

Study on Low Voltage Ride through of VSCF Wind Generator System with Large Capacity

Wenhui Wu

School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013

Email: whwu777@163.com

Abstract: With the continuous expansion of wind farms installed capacity, wind farms impact on power system voltage will become increasingly evident. From the VSCF wind turbine characteristics, this article was built the model of VSCF wind turbine to the grid based on Matlab / Simulink. This article analyzes the process of wind turbine output increases, the maximum output, the output reduction process. It analyzes wind turbine bus voltage, current, active power, reactive power and wind turbine inverter DC side voltage and other parameters change when the system bus voltage drops. It proposed low-voltage protection setting program. It analyzed to improve the wind turbine characteristics of low voltage power through (LVRT) wind turbines with a combination of measures across the power grid and wind turbine.

Keywords: VSCF wind generator; low voltage ride through; simulation study; combination of measures

大型变速恒频风电机组的低电压运行分析

吴文辉

华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西南昌, 中国, 330013

Email: whwu777@163.com

摘要: 随着风电场装机容量的不断扩大, 风电场对电网的电压的影响将越来越明显。从变速恒频风电机组特性出发, 建立了基于 Matlab/Simulink 的变速恒频风电机组并网模型, 分析了风力机出力增大过程中、最大出力时以及出力减少过程中, 系统母线电压跌落时风力机母线电压、电流、有功、无功和风力机逆变器直流侧电压等参数变化情况, 提出了低电压保护整定方案, 提出了提高风电机组低电压穿越特性的电网与风电机组的组合措施。

关键词: 变速恒频风电机组; 低电压穿越; 仿真分析; 组合措施

1 引言

随着风电场装机容量的不断扩大, 高风速期间, 由于输电网故障引起的大量风电切除会导致系统潮流的大幅变化甚至可能引起大面积的停电, 而带来系统频率的稳定问题和电压的崩溃。因此风力机低电压穿越能力是必需的, 我国已经制定了风电场低电压的最小限制^[1], 如图 1 所示。当端电压跌至额定电压的 20% 时要求风力发电机能够维持运行 625ms, 当风力发电机出口电压在其额定电压的 90% 时, 能够维持运行 2s, 当风力发电机出口电压在其额定电压的 90% 以上时要求风力发电机能够持续运行。

国内外目前对双馈感应发电机(DFIG)风电系统低电压穿越特性的研究较多^{[2][3][4]}, 大部分文献中并没有

考虑电网电压跌落时系统的应对措施^{[5][6][7]}。由于现有的大型变速恒频风电机组的 LVRT 功能, 受制于电力电子器件自身的过流能力。无法单独实现标准要求的 LVRT。因此, 研究系统故障时风电机组本身的低压穿越能力, 从电网与风电机组两方面采取有效的组合措施, 以此确定低电压保护方案, 确保其安全。

2 变速恒频风电机组数学模型

变速恒频风力发电机的原理图如图2所示。

2.1 风力机数学模型

风力转矩方程:

$$T_{\sigma} = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 v_{\sigma}^2 C_q \quad (1)$$

$$C_p = \frac{0.22}{\gamma} \left(\frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda} \quad (2)$$

(1)、(2) 式中, T_m 为风力机的机械转矩; ρ 为空气相对密度; R 为风力机转子半径; v_m 为风速; C_p 为风机的转矩系数, 是 γ 和 β 的函数; $\gamma = \omega R / v_m$ 为叶尖速比; β 为桨叶的桨距角。 λ 为 γ 和 β 的函数。

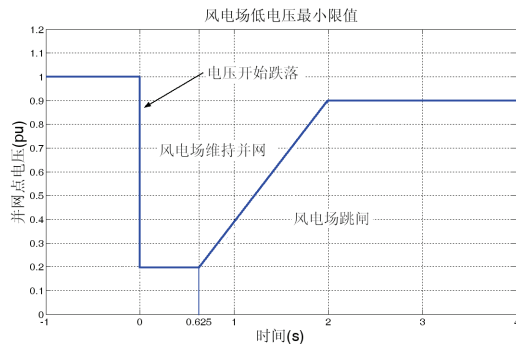


Figure 1. China's wind power low-voltage limit the minimum
图 1. 中国风电场低电压的最小限制

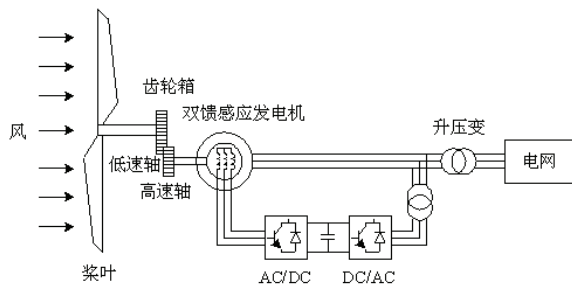


Figure 2. VSCF Wind Power Generator schematic
图2. 变速恒频风力发电机的原理图

2.2 风力发电机的数学模型

变速恒频风力发电机的电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_s + R_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & pL_s + R_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & pL_r + R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & pL_r + R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

风力发电机的磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

双馈电机转子的运动方程为:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{pJ_{eq}} (K_g T_{lss} - T_e) \quad (5)$$

发电机定子侧有功和无功功率方程:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{L_m}{L_s} u_{ds} i_{dr} \\ Q_s = \frac{1}{L_s} u_{ds} \left(\frac{u_s}{\omega_1} - L_m i_{dr} \right) \end{cases} \quad (6)$$

(3) ~ (6) 式中, u_{ds} 和 u_{qs} 分别为定子 d 轴和 q 轴电压分量, u_{dr} 和 u_{qr} 分别为转子 d 轴和 q 轴电压分量; i_{ds} 和 i_{qs} 分别为发电机定子的 d 轴和 q 轴电流分量, i_{dr} 和 i_{qr} 分别为发电机转子的 d 轴和 q 轴电流分量; P 为转子的极对数; R_s 为定子电阻, R_r 为转子电阻; L_s 和 L_r 分别为定子和转子电感; L_m 为互感; ω_r 为电角频率; ψ_{ds} 和 ψ_{qs} 分别为定子的 d 轴和 q 轴磁链; J_{eq} 为风力机的等效转动惯量; K_g 为齿轮箱变比; T_{lss} 为齿轮低速箱机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω_1 为发电机转子的转速。

2.3 风力机组并网模型

风电场经升压变通过输电线路并入电网, 如图3所示, 其电压方程为:

$$\dot{U}_{B1} = \dot{U}_{B3} + (R + jX)\dot{I} \quad (7)$$

(7) 式中 R 、 X 为母线 B_1 与母线 B_3 间的等值电阻和电抗。电压的稳定一般由电网的有功和无功的平衡决定, 电网要求风电机组的可控功率因数变化范围应在 -0.95~0.95 之间, 风电场的无功功率的调节范围和响应速度, 应满足风电场并网点电压调节的要求, 原则上风电场升压变电站高压侧功率因数按 1.0 配置。

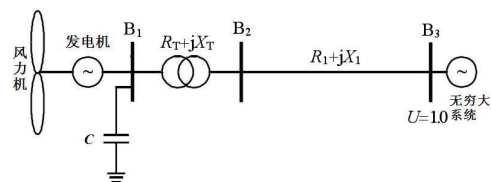


Figure 3. Schematic diagram of wind turbine grid
图3. 风力机组并网示意图

3 风力机低电压继电保护的整定

要确保风电机组在电压跌落时具有低电压穿越特性, 首先是不能切机。低电压保护整定值如下: $U < 0.2pu$ 瞬时跳闸; 当 $0.2pu \leq U \leq 0.9pu$ 时, 动作延时为 $(1.964U + 0.232)s$; 当 $U > 0.9pu$ 时, 风力机不跳闸。

4 电压跌落时风力机参量变化仿真分析

风力机不跳闸,电网发生电压跌落对风电机组产生重大影响,主要表现在电气功率的突然减少,机械功率瞬间大于电气功率,将使转子加速;暂态过程导致发电机中出现过流,可能损坏器件;附加的转矩、应力可能损坏机械部分。

仿真模型如图4所示。一个9MW的风力发电场由6台1.5MW风力机组构成,先升压到35kV配电系统,再通过一个30km的线路,连接到110kV电网。

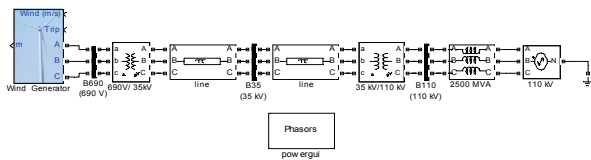


Figure4. LVRT of the wind turbine simulation model
图4. 风力机组低电压穿越仿真分析模型

系统110kV母线B₃电压跌落40%,持续时间1s,分别分析风力机出力在增大过程中、风力机运行在最大出力时、风力机出力在减少过程中,风力机690V母线B₁电压、电流、有功、无功和风力机逆变器直流侧电压变化分别如图5、图6、图7所示。

系统电压跌落期间,风电机组出口电压跟随跌落,出口负载受影响;网侧电流突增,在额定出力时电流增大引起风力机定子过流;风电机组有功功率突降;无功功率瞬时陡增至5Mvar;风力机逆变器直流侧电压振荡,最高至1350V。

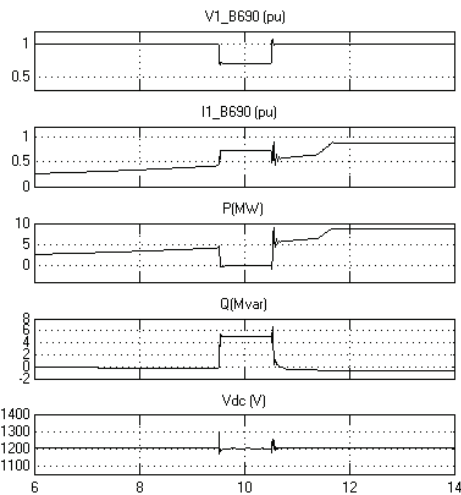


Figure5. LVRT of the wind turbine during output increased
图5. 风电机组出力增大过程中的低电压穿越

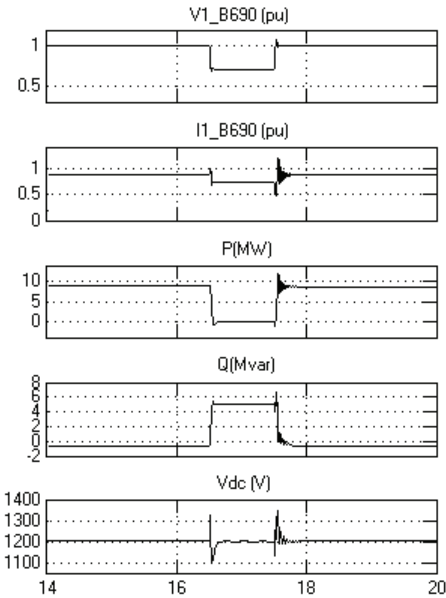


Figure6. LVRT of the wind turbine at the rated output
图6. 风电机组出力在额定出力时的低电压穿越

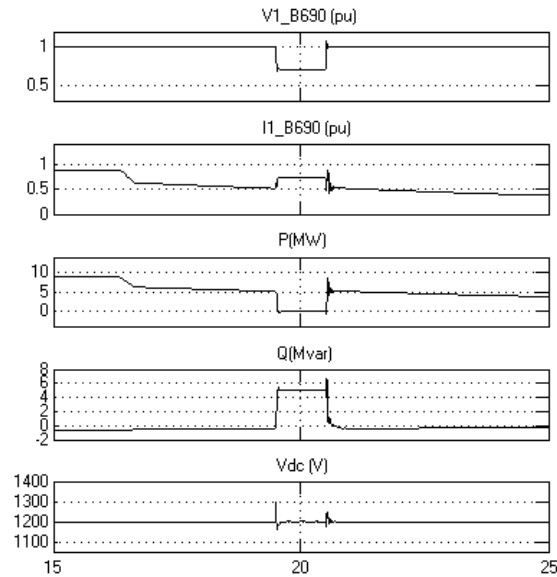


Figure7. LVRT of the wind turbine during output reduced
图7. 风电机组出力减少过程中的低电压穿越

电压恢复后,经过短时振荡,风电机组出口电压恢复额定;风电机组有功功率增加并恢复原来的趋势;无功功率下降,波动后很快恢复正常;转速下降恢复正常;风力机逆变器直流侧电压经振荡后恢复额定。

图5是风速从8m/s上升到14m/s的过程中,桨距角为0°,电压跌落过程中未变;图6时风速为14m/s,电

压跌落前桨距角为 2° ，以限制机械动力，电压跌落时桨距角进一步增大至 5° ；图6时风速从 14m/s 下降到 8m/s ，桨距角为 0° 。

5 提高风电机组低电压穿越特性的组合措施

故障点离风力机的电气距离越远，对风电机组运行影响越小；考虑到系统为有限容量系统，接入点短路容量越大，电网受故障点影响越小，风电场容量很大时有必要接入 220kV 系统。电压跌落时需要无功功率的突增，节点的无功功率对电压起到支撑作用，小容量风电机组用并联电容器，大容量风电机组并接静止无功补偿器(SVC)或静止同步补偿器(STATCOM)。动态发出无功功率，支撑电网电压。

有功功率的下降，引起机械与电气功率的不平衡，影响机组稳定运行，一方面可以采取电气制动的措施，在风力发电机附近自动地迅速接入一个制动电阻，以消耗发电机的有功功率，减小发电机组的不平衡功率。制动电阻可以采取串联接入(如图8)或并联接入的方式，接入地点可以是发电机电压母线或高压母线。电压跌落时，辅助触头K2闭合，主触头K1断开，电阻R串入电路，起到消耗电功率的作用。还可以在变压器中性点经小电阻接地，对接地短路故障起到电气制动的作用。尽快恢复电气有功出力。

另一方面，要减少风力机的机械功率，可以增大桨叶的桨距角 β ，即进行桨距角控制。控制的速率应考虑附加的转矩、应力可能损坏机械部分。

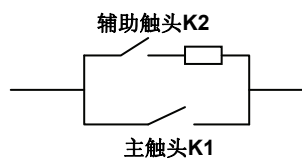


Figure8. Brake series resistance
图8. 串联电阻制动方式

暂态过程导致发电机中出现过流，可能损坏器件，为此，需要加强发电机系统的保护，在定子回路接入电阻加以保护，对于转子过流，用转子短路器(Crow-bar)保护变频器。只是旁路转子变流器，定子侧变流器仍挂网运行。Crow-bar短接时间很短， $60\sim 80\text{ms}$ ；Crow-bar的电阻可以阻尼转子磁链，当转子磁链衰减后就可以退出，此时稳态短路电流已不是

很大。Crow-bar退出后，变频器重新同步，控制能力恢复。

风电机组的LVRT功能，受制于电力电子器件自身的过流能力，采用大容量二极管与标准IGBT并联，故障过程中，IGBT闭锁，二极管导通，短路引起的冲击电流经二极管流过，用二极管导通大的暂态过电流以保护IGBT，提高风电机组的LVRT性能。

导致DC-Link的电容电压升高，采用直流侧的卸载单元，常规的卸载单元由功率器件串联电阻构成，如Buck电路与电阻构成方案，消耗电容的充电功率，稳定直流侧电压。

6 结语

新的电网规则要求大型变速恒频并网风电系统具有低电压穿越能力，通过电网和风力机的组合保护措施，使电网电压跌落发生及恢复时，变速恒频风电机组仍能保持低电压并网安全运行。

References (参考文献)

- [1] State grid corporation of enterprise standard (Q/GDW392-2009): Wind power technology provides, China Electric Power Press, 2010 (Ch).
国家电网公司企业标准(Q/GDW392-2009): 风电场接入电网技术规定, 中国电力出版社, 2010.
- [2] Morren J, de Hann S W. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [3] Li Mei, Li Jianlin, Zhao Bin, et al. Response of wind turbine with DFIG during grid voltage dip[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(22): 5243-5245(Ch).
李梅, 李建林, 赵斌, 等. 双馈感应式风力发电机的电压跌落响应[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5243-5245.
- [4] Abbey C, Joos G. Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA, 2005, 2: 1901-1907.
- [5] LI Jian-lin, XU Hong-yan, LIANG Liang, et al. Strategy to cope with the VSCF-DFIG during voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 65-68(Ch).
李建林, 许鸿雁, 梁亮, 等. VSCF-DFIG在电压瞬间跌落情况下的应对策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 65-68.
- [6] WU Yi-chun, DING Ming. Simulation Study on Voltage Fluctuations and Flicker Caused by Wind Farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 125-127.
吴义纯, 丁明. 风电引起的电压波动与闪变的仿真研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 125-127(Ch).
- [7] Wei Xiaoguang, Tang Guangfu, Wei Xiaoyun, et al. Study of VSC-HVDC controller to mitigate voltage fluctuation caused by wind farm integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 150-156(Ch).
魏晓光, 汤广福, 魏晓云, 等. VSC-HVDC控制器抑制风电场电压波动的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 150-156.