

# 基于海上大型风电场 VSC-HVDC 系统电网侧控制器的设计

汪璐, 邵如平, 王雅璐

(南京工业大学电气工程及其自动化学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:** 为了检测和分析风电场中风速等一系列可变因素对 VSC-HVDC 系统的影响, 从而优化大型海上风电场结构, 提出了一种新型的 VSC-HVDC 模型——无开关 VSC-HVDC 相量模型, 可以通过调制量来反馈控制系统。在此基础上, 结合各种策略的优缺点, 选择一种有效地控制策略进行控制器的设计, 以实现系统的控制。分析电网侧交流电流和直流电压的所需控制策略, 优选出了  $dq$  电流控制和 PI 电压控制作为最佳控制策略, 通过对内环外环控制器的参数计算和调节来达到设计要求。Matlab 搭建出的模型仿真结果表明, 建立的无开关 VSC-HVDC 相量模型控制策略的选用和控制器的参数设计具有适用性和合理性。

**关键词:** HVDC;  $dq$  控制; PI 控制; VSC-HVDC; 仿真模型

## Grid side controller design of VSC-HVDC system based on large offshore wind farm

WANG Lu, SHAO Ruping, WANG Yalu

(School of Electric Engineering and Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** For detection and analysis of wind speed and a series of variable factors on the impact of VSC-HVDC system in wind farm, so as to improve the structure of large offshore wind farm, this paper puts forward a new type of VSC-HVDC model, named no switch VSC-HVDC phasor model, which can control system through feedback of modulation. On this basis, it combines the advantages and disadvantages of various strategies and chooses a kind of effective control strategies for the design of controller in order to realize the control of the system. AC current and DC voltage of power grid side and their control strategies are analyzed, the  $dq$  current control and PI voltage control are chosen as the optimal control strategy, through calculating and adjusting the inner and outer loop controller parameters to meet the design requirements. Matlab simulation results show that the strategies of no switch control VSC-HVDC phasor model has the applicability and rationality.

**Key words:** HVDC;  $dq$  control; PI control; VSC-HVDC; simulation model

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0107-06

## 0 引言

随着风力发电的应用越来越广泛, 许多国家正在考虑建设大型的海上风电场。当海上风电场的规模较小, 风场离海岸距离相对较近时, 采用 HVAC 系统传输, 它的优点是动力传动系统简单、成本低。但也随之带来了传输容量和距离有限的问题<sup>[1-2]</sup>。而对于大型的海上风电场来说, PCC-HVDC 系统虽然具有输电损耗低, 无功功率可控制性等优势, 与 VSC-HVDC 系统相比较而言, 还是存在不经济, 需要吸收大量无功功率等一系列问题<sup>[2-3]</sup>。所以 VSC-HVDC 是最适合海上大型风电场的传输要求的, VSC-HVDC 采用新型

全控器件, 如门级可关断晶闸管(GTO)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT), 并结合脉宽调制技术(PMW), 实现有功和无功功率的独立控制<sup>[4]</sup>, 解决了 PCC - HVDC 传输需要吸收大量的无功功率和换向失败等问题<sup>[3,5]</sup>。

本文是运用 Matlab 仿真软件来建立一个无开关型 VSC-HVDC 模型, 然后设计出电网侧的控制器。

## 1 无开关 VSC-HVDC 系统的电网侧控制器的设计

### 1.1 无开关 VSC-HVDC 系统电网侧基本模型

一般来说, 传统的 VSC-HVDC 使用的是

PWM、SPWM 来控制 GTO 或者 IGBT 进行调制<sup>[4]</sup>。由于风电场系统和 HVDC 系统太过于复杂，以致于很难构建包含有整个开关设备的模型，所以必须

利用相量法建立一种无开关模型去解决。图 1 模型的原理是通过控制器来控制调制量来达到稳压的目的<sup>[6-7]</sup>。

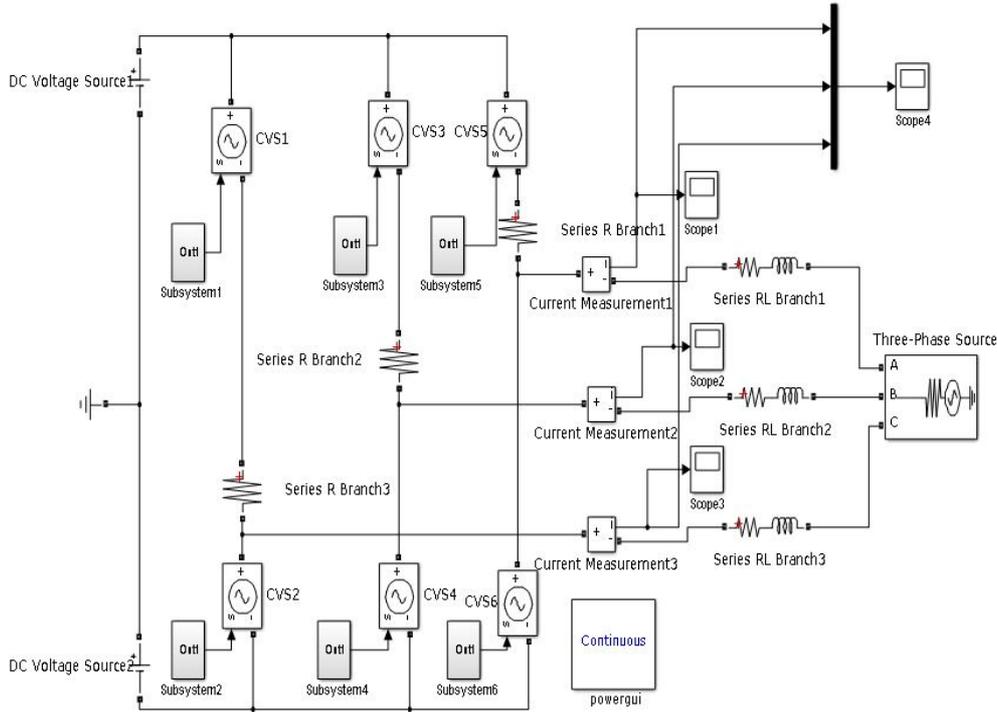


图 1 电网侧 VSC-HVDC 模型  
Fig. 1 Model of grid side VSC-HVDC

## 1.2 控制器的设计

### 1.1.1 交流侧电流的 $dq$ 控制器设计

关于 VSC - HVDC 控制方案的基本原则: (1) 首先, 要保证 HVDC-VSC 输电系统有一个直流电压控制器控制的换流站。(2) 一个换流站只能同时选择一个有功功率控制器或一个无功功率控制器, 不能同时选择这两种控制器<sup>[6-8]</sup>。

根据以上的原则, 可以在电网侧用三相整流控制方案控制交流侧电流, 虽然模拟电路控制简单, 但精确的模型是很难建立的, 回路的控制器设计还是很复杂的<sup>[4]</sup>。相对于其他控制策略,  $dq$  控制更适用于复杂控制。所以选用  $dq$  控制。让三相电流通过  $dq$  坐标变换产生直流反馈电流  $I_d, I_q$ 。为了达到调节的目的, 让  $I_d$  跟踪直流电压的输出信号。而且为了消除功率中的无功成分, 从而提高功率因数, 在设计的时候必须让  $I_q$  趋于 0<sup>[8]</sup>。

假设  $V_{DC} = 800 \text{ kV}$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $R = 1 \text{ } \Omega$ ,  $f_s = 50 \text{ Hz}$ ,  $P_{sref} = 1 \text{ 000 MW}$ ,  $Q_{sref} = 0$ ,  $f_{cc} = 200 \text{ Hz}$ ,  $\tau_i = 5 \text{ ms}$ ,  $\xi = 0.707$ , ignoring  $r_{on}$ 。  $V_{DC}$  和  $P_{sref}$  的选择是根据一般的系统的电压和功率。而  $\xi$  的取值是在普通范围内 0.7~0.8<sup>[9]</sup>。由于换流器开关频率的限制,

时间  $\tau_i$  在 0.5~5 ms, 为了更好地控制交流侧电流, 内环电流控制器的频率要比系统频率快得多, 所以就选定时间为 5 ms, 频率就为 200 Hz, 利用式 (1)~式(5), 可以计算出控制器的传递函数。

$$\frac{I_d(s)}{I_{dref}(s)} = G_i(s) = k_d(s) \frac{1}{LS + R} \quad (1)$$

$$G_i(s) = \frac{1}{\tau_i S + 1} \quad (2)$$

$$k_d(s) = \frac{k_p S + k_i}{S} \quad (3)$$

$$k_p = L / \tau_i, k_i = R / \tau_i \quad (4)$$

计算出的控制器的传递函数为

$$k_d(s) = \frac{0.2S + 200}{S} \quad (5)$$

$$k_q(s) = \frac{0.2S + 200}{S} \quad (6)$$

$$i_{dref}(t) = \frac{2}{3V_{sd}} P_{sref}(t) \quad (7)$$

$$i_{qref}(t) = -\frac{2}{3V_{sd}} Q_{sref}(t) \quad (8)$$

$$\hat{V}_{abc} = \hat{M}_{abc} \frac{V_{DC}}{2} \quad (9)$$

最后根据式(7)和传递函数可以搭建如图2和图3模型。

### 1.1.2 直流侧电压的 PI 控制器设计

一般直流侧的电压有两种方法控制, 一种是定直流电压控制, 另一种定无功功率控制<sup>[10-11]</sup>。第一种方法是给直流电压一个参考量并添加一个 PI 控制, 最后将得到的  $I_d$  参考量反馈到内环电流里。定无功功率的控制方法理论上是行得通的, 但在实际操作上, 由于软件自身的问题不能使模块运行。所以本文用定直流电压方法控制直流侧电压<sup>[12]</sup>。

假设  $V_{DC}=800$  kV,  $L=1$  mH,  $R=1$   $\Omega$ ,  $C_{total}=0.5$  MF,  $f_s=50$  Hz, ignoring  $r_{on}$ ,  $P_{sref}=1000$  MW,  $Q_{sref}=0$ ,  $f_{CC}=200$  Hz,  $f_{VC}=20$  Hz,  $\tau_i=5$  ms,  $\xi=0.707$ ,  $V_{DCref} =$

800 kV, 因为系统是先经过电流内环再经过电压外环, 所以电压外环的频率要远远低于电流内环的频率, 大约为 0.1 倍,  $f_{VC} = \frac{1}{10} f_{CC} = 20$  Hz,

$\omega_{VC} = 2\pi f_{VC} = 125.66$  rad/s, 根据式(10)~式(12)可以计算出电压控制器的传递函数。

$$1 + \frac{1}{SC} G(s) = 0 \quad (10)$$

$$G(s) = P + \frac{I}{S} \quad (11)$$

$$S^2 + 2\omega_{VC}\xi S + \omega_{VC}^2 = 0 \quad (12)$$

计算出的电压控制器的传递函数为

$$G(s) = 0.088 + \frac{7.896}{S} \quad (13)$$

根据传递函数可以建出如图4的模型。

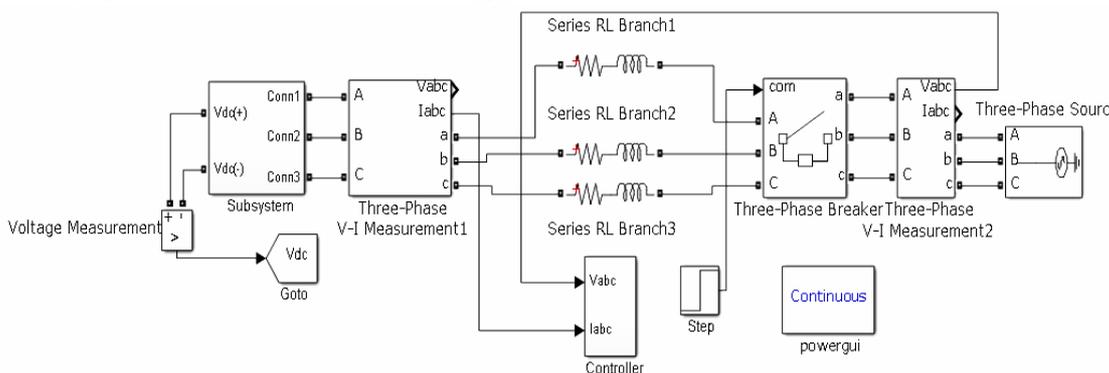


图2 电网侧带  $dq$  控制器的 VSC-HVDC 模型

Fig. 2 Model of grid side VSC-HVDC with  $dq$  controller

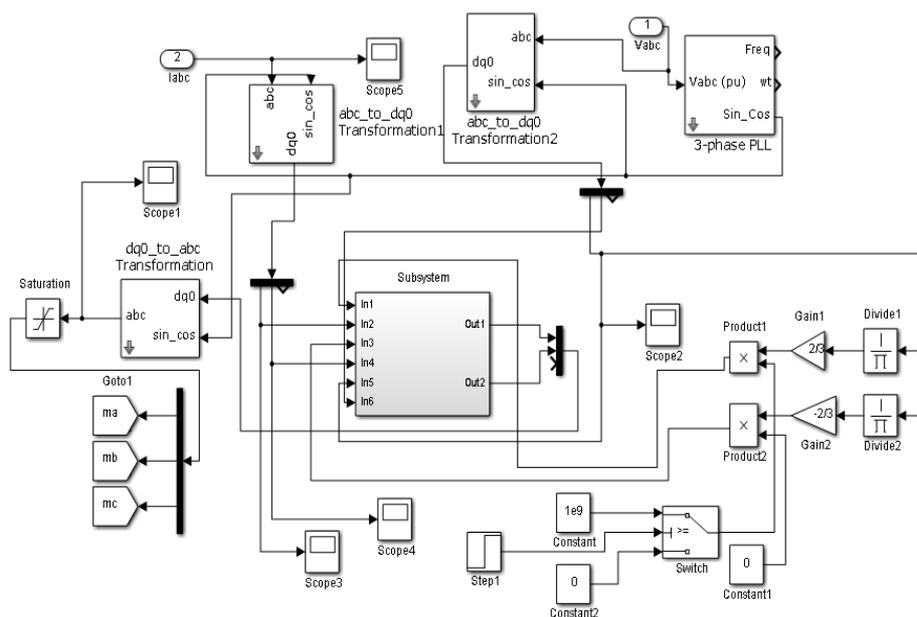


图3  $dq$  控制器的内部建模图

Fig. 3 Inner model of  $dq$  controller

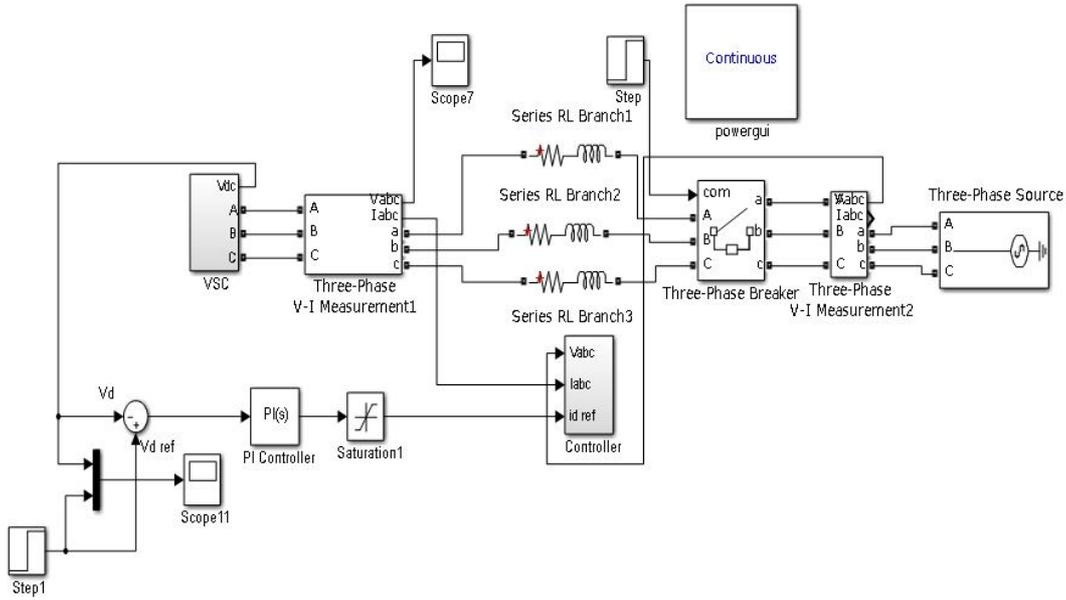


图 4 电压外环 PI 控制器建模图

Fig. 4 Outer voltage model of PI controller

## 2 无开关 VSC-HVDC 系统的电网侧控制器的仿真结果

### 2.1 交流电流控制器的仿真结果

通过建模可以得到以下的仿真结果，因为电流控制器、检测控制器设计是否成功的最关键的标志就是交流侧电流和调制量的正确性<sup>[9]</sup>。从图 5 可以看出  $V_{tabc}$  大约在 310 kV 左右，代入公式

$$(9) - V_{tabc}^{\wedge} = M_{abc} \frac{V_{DC}}{2}, \text{ 可以计算出 } M_{abc} \text{ 约等于 } 0.8.$$

通过图 6 可以看出  $M_{abc}$  的峰值大概在 0.8 上下，与算出的结果吻合。

从图 7 可以估出  $V_{sd}=310.27$  kV，结合式(7)–

$$i_{dref}(t) = \frac{2}{3V_{sd}} P_{sref}(t) \text{ 可以计算出 } I_{dref}=2148.66 \text{ A, 同理}$$

$$\text{根据式(8) } -i_{qref}(t) = -\frac{2}{3V_{sd}} Q_{sref}(t) \text{ 可得 } I_{qref}=0 \text{ A.}$$

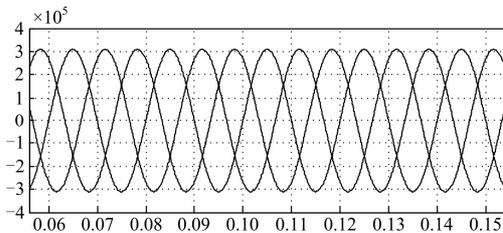


图 5 三相电压  $V_{tabc}$

Fig. 5 Voltage of three phases  $V_{tabc}$

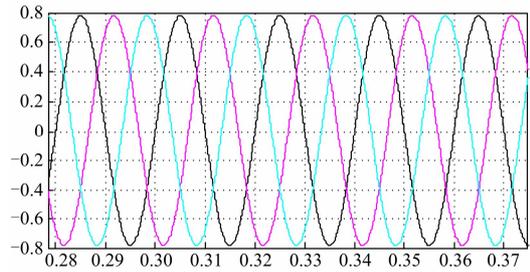


图 6 三相调制量  $M_{abc}$

Fig. 6 Modulation of three phases  $M_{abc}$

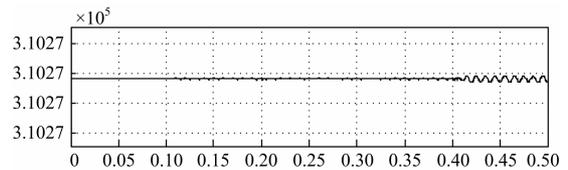
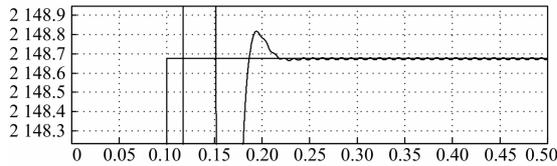
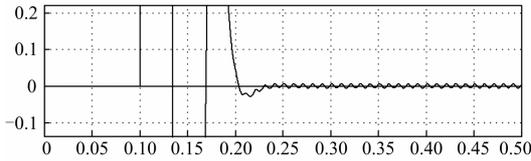


图 7 电压  $V_{sd}$

Fig. 7 Voltage  $V_{sd}$

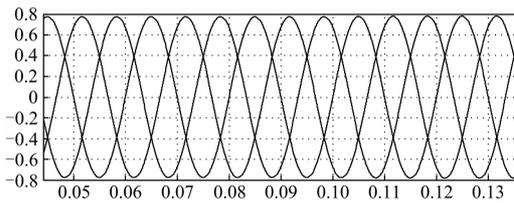
图 8、图 9 可以看出:  $I_d$ 、 $I_q$  和  $I_{dref}$ 、 $I_{qref}$  大致趋势是一样的，而且在容许范围内轻微震荡。图 8 中呈现出  $I_d$  在 2148.66 A 上下呈正弦波动，从图 9 可以看出  $I_q$  在 0.25 s 后在 0 A 左右震荡。不管是从图中还是通过精密的计算， $I_d$  和  $I_{dref}$  都是基本吻合的， $I_q$  和  $I_{qref}$  也是一样的。

这些数据都表明电网侧通过  $dq$  控制不仅有理想的仿真结果，而且还保证了各个器件参数的正确性。总的来说  $dq$  控制的参数设计得比较合理。

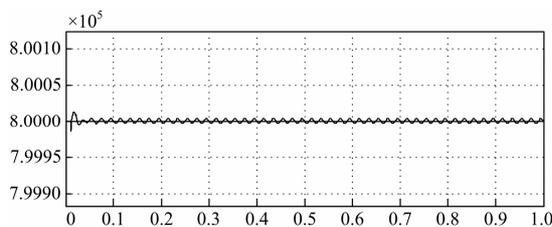
图 8 电流  $I_d$ (曲线),  $I_{dref}$ (直线)Fig. 8 Current  $I_d$  (curve),  $I_{dref}$  (straight line)图 9 电流  $I_q$ (曲线),  $I_{qref}$ (直线)Fig. 9 Current  $I_q$  (curve),  $I_{qref}$  (straight line)

## 2.2 直流电压控制器的仿真结果

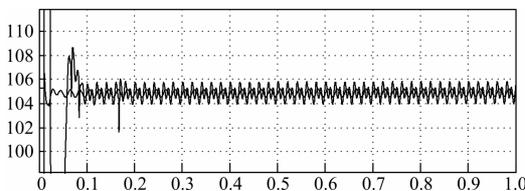
对于直流电压控制, 最主要看电压值是否稳定在参考值附近<sup>[13]</sup>。如图 10, 和交流电流控制器一样, 调制量测量值是和计算值大致一样。

图 10 三相调制量  $M_{abc}$ Fig. 10 Modulation of three phases  $M_{abc}$ 

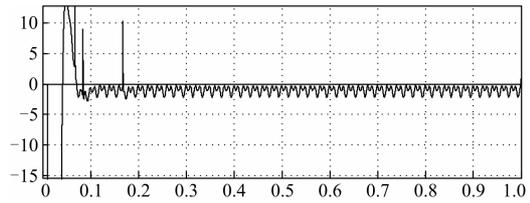
由图 11 可以看出  $V_{dc}$  在 800 kV 附近呈正弦变化, 与参考值 800 kV 保持一致的趋势。

图 11 直流电压  $V_{dc}$ (曲线),  $V_{dcref}$ (直线)Fig. 11 DC voltage  $V_{dc}$ (curve),  $V_{dcref}$  (straight line)

由图 12 可以看出,  $I_d$  虽然有些震荡, 但始终是在  $I_{dref}$  上下波动。

图 12 电流  $I_d$ (不规则曲线),  $I_{dref}$ (正弦曲线)Fig. 12 Current  $I_d$  (irregular curve),  $I_{dref}$  (sine curve)

为了消除无功功率, 让  $I_{qref}=0$  A, 从图 13 可以看出  $I_q$  在 0.2 s 前有些畸波和大幅度震荡, 在 0.2 s 后在 -0.1 A 保持稳定。

图 13 电流  $I_q$ (曲线),  $I_{qref}$ (直线)Fig. 13 Current  $I_q$  (curve),  $I_{qref}$  (straight line)

总的来说, 外环电压控制的很好, 但由于电容和电阻值的影响<sup>[14]</sup>, 内环电流控制不是特别的理想, 但在误差范围内。

## 3 结论

本文运用 Matlab 软件对适用于大型海上风电场的无开关 VSC-HVDC 进行建模, 通过对内环外环控制器的参数计算和调节来达到设计要求, 经过仿真验证, 最终实现新模型的建立。本文实质上是通过对新模型的建立, 来分析风电场中风速等一系列可变因素对 VSC-HVDC 系统的影响, 从而优化风电场结构。建立新型便捷, 高效的模型, 对后续海上风电场的设计和控制有指导性作用。

## 参考文献

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS G V, DEMETRIADES D G. VSC based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(24): 594-599.
- [2] WANG Guoqiang, WANG Zhixin, ZHANG Xueyan. Passivity control of VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 39(8): 12-13.
- [3] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, TAMURA J. Operation and control of HVDC-connected offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 30-37.
- [4] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 124-131.
- [5] YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 124-131.
- [6] BRESESTI P, KLING W L, HENDRIKS R L. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission

- system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(20): 37-43.
- [6] 李闯, 陈民铀, 付昂, 等. 含风电场的配电网无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 100-105.  
LI Chuang, CHEN Minyou, FU Ang, et al. Reactive power optimization strategy in distribution network with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 100-105.
- [7] 张学广, 刘义成, 海樱, 等. 改进的配电网双馈风电场电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 29-35.  
ZHANG Xueguang, LIU Yicheng, HAI Ying, et al. Improved voltage control strategy of doubly-fed induction generators wind farm in distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 29-35.
- [8] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.  
TIAN Chunzheng, LI Qionglin, SONG Xiaokai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-51.
- [9] 葛江北, 周明, 李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 146-153.  
GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin. Review on large-scale wind farm modeling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 146-153.
- [10] SPAHIĆ E, BALZER G. Offshore wind farms-VSC-based HVDC connection[C] // IEEE Russia, 2005: 1-6.
- [11] SUN Wei, MIAO Lu, YAO Liangzhong, et al. Coordinated control of offshore wind farms and HVDC transmission grid[C] // Renewable Power Generation Conference, 2nd IET, 2013: 1-6.
- [12] 曹娜, 于群, 戴慧珠. 风电场等值模型可辨识性研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 71-74.  
CAO Na, YU Qun, DAI Huizhu. Study on the identification of wind farm equivalent models[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 71-74.
- [13] 史华勃, 刘天琪, 李兴源. 交直流输电系统低频振荡仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 47-52.  
SHI Huabo, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Simulation analysis on low frequency oscillation in the AC/DC transmission system[J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 47-52.
- [14] 姚秀, 汲胜昌, HERRERA L, 等. 串联直流电弧特性及其在故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 6-10.  
YAO Xiu, JI Shengchang, HERRERA L, et al. Series DC arc characteristic study and the application in fault recognition[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 6-10.

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-03-31

作者简介:

汪璐(1988-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 从事电力系统控制研究; E-mail: 568494638@qq.com

邵如平(1964-), 男, 博士, 从事电力系统继电保护、微电网保护技术、智能电网研究; E-mail: njsrp@163.com

王雅璐(1989-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统保护与控制研究。E-mail: 175212040@qq.com

(编辑 姜新丽)