

电网频率变化下直驱永磁风力发电机组暂态特性分析

冯树辉¹ 杨浩² 项丹²

(1. 潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 为研究直驱永磁同步风力发电机(DPMSG)在电网频率发生变化情况下的暂态特性,建立了电网中风力发电系统数学模型,网侧和机侧变换器分别采用基于电网电压定向和电流前馈补偿的定子磁链定向矢量控制。根据建立的模型仿真分析电网频率下降情况下风机的输出特性进行仿真分析,仿真结果与实测数据对比验证了模型的正确性。利用该模型对电网频率升高时直驱永磁发电机功率、直流电压、转速进行了进一步研究分析,研究结果为分析风电场在电网频率变化期间直驱永磁风力发电系统实际运行、出力变化情况提供了有效依据。

关键词: 直驱永磁发电机; 风力发电; 电网频率; 暂态特性; 模型验证

Abstract: In order to study the transient characteristics of directly driven permanent magnet synchronous generator (DPMSG) with grid frequency variation, the mathematic model of a wind power generation system is established. The converter in grid side and the converter in machine side adopt stator flux linkage oriented vector control respectively based on grid voltage orientation and current feed-forward compensation. The output characteristics of wind turbine are analyzed under the decreases of grid frequency, and the correctness of the established model is verified by the comparison of simulation results with the measured data. Further researches are carried out for the power, DC voltage and rotating speed of directly driven permanent magnet synchronous generator when grid frequency increases by this established model. The presented results provide reference data for output characteristics of DPMSG during grid frequency changes.

Key words: directly driven permanent magnet synchronous generator (DPMSG); wind power generation; grid frequency; transient characteristic; model validation

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)04-0058-04

0 引言

直驱永磁同步风力发电机组(directly driven permanent magnet synchronous generator for wind power system, DPMSG)因其结构简单、维护成本低、噪声小、效率高、良好的低电压穿越能力及不需要电励磁而受到广泛关注和应用。随着风电特别是分布式风力发电的不断发展,电网复杂程度愈来愈高,其动态稳定性及暂态稳定性问题愈来愈突出,同时风电场对风力发电机组的运行要求也越来越严格^[1]。电网发生三相故障时会造成机侧变换器输出与网侧变换器输出不平衡。电网故障除了常见的电网电压跌落之外还有频率变化。当系统中的电气振荡频率与机组固有频率达到一定耦合条件时,会使机组的功率振荡更加剧烈,并有可能诱发连锁反应事故。

因此,有必要研究电网频率变化对风电机组输出特性的影响规律,这对风电机组安全运行及电网稳定性分析具有重要意义。

频率是电能质量的重要指标及电力系统运行的重要控制参数。根据风电场接入电网技术规定(Q/GDW 392-2009),风电场可以在频率偏离下运行。目前国内外主要研究并网双馈风力发电机对电网频率的影响及解决方法,而对 DPMSG 与电网频率间的关系研究较少。文献[2]建立了直驱永磁同步风力发电机、变桨控制器和驱动链模型。文献[3]提出永磁同步风力发电机在电网跌落情况下用机侧变换器代替网侧变换器控制直流母线电压。文献[4]对功率不平衡条件下永磁同步风力发电机全功率变换器的频率恢复性能进行了研究。文献[5]对离网模式下的孤岛系统风力发电机暂态和稳态特性进行了研究。以上文献均没有分析电网频率变化对永磁

风力发电机的影响。下面对风力发电系统中电网电源、风力发电机、控制策略等进行建模,在此基础上分析电网频率发生瞬变时风力发电机的暂态响应特性。

1 风力发电系统仿真模型

1.1 风力机模型

风力机的输出机械转矩 T_m 为^[6]

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R_m^5 \frac{\omega_r^2}{\lambda^3} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

其中 ρ 为空气密度; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; ω_r 为风力机机械角速度; R_m 为风轮半径; P_m 为风机捕获的机械功率; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数。

永磁同步发电机与风力机不经过齿轮箱而直接连接,传动系统的动态方程为

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3)$$

式中 T_e 为发电机电磁转矩; J 为风轮转动惯量; B 为发电机摩擦系数。

1.2 变桨系统模型

变桨系统模型可等效为式(4)所示的一阶惯性环节,式(4)中各参数说明见表1。

$$\theta = \frac{1}{T_p s + 1} \cdot \theta_{cmd} \quad (4)$$

表1 变桨系统模型参数说明

符号	说明
θ_{cmd}	主控制系统桨距角指令
θ	叶片桨距角
T_p	变桨系统等效惯性时间常数

1.3 DPMSG 数学模型

假设永磁同步发电机没有阻尼绕组,转子磁链 ψ_r 恒定不变,将两相旋转坐标系的 d 轴定向于转子磁链方向,可得永磁同步电机在同步旋转坐标系下的电压方程^[7]。

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \mu_{sd} - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} u_{sq} - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d - \frac{\psi_r \omega_e}{L_q} \end{cases} \quad (5)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式中 μ_{sd} 、 u_{sq} 为定子电压的 d、q 轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流的 d、q 轴分量; L_d 、 L_q 为 d、q 轴定子绕组电感; R 为定子电阻; ω_e 为转子电角频率; $\omega_e = p\omega_r$, p 为极对数。

2 控制策略

2.1 机侧变换器控制

对于机侧变换器,假设定子磁链幅值不变并以同步速旋转,将其定向于 d、q 坐标系的 d 轴,得到两相旋转坐标系下的数学模型为^[8]

$$\begin{cases} Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} = u_{sd} + \omega_e L_q i_q \\ Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - \omega_e (L_d i_d + \psi_s) \end{cases} \quad (7)$$

由以上可知,在基于定子磁链定向坐标系中,直驱永磁风力发电机有功电流和无功电流是完全解耦,在 d、q 轴电流控制器中分别增加前馈输入 $\omega_e L_d i_q$ 和 $\omega_e L_q i_d$ 即可实现电流的解耦控制。为实现 i_{sd} 和 i_{sq} 的解耦控制,设计如下控制方程。

$$\begin{cases} u_{sd}^* = -\omega L_q i_{sq} + K_{p1} (i_{sd}^* - i_{sd}) + \frac{1}{T_{i1}} \int (i_{sd}^* - i_{sd}) dt \\ u_{sq}^* = \omega (L_d i_{sd} + \psi_r) + K_{p2} (i_{sq}^* - i_{sq}) + \frac{1}{T_{i2}} \int (i_{sq}^* - i_{sq}) dt \end{cases} \quad (8)$$

式中 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 为定子电流的 d、q 轴参考电流; K_{p1} 、 K_{p2} 和 T_{i1} 、 T_{i2} 分别为控制器的比例、积分系数。

2.2 网侧变换器控制

网侧变换器主要实现网侧功率因数调整、并网无功功率控制及提供稳定的直流电容电压。对网侧变换器采用电网电压定向矢量控制并将电网电压定向在 d 轴上,则三相对称的网侧变换器在同步旋转 d、q 坐标系下的电压、功率方程为^[9]

$$\begin{cases} u_{gd} = -L_g \frac{di_{gd}}{dt} - R_g i_{gd} + u'_{gd} + \omega Li_{gq} \\ u_{gq} = -L_g \frac{di_{gq}}{dt} - R_g i_{gq} + u'_{gq} - \omega Li_{gd} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} p_g = \frac{3}{2} (u'_{gd} i_{gd} + u'_{gq} i_{gq}) = \frac{3}{2} u'_{gd} i_{gd} \\ Q_g = \frac{3}{2} (u'_{gq} i_{gd} - u'_{gd} i_{gq}) = \frac{3}{2} u'_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (10)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = s_d i_{gd} + s_q i_{gq} - i_L \quad (11)$$

式中 i_{gd} 、 i_{gq} 为网侧变换器输入电流的 d、q 轴分量;

u'_{gd} 、 u'_{gq} 为电网电压的 d、q 轴分量, S_d 、 S_q 分别为变换器的 d、q 轴开关函数; R_g 、 L_g 为网侧进线电抗器电阻、电感; ω 为电网电压角频率, C 为电容容值; u_{dc} 为直流母线电压; i_L 为负载电流。

网侧变换器采用双闭环控制, 内环为电流环, 外环为电压环。内环采用电流前馈解耦控制。q 轴电流参考值 i_{sq}^* 由电压外环误差信号经 PI 调节后产生。d 轴电流参考值 i_{sd}^* 根据下式中较小者确定^[10]。

$$i_{sd}^* = Q_s^* / u'_{gd} \quad (12)$$

$$i_{sd}^* = \sqrt{i_{\max}^2 - i_{gq}^2} \quad (13)$$

式中 Q_s^* 为电网需要的无功; i_{\max} 为逆变器允许最大电流有效值。

为方便解耦控制, 令

$$\begin{cases} u_d = Ri_{gd} + L \frac{d}{dt} i_{gd} \\ u_q = Ri_{gq} + L \frac{d}{dt} i_{gq} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{gd} = -\omega Li_{gq} + u'_{gd} \\ \Delta u_{gq} = \omega Li_{gd} + u'_{gq} \end{cases} \quad (15)$$

3 直驱永磁风力发电机组仿真分析

永磁风力发电系统参数如表 2 所示, 并设定恒定风速 8 m/s。风力机参数: 空气密度 1.04 kg/m³, 叶片半径 30 m, 最大风能利用系数 0.438, 最佳叶尖速比 6.325。DPMSG 经一定的输电线路并入电网, 输电线路阻抗为 0.6764 + j1.3528 Ω, 电网等效电抗为 j0.0001 Ω, 长度为 30 km。

表 2 直驱永磁风力发电系统参数

参数名称	参数值
定子额定电压 /V	690
电网频率 /Hz	50
额定功率 /kW	1 500
额定风速 / (m · s ⁻¹)	11
极对数	37
直流电压 /V	1 100
d、q 定子绕组电感 /mH	1.7
转子磁通 /Wb	4.744
转动惯量 /kg · m ²	11 258
逆变器开关频率 /kHz	20
等效电阻 /Ω	0.01
电抗器电感 /mH	0.2
变压器一次/二次绕组线电压 /V	35 000/690

根据前面阐述的 DPMSG 数学模型及变换器控制策略, 在 Matlab/Simulink 中搭建模型。

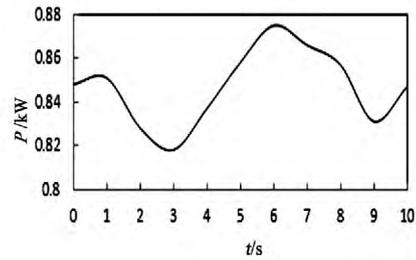


图 1 50 Hz 降到 48 Hz 的有功功率测试曲线

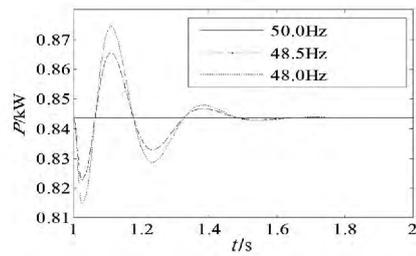


图 2 频率下降时有功功率变化情况

图 1 为 8 m/s 风速时直驱永磁同步风力发电机有功功率实测曲线, 图中 0 s 至 1 s、1 s 至 10 s 频率分别为 50 Hz 和 48 Hz。从实测波形图可以看出频率由 50 Hz 下降为 48 Hz 时有功功率在 850 kW 附近波动。图 2 为有功功率仿真结果, 在 1 s 时频率变化, 并持续运行 1 s, 从图 2 可见在频率降低后有功功率发生振荡, 其值在频率下降时刻瞬时下降, 并且幅值随频率升高而增大, 与图 1 中实测功率变化趋势一致。由于仿真分析时忽略了实际运行中风速的随机波动等环境因素对风力发电机的影响, 导致一定的误差。根据中国电力科学院起草将由国家能源局发布的风电机组低电压穿越建模及验证方法中有功功率偏差计算方法, 计算暂态、稳态区间仿真数据与测试数据平均偏差 F_1 和平均绝对偏差 F_2 及稳态区间最大偏差 F_3 , 其计算方法如下。

$$F_1 = \left| \frac{\sum_{i=K_{\text{start}}}^{K_{\text{end}}} (X_M(i) - X_S(i))}{K_{\text{end}} - K_{\text{start}} + 1} \right| \quad (16)$$

$$F_2 = \frac{\sum_{i=K_{\text{start}}}^{K_{\text{end}}} |X_M(i) - X_S(i)|}{K_{\text{end}} - K_{\text{start}} + 1} \quad (17)$$

$$F_3 = \max_{i=K_{\text{start}} \dots K_{\text{end}}} (|X_M(i) - X_S(i)|) \quad (18)$$

用 X_S 和 X_M 分别表示有功功率的仿真数据和测试数据基频正序分量的标幺值。 K_{start} 和 K_{end} 分别表示计算偏差时第一个和最后一个仿真、测试数据的序号。其偏差均小于验证结果评价的最大允许偏

差值 0.07、0.20、0.10、0.25、0.15,说明所建模型和控制方法的可行性。

图3至图6为电网频率降低时 DPMSG 无功功率、直流电压和转速的仿真结果,仿真分析时设置频率在 1 s 时开始变化并持续 1.5 s。无功功率变化情况如图3所示,在频率下降瞬间发出感性无功,经过近 0.2 s 后开始发容性无功以支撑定子电压的下降,频率降低导致无功功率波动并引起直流母线电压在 1100 V 左右波动,直流母线电压变化情况如图4所示。图5和图6分别为频率 50 Hz 和 48 Hz 时发电机转速变化情况,可见发电机转速发生轻微波动。

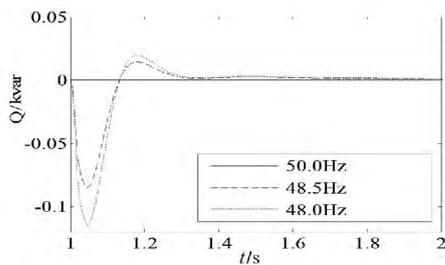


图3 频率下降时无功功率变化

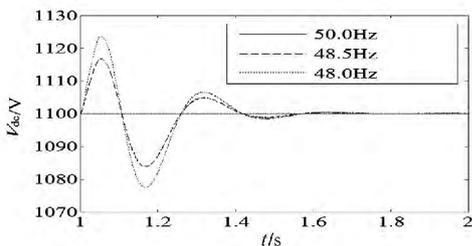


图4 频率下降时直流母线电压变化

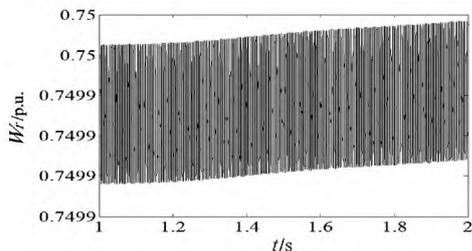


图5 50 Hz 时转速变化情况

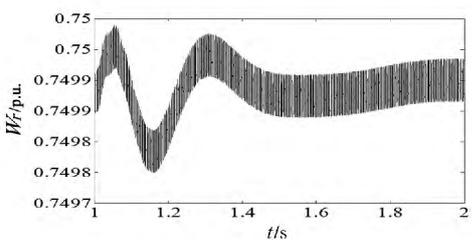


图6 48 Hz 时转速变化情况

对于直驱永磁风力发电机在电网频率升高时期暂态特性分析结果如图7至图10所示。

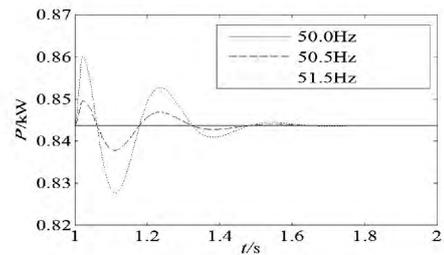


图7 频率上升时有功功率变化情况

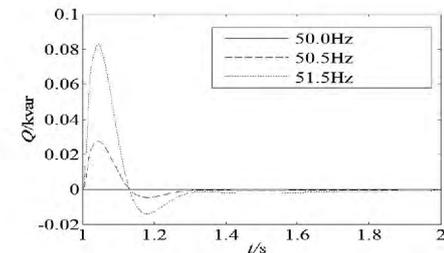


图8 频率上升时无功功率变化情况

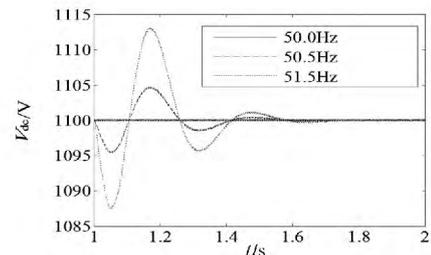


图9 频率上升时直流母线电压变化

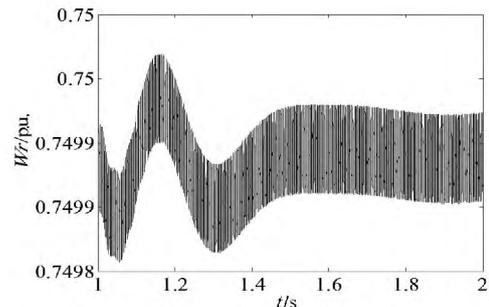


图10 51.5 Hz 时转速情况

由仿真结果图可知,直驱永磁风力发电机在频率升高时的暂态特性与频率降低时的暂态特性相对应,这也进一步说明模型的正确性。

4 结论

通过分析电网频率变化时直驱永磁同步风力发电机的输出特性,并与频率变化时风力发电机实测有功功率数据对比,验证了模型的正确性。在电网频率偏移时永磁同步风力发电机组由于自身保护作用降低了出力,无功功率变化明显。从分析结果知,

(下转第94页)

和测量值 PV 相同,MOXPODII 模块不进行调节。当 S1 为 0 时,ST_SEL 模块 VAL1 即 HSA20CQ103(分析仪 NO_x 测量值)为输出值,MOXPODII 模块根据设定值和测量值偏差进行自动调节。

4 总 结

通过以上几条措施的执行,脱硝供氨调节阀门自动运行投入率大大提高,在不对系统进行大的改动下,自动系统稳定性和可靠性得到了很大的提升。当然,如果要彻底避免 CEMS 在线监测仪表自我维护功能对自动控制系统的影响,建议应多增加一台脱硝出口 CEMS 在线监测仪表,DCS 组态中对两台 CEMS 测量的 NO_x 值进行分析判断,当两台仪表均正常工作时,NO_x 值取两台仪表测量的平均值,当一台进行自我维护时,NO_x 值取正常工作仪表值,这样将进一步提高该自动控制系统的可靠性和稳定性。

5 结束语

随着国家对环保要求的提高以及两部委《燃煤

=====

(上接第 61 页)

频率下降或上升引起定子电压的下降或上升。该研究为分析电网频率变化期间直驱永磁风力发电系统实际运行、出力变化情况奠定了基础。

参考文献

[1] Liserre M, Sauter T, Hung J Y. Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid through Industrial Electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1): 18-37.

[2] ARABI S, KUNDUR P. Stability Modeling of Storage Devices in FACTS Applications [C]. IEEE Power Eng Soc Summer Meeting. Vancouver, Canada, 2001: 15-19.

[3] Conroy J, Watson, R. Aggregate of Wind Farms Containing Full-converter Wind Turbine Generators with Permanent Magnet Synchronous Machines: Transient Stability Studies [J]. Renewable Power Generation, IET, 2009, 3(1): 39-52.

[4] Ki-Hong Kim, Toon-Cheul Jeung, Dong-Choon Lee, et al. LVRT Scheme of PMSG Wind Power Systems Based on Feedback Linearization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2376-2384.

发电机组环保电价及环保设施运行监管办法》的实施,火力发电厂对环保系统和环保设备的稳定可靠运行提出了更高的要求,前面以 600 MW 火力发电厂脱硝自动控制系统的优化与改进为例,详细分析了在火力发电厂中影响脱硝自动控制系统正常运行的各类因素以及解决处理办法,为同类型的问题提供了一个成功的案例。

参考文献

[1] TCS3000 仪电一体化分散控制系统系统手册 [R]. 国电南京自动化股份有限公司.

[2] Limitorque MX 电动执行装置使用说明书 [R]. 美国 flowserve 公司.

[3] SIEMENS ULTRAMAT 23 操作说明 [R]. 德国 SIEMENS 公司.

作者简介:

曾 俊 (1974), 本科, 电力工程师, 华电宜宾分公司热工专业公司经理, 主要从事火力发电厂热控专业检修及维修工作。

(收稿日期: 2014-05-17)

[5] Conroy, J F; Watson, R. Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 649-656.

[6] 谢萍, 刘永强. 直驱式永磁同步风力发电系统的整合模型与仿真 [J]. 可再生能源, 2011, 29(3): 13-16.

[7] 李军军, 吴政球. 风电参与一次调频的小扰动稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 1-9.

[8] 蔺红, 晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 1-5.

[9] 程航, 曹五顺, 周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究 [J]. 电力系统保护和控制, 2012, 40(7): 66-72.

[10] 杨晓萍, 郭鑫. 直驱式永磁风力发电机组并网控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 121-126.

作者简介:

冯树辉 (1985), 硕士, 主要研究方向为电力系统建模与辨识、电力系统稳定与控制;

杨 浩 (1960), 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统信号处理、保护与控制;

项 丹 (1986), 硕士, 主要研究方向为发电机控制策略及其电力电子技术在电力系统中的应用研究。

(收稿日期: 2014-04-28)