

风能变换系统在电网频率调节中的应用仿真^①

赵国材, 周前程

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁葫芦岛 125105)

摘 要: 随着不参与电网调频的变速风能变换系统(WECS)在电网中比例增大, 系统频率调节成为重大问题。针对提出了一种新的方法优化了变速风能变换系统(WECS)在电网频率调节中的应用。首先对惯性控制进行改进, 将调频功能加入到 WECS 中; 再根据 WECS 短时间内可以一定范围内任意调节输出有功功率的特性进行改进, 使 WECS 在频率暂态开始时起到更大的作用; 然后, 再使 WECS 与传统调频机组协调工作, 弥补 WECS 只能短时支持频率调节的缺陷, 使系统频率暂态恢复过程有功功率的注入更合理, 减小了频率波动幅度, 优化了 WECS 输出有功功率曲线, 完成了 WECS 的转速恢复。最后给出仿真结果与分析。

关键词: 风能变换系统; 电网频率调节; 惯性控制; Washout 滤波器

Wind Energy Conversion Systems Used in Grid Frequency Regulation Simulation

ZHAO Guo-Cai, ZHOU Qian-Cheng

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao, 125105, China)

Abstract: As Wind Energy Conversion Systems, which don't join in grid frequency regulation, take a much more important part in power grid, frequency becomes a big problem. To solve this problem, we present a new method to improve Wind Energy Conversion Systems control strategy using in power grid frequency regulation. At first bases on inertial control it introduces frequency regulation to WECS. Then it improves inertial control with WECS's advantage, capable of changing its output active power arbitrarily within range in a short time, makes WECS contributes more in frequency transient's beginning. Finally it makes WECS cooperates with conventional generators, makes up disadvantage that WECS only can support frequency regulation in a short time, this will make power injection between frequency transient more reasonable, decrease the frequency fluctuation, optimize the WECS output active power curve and achieve rotor speed's recovery. At the end of the paper is simulations results and analysis.

Key words: wind energy conversion Systems; grid frequency regulation; inertial control; washout filter

据预测到 2020 年, 风电将占电力需求的 12%, 到 2030 年可达 22%, 在一些地区风电所占比例更高。因为 WECS 总能量由风能输入决定, 通常 WECS 不参与系统频率的调节, 因而当频率上升或下降风能机组输出既不相应增加也不相应减少, 对于电力系统惯性无影响。风电比重的提高使得电网管理员开始担心系统频率的调节, 因为电网中可调频成分减少, 当电网频率受到扰动后电网很难快速恢复到稳定值^[1], 因而对于风电参与调频的研究日益迫切^[2]。

目前国内对风电参与电网调频的研究几乎没有, 国外有少量的研究。文献[3]介绍了仿效传统电机的比例控制, 风电机被强制进行功率调节, 风电机不能全额运行。

文献[4][5]研究了 WECS 仿效惯性控制进行频率调节。利用 WECS 可以短时间内将旋转质量内的有限动能转化为有功功率输出的特性。但是当频率暂态结束后, 风力发电机的转速也发生了变化, 需要额外的控制将转速恢复为最优速度。

① 收稿时间:2011-09-17;收到修改稿时间:2011-10-19

文献[6]针对各种新能源发电技术提出了负载-频率模型控制, 仿真表明能够对频率提供支持, 但是频率波动达到稳定时间较长。

本文根据 WECS 的特性, 对频率 WECS 参与频率调节的策略进行改进。在控制策略中加入速度调节功能使得频率波动恢复后风电机组的转速即以恢复。利用 WECS 的可快速改变输出有功功率的优点使它在频率暂态开始发挥更大作用, 并在接下来的时间里跟传统电机配合调频。基于这些改进本文对风电参与调频进行了仿真研究。

1 风电在传统调频方式的应用

电网频率的调节是通过一系列本地控制器实现, 每个控制器根据频率偏差控制相关单元根据额定值按比例增减有功功率输出, 保证系统达到新的平衡点, 然后再将频率复位至给定值。图 1 为经典的频率调节模型, 为了研究 WECS 参与频率调节在其中添加了 WECS 模块 W。

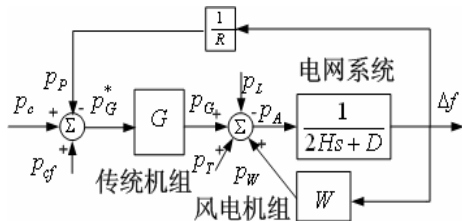


图 1 改进经典频率调节模型

图中 p_G 为传统发电单元有功功率输出, p_T 为相邻电网系统有功功率输出, p_W 为风电有功功率输出, p_L 为负载消耗有功功率, p_A 为有功功率总和, 稳态时 $p_A=0$ 。

$$p_G + p_T + p_W - p_L = p_A \quad (1)$$

图 2 为早期惯性控制在 WECS 应用, WECS 中加入输出功率参考信号使风电机组有功功率输出跟随频率偏差变化^{[4][7]}:

$$p_f^* = -K_{df} \frac{d\Delta f}{dt} - K_{pf} \Delta f \quad (2)$$

式中 K_{df} 为频率偏差的微分系数, K_{pf} 为频率偏差的比例系数。

变速风力发电系统为了最大地利用风能, 风电机组必须运行在特定转速 ω^* , 为了保证 ω^* 不变, 风能输

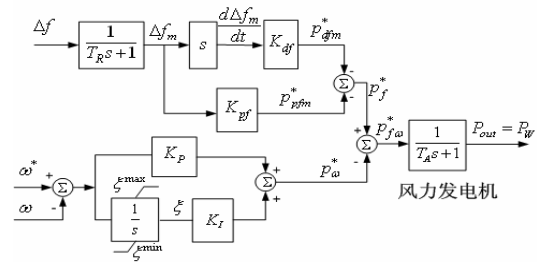


图 2 惯性控制模型

入功率 p_{in} 必须等于输出功率 p_{out} 。而频率调节过程中会打破风电单元的这种平衡, 频率暂态后必须使得风电机组转速恢复到 ω^* 。为了实现这一目标在 W 中加入一个 PI 调节器强制转速恢复, 如下:

$$P_{\omega}^* = K_p (\omega_m - \omega) + K_i \int (\omega_m - \omega) dt \quad (3)$$

式中 K_p 为转速偏差比例系数, K_i 为转速偏差积分系数。

PI 控制器需要满足如下两个条件:

- ① 频率波动恢复时间内强迫转速恢复;
- ② 转速可短时间内变化, 使得可以将动能转化为电能输出。

大约 20s 的恢复时间即可满足机组要求, 暂态过程中需要风电支持频率的时间大约为(2~3s), 因而 PI 控制器不需要很快。

将式(2)(3)作为风电中总的有功功率给定, 如下

$$p_{f\omega}^* = p_f^* - p_{\omega}^* \quad (4)$$

由于 p_{ω}^* 由慢速 PI 产生, 频率暂态开始时, 假设它不变化。相反由于 p_f^* 可以很快的通过变换器进行调节, 可认为无时延, 则短时间内有

$$p_w = p_f^* + p_w^0 \quad (5)$$

式中 p_w^0 为暂态前风电机组输出有功功率。

使用图 1 模型分析惯性控制如何影响电力系统其余部分。Δf 与功率总和 p_A 的关系如下

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = p_A - D\Delta f \quad (6)$$

将式(1)(2)(5)代入式(6)得

$$\begin{aligned} \underbrace{\left(2H + K_{df}\right)}_{2H'} \frac{d\Delta f}{dt} &= p_A - D\Delta f \\ &= p_G + p_w^0 + p_T - p_L - \underbrace{\left(D + K_{pf}\right)}_{D'} \Delta f \end{aligned} \quad (7)$$

可见改变 K_{df} 的可以改变系统的惯性, K_{df} 与功率有关, 改变 K_{pf} 可以改变系统阻尼比, K_{pf} 值可以加速频率波动的衰减, K_{pf} 过大的会产生副作用, 仿真中对此将进行研究。

2 改进策略

WECS 能够通过电力变换器控制电机, 使得能量在电机输出电功率和电机动能之间迅速变换, 因而风电相对于传统发电单元的最大优势在于可以短时间内在一定范围内任意改变输出功率, 以上控制策略没用利用这一特性, 本文根据这一特性对控制策略进行改进。改进策略依据传统单元调节原理, 由于风电机组动能有限只能短时间内支撑频率, 不能长时间作用, 故将 Washout 滤波的输出 $\Delta f_m'$ 作为频率偏差的中间量, 随着时间的 Washout 滤波输出 $\Delta f_m'$ 逐步减小, 如图 3。这是改进策略与传统策略的根本不同。

$$p_f' = \frac{1}{R} \Delta f_m' \quad (8)$$

式中 R 为下垂参数。

由于动能有限, 风电机组对频率的支撑时间远小于频率恢复时间, 故提出第二点改进。电力不平衡, 如负载 p_L 发生突增, 风电机组输出有功 p_w 迅速增加, 避免频率下降。因为这种增加只可以持续几秒, 而传统电机相对反应较慢, 在这期间应风电机组发送一个信号使传统机组尽早开始出力, 有功输出 p_G 增加以使 $p_A=0$ 。随着传统机组有功功率输出增加风能机组相应的减小出力, 传统机组逐渐成为频率调节主力, 本文利用 Washout 滤波器特性完成减小出力这一功能。在风电机组与传统机组之间加入协调信号 K_{Ci} 以实现协调控制。

$$P_{Ci} = K_{Ci} p_f^* \quad (9)$$

式中常数 K_{Ci} 是参加支持非传统电机的传统电机 i 的比例系数, 根据 p_f^* 和协调传统机组确定。 K_{Ci} 必须符合下式:

$$\sum_{i=1}^n K_{Ci} = 1 \quad (10)$$

利用这一策略, 根据各自特性传统机组与风电机组协调优化了总输出功率输出, 减小了频率的波动, 暂态开始 WECS 增大出力, 随后根据随着传统机组的

出力增加较小出力, 避免转速变化影响 WECS 运行稳定性, 优化了转速的变化。

过大的转速变化会影响 WECS 运行的稳定性, 因此在控制中加入转速限制, 当转速超过限制时, 不对频率提供支持, 维持 WECS 稳定性, 否则 WECS 不稳定可能会使得电力系统故障雪上加霜。

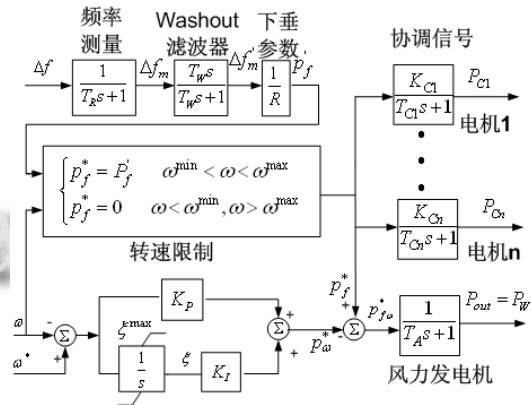


图 3 改进策略模型

3 仿真

仿真采用 PSS/E 平台, 仿真系统如图 4 所示。系统有 4 个 900MVA 传统电机一个风电机组, 分成两区域, 区域 1 包括发电机 G1、G2 和 W, 区域 2 包括发电机 G3 和 G4。负载分别接于 bus7 与 bus9, bus8 位于中间位置用于测量数据。其中 G1 和 G3 为水电机组, 采用 PSS/E 的 IEEEG2 模型, G2 和 G4 为火电机组, 采用 PSS/E 的 TGOV1 模型, W 为 500MW 风电机组, 接入 bus5。具体参数为 $H_c=3.5, T_w=6.0, T_R=0.1, T_A=0.2, T_C=0.2, K_P=1.5, K_I=0.15, R=0.04, K_{df}=15$ 。仿真包括惯性控制仿真和四种控制策略的比较。

4.1 惯性控制仿真

第一个仿真测试惯性控制中不同 K_{pf} 值对于系统频率恢复和 WECS 输出功率的影响, 由公式(7)可知 K_{pf} 的值可以加速频率波动的衰减。

仿真中 bus7 负载突增, 造成频率下降。如图 5 所示, 随着 K_{pf} 的增加频率的波动明显幅度减小, 但同时伴随着输出功率的振荡加剧, 如图 6。这是因为风电单元输出功率与该点频率偏差有关。可见惯性控制中 K_{pf} 值的选取很重要, 需在频率波动幅度和功率震荡之间平衡。这是惯性控制的缺点, 较小的频率波动幅度, 是以牺牲输出功率震荡为代价的, 这对于 WECS 的运行很不利。

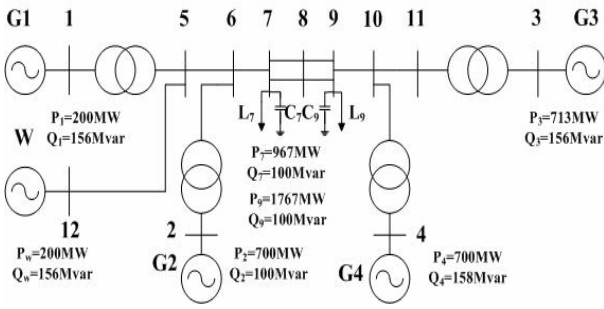


图 4 仿真系统模型

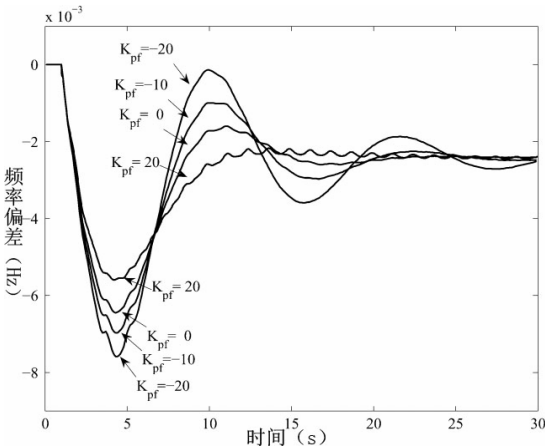


图 5 惯性控制频率偏差曲线

4.2 四种控制策略的比较。

为了检验改进策略的优越性，对四种策略进行仿真比较，四种策略分别为：①风电机组不参与调频；②风电机组采取惯性控制策略；③风电机组采取改进

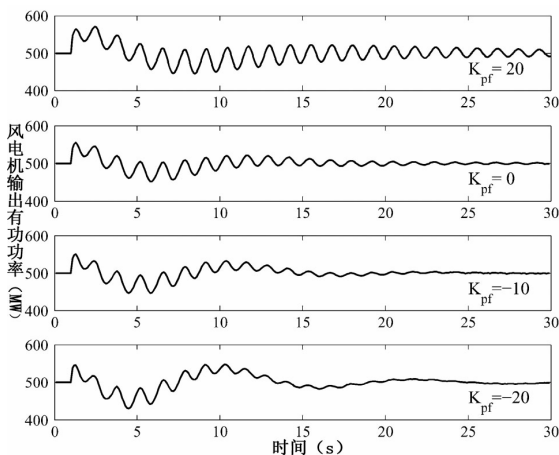


图 6 惯性控制 WECS 输出有功功率

策略但不与传统机组协同工作， $K_{CI}=0$ ；④风电机组采取改进策略并与传统机组 G2 协调工作， $K_{CI}=1$ 。

仿真中 bus7 处产生 200MW 负载突增。

图 7 是 bus8 处的频率响应曲线，如图所示四种策略频率波动幅度逐次减小，策略④波动幅度最小，后三种策略都存在功率振荡。相较于策略①，后三种策略频率下降幅度减小并在时间上延后了，这是因为风电机组相较于传统机组输出功率变化较快。后两种改进策略相较于策略②频波动幅度减小很大，这事因为惯性控制使得 WECS 出力受到限制，改进策略的出力更大。由于策略④中采用协调控制传统机组更早的参与到调频中，频率下降最小。证明风电机组参与调频能很大的优化频率暂态响应，这对于频率波动之后短时间内的优化很有效果。

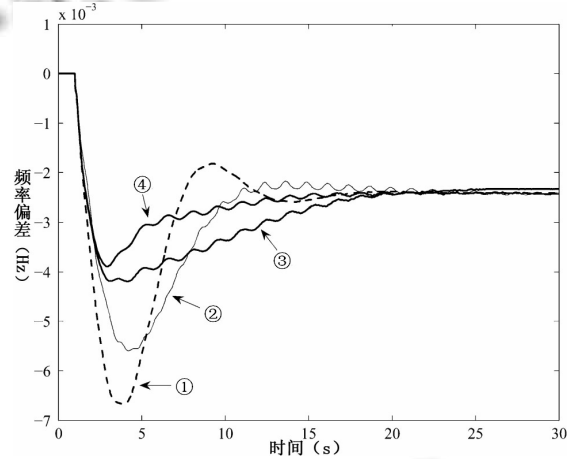


图 7 频率偏差曲线

图 8 为波动后风电机组有功功率输出曲线。策略①风电机组不参与频率调节，输出有功功率不变，后三种功率都有所增加，并都有振荡，策略②策略震荡最大，后两种策略震荡较小并都能较快的达到稳态，在 28s 时震荡基本消除。策略④最大功率输出小于策略③，这事因为策略④采取了与传统机组协同工作的机制，风电机组主要是在频率暂态开始时出力，随着传统机组出力的增加风电机组可以相应减少出力。

图 9 为四种策略情况下风电机的转速变化曲线，策略①转速不变化，策略②由于采用惯性控制发出功率较少，转速变化较小，但是受功率振荡影响，转速也发生明显振荡，而后面两种转速变化稍大，但曲线平滑很多，最大偏差量小于 8%，在允许范围内。同样由于输出功率的差别策略④转速变化小于策略③。策略④明显优于其他策略，充分发挥了风能系统的优点，并弥补了缺点。

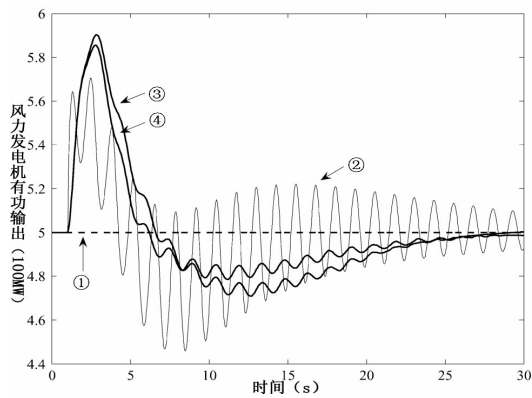


图 8 WECS 输出有功功率曲线

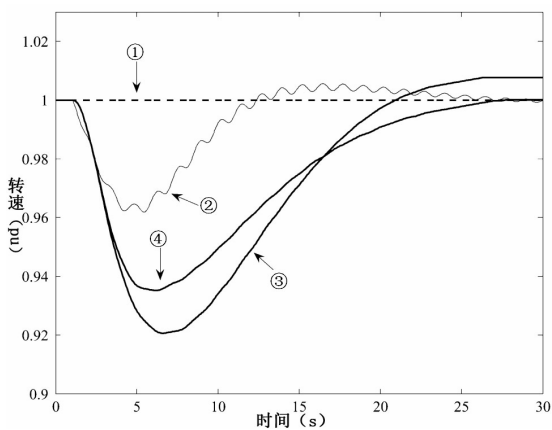


图 9 风力发电机转速曲线

4 结论

将传统惯性控制策略的直接用于 WECS 在参与频率调节时 WECS 出力很小,不能最大发挥地 WECS 频率调节能力。根据 WECS 的快速改变输出功率特性,提出改进策略,WECS 在频率波动开始时起到主要频率调节功能,通过协调信号使得传统机组尽快出力支持频率,弥补了 WECS 只能短时出力这一缺点。仿真研究表明,这一扬长避短改进,使得 WECS 在频率

暂态过程中表现很好,在暂态开始避免了惯性控制对 WECS 出力限制的缺点,能最大实现对频率的支持,通过协调控制使传统机组更早的参与调频,加速频率暂态结束,并且风电机组转速恢复时间、波动大小合理。相较于惯性控制改进策略大大减小了恢复过程中系统频率、WECS 有功功率输出和转速的震荡,对于电力系统和 WECS 运行都是很好的改进。

参考文献

- 1 Lalor G, Ritchie J, Rourke S, Flynn D, O'Malley M.J. Dynamic frequency control with increasing wind generation. USA: IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun. 6-10, 2004,2:1715-1720.
- 2 European Wind Energy Association (EWEA). Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: Analysis, Issues and Recommendations. USA: EWEA, 2005.
- 3 Almeida RG, Lopes JA. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation. USA:IEEE Trans. Power Syst. 2007,22(3):944-950.
- 4 Morren, S de Haan, Kling WL, Ferreira J. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control. IEEE Trans. Power Syst. 2006,21(1):433-437.
- 5 Lalor G, Mullane A, O'Malley M. Frequency control and wind turbine technologies. IEEE Trans. Power Syst. 2005, 20(4):1905-1913.
- 6 Bevrani H., Ghosh A., Ledwich G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives. IET Renewable Power Generation, 2010,438-457.
- 7 Almeida R, Castronuovo E, Lopes J. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests. IEEE Trans. Power Syst, 2006,21(2):718-725.

(上接第 24 页)

IEEE Computer,1996,29(2):38-47.

- 3 Ping Ni, Jianxin Liao, Chun Wang, Keyan Ren. Web information recommendation based on user behaviors. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. 2009.3.31-2009:426-430.
- 4 汤象峰.基于 RBAC 的动态 workflows 系统的研究与应用[硕士学位论文],武汉:武汉理工大学, 2010.

- 5 Ferraiolo DF, Barkley J, Kuhn DR. A Role Based Access Control Model and Reference Implementation within a Corporate Intranet. ACM Trans. on Information Systems Security, February 1999,1(2).
- 6 周志峰,王晶.基于 RBAC 的安全管理模块的设计与实现. 电信工程技术与标准化, 2010,(10):84-88.