

# 永磁直驱风电场的系统频率控制技术

王 琛<sup>1</sup>, 张玉婷<sup>1</sup>, 黄 松<sup>2</sup>

(1.江苏省电力公司连云港供电公司, 江苏 连云港 222000; 2.上海市崇明电力公司, 上海 202150)

**摘 要:** 永磁直驱风力发电机组对系统频率的支持作用, 有利于提高风电渗透率较高的区域电网的稳定性。本文在分析永磁直驱风电机组运行特性和控制策略的基础上, 研究该机组的转动惯量与转速调节及电网频率变化的关系, 提出了永磁直驱风电机组的频率控制策略。利用 MATLAB/Simulink 仿真软件对含永磁直驱风电机组的系统进行仿真分析, 验证了在所提控制策略下, 永磁直驱风电机组能够利用其转动惯量对系统频率快速响应, 减小系统功率不平衡造成的频率变化, 从而提高了基于永磁直驱风电机组的大规模风电场接入电网后的电力系统暂态稳定性。

**关键词:** 风力发电; 永磁同步发电机; 最大功率跟踪; 频率支持

## 0 引言

2011年上半年世界风能协会报告全球风电总装机容量已超过215,000MW<sup>[1]</sup>。其中, 中国风电新增装机容量为8,000MW, 占全球新增总量的43%。风力发电技术也得到了长足发展和广泛应用。随着电网中风电渗透率的不断增加, 风电机组对系统安全稳定运行的影响已不容忽视。目前, 双馈风力发电技术逐渐成熟, 风电机组的运行要求不断提高, 与风力机直接相连的多极低速无刷永磁同步发电机(PMSG-permanent magnet synchronous generator)受到了国内外科研人员越来越多的关注。

PMSG风电机组采用全功率变流器实现并网发电, 利用全功率变流技术实现功率解耦、最大风能捕获及变速恒频发电特性。和双馈风电机组相比, PMSG风电机组发电效率、运行可靠性及控制灵活性方面均有所提高<sup>[2-4]</sup>。目前, 针对PMSG风电机组主要围绕全功率变流技术控制策略、低电压穿越特性等风电机组自身运行特性的分析和探讨<sup>[5-7]</sup>。基于PMSG的风电场参与电力系统频率调整的问题尚未深入研究。PMSG风电机组的全功率变流器在实现最大功率跟踪的同时, 使得风力机的转速和电网频率之间不再存在耦合关系, 其旋转动能被“隐藏”起来, 对电力系统的惯量几乎没有贡献<sup>[8-12]</sup>。因此, 有必要从PMSG机组的控制策略方面深入研究如何利用其“隐含”的惯量。利用全功率变流器灵活可控的功率调节特性, 在PMSG控制系统中加入频率

控制环节, 使PMSG风电机组参与系统频率的动态调整, 进而通过释放或吸收PMSG风电机组的转子动能使风电机组对系统频率具备支持能力, 这将对风电渗透率较高的区域电网的安全稳定运行具有重要意义。

本文首先研究基于全功率变流器并网PMSG风电机组的控制策略; 并在此基础上分析系统扰动后利用PMSG风电机组的惯性改善系统频率动态响应的原理, 提出PMSG机组通过改进传统最大功率跟踪控制, 增加频率附加控制环节参与系统调频的控制策略。为验证所提控制策略对含PMSG风电机组的区域电网频率调整的有效控制, 本文基于MATLAB/Simulink建立仿真系统模型, 对风电机组在系统功率不平衡后参与系统频率调整的动态过程进行仿真研究。

## 1 PMSG 机组网侧变流器模型及控制策略

图1为采用双PWM全功率变流器并网PMSG风电机组的网侧变流器控制结构图。其中, 机侧变流器实现全功率变流器直流侧电压稳定和PMSG定子侧电压稳定; 网侧变流器采用基于电网电压定向的矢量控制方案, 控制器主要用于实现风电机组最大功率跟踪控制和无功功率控制。

PMSG风电机组网侧变流器在 $dq$ 同步旋转坐标系下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} V_c = R_c I_g + j\omega_c L_c I_g + L_c \frac{dI_g}{dt} + V_g \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_s}{V_{dc}} - \frac{P_g}{V_{dc}} \\ P_g + jQ_g = \frac{3}{2} V_g \hat{I}_g \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $V_c$ 、 $V_g$ 、 $I_g$ 、 $V_{dc}$ 分别为电网电压矢量、网侧变流器电压、电流矢量和直流侧电压;  $C$ 、 $R_c$ 、 $L_c$ 分别为直流侧电容、滤波电抗器的电阻、电感;  $P_g$ 、 $Q_g$ 分别为网侧变流器输出有功、无功功率。

忽略电阻 $R_c$ 及电感 $L_c$ 的电磁暂态, 采用电网电压定向的矢量控制策略, 由式(1)可得PMSG网侧变流器有功、无功方程为

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} V_g I_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} V_g I_{gq} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得, PMSG网侧变流器通过分别控制网侧电流的 $d$ 轴分量 $I_{gd}$ 和 $q$ 轴分量 $I_{gq}$ 实现有功、无功的解耦控制。网侧变流器可采用双闭环矢量控制, 外环控制通过定直流电压控制来计算有功电流分量的给定值, 而通过定交流电压控制或定功率因数控制来计算无功电流分量的给定值。

PMSG风电机组最大功率跟踪控制<sup>[13]</sup>可用式(3)

表示为

$$\begin{cases} P_{opt}^* = k\omega_r^3 - \Delta P \\ k = \rho A (R / \lambda_{opt})^3 C_{pmax} / 2 \\ \Delta P = P_0 + P_{Cu} + P_{Fe} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $k$ 为最大功率跟踪曲线比例系数;  $\rho$ 为空气密度;  $A$ 为风轮迎风面积;  $R$ 为风轮半径;  $\lambda_{opt}$ 为最佳叶尖速比;  $C_{pmax}$ 为最大风能利用系数;  $\omega_r$ 为风机转速;  $P_0$ 为风电机组空载损耗;  $P_{Cu}$ 为风电机组铜耗;  $P_{Fe}$ 为风电机组铁耗。

PMSG全功率变流器采用图1所示的矢量控制时, 虽然可以隔离系统扰动对风力发电机的影响, 但电网扰动期间PMSG缺乏对系统频率的动态响应, 无法利用风电系统存储的旋转动能支持电网频率。PMSG全功率变流器根据风电机组转速变化调节有功输出, 当电网有功扰动时, 风电机组遵循最大功率跟踪指令向电网输送有功功率, 不能分担系统有功的变化, 无法对系统扰动提供惯性支持。若想改善风电机组的频率响应, 可利用PMSG风电场通过网侧变流器接入电网的并网结构, 使网侧变流器调节风电机组馈入电网的有功功率, 进行PMSG的转速调节, 进而通过释放或吸收风电系统的旋转动能, 参与系统的功率调节, 使其参与抑制系统频率的变化。

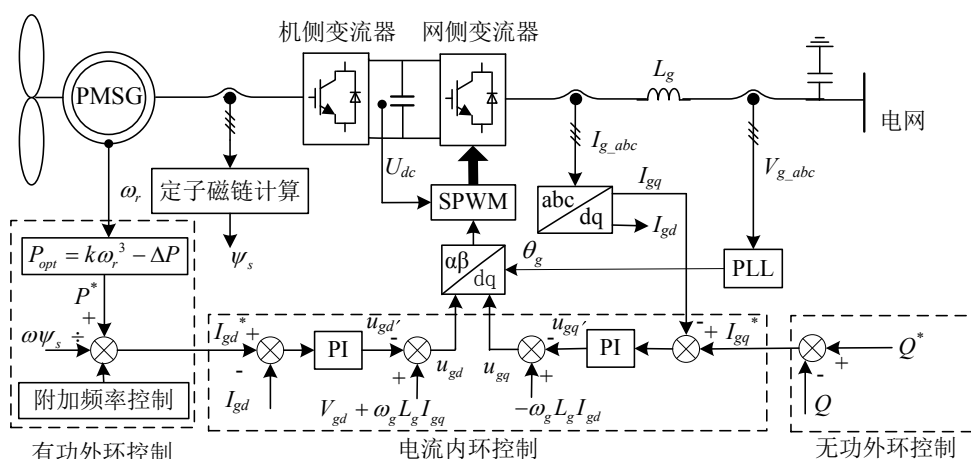


图1 PMSG风电机组网侧变流器控制结构图

## 2 PMSG 风电机组的频率控制

### 2.1 PMSG 风电机组的惯量

由于 PMSG 通过全功率变流器与电网相连, 注入电网的功率仅取决于风速和变流器的控制器设

计, 而现有的控制系统针对系统频率变化并没有任何响应措施, 风电机组无法利用其惯性支持系统频率。因此, 在 PMSG 装机比例较高的区域电网中势必存在缺乏惯性的问题。

对于常规同步发电机组, 忽略阻尼作用, 转子

机械部分储存的旋转动能 $E_k$ 为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} E_k &= \int (P_m - P_e) dt = \int J \omega_m d\omega_m \\ &= \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2p^2} J \omega_e^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\omega_m$ 、 $\omega_e$ 分别为发电机的机械角速度和同步电角速度;  $J$ 、 $p$ 分别为发电机的转动惯量和极对数。

在电力系统分析中, 通常定义惯性时间常数 $H$ 为发电机在同步角速度 $\omega_e$ 下机组转子储能与电机额定容量 $S_N$ 之比, 即

$$H = \frac{J \omega_e^2}{2p^2 S_N} \quad (5)$$

由式(5)可得, PMSG 风电机组相对于电网频率变化的等效惯量为

$$H_p = \frac{\sum_{j=1}^m E_{k\_PMSG,j}}{P_N} \quad (6)$$

式中,  $m$ 为系统中风电机组的台数;  $H_p$ 、 $E_{k\_PMSG,j}$ 、 $P_N$ 分别为PMSG机组 $j$ 的等效惯量、旋转动能和额定容量。

基于全功率并网的PMSG不能像同步发电机在电网频率变化时释放或吸收转子动能, 即

$$\sum_{j=1}^m E_{k\_PMSG,j} \approx 0 \quad (7)$$

因此, 大型风电场接入电网势必导致系统惯量降低。为改善基于PMSG风电场接入电网降低系统惯性的不利影响, 将系统的频率变化信号引入PMSG风电系统的控制系统, 通过其快速有功控制以调节电机转速释放动能, 利用风电机组的转动惯量对交流电网起到惯性支持作用。与转速和电网频率直接耦合的同步发电机不同, 通常PMSG转速的调节量可以比系统频率的变化量大很多, 所以PMSG可虚拟出比固有惯量大很多倍的等效惯量。

## 2.2 PMSG风电机组的频率控制

含PMSG风电场的电力系统惯性时间常数 $H_{sys}$ 满足

$$2H_{sys} \frac{df_{sys}}{dt} = P_{m,sys} - P_{e,sys} + P_g \quad (8)$$

式中,  $P_{m,sys}$ 为系统等效机械功率;  $P_{e,sys}$ 为系统等效电磁功率;  $P_g$ 为PMSG机组注入系统的有功;  $f_{sys}$ 为系统频率。

若不计PMSG风电机组损耗, 则 $P_g = P_{opt}^*$ 。若

风电机组在频率控制下动态注入电网的电磁功率为

$$P_g = P_{opt}^* - k \frac{df_{sys}}{dt} \quad (9)$$

则含PMSG风电场的电力系统的运动方程可表示为

$$2 \left( H_{sys} + \frac{k}{2} \right) \frac{df_{sys}}{dt} = P_{m,sys} - P_{e,sys} + P_g \quad (10)$$

由式(10)可知, 此时电力系统惯性时间常数 $H_{sys,tot}$ 可表示为

$$H_{sys,tot} = H_{sys} + \frac{k}{2} \quad (11)$$

由式(11)可知,  $k>0$ 时, PMSG 风电机组在频率控制下可使系统惯性时间常数增加。

## 2.3 PMSG 风电机组的附加频率控制器

本文所提出的PMSG机组的频率控制策略根据电网频率误差信号, 快速调节风电机组有功输出, 从而分担电网有功功率的突变, 通过自身转速及动能的变化缓解电网频率的突变量, 使PMSG风电机组对系统惯性具有支持能力。该控制策略的原理框图如图2所示, PMSG的有功调节信号通过频率误差信号给出, 其中频率的隔直环节可避免风电机组在电网稳态频率误差时参与调节, 限幅环节可确保在调速过程中PMSG运行的稳定性。

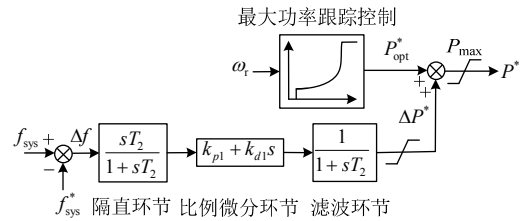


图2 PMSG 机组频率控制结构图

该控制策略充分利用了风电机组的快速有功调节能力, 使PMSG风电机组在电力系统有功扰动过程中能够产生有效的动态频率支持, 从而改善了风电场接入电网后降低系统惯量的不利影响。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真系统

为验证本文提出的控制策略, 利用Matlab/Simulink仿真软件建立了如图3所示的仿真系统, 该系统包含一个风电场(200台 $\times$ 2MW永磁直驱风电机组), 和一个容量为1200MVA的火电厂( $G_1$ )。负荷

$L_1$ 和 $L_2$ 容量分别为800MW和300MW,风电场和火电厂均视为等值机组。仿真结果中功率、转速和电压均采用标么值,选取各个发电厂的额定容量为其功率基值。为简化分析,假定风速为8m/s。

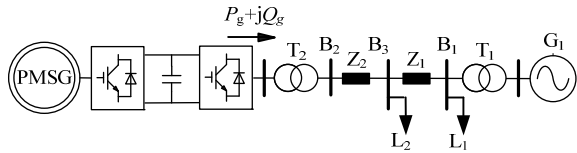


图 3 仿真系统结构图

3.2 系统负荷增加时的仿真分析

风速为 8m/s, PMSG 风电机组运行在最大功率跟踪状态,通过负载 $L_1$ 在 3.0s时刻由 800MW增至 1000MW,使系统频率降低。PMSG 机组采用频率控制前后,系统动态响应的仿真结果如图 4、5 所示。

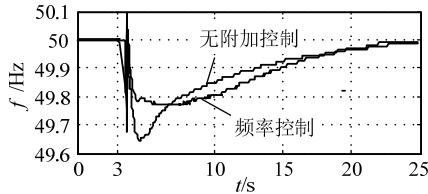


图 4 负荷 $L_1$ 突增 200MW时系统的频率响应对比

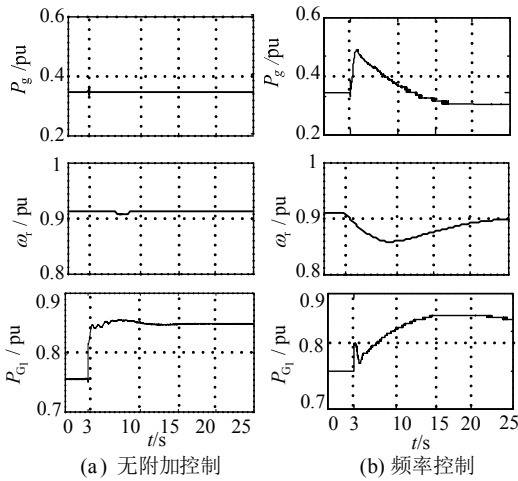


图 5 PMSG功率、转速及 $G_1$ 的功率响应对比

图 4 为 PMSG 机组采用频率控制与无附加控制,即传统最大功率跟踪控制的系统频率响应对比。采用频率控制后,系统频率变化得到了明显减缓,频率最低值由 49.65Hz 提升为 49.78Hz, PMSG 机组在频率动态过程中对系统起到了明显的惯性支持作用。

图5对比了无附加控制和采用频率控制下 PMSG 风电机组的功率、转速及 $G_1$ 有功输出的动态

响应。当PMSG机组无附加控制时,风电场对系统频率变化几乎没有响应,而 $G_1$ 的有功输出在系统功率不平衡下快速增加以补偿系统的功率缺额;当 PMSG 机组采用频率控制后,转速下降约为0.07pu,释放部分转子动能,功率增量最大约为0.16pu,使系统频率突变量得到了有效减弱,由于风电场对系统有功的支持,分担了系统突变的功率, $G_1$ 的功率不平衡情况有所缓解,从而降低了频率的变化幅值。

3.3 系统负荷减小时的仿真分析

风速为8m/s, PMSG 风电机组运行在最大功率跟踪状态,通过负载 $L_1$ 在 3.0s时刻由 800MW减至 600MW,使系统频率降低。PMSG 机组采用频率控制前后,系统动态响应的仿真结果如图6、7所示。

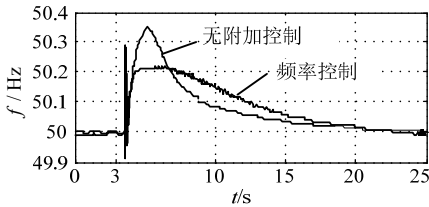


图 6 负荷 $L_1$ 突减 200MW时系统的频率响应对比

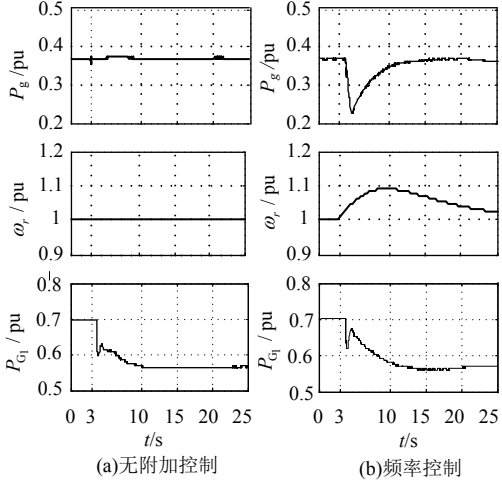


图 7 PMSG功率、转速及 $G_1$ 的功率响应对比

图 6 对比了 PMSG 机组采用频率控制前后系统的频率响应对比。采用频率控制后,系统频率变化得到了明显减缓,频率最高值由 50.34Hz 下降至 50.21Hz, PMSG 机组在频率动态过程中对系统起到了明显的惯性支持作用。

图7对比了采用频率控制前后风电机组的功率、转速及 $G_1$ 有功输出的动态响应。当PMSG机组无附加控制时,风电场对系统频率变化几乎没有响应; PMSG 机组在频率控制下,转速明显上升,储

存了部分转子动能,使系统频率突变量得到了有效减弱。风电场在系统功率过剩时,通过减小自身的有功输出,缓解了系统功率过剩的情况,使 $G_1$ 的功率不平衡情况有所改善。

## 4 结论

本文研究了电网出现功率不平衡后永磁直驱风电机组参与系统频率调整,增加系统惯性的控制技术,使基于PMSG的风电场具备参与电网调频的能力。通过对提出的控制策略的原理和仿真分析,得出如下结论:

1) 永磁直驱同步风电机组通过全功率变流器接入电网,隔离了风电机组和电网之间的电气联系,缺乏对电网频率的动态响应。

2) PMSG风电机组通过全功率变流器的有功调节可增加系统惯性,快速缓解电网功率的不平衡情况,参与系统频率调整。

3) 通过改进永磁直驱机组最大功率跟踪控制,使风电机组对系统频率具备有效的动态响应,参与电网的有功调节,可以有效改善因风电渗透率较高导致系统惯性降低的不利影响,提高了系统的暂态稳定性。

## 参考文献:

- [1] Word Wild Wind Energy Report 2011. [Online]. Available: <http://www.wwec2010.com>.
- [2] Li S H, Haskew T A, Xu L. Conventional and novel control designs for direct driven PMSG wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80: 328-338.
- [3] 姚骏,廖勇,庄凯. 永磁直驱风电机组的双 PWM 变换器协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 88-92.
- [4] 肖磊,黄守道,黄科元,等. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 123-129.

- [5] 李建林,胡书举,孔德国,等. 全功率变流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): 91-94.
- [6] 耿华,许德伟,吴斌,等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 68-75.
- [7] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.
- [8] 关宏亮,迟永宁,王伟胜,等. 双馈变速风电机组频率控制的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 61-65.
- [9] 曹军,王虹富,邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
- [10] Ekanayake J, Jenkins N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19 (4): 800-802.
- [11] Holdsworth L, Ekanayake J, Jenkins N. Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator-based wind turbines[J]. Wind Energy, 2004, 7(1): 21-35.
- [12] Ramtharan G, Ekanayake J B and Jenkins N. Frequency support from DFIG wind turbine. IET Renew. Power Generator, 2007, 1 (1): 3-9.
- [13] 李晶,宋家骅,王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
- [14] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 34-35.

## 作者简介:

- 王 琛(1984-), 男, 助理工程师, 研究方向为风力发电控制技术;
- 张玉婷(1984-), 女, 助理工程师, 研究方向为风力发电控制技术;
- 黄 松(1984-), 男, 助理工程师, 研究方向为风力发电控制技术。