

# 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

饶成诚<sup>1,2</sup>, 王海云<sup>1</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 夏哲辉<sup>3</sup>, 吴寒<sup>1</sup>

(1. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心(新疆大学电气工程学院), 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网湖南省电力公司检修公司, 湖南 长沙 410004; 3. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 大规模风电集中接入电网对直流输电技术提出了更高的要求。为此, 提出了基于储能装置的柔性直流输电并网传输系统拓扑结构。根据 dq 同步旋转坐标系下 VSC-HVDC (Voltage Source Converter HVDC) 系统的数学模型, 设计了相应的换流器直接电流控制策略。其中送端换流站解耦控制器实现了风电场输出有功功率和无功功率的独立控制, 受端换流站采用将储能装置充放电功率偏差值作为直流电压控制器附加信号的控制策略。最后, 以配备双馈风电机组的风电场经柔性直流输电系统接入电网进行仿真分析, 针对风电场在噪声风引起的输电功率波动、受端换流站侧交流系统短路故障等情况进行仿真验证, 结果表明该控制方案有效可行。

**关键词:** 柔性直流输电; 直接电流控制; 双馈风电机组; 储能装置; 附加信号

## Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus

RAO Cheng-cheng<sup>1,2</sup>, WANG Hai-yun<sup>1</sup>, WANG Wei-qing<sup>1</sup>, XIA Zhe-hui<sup>3</sup>, WU Han<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410004, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Rigorous transmission technology is important when large-scale wind farm is connected to the power grid. Hence, a power transmission topological framework based on energy storage apparatus is proposed. The mathematical model is built in the dq synchronous frame, and the related direct current control strategy of converter is designed. The active and reactive power of wind farm is decoupled through the sending-end VSC controller, and the charge/discharge deviation power of energy storage apparatus is treated as an auxiliary signal for the DC bus voltage control strategy. The doubly fed induction generator wind farm with VSC-HVDC system is analyzed. Ultimately, the conditions of power fluctuation caused by noise wind and the short-circuit fault at the receiving-end VSC AC bus are simulated. The control scheme is proved to be feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267017).

**Key words:** VSC-HVDC; direct current control; DFIG; energy storage apparatus; auxiliary signal

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0001-07

## 0 引言

作为可再生能源技术中开发较成熟的风能, 已经逐步规模化、产业化。截至 2012 年, 我国(台湾地区除外)累计装机容量 75324.2 MW<sup>[1]</sup>, 居世界第

一位。然而, 我国风资源最密集的地区是东北、华北、西北等“三北”地区, 国内的风电多采用大规模集中并网方式接入配电网, 这些地区用电负荷较低, 自身消纳能力不强, 因此将出现大量的电力盈余, 大规模风电基地的风能需要经过远距离直流输电在中华和华东地区负荷中心进行消纳<sup>[2]</sup>。

目前风电场接入电网的方式有交流接入方式和直流接入方式两种。尽管交流接入方式技术方面较

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51267017); 新疆研究生科研创新项目(XJGR12013035); 自治区高技术项目(201132116)

为成熟，系统可靠性更高，但实际工程中只适用于近距离风电场接入系统<sup>[3]</sup>。对于输电距离达数千千米的大规模直流输电系统而言，基于晶闸管换流器 (Line Commutated Converter) 的高压直流输电技术 (LCC-HVDC) 仍是首选<sup>[4]</sup>，但 LCC-HVDC 系统存在换相失败问题，需要交流系统给其提供无功与电压支撑，从经济角度出发，在含风电场的 LCC-HVDC 系统换流站大规模配备静止同步补偿器 (STATCOM) 并不现实<sup>[5]</sup>。基于电压源换流器 (Voltage Source Converter) 的高压直流输电技术 (VSC-HVDC) 可以实现有功和无功功率的独立控制，能够起到 STATCOM 的作用等优点，在可再生能源并网方面更具竞争优势<sup>[6]</sup>。文献[6]建立了 dq0 旋转坐标下的 VSC-HVDC 系统数学模型，设计了功率和定直流电压控制器，指出直接电流控制策略抗扰动性能好，响应速度更快。文献[7]在 dq 坐标下建立了 VSC-HVDC 系统整流器的状态空间模型，文献[8]提出的风电场多端直流输电系统 (VSC-MTDC) 能够实现功率控制和直流电压控制模式间的转换，确保了换流站故障后风电场的可靠输出和直流母线电压稳定。文献[9]提出 VSC-HVDC 系统换流器的无源性控制策略，指出该控制策略可以独立控制有功和无功功率，暂态性能比常规 PI 控制更优。以上的 VSC-HVDC 风电并网系统并不能平抑风电场输送至受端系统的波动功率。

风资源有间歇性和预测精度较低等特点，风电渗透率逐步增大将对电网的安全运行带来一定负面影响<sup>[10-11]</sup>。要提高大规模风电基地输出功率的可控性，最主流的方式是引入储能系统<sup>[12]</sup>。超导储能 (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 具有毫秒级的响应速度和大容量功率/能量传递等特点，在可再生能源并网稳定性控制方面有独特优势<sup>[13]</sup>。文献[14]建立了 SMES 的三阶模型，提出了含风电-SMES 系统的暂态稳定概率评估法，并基于经济性给出了储能容量的优化算法，文献[15]根据风速的自然特性，将风电波动功率进行分解，并与电网风力发电计划结合，提出了基于储能技术的有功波动功率的控制方法。本文在 VSC-HVDC 系统直流母线上并联储能装置，设计了该系统两端换流站的控制策略。通过控制直流母线电压从而调节储能装置充放电功率，使得风电场输入至受端电网的功率保持恒定。最后，以 DFIG 风电场经柔性直流输电系统接入电网构建仿真模型，针对风电场在噪声风引起的输入至 VSC-HVDC 系统功率波动、受端换流站侧交流系统短路故障等情况进行仿真，结果

表明控制方案有效可行。

## 1 双馈风电机组结构及并网方式

### 1.1 双馈式风电机组的结构

双馈风电机组定子直接接入电网，转子通过背靠背换流器与电网相接，采用转子交流励磁，若风电机组转速大于旋转磁场的转速，机组工作在超同步工况，背靠背换流器能量流向逆向，风电机组定子和转子均向电网输送功率；若机组转速等于旋转磁场的转速，发电机工作在同步工况，换流器为转子提供直流励磁；若机组转速小于旋转磁场的转速，机组工作在亚同步工况，换流器为转子提供交流励磁，仅定子向电网输送功率。

### 1.2 基于储能装置的 DFIG 柔性并网结构

DFIG 组成的风电场经过 VSC-HVDC 系统与受端电网相连。储能装置并联在送端系统和受端系统间直流母线上，如图 1 所示。通过控制直流母线电压就能调节储能装置的充放电功率，平抑风功率波动，从而使得注入到受端系统的风电功率保持恒定。当送端系统输送风电功率值大于设定的平均风速对应的风功率时，储能装置处于充电工况吸收多余的功率；当送端系统输送风电功率值小于设定的平均风速对应的风功率时，储能装置处于放电工况输出与之适应的功率，使输入至受端系统的功率恒定。

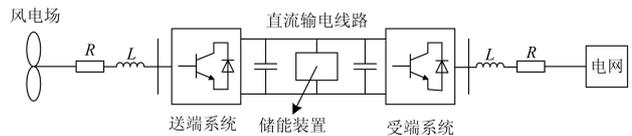


图 1 基于储能装置的 DFIG 柔性并网

Fig. 1 Wind farm integration via VSC-HVDC

## 2 VSC-HVDC 原理及其控制方案

### 2.1 VSC-HVDC 的数学模型

VSC-HVDC 系统换流站通常采用图 2 所示三相两电平半桥结构，其送端换流站和受端换流站拓扑结构对称。图中  $U_s$ 、 $I$  分别为交流侧的电压和电流； $L$ 、 $R$  分别为换流电抗器及其等效损耗电阻；直流侧电容  $C$  为换流站提供电压支撑及滤波作用； $U_h$  为换流器交流侧电压基波分量； $I_{dc}$ 、 $P_{dc}$  分别为输入至直流输电线路的电流和功率； $U_{dc}$  为直流母线电压。

由基尔霍夫定理，换流器交流侧三相动态数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ha} \\ u_{hb} \\ u_{hc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为三相相电流;  $u_{ha}$ 、 $u_{hb}$ 、 $u_{hc}$  为换流器侧三相相电压;  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为电网交流侧三相相电压。

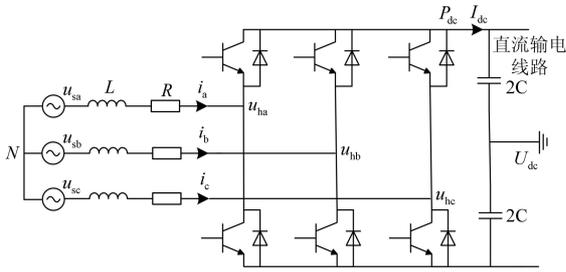


图2 换流器等效电路结构图

Fig. 2 Schematic circuit of converter

经过 Clarke 和 Park 变换, 将式(1)变换为 dq 同步旋转坐标形式

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{sq} - u_{hq}}{L} - \omega i_d - \frac{R}{L} i_q \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{sd} - u_{hd}}{L} + \omega i_q - \frac{R}{L} i_d \end{cases} \quad (2)$$

其中: 下标 d、q 分别为各电气量的 d 轴和 q 轴分量;  $\omega$  为交流系统角频率。

风电场输入至送端换流站的有功功率  $P_w$  和无功功率  $Q_w$  分别为

$$\begin{cases} P_w = 1.5(u_{sd} i_d + u_{sq} i_q) \\ Q_w = 1.5(u_{sd} i_q - u_{sq} i_d) \end{cases} \quad (3)$$

为简化分析, 令同步旋转坐标系 d 轴与交流侧电网电压向量  $U_s$  同轴, 即  $u_{sq} = 0$ 。

$$\begin{cases} P_w = 1.5u_{sd} i_d \\ Q_w = 1.5u_{sd} i_q \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知, 有功功率和无功率分别与  $i_d$  和  $i_q$  呈线性比例关系, 因此调节  $i_d$  与  $i_q$  就可以实现输入至换流站的风电场有功功率与无功功率的控制。

## 2.2 VSC-HVDC 解耦控制器设计

柔性高压直流输电系统换流器的控制分为间接电流控制法和直接电流控制法两种。间接电流控制法结构简单、不需要反馈控制, 静态性能较好, 但是其动态响应速度慢<sup>[6]</sup>, 本文采用直接电流控制方案。

### 2.2.1 送端换流站控制策略

方程(2)化简可得

$$\begin{cases} u_{hd} = u_{sd} + \omega L i_q - R i_d - L di_d/dt \\ u_{hq} = u_{sq} - \omega L i_d - R i_q - L di_q/dt \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)推导出图3所示针对送端换流站的定有功功率和定无功功率的解耦控制器。

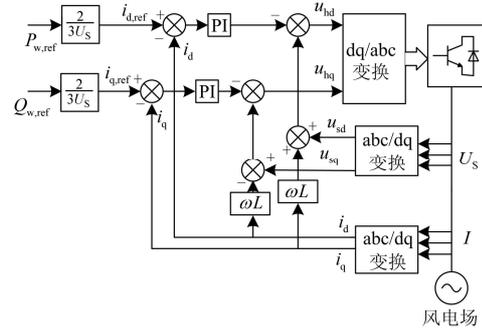


图3 送端换流站控制策略

Fig. 3 Control strategy of the sending converter

$P_{w.ref}$ 、 $Q_{w.ref}$  分别为风电场有功和无功功率的

参考值;  $i_{d.ref}$ 、 $i_{q.ref}$  为式(4)中有功和无功率所对应的电流参考值。该解耦控制器能实现风电场有功和无功率的独立控制, 动态特性较好。

### 2.2.2 受端换流站控制策略

在柔性直流输电系统中, 必须有一端换流站采用直流电压控制, 用于平衡直流网络的有功功率传输。

将风电场输出有功功率波动量  $P_{c.ref}$  作为储能装置充放电功率的参考值。将储能装置充放电功率实测值  $P_c$  与其参考值  $P_{c.ref}$  的误差信号经过比例积分环节作为直流电压  $U_{dc}$  的附加控制量  $\Delta U_{dc}$ , 因此通过控制直流电压能实现储能装置的充放电功率调节。在已有的直流电压控制器上增加储能装置充放电功率附加信号, 受端换流站的控制框图如图4所示。

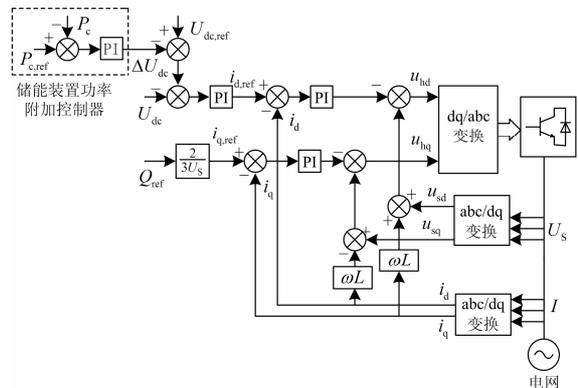


图4 受端站换流器控制策略

Fig. 4 Control strategy of the receiving converter

$U_{dc,ref}$  为直流电压参考值, 直流电压实测值与其基准值的误差信号经过比例积分环节作为电流参考值  $i_{d,ref}$ ;  $i_{q,ref}$  为式(4)中无功功率所对应的 q 轴电流参考值。该解耦控制策略能实现直流电压和无功功率的独立控制, 有较好的动态性能。

### 3 算例系统仿真分析

#### 3.1 算例系统拓扑结构

风电场由双馈风力发电机组成, 风电场装机容量 90 MW, DFIG 单机容量 3 MW。大量实测风电数据表明 98% 的时间段风电场群的出力小于装机容量的 70%, 因此仿真中选取的风电场群有效装机容量为 60 MW。图 5(a) 中 VSC-HVDC 系统的额定容量为 60 MW, 直流母线电压为 80 kV, 直流输电线路长度为 50 km, 直流电容为 35  $\mu$ F。风电场通过两级升压变连接至 VSC-HVDC 系统的送端换流站。图 5(b) 中风电场经双回 80 kV 交流输电线(HVAC)接入电网,  $X_0$  为风电场及输电线路以外电网的等效阻抗。两种并网接入方式仿真拓扑结构如图 5 所示。

根据已有 VSC-HVDC 系统运行经验, 换流器控制分为有功功率控制类和无功功率控制类。定有功功率和直流电压属于有功功率控制类, 定无功功率和交流电压属于无功功率控制类。本文 VSC-HVDC 系统送端换流站采用定有功功率和定无功功率控制, 受端换流站采用直流电压和无功功率控制。

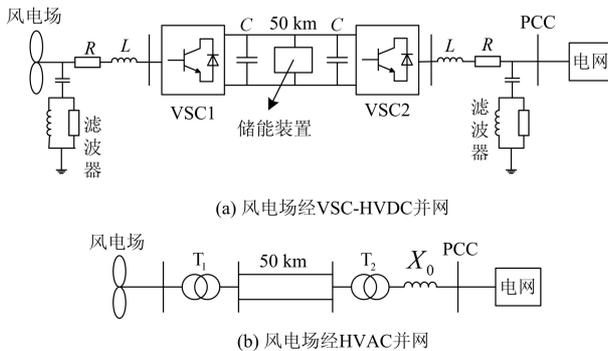


图 5 仿真算例拓扑结构图

Fig. 5 Configuration of the studied power system

#### 3.2 仿真结果分析

针对图 5(a) 风电场经 VSC-HVDC 并网, 验证直流母线所安装的储能装置对平抑风电输出功率波动的有效性(忽略储能装置的内部特性), 对风电场在风速频繁波动的情况进行仿真分析。图 6 为新疆达坂城地区某风电场 30 s 内噪声风波动情况。图 7 为无储能装置情况下 VSC-HVDC 并网系统风电场输

出功率、DFIG 转速情况。考虑在直流母线上安装储能装置, 图 8、图 9 分别为储能装置的充放电功率和直流母线电压波动情况。

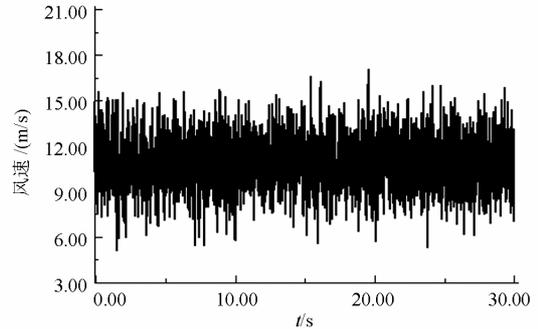
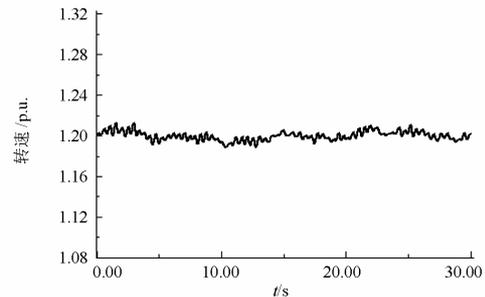
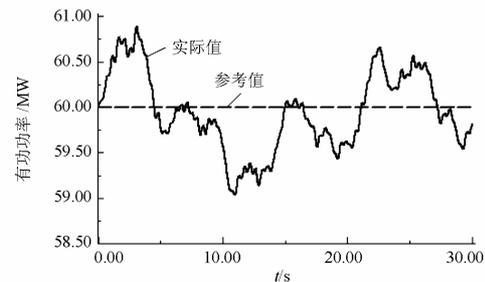


图 6 风速频繁波动情况

Fig. 6 Variation of the wind speed



(a) 等效风电机组转速曲线



(b) 风电场输出有功功率曲线

图 7 风电场功率变动情况

Fig. 7 Dynamic characteristics of active power

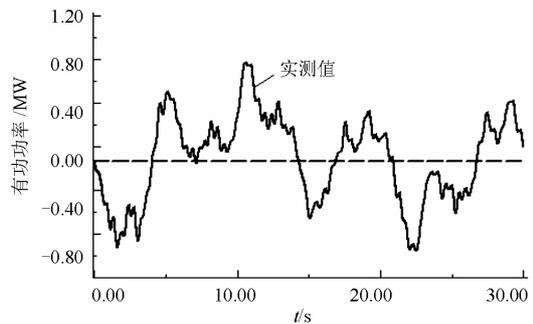


图 8 储能装置充放电功率曲线

Fig. 8 Response of the energy storage apparatus

图10为直流母线上安装储能装置前后并网系统受端电网侧响应情况。

由图 10 可知, 当风电场内风速频繁波动时, 采用变速恒频技术的双馈风电机组转速也发生一定的

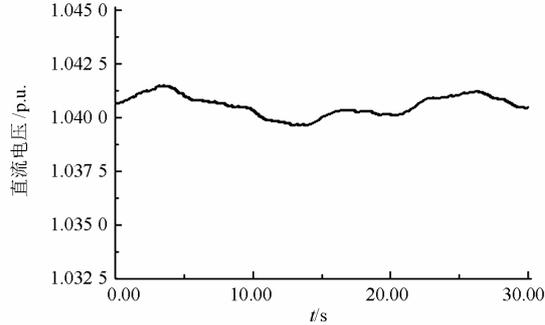
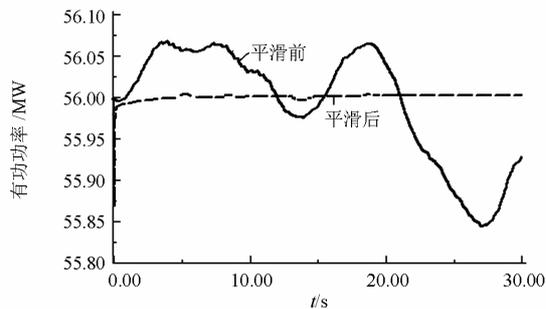
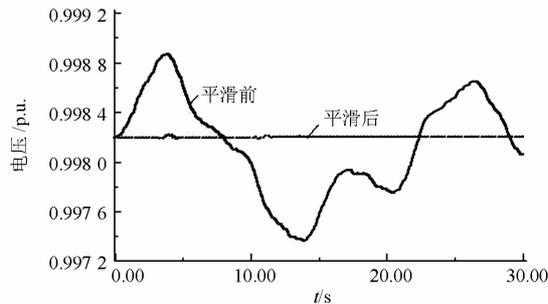


图 9 VSC-HVDC 系统直流母线电压

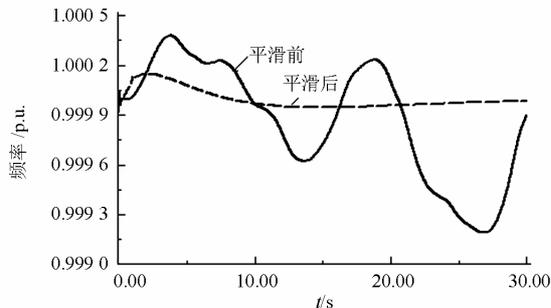
Fig. 9 DC bus voltage of the VSC-HVDC



(a) 输入至受端电网的有功功率



(b) 受端换流站侧交流母线电压



(c) 受端换流站侧交流母线处频率曲线

图 10 受端电网系统动态响应情况

Fig. 10 Dynamic response of the receiving grid

变动, 但其变动幅度较小, 风电机组能够稳定运行。储能装置充放电功率能够跟踪风电场输送有功功率频繁波动的情况, 平抑风电功率波动, 输入至受端电网的风电功率基本稳定, 如图10(a)所示。图 10(b)、图 10(c)表明 VSC-HVDC 系统直流母线上安装储能装置能够削弱波动的风功率给受端电网带来的电压、频率波动等不利影响, 受端电网的安全稳定运行能力得到加强。因此, 风电场采用基于储能装置的 VSC-HVDC 系统与电网连接, 受端电网可以实现对风功率波动等不利因素的隔离。

常规 VSC-HVDC 系统通常有一端换流站采用定直流母线电压的控制策略<sup>[7]</sup>。由图 9 可知, 本文中 VSC-HVDC 系统直流母线电压并不恒定, 而是在参考值附近平缓波动, 允许波动的范围可以根据具体情况进行设定。考虑到直流母线电压的波动量过大会引起母线过电压保护或者影响交流侧换流站母线电压。仿真中设定的直流母线电压上限值为 1.045 p.u., 由图 10(b)可知, 交流侧换流站侧母线电压基本不受影响。

以下再对图 5 中两种不同的风电场接入方式进行故障特性的对比分析, 风速恒定为 12 m/s。设定 2 s 时刻风电场出口处发生三相短路, 2.2 s 时刻切除故障。图 11 为两种接入方式下受端电网交流母线电压(即风电场并网 PCC 母线)波动情况。

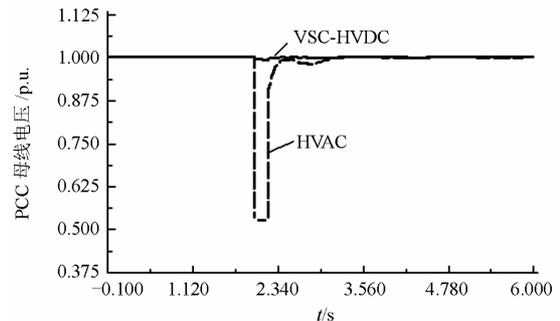


图 11 PCC 处母线电压

Fig. 11 Voltage of the PCC bus

设定 2 s 时刻 PCC 点发生三相短路故障, 2.2 s 时刻切除故障, 图 12 为两种并网方式下风电场各电气量的仿真结果图。

由图 12 可知, 当 PCC 母线处短路故障, VSC-HVDC 输电方式下风电机组机端电压几乎没有明显的变化, 跌落不明显, 这是因为柔性直流并网方式在故障发生瞬间可以向风电场提供紧急无功功率支援。而 HVAC 接入方式下风电机组机端电压发生大幅跌落, 风电场无功支撑不足, 这不利于故障切除后风电场恢复稳定运行。

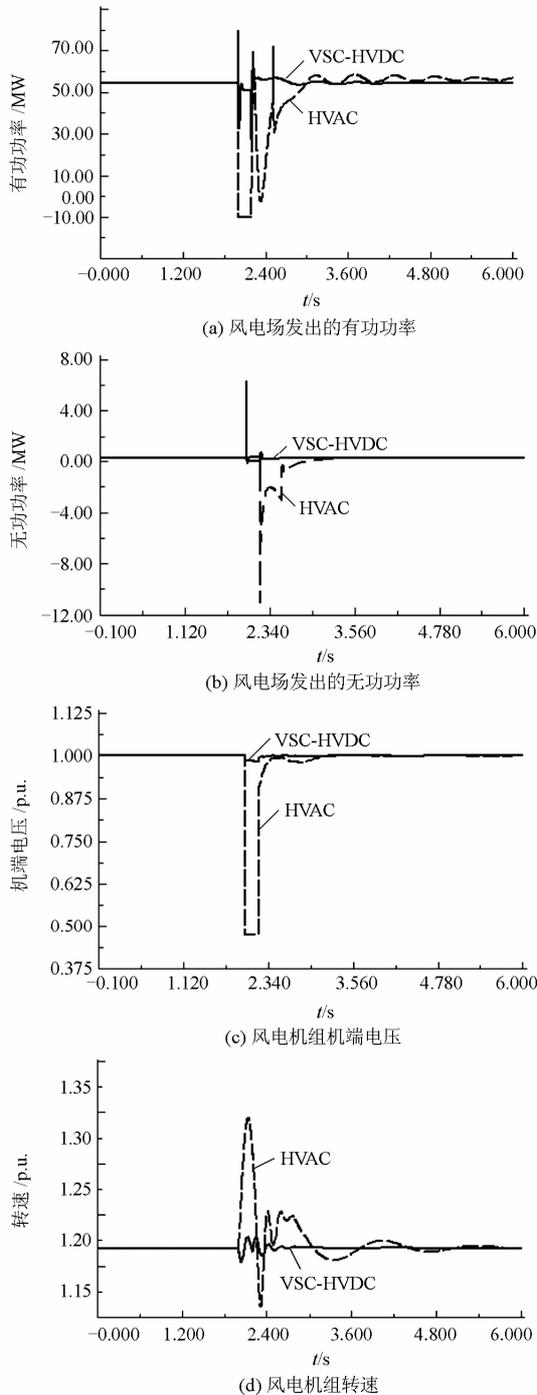


图 12 风电场各电气量仿真结果图

Fig. 12 Electrical variables of the wind farms

此外，采用柔性直流输电接入方式，故障发生后风电场的有功功率输出波动较小，风电机组转速波动在故障切除后能迅速恢复稳定。需要说明的是图 12(b)中，若采用 HVAC 并网方式，在故障发生后 0.1 s 时风电场发出的无功功率由正值变为负值，

这是因为 PCC 母线短路故障期间 DFIG 背靠背变流器间直流母线电压太大会损坏 DFIG 的变流器。此时 Crowbar 保护电路启动将转子侧变流器短接，双馈风电机组运行在普通异步风力发电机状态，从电网吸收一定的无功功率，这对于电网恢复安全稳定运行的工况不利。上述仿真结果表明，VSC-HVDC 并网方式有利于风电场与受端电网的稳定运行，特别是有利于风电场内风电机组机端电压稳定；当受端换流站母线(PCC 母线)发生故障时，采用柔性直流输电并网接入方式能帮助风电场“穿越”故障。

### 4 结论

1) 与交流输电接入方式相比，采用柔性直流输电方式并网有利于并网系统的稳定运行，当受端换流站母线(PCC 母线)发生故障时，采用柔性直流输电并网接入方式更有利于实现风电场的故障穿越。

2) 通过在 VSC-HVDC 直流输电线路并联储能装置，通过控制储能装置的充放电功率可以平抑风电场输入至电网的有功功率。解决了传统的 VSC-HVDC 风电并网系统输入至受端电网的风电功率波动问题。

3) 本文不对储能装置的设计作详尽讨论。已有较多文献对超导储能(SMES)系统改善并网风电场稳定性及电能质量进行研究。超级电容器储能、超级电容器与蓄电池混合储能等新兴储能元件也逐渐成为研究热点<sup>[16]</sup>。储能装置成本较高，为满足风电等新能源并网需求，应该加大对充放电速率更快和高功率密度的储能装置进行研发以期其在新能源并网工程中获得更大的应用。

4) 下一步研究将计及风力发电机、备用电源、储能设备等投入的经济因素，综合评估并网风电系统可靠性和经济性。

### 参考文献

[1] 闵勇. 特约主编寄语[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 1.  
MIN Yong. Contributing editor message[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 1.

[2] 侯婷婷, 娄素华, 张滋华, 等. 协调大规模风电集聚外送的火电容量优化[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 255-261.  
HOU Ting-ting, LOU Su-hua, ZHANG Zi-hua, et al. Capacity optimization of corollary thermal sources transmitted with large-scale clustering wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27 (10): 255-261.

- [3] Chou Chih-Ju, Wu Yuan-Kang, Han Gia-Yo, et al. Comparative evaluation of the HVDC and HVAC links integration in a large offshore wind farm-an actual case study in Taiwan[C] // 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Orlando, FL, 2011: 1-8.
- [4] LI Ri-sheng, Bozhko S, Asher G Frequency control design for offshore wind farm grid with LCC-HVDC link connection[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(3): 1085-1092.
- [5] 廖勇, 王国栋. 双馈风电场的柔性高压直流输电系统控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 7-14.  
LIAO Yong, WANG Guo-dong. VSC HVDC system control for grid-connection of DFIG wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 7-14.
- [6] 姚为正, 邓详纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电系统控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-75.  
YAO Wei-zheng, DENG Xiang-chun, YI Ying-ping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-75.
- [7] 周宏林, 杨耕. 用于大型 DFIG 风电场的混合型 HVDC 系统中整流器的建模与控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 224-232.  
ZHOU Hong-lin, YANG Geng. Modeling and control for rectifier in the hybrid-HVDC system for DFIG-based wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 224-232.
- [8] 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 Jun-hong, AI Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27.
- [9] 王国强, 王志新, 张学燕. 海上风电场柔性直流输电变流器的无源性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 11-15.  
WANG Guo-qiang, WANG Zhi-xin, ZHANG Xue-yan. Passivity control of VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 11-15.
- [10] 李渝, 范高峰, 李庆, 等. 达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 88-92.  
LI Yu, FAN Gao-feng, LI Qing, et al. The impact of Dabancheng wind farm integration on power quality of Xinjiang power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 88-92.
- [11] 饶成诚, 王海云, 吴寒, 等. 基于 PSASP 的并网风电场潮流分析[J]. 水力发电, 2013, 39(4): 87-90.  
RAO Cheng-cheng, WANG Hai-yun, WU Han, et al. PSASP-based flow analysis of wind farm in power system[J]. Water Power, 2013, 39(4): 87-90.
- [12] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.  
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
- [13] 张占奎, 王德意, 迟永宁, 等. 超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 38-42.  
ZHANG Zhan-kui, WANG De-yi, CHI Yong-ning, et al. Study of transient stability enhancement of wind farm application of superconducting magnetic energy storage devices[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 38-42.
- [14] 方家琨, 苗璐, 文劲宇, 等. 含风电-SMES 的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 176-182.  
FANG Jia-kun, MIAO Lu, WEN Jin-yu, et al. Transient stability probability evaluation of power systems incorporating with wind farm and SMES[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 176-182.
- [15] 赵瑜, 周玮, 于芑, 等. 风电有功波动功率调节控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 85-91.  
ZHAO Yu, ZHOU Wei, YU Peng, et al. Study on regulation and control of active wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 85-91.
- [16] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.

收稿日期: 2013-06-01

作者简介:

饶成诚(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: raochengcheng@yeah.net

王海云(1973-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术;

王维庆(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制。