小 10
kV 时, 实际的直流电压能迅速跟踪变化, 同时直流

电流增大以保证有功功率的恒定。直流电压的减小除了对受端的有功产生一个极小的扰动外，对受端的无功以及送端的有功、无功均无影响。

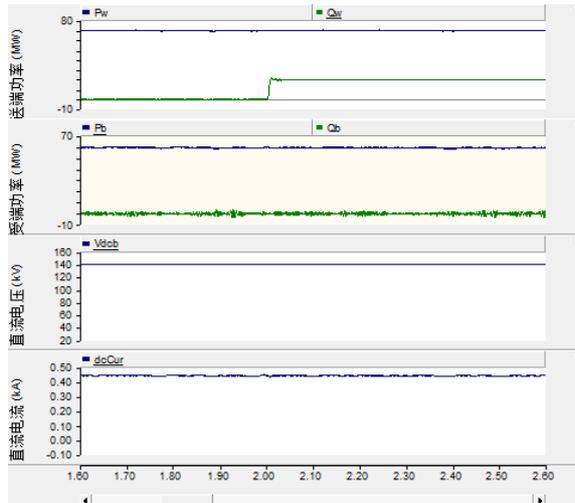


图 6 送端的无功功率阶跃变化时仿真结果
Fig. 6 Reactive power simulation results

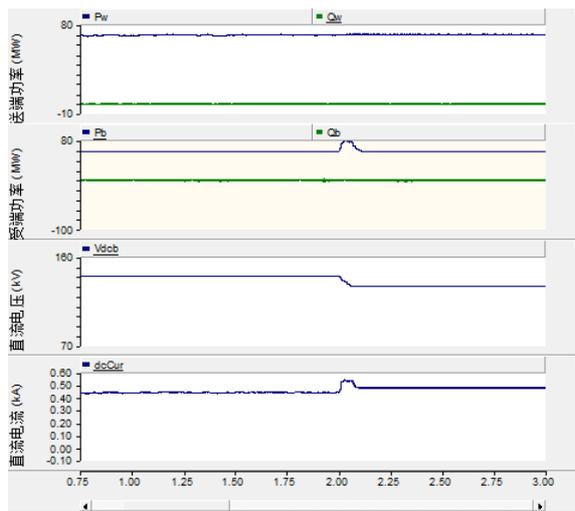


图 7 直流电压阶跃变化时仿真结果
Fig. 7 DC voltage step simulation results

3.3 与传统方法的对比分析

如图 8 所示，“校正前”代表在 3.1 节所示的系统参数下，以典型环节设置 PI 参数下的系统阶跃响应，“校正后”代表以模最优和对称最优的方法设置 PI 参数时系统的阶跃响应。

由图 8(a)得到，在直流电压阶跃响应过程中，校正后相比校正前上升时间更合理，超调量更小，系统过渡到稳态值的过程中没有波动。在功率(无功、有功)阶跃响应过程中，校正前上升时间过短，约为 2×10^{-4} s，而校正后系统的上升时间更加合理，约为 0.01 s。

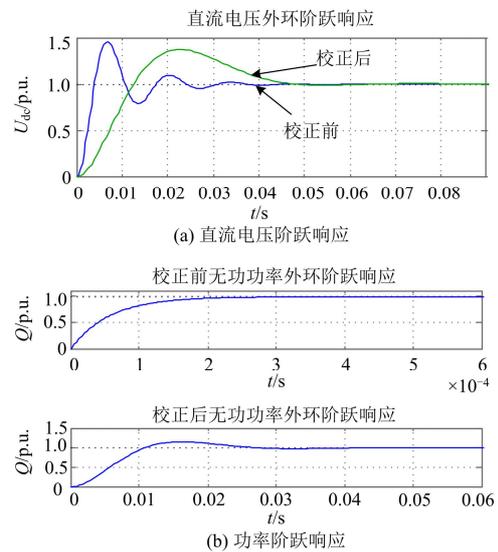


图 8 两种参数设置方法下系统阶跃响应的比较
Fig. 8 Comparison of step response of both methods

4 结论

本文针对 VSC-HVDC 系统的直接电流控制提出了参数整定方法，直接电流控制分为内环控制和外环控制，内环控制的主要目的是为了使得控制单元具有快速的电流响应和鲁棒性，故选择了具有快速响应和简便性的模最优方法。而外环控制的主要目的是为了达到较好的稳定性和抗干扰性能，故采用了可以保证最大相角裕度的对称最优方法。

通过仿真验证发现，按上述方法设置仿真模型参数后，PI 调节器可以使得实际值迅速跟踪参考值的变化，同时也很好地实现两侧换流站有功、无功的独立解耦控制功能。

参考文献

[1] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and application of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.

[2] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44, 89.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44, 89.

[3] 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-HVSC applied to DFIG based wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 64-67.
- [4] 邓雪松, 欧开健, 陈鹏, 等. 基于无差拍电流控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 34-39.
- DENG Xuesong, OU Kaijian, CHEN Peng, et al. Study of control strategy for MMC-HVDC system based on deadbeat current control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 34-39.
- [5] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 33-38.
- HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38.
- [6] BAJRACHARYA C, MOLINAS M, SUUL J A, et al. Understanding of tuning techniques of converter controllers for VSC-HVDC[J]. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2008: 9-11.
- [7] PREITL S, PRECUP R E. An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers[J]. Automatica, 1999, 35(10): 1731-1736.
- [8] 梁营玉, 张涛, 刘建政, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 78-89.
- LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. Model predictive control for VSC-HVDC supplying passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 78-89.
- [9] REZEK A J J. The modulus optimum (MO) method applied to voltage regulation systems: modeling, tuning and implementation[C] // International Conference on Power System Transients, June, 2001: 24-28.
- [10] ASTROM K J, HAGGLUND T. PID controllers: theory, design, and tuning[M]. USA: Instrument Society of America, 1995.
- [11] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.
- LI Huanping, YANG Jinming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD_EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 62-66.
- [12] 鲍正杰, 李生虎. 基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的区域电网频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 32-37.
- BAO Zhengjie, LI Shenghu. Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 32-37.
- [13] 李广磊, 李笋, 孙树敏, 等. 基于 STATCOM 和 LCC-MTDC 技术的大规模风电并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 32-39.
- LI Guanglei, LI Sun, SUN Shumin, et al. Research on LCC-MTDC and STATCOM technology for wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 32-39.
- [14] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 1-7.
- RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 1-7.
- [15] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 海上串联拓扑风电场低电压穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 362-369.
- HUANG Sheng, WANG Hui, LIAO Wu, et al. Control strategy based on VSC-HVDC series topology offshore wind farm for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 362-369.
- [16] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 串并联拓扑结构风电场协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 155-162.
- HUANG Sheng, WANG Hui, LIAO Wu, et al. The coordinated control strategy based on VSC-HVDC series-parallel topology in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 155-162.

收稿日期: 2015-04-07; 修回日期: 2015-06-18

作者简介:

许可(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划, 新能源并网。E-mail: hust1125@126.com

(编辑 魏小丽)