

Research on Pitch Control Strategy Supporting Low Voltage Ride-through

Zhanglong Jing¹, Bin Duan¹, Yongxin Su¹, Tianran Lin¹, Xin Long²

¹Information engineering college, XiangTan University,XTU, Hunan Province, China

²Hara XEMC Windpower Co. Ltd, XEMC, Hunan Province, China

Email: jzhlmg104@163.com, db61850@163.com

Abstract: To improve the level of the MW Direct-drive wind turbines and grid security and the operation stability, study the operation characteristics of MW-class wind turbines in voltage drop and improve its ability about low voltage ride through, this paper proposes a variable pitch control scheme support of low voltage ride through about MW-class wind turbines, which use unloading load circuit to improve the ability about low voltage ride through. When voltage drop with switching pitch control state it will reduce the absorption energy to limit the input of power converter, with the comprehensive consideration about changes sensitivity of pitch angle and output power, unloading load power consumption ability and reaction ability of pitch control devices to realize the balance of power converter ends, thus effectively improve power system of the margin about low voltage ride through. Through systematic analysis it shows that the proposed control schemes in voltage drop can effectively improve the wind turbines safety and the ability about low voltage ride through.

Key words: wind turbine; pitch control; low voltage ride through; control strategy

支持低电压穿越的变桨距控制策略研究

敬章龙¹, 段 斌¹, 苏永新¹, 林天然¹, 龙 辛²

¹湘潭大学信息工程学院, 湖南省湘潭市, 中国, 411105

²湘电风能有限公司, 湖南省湘潭市, 中国, 411105

Email: jzhlmg104@163.com, db61850@163.com

摘 要: 为提高兆瓦级直驱风电机组并网的安全性及所并电网的运行稳定性, 研究电网电压跌落时该机型的运行特性以及其低电压穿越能力的提高, 文中提出一种适用于采用卸荷负载提高低电压穿越能力的兆瓦级直驱机组变桨距控制方案。通过在电压跌落时切换变桨状态降低机组吸收的风能来限制输入至变频器的功率, 通过在电压跌落时综合考虑系统输出功率相对桨距角变化灵敏度、卸荷负载的功率消耗能力及变桨机构的反应能力实现变频器两端功率平衡, 从而有效提高发电系统的低电压穿越裕度。经系统分析表明, 所提出的控制方案在电压跌落下可有效提高机组的安全性及低电压穿越能力。

关键词: 风电机组; 变桨距控制; 低电压穿越; 控制策略

1. 引言

电压跌落期间风电机组的主要问题在于功率不匹配导致直流侧电压的上升。目前有三种典型的直流侧crowbar 解决方案: 采用卸荷负载^[1]; 增加储能装置增大直流侧储能容量^[2]; 网侧增加辅助变换器^[3]。从经济性考虑, 采用卸荷负载结构简单, 响应速度快, 可靠性高, 目前直驱型风电机组多采用基于卸荷负载的低

电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)方案。

作为风机控制系统的关键部分, 变桨距具有三个作用: 启动时加大启动力矩, 有利于机组快速启动; 额定风速以下, 提供最佳力矩, 使机组捕获最大风能; 额定风速以上优化功率输出, 降低机组载荷。变桨距可从根本上减小风机的输入功率, 有利于电压跌落时的功率平衡^[5]。当电网电压跌落持续时间较长时, 会造成卸荷电阻产生大量热能带来安全隐患, 可利用变桨距限制风电机组的输入功率^[4]。文献[7]指出故障时间 0.5s、恢复时间 3s 时利用 STATCOM (Static synchronous Compensator) 和变桨距控制结合,

资助信息: 国家自然科学基金项目(50677058); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA012476); 湖南省教育厅重点科学研究资助项目(08A076); 湖南省教育厅资助科研项目(06C842); 湖南省自然科学基金资助项目(08JJ6031)。

STATCOM 提供无功功率以维持恒压, 变桨距控制使风轮转速维持恒定, 可较好地提高机组的低电压穿越能力。但其对低电压穿越过程变桨距的控制策略没有进行研究。文献[6]提出电压跌落时利用紧急变桨指令触发变桨系统工作至紧急运行状态。但对于紧急变桨指令及紧急状态值的确定没有详细研究。

本文在文献[6]的基础上, 结合国内新出台的低电压穿越要求, 对变桨距控制在其中能起的作用进行分析, 提出一种适用于采用卸荷负载提高低电压穿越能力的兆瓦级直驱风电机组变桨距控制方案。

2. 低电压穿越要求及变桨距控制要求分析

图 1 是国家电网公司对接入电网的风电场的低电压穿越要求。

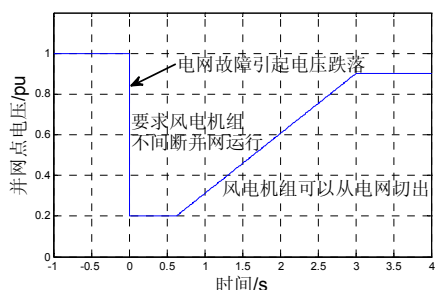


Figure 1. The requirement on LVRT for consideration in China

图 1. 我国正在审议的低电压穿越要求

2.1 跌落时段 (0 至 625ms)

并网点电压跌落一发生, 网侧逆变器的交流电压从标幺值 1 跌落至 0.2, 增加了无功功率输出, 同时输出与跌落电压成比例的有功功率, 而机侧变频器仍保持输入功率不变, 导致直流母线电压不受控制的上升。卸荷负载电路此时发挥作用, 在短时间内可解决直流母线电压的泵升^[8]。时间一长, 卸荷负载电路中开关和电阻的温度将会升高到难以接受的程度。增大桨距角使捕获风能减小, 减轻能量失衡, 可使卸荷电阻消耗的能量降低至安全域内。因此, 本阶段的变桨距系统主要任务是及时减少风能捕获, 降低机械转矩, 减小有功功率输出, 保证机组稳定运行。

2.2 恢复时段 (0.625 至 3s)

并网点电压在电压轮廓线以上, 机组保持并网运行。此时直流母线电压仍旧偏高。变桨距系统在此阶段需根据卸荷负载电路状况、并网点电压恢复速度及国家规定的有功恢复速度要求控制机组的有功功率输出, 一方面保证机组安全、稳定并网运行, 一方面使

机组满足电网有功需求, 加快电网的恢复。

2.3 较稳定时段 (3s 后)

并网点电压接近于正常值, 由于变频器能够承受此状况, 机组恢复至正常运行, 变桨距按其正常运行。

3. 支持低电压穿越的变桨距控制策略

永磁直驱型风电机组主控制策略为: 额定风速以下恒尖速比控制, 额定风速以上恒功率控制。在电网电压正常情况下, 变桨过程如下: 机组复位时, 桨叶按 1.5°/s 由 90°转动至 86°。当 10 分钟平均风速达到切入风速前且变桨命令发出, 桨叶按 2°/s 由 86°变桨至 30°, 叶轮开始启动。平均风速升至切入风速且满足并网要求时, 执行发电变桨算法, 风速低于额定风速, 桨距角保持在 3°不变, 捕获最大的风能; 高于额定风速, 改变桨距角以跟踪额定功率, 降低机组载荷。

目前在高于额定风速情况下变桨距有 3 种控制方法: 桨距角环控制、功率环控制和转速环控制^[6]。桨距角环控制为最基本的方法, 在实际应用中并不采用。功率环控制特点为: 功率偏差作为输入量驱动变桨系统, 适用于定速变桨风电机组。转速环控制原理是转速偏差驱动变桨系统工作, 适用于变速变桨风电机组。本文研究的永磁直驱型风电机组属于变速变桨风电机组, 故采用此方法。

3.1 低于额定风速

当检测或预测到并网点电压跌落时变桨距有以下三种可行控制策略:

3.1.1 额定值切换

保持主控制策略不变, 降低变桨系统的额定风速, 在较低的额定转速和额定功率下实现恒功率变桨距控制, 从而降低输出功率。由于采用恒功率控制, 机组有功功率降低幅度有限, 且增加了控制系统的复杂性。

3.1.2 转速控制

在功率——转速曲线 (图 2) 中某一对应的风速曲线上减小转速, 使机组偏离恒尖速比运行, 进而降低风能利用系数, 使输出功率降低。风的随机性使得这一策略控制更为复杂。

3.1.3 紧急桨距角设定

在电压跌落发生或即将发生时控制器确定减少卸荷电阻要消耗的功率, 通过计算得到桨距角紧急设定值及变桨速度, 变桨距系统按得到的紧急设定值及变

桨速度运行, 以使卸荷电阻消耗功率降低。此策略控制简单、执行方便, 且实用性强。本文采用此策略。

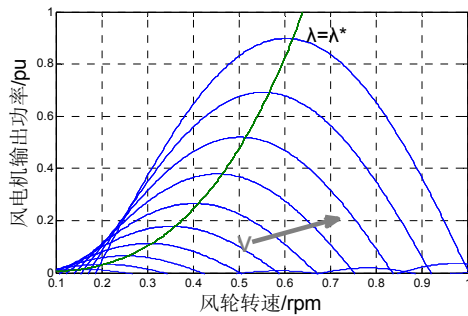


Figure 2. The curve about constant tip speed ratio below the rated wind speed

图 2. 低于额定风速时的恒尖速比控制曲线

3.2 高于额定风速

当检测或预测到并网点电压跌落时, 由于机组已工作在额定状态, 变桨距系统将会增大桨距角以限制功率输出, 采用额定值切换策略 (3.1.1) 已显得多余。此时变桨距系统应以尽可能大的变桨速度增大桨距角, 快速地降低输出功率, 同时为了确保机组并网稳定运行和电网的快速恢复, 需变桨至合适的桨叶角度。采用紧急桨距角设定策略可方便地实现这一点。

综上所述, 本文采用如下控制策略: 并网点电压正常时机组按常规变桨策略运行, 即低于切入风速时改变桨距角实现机组的快速启动、高于切入风速低于额定风速时保持最优桨距角不变 (3°) 及高于额定风速时采用转速环控制实现最佳跟踪额定功率; 并网点电压跌落时, 低于切入风速时仍改变桨距角实现机组的快速启动, 高于切入风速低于切出风速时采用紧急桨距角设定以降低卸荷电阻的消耗功率 (图 3)。

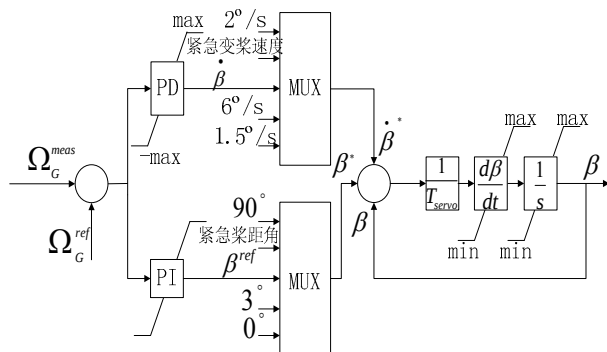


Figure 3. Principle diagram about pitch control

图 3. 变桨距控制原理图

3.3 紧急桨距角与变桨速度的确定

从机组安全角度考虑, 设 U_G 为电网点电压, 变频器最大容许输出电流为 $I_{\max}$, 其效率为 η , 机组传动系统效率为 k , 电网电压跌落前机组的发电机转速为 Ω^{ref} , 根据功率平衡, 通过式 (1) 和 (2) 构成的方程组, 得到紧急桨距角 β_E 。

$$\frac{U_G I_{\max}}{\eta k} = \frac{1}{2} \rho V^3 A \left[c_l \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \frac{\Omega^{\text{ref}} R}{V} \right] \quad (1)$$

条件: $U_G \times I_{\max} / (\eta \times k) \leq P_G$, P_G 为机组输出功率

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{\Omega^{\text{ref}} R}{V} + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

针对机组不同运行状态下, 电网电压跌落时发电机转速的高低直接影响机组的振荡程度, 从而导致更严重的损坏。低风速时, 发电机转速较低, 机组输出功率对桨距角变化灵敏度在几 kw° 至几百 kw° 之间, 此时紧急变桨速度不必统一取极限值, 利用式 (3) 确定即可。高风速下, 发电机转速已在额定状态下, 若再进一步增加将严重影响机组安全稳定运行, 因此需以最快的速度变桨以消除可能产生的安全隐患。

$$\dot{\beta} = \begin{cases} \frac{V \dot{\beta}_{\max}}{V_{\text{额}}} & \frac{\Delta p}{\Delta \beta} \leq 100 \\ \dot{\beta}_{\max} & \frac{\Delta p}{\Delta \beta} > 100 \end{cases} \quad (3)$$

4. 含低电压穿越处理的变桨距控制状态机

如图 4, 变桨距控制状态机共 10 个状态: 手动叶片变桨模式、紧急状态、变桨初始化、等待位置变桨、启动位置变桨、发电状态变桨、跌落时段变桨、恢复时段变桨、较稳定时段变桨和停止变桨。

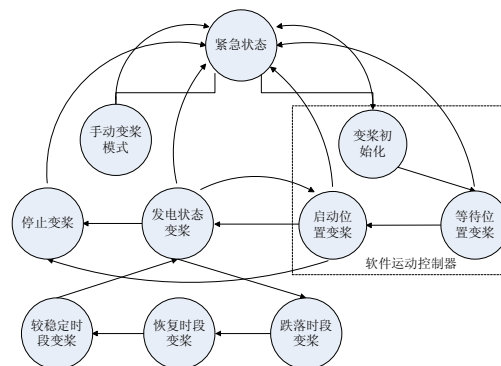


Figure 4. Pitch control state transition diagram of wind turbine during operation

图 4. 机组运行时变桨距控制状态转换图

4.1 发电状态变桨

该状态下并网点电压正常, 利用 (4) 作为触发条件。机组执行正常变桨距控制策略。(式 (4) 至 (7) 都是在假设并网点电压突变、闪变、谐波等满足相应国家标准下建立的。)

$$|V - V_{ref}| < \varepsilon_n \quad (4)$$

式中: V 为当前电网电压值; V_{ref} 为电网电压额定值; ε_n 表示机组正常发电时电压波动范围最大值。

4.2 跌落时段变桨

此时电网电压为额定值的 20% 附近, 由 (5) 判断。执行第三节控制策略, 在电压低落开始后一个周期桨距角控制器切换至紧急桨距角控制状态, 变桨系统按特定的紧急桨距角及变桨速率运行, 在跌落时段结束前使卸荷电阻消耗功率在安全范围内。

$$|V - 0.2V_{ref}| < \varepsilon_f \quad (5)$$

式中: ε_f 表示电压跌落时电压波动范围最大值。

4.3 恢复时段变桨

该时段电网电压升高 (式 (6)), 针对机组输出有功功率至少按 10% 额定功率/秒的速度增加, 机组有功功率需与并网点电压成比例增加。为确保机组在安全稳定运行下恢复有功出力, 以与电网电压增速成比例的变桨速度降低桨距角, 加快机组的恢复时间。

$$V - V_b > 2V_r \quad (6)$$

式中: V_b 为之前的电网电压值; V_r 为电压波动最大值。

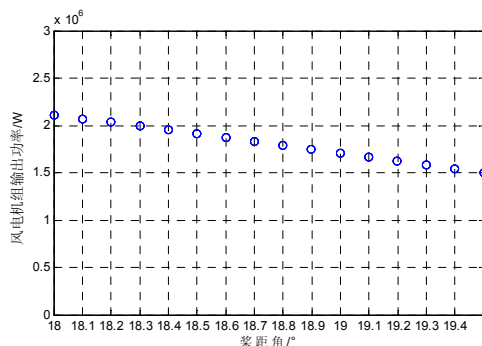


Figure 5. The curve of pitch angle and wind turbine output active power when wind speed is 13m / s

图 5. 风速为 13m/s 时的桨距角与风电机组输出有功功率曲线

4.4 较稳定时段(3s 后)

电网电压在额定值的 90% 附近 (式 (7)). 执行正常变桨距控制策略, 即当风速小于额定风速时, 使桨距角保持在最佳角度; 高于额定风速时, 根据功率

反馈, 利用伺服控制系统使叶片变桨至工作位置。

$$|V - 0.9V_{ref}| < \varepsilon_s \quad (7)$$

式中: ε_s 表示电压较稳定时电压波动范围最大值。

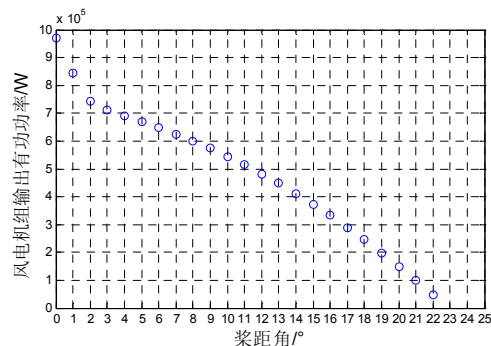


Figure 6. The curve of pitch angle and wind turbine output active power when wind speed is 6m / s

图 6. 风速为 6m/s 时的桨距角与风电机组输出有功功率曲线

5. 应用分析

根据某公司 2MW 直驱机组参数, 取 $\lambda=7$, $R=70.65$, $c1=0.5176$, $c2=116$, $c3=0.4$, $c4=5$, $c5=21$, $c6=0.0068$, $I_{max}=10kA$, $\eta=0.92$, $k=0.92$, 并网点额定电压 690V。当风速在额定风速以上 (13m/s) 时 (图 5), 机组输出功率为 2MW, 桨距角为 18.3°, 电压跌落时, 电网电压为 138V, 根据式 (1) 和式 (2) 得到紧急桨距角为 18.7°, 由式 (3) 确定紧急变桨速度为最大值 6°/s, 需约 87ms 即可完成, 加上控制系统反应时间 (以系统周期 100ms 计算) 为 187ms, 总时间在电压跌落允许时间内。当风速在额定风速以下 (6m/s) 时 (图 6), 桨距角为 3°, 由于机组输出功率在安全域内, 变频器与卸荷负载能够安全的实现低电压穿越, 故不启动变桨。经上分析, 针对该型机组的变桨距安全控制策略能够有效地降低机组输出有功功率, 从而降低卸荷负载的消耗, 提高机组低压穿越能力。

6. 结语

采用卸荷负载方案的直驱风电机组中能解决低电压穿越问题的主要部件是变频器及卸荷负载电路, 变桨距系统作为支持机组低电压穿越的辅助方法, 当卸荷负载消耗功率超过其容量或者过大时, 本文的变桨距控制策略可减轻卸荷负载的消耗功率, 以支持机组的低电压穿越能力。

致 谢

感谢段斌教授的指导及湘电风能的大力支持。

References (参考文献)

- [1] Morren J, Pierik J TG, De Haan SWH. Voltage dip ride through

- control of direct drive wind turbines[C] // 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, UK: 2004.
- [2] Abbey C, Li W, Owatta L. Power electronic converter control techniques for improved low voltage ride through performance in WTGs[C] // 2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 18-22 June 2006, Jeju, South Korea: 2006.
- [3] Macken KJP, Bollen MHJ, Belmans RJM. Mitigation of Voltage Dips Through Distributed Generation Systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(6):1686-1693.
- [4] LI Jianlin, HU Shuju, KONG Deguo, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95.
李建林, 胡书举, 孔德国, 等. 全功率变频器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化. 2008, 32(19): 92-95.
- [5] ZHANG Xing, ZHANG Longyun, YANG Shuying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation. Proceedings of the CSU-EPSC, 2008, 20(2): 1-8.
张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 1-8.
- [6] J. F. Conroy, R. Watson. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(3): 182-189.
- [7] Zhu Wu, Cao Rui-fa. Improved Low Voltage Ride-through of Wind Farm Using STATCOM and Pitch Control[C] // IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 17-20 May 2009, Wuhan, China: 2009.
- [8] L. Lupu, B. Boukhezzer, H. Siguerdidjane. Pitch and torque control strategy for variable speed wind turbines[C] // 2006 European Wind Energy Conference Proceedings, 2006, Athens, Greece: 2006.