

基于多参考信号的变速恒频风电机组的最大风能追踪控制

变速恒频风力发电机组的最大风能追踪控制通常采用基于单一转速信号或单一功率信号的控制方式，两种方式各有优缺点，但是难以同时兼顾系统响应速度与稳定性。以直驱永磁同步风力发电机组系统为例，建立了其机组各部分的数学模型，利用PSCAD/EMTDC搭建了基于双PWM变换器的并网系统仿真模型，并对上述两种控制方式的仿真结果进行对比分析。在此基础上，提出了一种基于多参考信号的实现最大风能追踪控制的思路。仿真结果表明，该方法能够提高系统跟随风速变化的响应速度，同时又具有较高的稳定性。

种亚林 唐文虎 李 波/华南理工大学电力学院

0 引言

在过去几十年，随着传统能源的匮乏和环境恶化带来的压力迅速增加，风能作为一种新型可再生能源得到了巨大的关注，我国的风电装机容量随之迅速增加，开展对风电大规模并网运行和控制技术的研究对保障电力系统的稳定运行具有十分重要的意义。

目前，我国市场上装机应用比较广泛的变速恒频风力发电机组主要包括双馈式感应发电机（Doubly Fed Induction Generator, DFIG）和直驱永磁同步发电机（Direct-driven Permanent Magnet Synchronous Generator, D-PMSG）两种，相较于双馈式感应电机，直驱永磁同步电机由于省去了齿轮箱结构，噪声减小，更能够适应低风速，且能耗较少、后续维护成本低^[1]。我国低风速的三类风区占到我国全部风能资源的50%左右，直驱永磁同步风力发电机将是我国风力发电机未来发展的方向。故而，本文采

用直驱永磁同步风机作为研究对象。

目前针对变速恒频风力发电机组双PWM变换器结构系统的最大风能追踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）控制的研究已有诸多文献：文献[2-3]分别给出了基于单一转速信号或者功率信号的控制方式，但是并未对该控制方式的结果以及不同的控制方式之间的联系进行分析；文献[4-5]对变速风电机组的最大风能追踪控制方法进行了综述，但是没有给出各种控制方式具体的仿真结果以及选择依据；文献[6]基于转速信号、叶尖速比信号以及功率信号三种控制方法建立了仿真模型，对仿真结果进行了简单的对比，但是并未分析三种控制方式之间的联系和相应的理论依据；同时，有大量的文献采用转速控制和功率控制的MPPT控制策略对变速风电机组的控制策略和并网可靠性等问题进行了研究，但是都局限于整个系统或者控制方式本身的研究之上，没有深入进行转速信号和功率信号这两种控制方式之间相互联系的研究工作。对此，在经过对诸多文献研究的基础上，本文通过PSCAD分别针对基于转速信号和功率信号的MPPT控制策略进行了详细的建模仿真，仿真结果验证了所建模型的正确性，并对上述两种控制方法的仿真结果进行深入对比，阐述了不同控制方式的优缺点，在此基础上，结合仿真结果和相应的理论分析，将转速信号和功率信号有机地结合起来，最后提出了基于多参考信号的变速恒频风力发电机组的



种亚林/硕士研究生

关键词/Keywords

变速恒频 ·
直驱永磁 ·
双PWM变换器 ·
最大风能追踪控制 ·

MPPT控制策略，并且以直驱永磁同步风力发电机组系统为研究对象，通过建模仿真验证了该控制方式的有效性。

1 机组系统及数学模型

所采用的直驱永磁同步风力发电机组系统结构如图1所示。其通过风轮机将风能转化为机械

能，然后由永磁同步发电机将机械能转化为电能并通过双PWM全功率变换器的整流逆变，获得稳定的电能，最后接入电网，实现并网运行。图1中， $T_1 \sim T_6$ 、 $G_1 \sim G_6$ 分别代表三相桥式PWM变换器整流侧和逆变侧的各开关器件控制脉冲信号，可以通过波形调制获得； U_{DC} 为直流侧电容两端的直流电压。

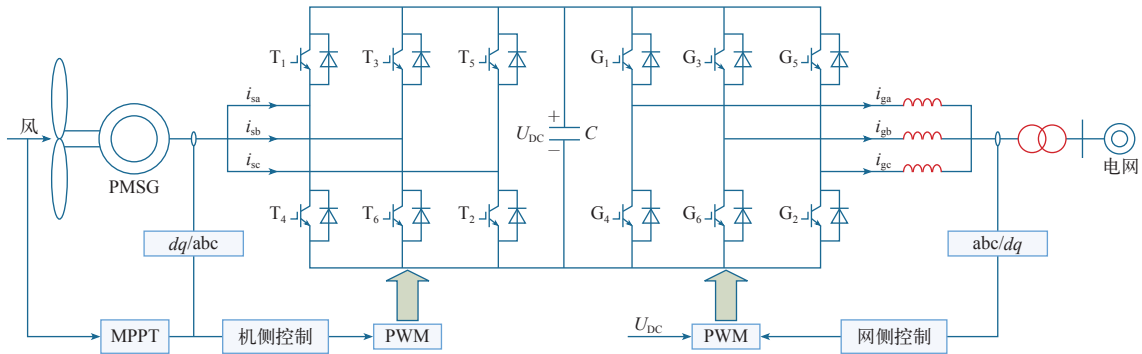


图1 直驱永磁同步风力发电机组系统结构图

1.1 风轮机模型

根据贝茨理论^[7]，风轮机捕获的风能转化吸收后的机械功率可以表示为

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

式中， ρ 为空气密度， kg/m^3 ，本文中取值为1.21； R 为叶片的半径， m ； v 为风速， m/s 。

式(1)中， $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数，是关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数^[7-8]，其值通常取决于风轮机的叶片结构，本文采用在风电研究中比较通用的表达式来近似表达文中研究所选风轮机的风能利用系数曲线，其曲线如图2所示，具体可以表示为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(-\frac{12.5}{\lambda_1} \right) \\ \lambda_1 = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

并且

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (3)$$

式中， ω_t 为风轮机叶片转速， rad/s ，即风轮机的机

械转速 ω_m ，由于本文为直驱机组，故而也是永磁同步发电机的转速。

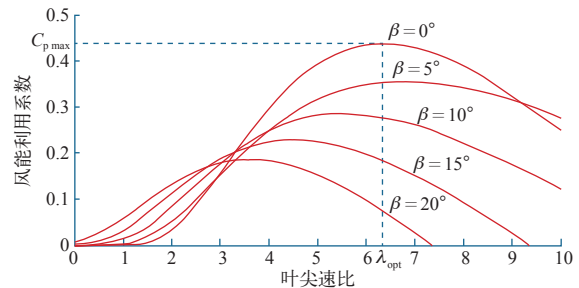


图2 风能利用系数曲线

由图2可以看出，对应不同的桨距角，都有一个最大的风能利用系数，而当 $\beta = 0^\circ$ 时，此时对应的曲线有 $\lambda = \lambda_{opt}$ （最佳叶尖速比）时， C_p 取得最大值 C_{pmax} ，故而可得某一风速下风轮机获得的最大机械功率为

$$P_{max} = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho \pi R^2 v^3 \quad (4)$$

根据式(3)可知，该风速下对应的风轮机的最佳转速为

$$\omega_{opt} = \frac{v}{R} \lambda_{opt} \quad (5)$$

同时联立式(4), 可得风轮机捕获的最大功率为

$$P_{\max} = \frac{0.5C_{p\max}\rho\pi R^5}{\lambda_{\text{opt}}^3} \omega_{\text{opt}}^3 = k_{\text{opt}} \omega_{\text{opt}}^3 \quad (6)$$

式中, k_{opt} 为一常数, 由风轮机的特性决定, 因此对于不同的风速, 总有一个确定的最佳转速和最大功率。

图3为不同风速下 ($v_1 \sim v_6$ 逐渐增加) 风轮机的输出功率特性曲线, 各风速下的最大功率点的轨迹即为风轮机捕获的最大功率曲线 P_{opt} (在 $\beta = 0^\circ$ 时的曲线)。图3中, ω_{in} 、 ω_n 分别为风轮机的切入转速和额定转速; P_n 为风轮机的额定功率; pu (下同) 表示各参数变量的标么值。

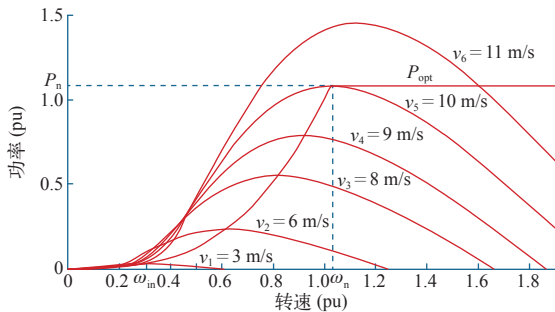


图3 风轮机输出功率特性曲线

由图3可以看出, 当风速大于切入风速时, 风轮机开始工作捕获风能, 在此期间, 使风能利用系数一直保持在最大值不变, 控制风轮机的转速 (功率) 始终跟随最佳转速 ω_{opt} (最大功率 $P_{\max}$), 使风力机运行在最大功率曲线上, 从而实现机组对风能的最大功率追踪控制, 即为机组MPPT控制^[9]。

通过式(6)和图3可以发现, 无论是转速控制还是功率控制时, 其目标都是要使风轮机最终工作在最大功率曲线上。在运用单一转速控制时, 由于风轮机的转速跟随最佳转速变化, 随着风速的跃变, 最佳转速也会跟着跃变, 使其偏移最大功率曲线, 此时的风能利用系数会有明显的下降, 进而导致风轮机捕获的功率下降, 出现较大的振荡, 待转速稳定时, 重新恢复到功率曲线上。在运用单一功率控制时, 由于发电机的输出有功功率始终跟随风轮机捕获的最大功率, 同时

由于风轮机和发电机巨大的机械惯性, 发电机的转速并不会发生突变, 响应速度较慢, 故而风轮机捕获的最大功率也会随着转速的变化缓慢增加, 沿着最大功率曲线缓慢过渡, 故而其响应过渡比较平稳, 不会出现功率的振荡。

风轮机的机械输出转矩为

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (7)$$

1.2 永磁同步发电机模型

对于永磁同步发电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG), 本文直接采用PSCAD中的永磁同步电机模型, 在同步旋转坐标系下, 选取 d 轴作为定子电压矢量的参考方向, q 轴超前于 d 轴 90° , 则其在 dq 轴同步旋转坐标系下的电压方程^[10-12]可表示为

$$\begin{cases} u_{sd} = i_{sd} R_s + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_q i_{sq} \\ u_{sq} = i_{sq} R_s + L_q \frac{di_{sq}}{dt} - \omega L_d i_{sd} + \omega \Psi_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 为发电机定子 d 、 q 轴电压; i_{sd} 、 i_{sq} 为发电机定子 d 轴、 q 轴电流; L_d 、 L_q 为发电机 d 轴、 q 轴电感; R_s 为发电机定子等效电阻; ω 为发电机电角速度; Ψ_0 为发电机永磁体等效磁链。

发电机电磁转矩^[10-12]为

$$T_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + i_{sq} \Psi_0] \quad (9)$$

式中, p 为发电机极对数, 同时有 $\omega = p\omega_m$ 。文中PMSG采用 $i_{sd}^* = 0$ 的控制策略, 故而上式可以进一步简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_{sq} \Psi_0 \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 发电机的电磁转矩只与发电机定子 q 轴电流有关。

发电机的转子运动方程^[13]为

$$J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - B\omega_m \quad (11)$$

式中, J_{eq} 为等效转动惯量; B 为阻尼系数。

1.3 网侧变换器模型

对于电网侧变换器, 在同步旋转坐标系下,

选取 d 轴作为电网A相电压矢量的参考方向， q 轴超前于 d 轴 90° ，则其在 dq 轴同步旋转坐标系下的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_{gd} = i_{gd}R + L \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_e Li_{gq} + e_d \\ u_{gq} = i_{gq}R + L \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_e Li_{gd} + e_q \end{cases} \quad (12)$$

式中， u_{gd} 、 u_{gq} 为变换器输出电压的 d 轴、 q 轴分量； i_{gd} 、 i_{gq} 为变换器输出电流的 d 轴、 q 轴分量； e_d 、 e_q 为电网侧电压的 d 轴、 q 轴分量； L 、 R 和 ω_e 分别为电网侧的电感和电阻以及电角速度。

由于网侧采用电网电压定向矢量控制的策略， d 轴与电网A相电压矢量重合，故而有 $e_d = u_g$ （电网侧电压有效值）， $e_q = 0$ 。

2 控制系统比较分析

2.1 发电机侧变换器控制

发电机侧变换器控制主要分为两个部分：一部分是外环功率控制，是为了追踪风轮捕获的最大功率，保证风机始终保持在最佳功率，即为MPPT模块（图4中点画线框内部分）；另一部分是由内环电流控制构成，主要控制发电机的运行状态，其 d 轴电流采用参考电流 $i_{sd}^* = 0$ 的控制策略， q 轴电流通过MPPT模块获得电流的输入参考值。

(1) 转速控制和功率控制

机侧控制框图如图4所示，其工作原理为：通过计算模块即式（4）、式（5）计算得到输入信号的参考值 X^* （此处的 X 分别代表转速信号和功率信号），将其与实际信号值作差作为PI调节器的输入，得到内环的电流参考值，有功电流的参考值给定为 $i_{sd}^* = 0$ ；然后再经过PI调节器并引入前馈补偿变量得到最终的动态电压调节量 U_{1d} 和 U_{1q} ，然后通过 dq/abc 坐标变化，得到变换器的电压控制信

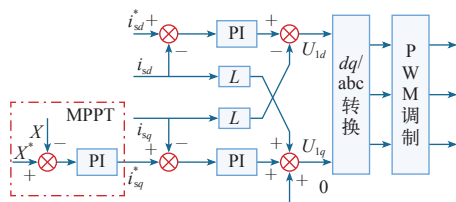


图4 机侧变换器控制框图

号，进行PWM波形调制，最终得到各开关器件的控制脉冲信号。

(2) 改进多参考信号控制设计

当采用所提出的改进多参考信号控制方式时，图4中点画线框内的控制策略按照图5所示，其余各部分保持不变。从图5中可以看出，首先将发电机的实际功率和参考功率信号作差，作为PI调节器的输入信号，将得到的信号 $\Delta\omega$ 补偿给最佳转速，得到新的转速参考信号 $\omega_{ref} = \omega_{opt} + \Delta\omega$ ，输入至PI调节器，获得 q 轴电流参考值，然后运用图4的控制策略，进而得到变换器的控制信号。

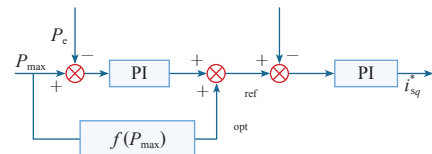


图5 改进参考信号控制框图

2.2 电网侧变换器控制

网侧变换器的控制目标是在风速和负载变化时保证有功功率、无功功率的传送和直流电压的稳定。针对不同的参考信号，网侧变换器的控制策略采用电网电压定向矢量控制策略，该控制策略与发电机侧变换器控制策略相似，一般采用电压外环和电流内环的双闭环结构，其工作原理为： d 轴电流的参考值由直流电压构成的电压外环决定，直流电压的参考值给定为一定数值，以保证直流电压的稳定； q 轴电流由无功功率构成的功率外环决定，无功功率的参考值设定为零，以保证变换器的单位功率因数运行； d 轴和 q 轴电流再经过电流内环调节后，通过引入前馈补偿变量即可获得稳定的电压输出控制量 U_{2d} 和 U_{2q} ，最后通过 dq/abc 坐标变化以及PWM波形调制，最终得到变换器的控制脉冲信号，具体控制策略如图6所示。

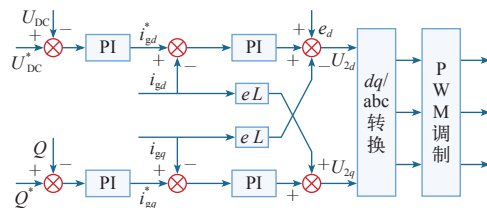


图6 网侧变换器控制框图

3 仿真结果与分析

利用PSCAD/EMTDC仿真软件建立了直驱永磁同步风力发电机组的仿真系统模型，相关参数如下表所示。

表 风力发电机组仿真参数

风轮机参数/单位	数值	发电机参数/单位	数值
风轮半径 R/m	36	额定容量 P_n/MW	1.0
空气密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.21	额定电压 U_n/kV	0.69
额定风速 $v_{in}/(\text{m}/\text{s})$	10	极对数 p	60
额定转速 $\omega_m/(\text{rad}/\text{s})$	1.713	额定转速 $\omega/(\text{rad}/\text{s})$	102.78
最佳叶尖速比 λ_{opt}	6.3	永磁磁链 Ψ_f/Wb	0.50
最大风能利用系数 $C_{p\max}$	0.438	直交电感 $L_{d,q}/\text{mH}$	0.19

本文仿真时长为20 s，仿真开始经过短时后，整个系统进入稳定状态。 $t=0$ s时，风速保持在10 m/s； $t=8$ s时，风速阶跃下降至8 m/s； $t=14$ s时，风速阶跃变化增加到9 m/s，直至仿真结束。风速变化波形图如图7所示。

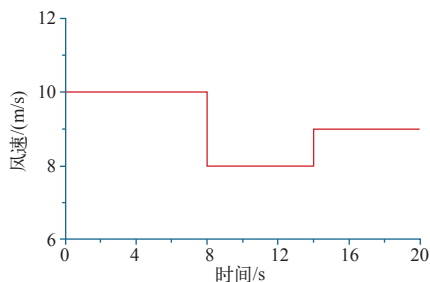


图7 风速波形

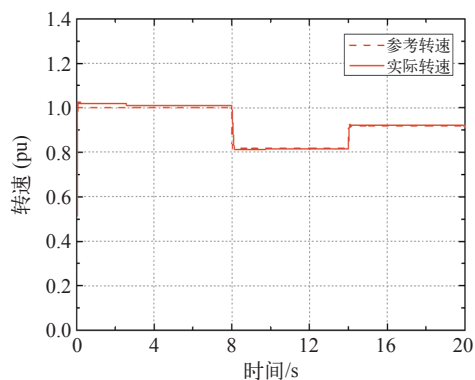
3.1 转速信号控制

当参考信号为发电机的最佳转速时，机组各变量仿真结果的波形图如图8所示。

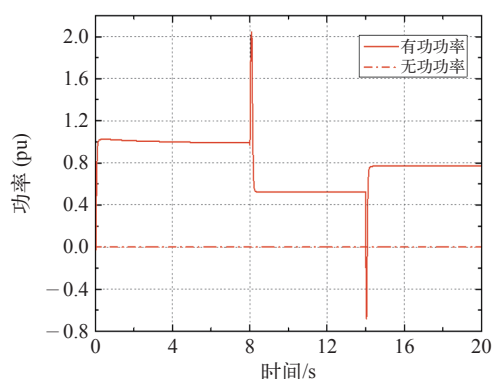
由图8可以看出，系统的转速和有功功率在风速阶跃变化时，迅速响应，能够有效地实现最大风能追踪，系统各变量最终保持在一个新的稳定状态，无功功率始终保持在零值附近；但是由于发电机的转速追踪最佳转速迅速变化时，由于系统巨大的惯性，导致发电机输出的有功功率剧烈变化，超调量很大，故而系统对于风速的迅速阶跃变化稳定性较差。

3.2 功率信号控制

当参考信号变为风轮机所能捕获的最大功率



(a) 发电机的转速

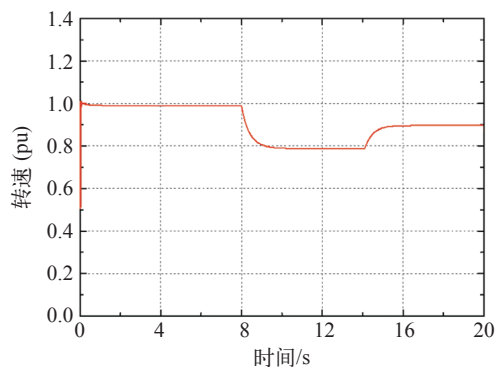


(b) 发电机输出有功功率和网侧无功功率

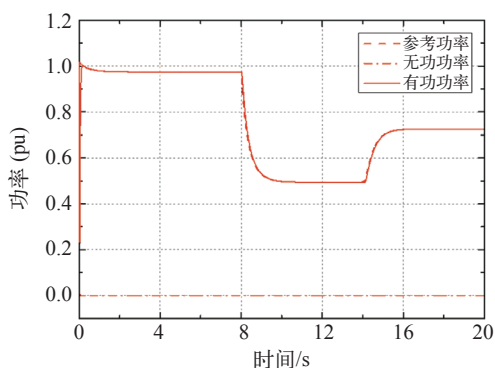
图8 转速控制时各运行变量波形图

时，机组各变量仿真结果的波形图如图9所示。

从图9中可以看出，系统的转速和功率对风速的阶跃变化响应较慢，各参量变化迟缓并最终稳定在新的状态下，能够实现系统的平稳过渡，有效地避免了风速突变对系统可能造成的冲击，具有较好的稳定性，能够有效地追踪最优功率，实现最大风能追踪控制。



(a) 发电机的转速

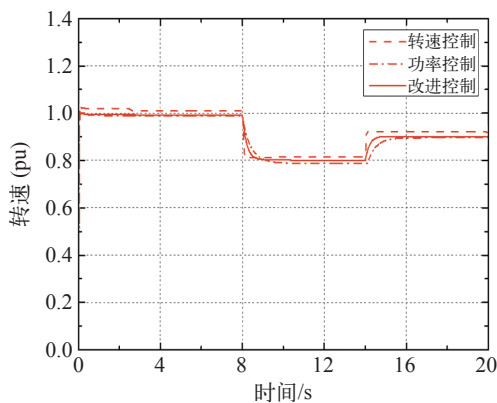


(b) 发电机输出有功功率和网侧无功功率

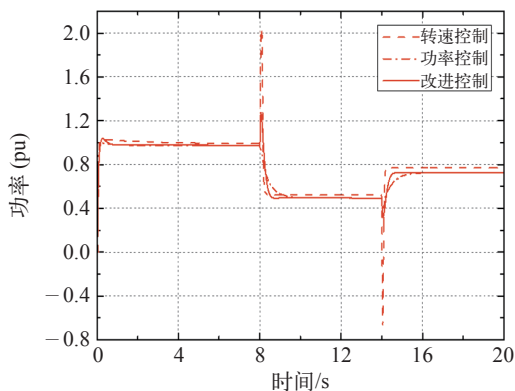
图9 功率控制时各运行变量波形图

3.3 改进多参考信号控制

当采用本文中提出的多参考信号控制时, 机组各变量仿真结果的波形对比图如图10所示。



(a) 发电机的转速



(b) 发电机输出有功功率

图10 三种MPPT控制方式仿真结果对比

当采用多参考信号改进的MPPT控制策略时, 根据图5的控制方式分析可知, 由于转速信号在内环一方面保证了系统的快速响应; 另一方面, 相

应的功率信号在外环由于其响应速度较慢, 通过功率信号的作差会产生一个相反的功率信号, 在经过调节之后, 可以补偿由于转速迅速变化引起的功率振荡, 从而有效地缓解功率剧烈变化, 继而获得较为平稳的功率输出。从图10中的对比结果可以看出, 发电机的转速和输出功率的变化和系统响应速度都介于转速控制和功率控制之间, 与理论分析相一致, 故而本文所采用的多参考信号改进的MPPT控制方式一方面能够提高单一功率信号控制时系统对阶跃风速变化的响应速度, 同时又能抑制单一转速信号控制时的功率振荡, 保持较好的稳定性。

4 结束语

详细描述了D-PMSG基于双PWM变换器结构系统各个部分的数学模型, 分别建立了基于单一转速信号和单一功率信号的直驱永磁同步风力发电机组的MPPT控制的仿真模型。仿真结果表明, 所建模型能够实现机组的变速运行和最大风能追踪以及有功、无功的解耦控制, 验证了所建数学模型的正确性。同时, 本文将两种控制方式的仿真结果进行了对比分析, 对比结果显示: 转速控制具有较快的响应速度, 但是输出功率的稳定性较差; 功率控制的系统响应较慢, 但是具有较好的动态稳定性, 并分析了可能的原因。在此基础上, 提出了一种基于多参考信号改进的MPPT控制策略, 该方式通过外环功率信号的调节引入附加转速, 再以新的最佳转速作为参考信号, 经过内环的调节获得 q 轴参考电流, 进而实现整个机组的MPPT控制, 最后通过对该控制方式的建模仿真, 并同上述两种常用控制方式相比较, 验证了该控制方式的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 朱卫平, 王秀丽, 王锡凡, 等. 变速变频风力发电系统最优风能捕获运行方式 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (11): 94-98.
- [2] Eftiehios K, Kostas K. Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion

- applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (2) : 486-494.
- [3] Moor G D, Beukes H J. Maximum power point trackers for wind turbines [C]. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004 : 2044-2049.
- [4] 宋卓彦, 王锡凡, 滕予非, 等. 变速恒频风力发电机组控制技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (10) : 8-17.
- [5] 吴政球, 干磊, 曾议, 等. 风力发电最大风能追踪综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (4) : 88-93.
- [6] 朱翔, 高强, 李征, 等. 基于自建永磁直驱风电机组数学模型的三种MPPT控制模式的比较研究 [J]. 华东电力, 2013, 41 (2) : 341-346.
- [7] Younsi R, Eibatany I, Tritsch J B, et al. Dynamic study of a turbine blade with horizontal axis [J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2001, 20 (2) : 241-252.
- [8] Nicholas W M, Juan J S-G, William W P. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine generators for stability simulation [R]. USA: GE Power Systems Energy Consulting, 2003.
- [9] 周志超, 王成山, 郭力, 等. 变速变桨距风电机组的全风速限功率优化控制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (8) : 1737-1844.
- [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, 2010, 22 (1) : 65-70.
- [11] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电机组最大功率追踪控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (27) : 106-111.
- [12] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略 [J]. 电网技术, 2007, 31 (15) : 61-65.
- [13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [14] 管维亚, 吴峰, 鞠平. 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (9) : 54-60.
- [15] Omid A, Amirnaser Y. A strategy for real power control in a direct-drive PMSG-based wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3) : 1297-1305.
- (收稿日期: 2016-11-17) **EA**

(上接第65页)

- [8] 丁志勇. 基于相似日聚类的支持向量风电功率预测方法 [J]. 电气应用, 2013, 32 (19) : 25-28.
- [9] 杨茂, 熊昊, 严干贵, 等. 基于数据挖掘和模糊聚类的风电功率实时预测研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (1) : 1-6.
- [10] 朱峰, 孙辉, 周玮. 基于相似日聚类的神经网络风速预测 [C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会议论文集 (下册), 2008.
- [11] 方江晓, 周晖, 黄梅, 等. 基于统计聚类分析的短期风电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (11) : 67-74.
- [12] 王骏, 王士同, 邓赵红. 聚类分析中的若干问题 [J]. 控制与决策, 2012, 27 (3) : 321-32.
- [13] 范高峰, 王伟胜, 刘纯. 基于人工神经网络的风电功率短期预测系统 [J]. 电网技术, 2008, 32 (22) : 72-76.
- (收稿日期: 2016-12-13) **EA**