

# 基于 Crowbar 保护的双馈风力发电机低电压控制策略研究

李啸聪, 黄维, 黄承喜, 鹿建成, 查中魁, 席云

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 针对双馈风力发电机在电压大幅骤降时投入 Crowbar 电路后引起直流侧过电压和动态无功补偿的问题, 基于反馈线性化理论, 提出了对网侧变频器进行非线性控制策略。通过协调控制 STATCOM 对电网进行动态无功补偿。仿真表明: 网侧非线性控制器在电压骤降过程中能很好地抑制直流侧过电压; 通过引入 STATCOM 补偿装置, 很好地满足系统无功需求, 证实了所提出控制策略的正确性, 提高了系统的低电压穿越能力。

**关键词:** 双馈风力发电机; 低电压穿越; 电压跌落; 网侧变换器; 静止无功补偿

## Analysis of doubly-fed wind power generator low voltage control strategy based on Crowbar protection

LI Xiao-cong, HUANG Wei, HUANG Cheng-xi, LU Jian-cheng, ZHA Zhong-kui, XI Yun

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the DC over-voltage and the dynamic reactive power compensation, which caused by the doubly-fed wind generator switch Crowbar circuit when the grid voltage dips, and basing on the feedback linearization theory, the nonlinear control strategy on grid-side converter is proposed. This paper adopts a coordinated control STATCOM to compensate the dynamic reactive power of the grid. Simulation result shows that, the grid-side nonlinear controller can well restrain the DC over-voltage during the grid voltage dip, and meet the requirements of system reactive power by introducing a STATCOM compensation device. The result also confirms the correctness of the control strategy, which improves the ability of low voltage ride through (LVRT) of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267001).

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); low voltage ride through (LVRT); voltage dip; grid-side converter; STATCOM

中图分类号: TM935

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0067-05

## 0 引言

随着风电容量在电网中所占比重的增加, 电网对并网运行的风电机组的要求进一步提升, 一些新的电网规定要求在电网电压跌落时风电机组仍具有不间断运行能力, 甚至是零电压过渡<sup>[1]</sup>。

双馈发电机因具备幅值、频率、相位均可调节的特点, 在电力系统中得到广泛运用, 但由于发电机定子直接并网, 使其对电压跌落相当敏感。通过改进 DFIG 控制策略来实现低电压穿越<sup>[2-3]</sup>, 因不需要增加硬件电路, 经济性较好, 但只适合小幅度电压

骤降; 遇到大幅值骤降时, 转子侧短接撬棒(Crowbar)必不可少<sup>[4-12]</sup>。撬棒(Crowbar)保护电路投入能有效限制转子电流, 但因故障时 DFIG 以异步电机方式运行, 其将从电网吸收大量无功功率, 不利于交流电网电压稳定, 严重时甚至可能导致电网电压崩溃。文献[6]分析了不同故障类型、不同投切时间和不同撬棒阻值对系统的影响。文献[10]提出了采用 Crowbar 硬件保护电路方法实现 LVRT 运行, 但并没有提到网侧变频器的控制和 DFIG 的无功支撑问题。文献[11]提出采用串联网侧变换器(SGSC)的低电压控制策略, 但是所接入的 SGSC 容量较大, 还需要同容量的串联注入变压器, 大大地增加了系统成本, 而且相关研究发现在功率处理问题上能力较差<sup>[12]</sup>。

为了解决接入 Crowbar 保护方式所引起的直流侧过电压与无功补偿的问题, 本文设计了基于多

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51267001); 广西自然科学基金资助项目(桂科自 0728027); 南宁市市校科技合作专项项目(200801029D); 北海市市校科技合作专项项目(北科合 200801027)

目标非线性控制理论<sup>[13-14]</sup>的网侧控制器用以限制直流过电压；对故障时 DFIG 将从电网吸收大量无功功率的问题，考虑同时协调 STATCOM 补偿装置以补偿无功，防止电压进一步下降及 Crowbar 二次动作。通过仿真研究，非线性网侧控制器能很好地实现稳定直流母线电压的目的，STATCOM 提供的动态无功电流满足了低电压对无功的需求，保证了电力系统的稳定性，证明了系统具有良好的低电压穿越能力。

## 1 网侧变频器控制策略

网侧变换器有保持直流母线电压的稳定、输入电流的波形接近正弦、谐波含量少等作用，其中直流母线电压的稳定是两个变换器正常工作的前提。

根据图 1 所示的网侧变换器的拓扑结构，由基尔霍夫定律可以得到

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -U_d - Ri_d + \omega_1 Li_q + e_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -U_q - Ri_q - \omega_1 Li_d + e_q \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{i_{dcr}}{C} - \frac{e_d i_d}{CU_{dc}} - \frac{e_q i_q}{CU_{dc}} \\ \begin{cases} y_1 = h_1(x) = Q - Q^* \\ y_2 = h_2(x) = U_{dc} - U_{dcrf} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

其中： $U_d$ 、 $U_q$  分别为电网电压的 d、q 轴量； $i_d$ 、 $i_q$  分别为变换器输入电流的 d、q 轴分量； $e_d$ 、 $e_q$  为变换器交流侧电压的 d、q 轴分量； $\omega_1$  为电网电压的同步角速度； $i_{dcr}$  为直流侧流向网侧的电流； $C$  为直流侧电容；网侧变频器输出无功  $Q = U_d i_q$ ； $U_{dc}$  为直流侧电压； $Q^*$  为风电机组需向电网注入的动态无功功率。

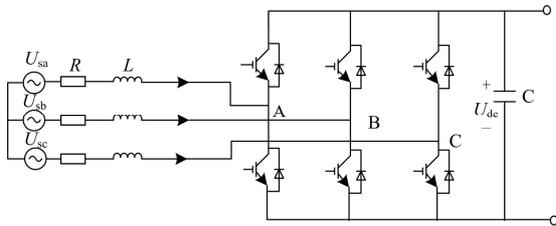


图 1 网侧变频器

Fig. 1 Grid side converter

## 2 双馈风机网侧变频器非线性控制设计

对于如下的多输入多输出(MIMO)非线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x)u_1 + \dots + g_m(x)u_m \\ y_1(t) = h_1(x) \\ \vdots \\ y_m(t) = h_m(x) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x \in \mathbf{R}^n$  为状态向量； $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$ ； $g_j(x) = [g_{1j}(x), g_{2j}(x), \dots, g_{mj}(x)]^T$ ； $u_1, u_2, \dots, u_m$  为控制量； $h_1(x), \dots, h_m(x)$  为输出函数； $y_1, \dots, y_m$  为输出量。

式(1)为 DFIG 的三阶非线性模型，根据非线性理论求解矩阵：

$$\tilde{B}(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^0 h_1(x) & L_{g_2} L_f^0 h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^0 h_2(x) & L_{g_2} L_f^0 h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{U_d}{L} \\ -\frac{i_d}{CU_{dc}} & -\frac{i_q}{CU_{dc}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

知系统的总相对阶  $r_1 + r_2 = 2 < n = 3$ ，故可进行部分精确线性化设计控制律。选择函数  $\eta = \frac{Li_d^2}{2} + \frac{Li_q^2}{2} + \frac{CU_{dc}^2}{2}$ ，使之满足偏微分方程组：

$$\begin{cases} L_{g_i} \eta_j(x) = 0 \quad (i=1,2; j=1,2) \\ \begin{cases} L_{g_1} \eta = 0 \\ L_{g_2} \eta = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

将系统从  $x$  空间变换到  $z$  空间的标准型，反馈控制律  $u = [e_d \quad e_q]^T$

$$\begin{aligned} \dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \dot{i}_q \\ \dot{U}_{dc} \\ \frac{Li_d^2}{2} + \frac{Li_q^2}{2} + \frac{CU_{dc}^2}{2} \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} \frac{U_d(-Ri_q - \omega_1 Li_d + e_q)}{L} \\ \frac{i_{dcr}}{C} - \frac{e_d i_d}{CU_{dc}} - \frac{e_q i_q}{CU_{dc}} \\ i_d(-U_d - Ri_d) + i_q(-U_q - Ri_q) + U_{dc} i_{dcr} \end{bmatrix} \\ u = -\tilde{B}^{-1}(x)\tilde{a}(x) + \tilde{B}^{-1}(x)v \end{aligned} \quad (6)$$

式中：

$$\tilde{a}(x) = \begin{bmatrix} L_f^1 h_1(x) & L_f^1 h_2(x) \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{v} = [-k_1 z_1 \quad -k_2 z_2]^T$$

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_2 C U_{dc}^2 - k_2 C U_{dc} U_{dref} - i_q e_q + i_{dc} U_{dc}) / i_d \\ (-k_1 L U_d i_q + k_1 L Q^* + U_d R i_q + U_d \omega_l i_d L) / U_d \end{bmatrix}$$

### 3 故障时的STATCOM无功协调控制

STATCOM 是一种很重要的 FACTS 装置, 在电网出现扰动时提高风力发电机组的故障穿越能力, 原理接线图如图 2 所示。

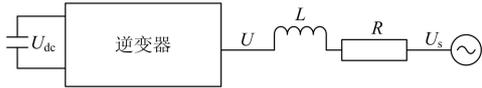


图 2 STATCOM 原理接线图

Fig. 2 Principle structure of STATCOM

当 Crowbar 电路启动后, DFIG 等效异步电机运行状态, 不仅无法向电网提供无功支持, 反而从电网吸收无功, 此时如果不进行无功补偿, 故障有可能进一步加大。

建立 d-p 坐标系下的 STATCOM 数学模型如式 (7)。

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{sd} + \omega i_{sq} + \frac{k}{L_s} \cos \delta U_{sdc} - \frac{1}{L} U \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{sq} - \omega i_{sd} + \frac{k}{L_s} \sin \delta U_{sdc} \\ \frac{dU_{sdc}}{dt} = -\frac{3k}{2C_s} \cos \delta i_{sd} - \frac{3k}{2C_s} \sin \delta i_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k$  为逆变器调制比;  $\delta$  为电网电压与 STATCOM 输出电压相角差;  $L_s$ 、 $R_s$  分别为 STATCOM 电感和电阻;  $U_{sdc}$  为 STATCOM 直流侧电容电压;  $C_s$  为 STATCOM 直流侧电容;  $U$  为电网电压。

当 Crowbar 投入运行时, 从电网吸收大量无功, 此时, STATCOM 采用非线性控制方法跟踪网侧系统无功指令, 对系统无功需求状态进行快速响应, 通过控制交流侧输入电压相位与系统电压的相位  $\delta$  来控制 STATCOM 无功补偿容量, 为异步发电机提供必要的无功, 与网侧变频协调控制, 快速向系统注入无功, 改善风电场暂态电压稳定性。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真数据

为了验证本文所设计控制策略的合理性及优越性, 采用如下参数进行了数字仿真:

$$U_s = 220 \text{ V}, \quad P^* = 140 \text{ kW}, \quad L_r = 0.0449 \text{ H},$$

$$L_s = 0.0438 \text{ H}, \quad L_m = 0.0427 \text{ H}, \quad R_r = 0.0514 \Omega,$$

$$R_s = 0.0519 \Omega, \quad U_{dref} = 1000 \text{ V}。$$

### 4.2 仿真分析

电网电压在 0.3 s 时刻跌落至 0.15 pu, 0.7 s 时刻故障清除, 故障期间接入 crowbar 电路限制转子与定子电流。

图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 分别表示在该故障下的电网电压、定子电流、转子电流的波形, 定子侧的励磁电流  $I_s$  最大值为稳态时 4 倍左右, 转子侧的励磁电流  $I_r$  最大值为稳态时 1.4 倍左右, 说明启动 crowbar 电路, 能有效控制电流, 实现低电压穿越运行。

图 4 实线表示网侧变频控制器采用多指标非线性 (MINC) 控制, 虚线表示 PID 控制策略下相关状态量的动态响应曲线。由图可知, 在多指标非线性 (MINC) 控制下, 直流侧电压  $U_{dc}$  基本为一条直线, PID 控制策略下的  $U_{dc}$  为稳态值的 1.25 倍, 在设备允许值范围内, 但 MINC 对直流侧过电压控制更为理想, 能更好地保护变频器。

图 5 表示在电网电压跌落至 0.15 pu 时, 加入了 Crowbar 电路后, 风电机组输出的无功量, 其中虚线与实线分别表示不加无功补偿装置与协调 STATCOM 装置后的风电机组输出无功, 由图可知: 由于风电机组失去无功调节能力, 风电机组从电网吸收大量无功; 而协调 STATCOM, 能快速跟踪无功, 减轻风电机组故障系统负担, 实现了 crowbar 电路的过渡, 提高了整个风电系统的运行能力。

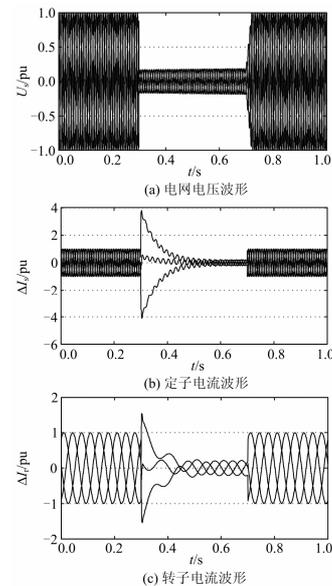


图 3 电压跌落到 0.15 pu 时, DFIG 运行结果  
Fig. 3 Voltage drop to 0.15 pu, DFIG operation result

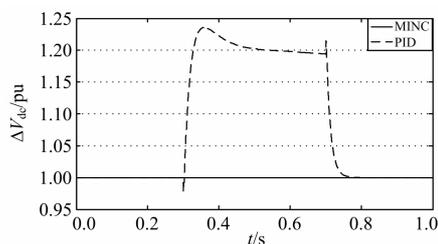


图4 两种不同控制方法下直流侧电压值

Fig. 4 DC side voltage value of the two control methods

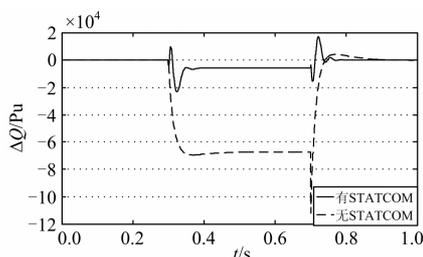


图5 DFIG 无功输出

Fig. 5 DFIG reactive power output

## 5 小结

本文针对双馈风机低电压穿越过程中的直流侧过电压和系统动态无功支撑问题, 基于反馈精确线性化理论, 提出了网侧非线性控制器控制方案, 并对该方案进行了仿真研究; 针对无功补偿问题, 通过控制 STATCOM 进而解决了电压穿越时风电机组从电网吸收无功的问题, 提高了系统的低电压穿越能力。

## 参考文献

- [1] ZHANG Yong, DUAN Zhen-gang, LIU Xue-lian. Comparison of grid code requirements with wind turbine in China and Europe[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2010: 1-4.
- [2] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.  
HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [3] 倪林, 袁荣湘, 张宗包, 等. 大型风电场接入系统的控制方式与动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制,

2011, 39(8): 75-79, 85.

- NI Lin, YUAN Rong-xiang, ZHANG Zong-bao, et al. Research on control method and dynamic characteristic of large wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 75-79, 85.
- [4] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应与保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-44, 48.  
GUO Jia-hu, ZHANG Lu-hua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-44, 48.
- [5] MORREN J, DE HANN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [6] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.  
XU Dian-guo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [7] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频双馈型异步发电机的稳态功率关系[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 39-44.  
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Steady-state power relation of AC-excited variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 39-44.
- [8] 王定国, 张红超. 双馈型风力发电机低电压穿越的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 70-73.  
WANG Ding-guo, ZHANG Hong-chao. Analysis and research of low voltage ride through for doubly fed windpower generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 70-73.
- [9] 姚骏, 廖勇, 唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程

- 学报, 2007, 27(30): 64-71.
- YAO Jun, LIAO Yong, TANG Jian-ping. Ride-through control strategy of AC excited wind-power generator for grid short-circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 64-71.
- [10] 蔚兰, 陈宇晨, 陈国呈, 等. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略的理论分析与实验研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 30-36.
- YU Lan, CHEN Yu-chen, CHEN Guo-cheng, et al. A low voltage ride through control strategy of doubly fed wind induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 30-36.
- [11] 廖勇, 李辉, 姚骏, 等. 采用串联网侧变换器的双馈风电机组低电压过渡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 90-98.
- LIAO Yong, LI Hui, YAO Jun, et al. Low voltage ride-through control strategy of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 90-98.
- [12] PETERSSON A. Analysis modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2005.
- [13] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.
- LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. High performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [14] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 输出函数在多输入多输出非线性控制系统设计中的重要作用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 87-93.
- LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. Important affection of the output function in MIMO nonlinear control system design[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 87-93.

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2013-11-01

作者简介:

李啸骢(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制, 电力系统分析与控制(电力系统自动控制技术、人工智能在电力系统中的应用、电力系统非线性控制、电力系统预测控制), 农业工程自动化;

黄维(1987-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: 123585200@qq.com