

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.005

# 应用 STATCOM 的 DFIG 风力发电机低电压穿越能力分析

李鸿南, 金 涛

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福州 350108)

**摘 要:**针对 DFIG(double fed induction generator)风电机组低电压穿越能力(LVRT, low voltage ride through)问题,笔者基于 STATCOM 研究了一种电压外环与电流内环相结合的双闭环反馈控制策略,并仿真验证了所提出方法的有效性。将 STATCOM 分别安装风电机组机端、并网点高压侧和低压侧,且设置不同电压跌落深度,比较其补偿效果。实验结果表明,安装在风电机组机端时补偿效果最好。在电网电压跌落时,STATCOM 能快速为电网输入无功,抬高风力机的机端电压,从而提高风电场的 LVRT 能力,从 STATCOM 输出无功大小和风电场机端电压被抬升的比例两方面分析,对于不同深度的电压跌落,STATCOM 补偿效果都较为显著。

**关键词:**静止同步补偿器;低电压穿越;反馈控制;双馈感应风力发电机;电压跌落

**中图分类号:**TM315

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2016)06-034-07

## Analysis of low voltage ride through capability of double fed induction generator with STATCOM

LI Hongnan, JIN Tao

(College of Electrical Engineering & Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P.R.China)

**Abstract:** To improve the low voltage ride through(LVRT) capability on double fed induction generator (DFIG), we developed a double closed-loop feedback control strategy combining voltage outer loop with current inner ring on the basis of STATCOM, and verified its effectiveness through simulation. In the simulations, STATCOMs were respectively installed at the terminal of wind generator, the high voltage side and the low voltage side of common coupling point. And then different depths of voltage drop were added to the grid, and different compensation effects were compared and discussed. Experimental results suggest that the compensation effect is the best when STATCOM is installed at the wind generator terminal. When the voltage drops, STATCOMs can provide power grid with reactive power quickly, raise the voltage of the wind turbine generator, and improve the LVRT capability of wind farms. In the aspects of STATCOM output reactive power and rising percentages of wind farm terminal voltage, the compensation effect of STATCOM is significant for different depths of voltage drop.

**收稿日期:**2016-07-03

**基金项目:**欧盟 FP7 国际科技合作基金(909880);国家自然科学基金(50907011);福建省杰出青年科学基金(2012J06012)。

Supported by International Scientific Cooperation Fund with European Union FP7(909880), the National Natural Science Foundation of China(50907011) and the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Fujian Province(2012J06012).

**作者简介:**李鸿南(1991-),男,福州大学硕士研究生,主要从事电力系统监测与故障分析方面研究。

金涛(联系人),男,福州大学研究员,博士生导师,(E-mail)jintly@fzu.edu.cn。

**Keywords:** STATCOM; low voltage ride through; feedback control; double fed induction generator; voltage drop

随着风力发电规模不断扩大,风电在电网系统中所占份额逐渐增加。当风电并网运行时,会发生很多种并网问题,其中最常见的问题之一就是电压跌落<sup>[1-2]</sup>。电压跌落时,风电机组机端电压难以建立,为了确保其安全,传统做法是将其从电网中切除。但当风电在电网中占有份额较多时,此种做法会使电网恢复稳定的时间大大增加,同时,电能质量将受到严重影响。因此,实际运行中对风电机组的并网运行规定了更高的技术要求,低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)是指电网发生故障等问题导致电压跌落时,风电场能够不切除机组、保持持续挂网运行的能力。理想情况下,它是指能向电网输入无功功率以恢复电压的能力<sup>[3-4]</sup>。

双馈感应风力发电机(double fed induction generator, DFIG)因其所需变流器容量占额定系统容量的比例小,适用风速范围广而得到了广泛使用<sup>[5-6]</sup>。但是,DFIG 仅凭自身的无功功率容量较难符合国际标准,而且当风速达到额定风速时,DFIG 将会丧失无功功率调节的能力,因此,必须对 DFIG 进行无功补偿<sup>[7-9]</sup>。文献[10]提出通过控制逆变侧过电流和直流侧过电压的方法来提高风电机组的 LVRT 能力;文献[11]中建立了电网的无功功率优化模型,以 DFIG 的无功极限作为条件进行无功功率的优化;文献[12]提出在转子回路中加入 Crowbar 撬棒电路;其他文献利用储能系统如超级电容储能<sup>[13]</sup>、飞轮储能<sup>[14]</sup>、超导储能<sup>[15]</sup>来储存过多的能量,抑制直流母线电压过高,提高 LVRT 能力。这种方法可以实现功率平滑输出,但系统的成本也会随之增加。

笔者从电网对并网风电机组的 LVRT 能力要求出发,结合 DFIG 的工作原理及基于电压和电流双闭环反馈控制策略的 STATCOM 无功补偿机理,建立含 DFIG 和 STATCOM 的仿真模型,分析比较将 STATCOM 安装在电网中不同点时,风力机的 LVRT 能力和电压跌落深度不同时,电网中投入 STATCOM 时的 LVRT 能力。

## 1 DFIG 与 STATCOM 控制策略

DFIG 的并网结构如图 1 所示,图中的箭头标明了系统的能量流向。

当 DFIG 运行时,可以通过调节发电机转速来控制转子的励磁频率,具体见公式(1)所示。

$$\omega_s = \omega_r \pm \omega_f, \quad (1)$$

式中: $\omega_s$  表示定子(电网)角频率, $\omega_r$  表示转子旋转角频率, $\omega_f$  表示转子上的励磁电压角频率。当  $\omega_r$  发生改变时,可以通过调节  $\omega_f$  使定子和转子绕组上的旋转磁场在空间上保持相对静止。

STATCOM 主电路是电压源型逆变器 VSC,交流侧通过变压器或者电抗器接入电网。在  $dq$  平面下,STATCOM 数学模型可以用式(2)表示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & \omega & \frac{K}{L} \cos \delta \\ -\omega & \frac{R}{L} & \frac{K}{L} \sin \delta \\ \frac{3K}{2C} \cos \delta & \frac{3K}{2C} \sin \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $I_d$ 、 $I_q$  为 STATCOM 输出电流  $dq$  分量, $K$  为逆变器的调制比, $\delta$  为  $U_s$  和  $U$  的相角差, $U_{dc}$  为 STATCOM 直流侧电容电压, $C$  为 STATCOM 的直流侧电容。设系统电压为  $\dot{U}_s$ ,VSC 输出电压为  $\dot{U}_1$ ,电抗为  $X$ ,STATCOM 无功功率调整原理图如图 2 所示<sup>[16]</sup>。

STATCOM 吸收的视在功率为:

$$\bar{S} = \dot{U}_s \dot{I}^* = \dot{U}_s \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_1}{-jX}. \quad (3)$$

STATCOM 所吸收的有功很小,可忽略不计,此时  $\dot{U}_s$  和  $\dot{U}_1$  之间的相角差是 0,则由式(3)可得出,STATCOM 所吸收的无功为:

$$Q = I_m(\bar{S}) = I_m(\dot{U}_s \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_1}{-jX}) = \frac{U_s - U_1}{X} U_s. \quad (4)$$

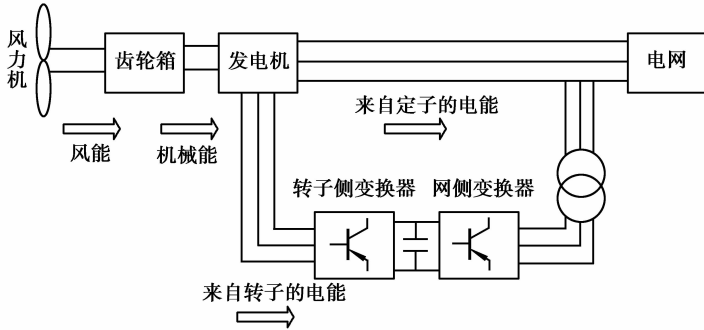


图 1 DFIG 并网结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of grid-connected DFIG

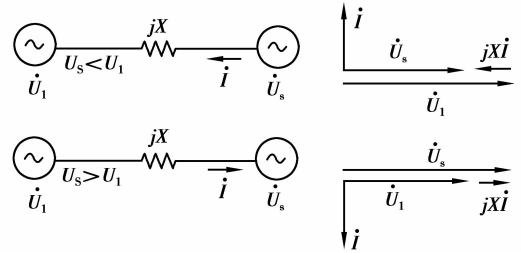


图 2 STATCOM 无功功率调整原理图

Fig.2 The reactive power regulation schematic diagram STATCOM

当系统电压跌落低于 STATCOM 的输出电压 (即  $U_s < U_1$ ) 时,电压滞后电流  $90^\circ$ ,  $Q < 0$ 。此时 STATCOM 输出无功用于支撑电网电压;当系统电  $U_s > U_1$ ,电压超前电流  $90^\circ$ ,  $Q > 0$ 。此时 STATCOM 吸收无功降低电网电压;当  $U_s = U_1$ ,STATCOM 处于空载模式。所以通过调整  $U_1$  的大小可以连续控制 STATCOM 所吸收的无功。

这里采用电压外环和电流内环相结合的双闭环反馈控制方式的 STATCOM,其控制模型结构框图如图 3 所示。

交流侧的电压外环控制电路通过交流电压测量模块得到  $U$  的正序分量  $U_{ac}$ 、相位角  $\theta$ 、 $U_d$  和  $U_q$ 。 $\theta$  作为电流测量模块和脉宽调节器的输入。 $U_d$ 、 $U_q$  输入电流调节器。 $U_{ac}$  通过和参考值  $U_{ref}$  比较得到交流电压调节器的输入,PI 调节器控制方程为

$$I_{qref} = (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s})(U_{ref} - U_{ac}), \quad (5)$$

式中: $K_{p1}$  和  $K_{i1}$  依次表示交流电压 PI 调节器的比例和积分系数。在 PI 调节器中引入 Droop 下垂控制,通过百分比值的设定,可以实现软化  $I_{qref}$  输出特性的功能。交流电压通过外环耦合到  $q$  轴分量,可以通过调节 STATCOM 的无功电流实现对  $U$  的稳压调控。

直流侧外环控制电路通过直流电压测量模块得到  $U_{dc}$  的瞬时值,通过和参考值  $U_{dcref}$  比较得到直流电压调节器输入值,PI 调节器控制方程为

$$I_{dref} = (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s})(U_{dcref} - U_{dc}), \quad (6)$$

式中: $K_{p2}$  和  $K_{i2}$  依次表示直流电压 PI 调节器的比例和积分系数。直流侧电压经过外环电路耦合到  $d$  轴分量,对 STATCOM 输出有功电流的调整可以实现对  $U_{dc}$  的稳压调控。

在内环电路中,交流侧电流  $I$  与相位角  $\theta$  通过电流测量模块得到  $I_d$  与  $I_q$ 。将两者作为电流调节器的输入。如图 4 所示为 STATCOM 中电流调节器控制结构框图。

由以上分析可知,STATCOM 的三相 PWM 变流器模型因  $dq$  变换产生了交叉融合项  $\omega I_d$  和  $\omega I_q$ ,需要对其进行解耦控制,此时双环 PI 调节器的控制方程为

$$\begin{cases} U_d^* = -(K_p + \frac{K_i}{s})(I_{dref} - I_d) + U_d + \omega L I_q, \\ U_q^* = -(K_p + \frac{K_i}{s})(I_{qref} - I_q) + U_q - \omega L I_d, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K_p$  和  $K_i$  依次表示双环 PI 调节器的比例和积分系数; $\omega$  为交流测电压角频率。电流内环控制电路可以使 VSC 输出电流实时根据交直流电压输出参考信号  $I_{dref}$  和  $I_{qref}$  的变化而快速变化。

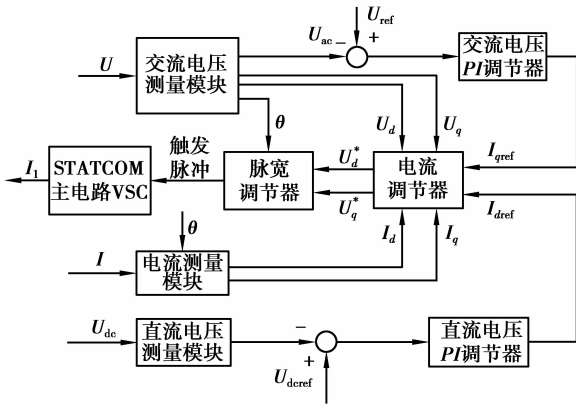


图 3 STATCOM 的控制模型结构框图

Fig.3 Control model structure diagram of STATCOM

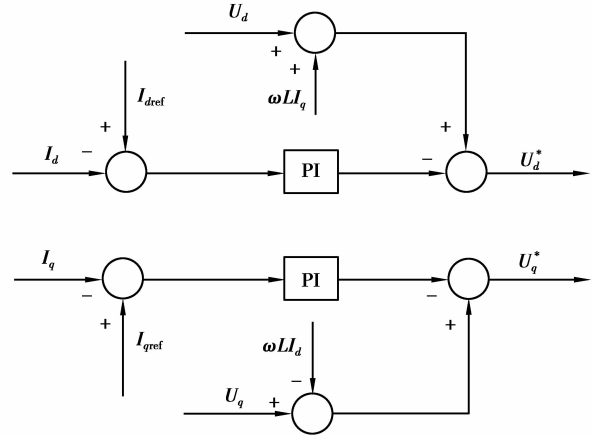


图 4 电流调节器的控制结构框图

Fig.4 The control structure diagram of current regulator

调制信号 ( $U_d^*$ 、 $U_q^*$ 、 $\theta$ ) 经过脉宽调制器后得到触发脉冲, 利用此触发脉冲控制 VSC 的 3 组桥臂开关的导通与关断及其作用时间实现对 VSC 的输出电压  $U_1$  的调节, 此时电抗  $X$  的电压

$$U_x = U_s - U_1 \tag{8}$$

假设系统电压  $U_s$  保持不变, 通过调节  $U_1$  相位和大小就可以调节电抗  $X$  的电压  $U_x$ , 进而改变输出电流, STATCOM 无功补偿也就得到实时调节。

## 2 仿真算例分析

仿真模型如图 5 所示, 风电场由 6 台 DFIG 组成, 经两次升压接入无穷大系统。

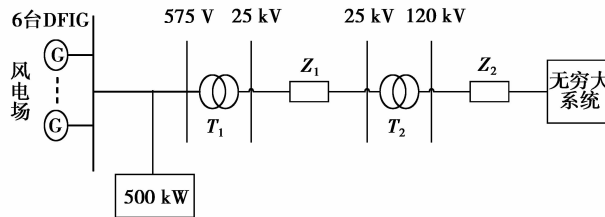


图 5 风电机组并网的仿真示意图

Fig.5 Schematic diagram of wind farm simulation

其中 DFIG 的参数设置如表 1 所示, 表中各参数标么值都是以额定视在功率  $S_N$  和额定电压  $U_N$  作为基准值的。

表 1 DFIG 的参数设置

Table 1 The parameters of DFIG

额定功率/MW	额定频率/Hz	定子额定线电压/V	直流母线额定电压/V	定子电阻/p.u.	转子电阻/p.u.	定子漏感/p.u.	转子漏感/p.u.	互感/p.u.	惯性常数/s	极对数
1.5	60	575	1 200	0.007 06	0.005	0.171	0.156	2.9	5.04	3

### 2.1 不同接入点的 STATCOM 仿真效果比较

利用 STATCOM 对 DFIG 进行无功补偿时, 其接入点不同将引起不同补偿效果。笔者提出 3 种不同安装方案。分别将 STATCOM 安装在风电机组机端、并网点低压侧 25 kV 节点处和并网点高压侧 120 kV 节点处。

DFIG 工作在恒功率因素控制方式, 电网在 15 s 时出现 50% 电压跌落且持续 0.5 s。风速保持在 14 m/s 不变。通过测量 STATCOM 发出无功功率、风电场机端电压及输出有功功率来比较安装方案补偿效果。仿

真对比效果如表 2、表 3 和图 6 所示。

表 2 不同方案补偿效果平均值对比表

安装方案	未安装	机端	低压侧	高压侧
输出无功 平均值/MW	0	2.281 5	1.951 8	1.515 9
机端电压 平均值/p.u.	0.479 2	0.788 3	0.691 5	0.504 3
输出有功 平均值/MW	5.330 0	8.523 5	7.586 2	5.602 6

表 3 不同方案补偿效果标准差对比表

安装方案	未安装	机端	低压侧	高压侧
输出无功 标准差	0	0.377 1	0.273 0	0.215 5
机端电压 标准差	0.081 9	0.025 1	0.045 2	0.077 2
输出有功 标准差	0.529 7	0.219 4	0.176 7	0.477 3

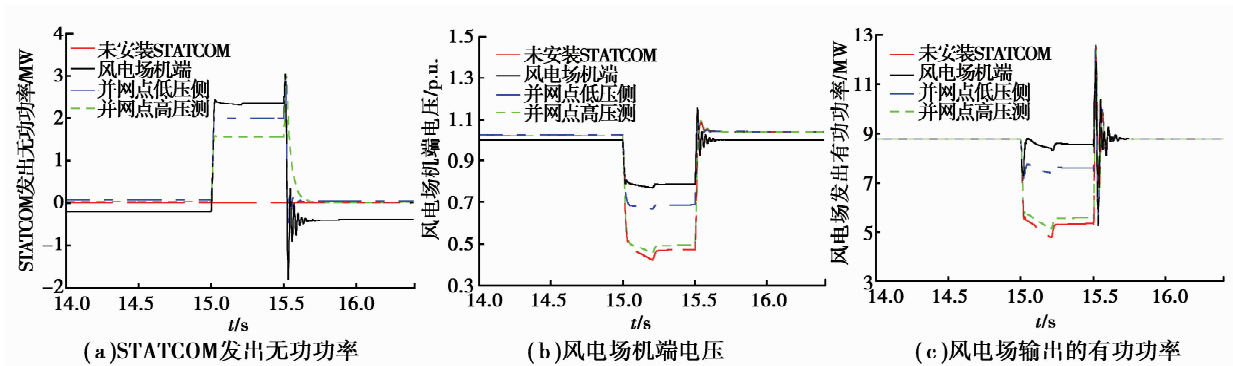


图 6 不同安装方案的仿真对比曲线

Fig.6 Comparison of different installation program simulation curves

从表 2 和表 3 可以看出,当 STATCOM 安装在风电场机端时,STATCOM 向系统输入 2.281 5 Mvar 的无功功率,风电场机端电压可以恢复到 0.788 3 p.u.,风电机组能输出 8.523 5 MW 的有功,接近于额定输出状态,此种安装方式补偿效果最好。同时,对于 3 种安装方案,风电场机端电压和输出有功功率的标准差在投入 STATCOM 后都明显减小,说明波动震荡幅度减少,能够平稳过渡,最终实现稳定输出。

由此可以得出结论:STATCOM 安装在风电机组机端时,补偿效果最好。此结论和文献[17]、文献[18]等采用的 STATCOM 安装点近似轨迹灵敏度方法得出的结论相近,说明了本文研究方法的正确性和先进性。

## 2.2 不同电压跌落深度 STATCOM 补偿效果分析

当电压跌落深度改变时,DFIG 的各动态响应的剧烈程度发生改变,STATCOM 的补偿效果也会随之变化。根据算例 2.1 的仿真结果,将 STATCOM 安装在风电机组机端,分别研究电网电压出现不同百分比电压跌落时的结果,下面将主要以 30% 和 70% 的电压跌落为例进行说明。

图 7 为电网出现 30% 电压跌落深度时,各监测参数的仿真曲线。当电压跌落 30% 时,STATCOM 可以向电网输入 2.720 0 Mvar 的无功功率将风电场机端电压抬到 0.988 1 p.u.,风电机组输出有功出现波动后趋于平稳达到了 8.714 4 MW,整体补偿效果显著。

图 8 为电网出现 70% 电压跌落深度时,各监测参数的仿真曲线。电压跌落达到 70% 且未投入 STATCOM 时,为了维持确保风电机组的安全,风电机组在 15.47 s 时被迫退出运行,其输出有功功率降为零。若此时投入 STATCOM,能向电网提供 1.539 2 Mvar 的无功将出口机端电压抬高到 0.538 9 p.u.,实现风电场的低电压穿越。

从图 7、图 8 和表 4 可以看出,STATCOM 发出的无功方面分析,电压跌落 30% 时输出的无功最多,机端电压被抬升了最高,补偿效果显著。从机端电压上升的百分比方面分析,随着电压跌落的不断加深,虽然 STATCOM 发出的无功逐渐减少,但机端电压上升的百分比却逐渐增加。这是因为 STATCOM 装置输出的无功功率与系统电压成比例关系。随着系统电压的降低,每抬升单位百分比的电压所需要吸收的无功逐渐降低。

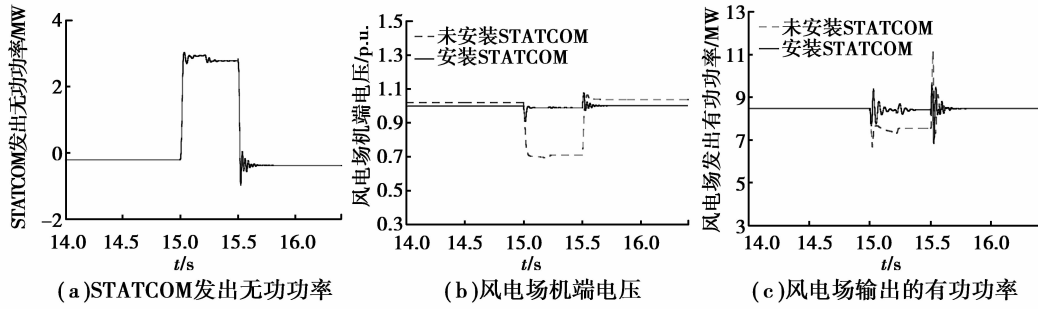


图 7 30%电压跌落的仿真曲线

Fig.7 Simulation curves of 30% voltage drop

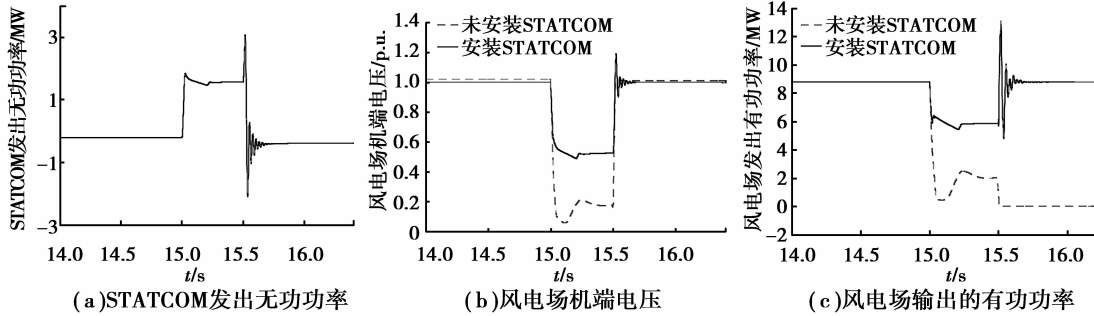


图 8 70%电压跌落的仿真曲线

Fig.8 Simulation curves of 70% voltage drop

除以上 30%、70%的分析外,还进行了电压跌落分别为 10%、40%、60%等的电压跌落仿真,得出的结论与前面阐述的结论一致,具体数据见表 5。

表 4 不同电压跌落时仿真结果对照表

Table 4 Comparison of simulation results under different voltage drops

跌落深度	STATCOM 发出 无功功率/MW	机端电压/p.u.			有功功率/MW	
		未安装	安装后	上升率/%	未安装	安装后
30%	2.720 0	0.715 4	0.988 1	38.12	7.821 9	8.714 4
70%	1.539 2	0.185 5	0.538 9	190.51	1.952 3	5.918 9

表 5 不同电压跌落时仿真结果对照表

Table 5 Comparison of simulation results under different voltage drops

跌落深度	STATCOM 发出 无功功率/MW	机端电压/p.u.			有功功率/MW	
		未安装	安装后	上升率/%	未安装	安装后
10%	0.808 6	0.919 9	0.996 5	8.33	8.753 3	8.773 5
40%	2.614 9	0.603 9	0.900 9	49.18	6.664 2	8.681 1
60%	1.944 6	0.288 1	0.674 9	134.26	1.528 7	7.357 9

综上所述可以得出结论,在风电场机端出口安装 STATCOM 后,对于不同电压跌落深度,从不同角度分析,其补偿效果都较为显著,输出的有功功率得到大大提升,风电机组的低电压穿越 LVRT 能力得到有效提高。

### 3 结 论

研究了采用基于电压外环与电流内环相结合双闭环反馈控制策略的 STATCOM,搭建含 DFIG 和 STATCOM 的仿真模型,分析了 STATCOM 在提高风电机组 LVRT 能力和电压暂态稳定性中所发挥的积极作用。实验结果表明:

1)将 STATCOM 安装在风电机组机端时可以向电网提供大量无功,使电压上升恢复正常,此安装方案补偿效果最好,此时风电场 LVRT 能力得到大大提升。

2)从 STATCOM 输出无功大小和风电机组机端电压被抬升的比例两方面分析,对于不同深度的电压跌落,STATCOM 的补偿效果都较为显著,风电机组 LVRT 能力提升效果明显,能输出理想有功。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Babaie Lajimi A, Asghar Gholamian S, Shahabi M. Modeling and control of a DFIG-based wind turbine during a grid voltage drop[J]. *Engineering Technology and Applied Science Research*, 2011,1(5): 121-125.
- [ 2 ] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].*中国电机工程学报*,2010,30(25): 1-9.  
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2010, 30(25): 1-9.(in Chinese)
- [ 3 ] Rahimi M, Parniani M. Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators [J].*IEEE Transactions on Energy Conversion*,2010,25(3): 873-93.
- [ 4 ] Abdel B, Nasiri O. A dynamic LVRT solution for doubly fed induction generators [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25 (1):193-196.
- [ 5 ] Vrionis T D, Koutiva X I, Vovos N A. A genetic algorithm-based low voltage ride-through control strategy for grid connected doubly fed induction wind generators [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1325-1334.
- [ 6 ] Mohsen R, Mostafa P. Low voltage ride-through capability improvement of DFIG-based wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2014, 60: 82-95.
- [ 7 ] 蔚兰,陈国呈,宋小亮,等.一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略[J].*电工技术学报*,2010,25(9): 170-175.  
YU Lan, CHEN Guocheng, SONG Xiaoliang, et al. A low voltage ride-through of strategy for doubly fed induction generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(9): 170-175.(in Chinese)
- [ 8 ] Kasem A H, EI-Saadany E F, EI-Tamaly H H, et al. An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2008,2(4): 201-214.
- [ 9 ] Asit Mohantya, Meera Viswavandyab, Prakash K. Rayc, et al. Stability analysis and reactive power compensation issue in a microgrid with a DFIG based WECS[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2014, 62: 753-762.
- [10] 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. Coordinative strategy for automatic voltage control of wind farms with doubly fed induction generators [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(7): 29-35.(in Chinese)
- [11] 赵晶晶,符杨,李东东.考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J].*电力系统自动化*,2011,35(11): 33-38.  
ZHAO Jingjing, FU Yang, LI Dongdong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35 (11): 33-38.(in Chinese)
- [12] Chondrogiannis S, Barnes M. Specification of rotor side voltage source inverter of a doubly-fed induction generator for achieving ride-through capability [J]. *IET Renew Power Generation*, 2008, 2(3): 139-150.
- [13] Zou H P, Yu P, Sun H, et al. Fault ride through of doubly fed induction generator wind turbine based on super capacitors energy storage [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 130/131/132/133/134: 2851-2854.
- [14] 孙春顺,王耀南,李欣然.飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J].*中国电机工程学报*,2008,28(29): 111-115.  
SUN Chunshun, WANG Yaonan, LI Xinran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(29):111-116.
- [15] Hasanién, Hany M, Muyeén S M. Particle swarm optimization-based superconducting magnetic energy storage for low-voltage ride-through capability enhancement in wind energy conversion system [J]. *Electric Power Components and Systems*, 2015, 43(11): 1278-1288.
- [16] 朱永强,迟永宁,李琰.风电场无功补偿与电压控制[M].北京:电子工业出版社,2010.  
ZHU Yongqiang, CHI Yongning, LI Yan. *Reactive power compensation and voltage control for wind farms*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.(in Chinese)
- [17] 李海琛,刘明波,林舜江.考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化[J].*电力系统保护与控制*,2011, 39(5): 69-80.  
LI Haichen, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Selection of STATCOM's installation site and capacity optimization considering transient voltage security [J]. *Power System Protection and Control*, 2011,39(5): 69-80.(in Chinese)
- [18] 季亮,季春,任凯,等.基于量测轨迹及近似轨迹灵敏度的 STATCOM 安装地点和安装容量的选择[J]. *电力与能源*,2015, 36(2): 174-178.  
JI Liang, JI Chun, REN Kai, et al. Selection of STATCOM installation site and capacity based on measured trajectory and approximate trajectory sensitivity[J]. *Power and Energy*, 2015, 36(2): 174-178.(in Chinese)