

新型场调制风力发电机的变步长爬山法 MPPT 控制

程 明, 李 顺, 李祥林

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 最大风功率跟踪 (MPPT) 控制是变速恒频风力发电机组实现风能高效利用的关键技术之一。本文针对所提出的一种利用磁齿轮原理的低速大扭矩新型场调制电机, 提出了一种利用 PI 调节器的新型变步长爬山法 MPPT 控制策略, 相较于常用的转速控制方法, 本文中电机侧控制器采用对发电机的转矩进行直接控制, 利用爬山法计算给定转矩, 作为直接转矩控制的目标进行实时跟踪, 从而实现最大风能跟踪, 使该控制系统获得了较好的快速性和鲁棒性。

关键词: 变步长爬山法; 磁齿轮电机; 直接转矩控制; 最大风能跟踪

0 引言

随着现代社会的快速发展, 能源危机、环境污染问题日益严峻, 可再生能源的开发利用正呈现出加速发展的趋势。风能作为一种绿色能源, 正逐渐被人们熟悉和利用。近年来, 风力发电产业得到了蓬勃发展, 先后涌现出多种风力发电系统及其部件的新结构, 以及相应的控制方法等。目前, 变速恒频风力发电系统以其风能利用率高等特点成为大功率并网发电系统中的主流技术^[1]。

在变速恒频的风力发电机组中, 直驱型风力发电机组中, 采用全功率变流器, 将发电机与电网隔离, 既保护了发电机又提高了输出电能质量, 受到了越来越多的关注和研究, 成为目前大型并网型风力发电机组发展的重要方向。相较于传统带有齿轮箱的驱动方式, 直接驱动技术提高了系统的可靠性, 节约了维护费用, 减小了机械损耗, 提高了系统效率。但是直驱式风力发电机转速很低, 导致电机体积和质量大, 制造、运输和安装困难。

磁齿轮概念的引入可以较好地解决直驱风力发电发电机低转速带来的问题。相比于传统的机械齿轮变速方式, 磁齿轮具有高效率、低噪声、维护费用低、可靠性高以及过载保护性能好等特点。早在上世纪初期磁齿轮的概念就被提了出来, 但是受限于永磁材料以及有缺陷的结构设计, 实用价值比较低, 发展较为缓慢。上世纪 80 年代后, 稀土永磁材料得到了快速发展, 特别是高磁能积钕铁硼等高性能永磁材料开始大规模应用, 磁齿轮技术再度受到

国内外学者的关注。上世纪 90 年代以来, 提出了多种新型同轴磁齿轮结构^[2,3], 如图 1 所示, 该新型磁齿轮结构在内外转子之间加入了调磁环, 利用磁场调制原理实现内外转子的变速传动, 根据理论分析以及实际仿真测试, 其转矩传递效率可达 96% 以上。将磁齿轮应用于直接驱动技术, 可以较好满足直接驱动控制技术较高的转矩电流比要求。

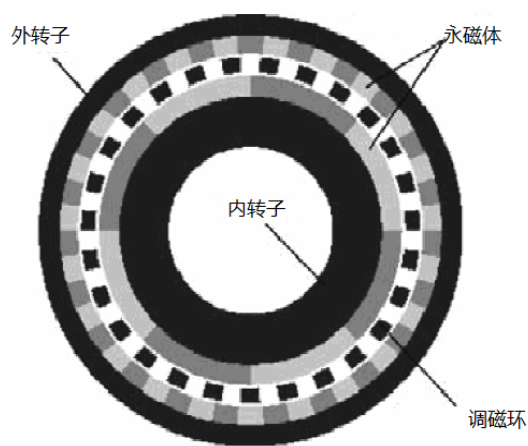


图 1 新型同轴磁齿轮结构

磁齿轮的不断深入研究为磁齿轮和永磁电机一体化研究提供了基础, 利用磁齿轮调速这一概念, 将磁场调制原理应用到电机上, 就可以研制出低速大扭矩的磁齿轮电机, 而这样的电机和低速直驱风力发电的目标正相符合。本文基于利用磁齿轮原理的新型外转子永磁电机, 对其风力发电系统进行最大风能跟踪控制研究, 其跟踪方式利用了直接转矩控制技术, 并采用一种新型的变步长爬山法, 实现

最大风能的快速、稳定跟踪这一目标。

最大风能跟踪是指在风机运行过程中伴随风速的变化实时保持最大功率点, 以实现风能的最大利用。常用的最大风能跟踪方式一般分为三种: 最佳叶尖速比法、功率信号反馈法、爬山法。最佳叶尖速比法物理概念清晰明了, 直接体现了最大风能跟踪思想, 原理简单, 但其需要精确的风速测量装置, 在实际工程当中, 风速准确实时测量有一定难度, 所以最佳叶尖速比法的应用较少。功率信号反馈法不需要风速测量装置, 但需要知道较为精确的最优功率曲线, 对于不同的风机要做大量实验测试以及仿真验证, 从而增加了技术难度。爬山法无需风速测定装置, 也不需要知道确切的风机功率特性, 但更适用于小惯性风电系统, 即使在风速稳定的情况下, 因为其需扰动搜索, 也会使得其在最佳功率点附近波动, 对于大惯性风力发电系统以及出现风速变化较快的情况, 其稳定性能较低, 跟踪时间也较长。此外, 在这三种方法基础上也衍生出三点比较法、基于风速估计的最优叶尖速比法、模糊逻辑搜索法、最优转矩算法等等, 这些新的算法是在原有三种主要算法的基础上, 做出了一些功能上的改进, 基本保持了原算法的特点^[4-8]。

爬山法因其无需风速测量装置以及对风力机的特性不敏感, 在实际工程当中应用较多。本文在传统爬山法基础上进行了优化改进, 提出一种新型变步长爬山法, 较好地解决了爬山法所存在的缺点。变步长爬山法中步长改变原则一直是近年来的研究热点, 纵观国内外相关文献报道, 所提出的方法可以较好地控制风速稳定时的稳态运行^[8,9,10], 但是风速快速变化时的实时跟踪控制并未得到较好解决。这主要是因为离开了风速测量装置, 系统对风力变化趋势只能是扰动判断, 所以不能将步长设定太大, 这样就降低了风机系统的快速性。本文采用一种 PI 调制方法, 利用 PI 调节器获得爬山步长, 能够在风速快速变化时较快的实现最大功率点的跟踪, 而且 PI 调节控制对风速变化也有一定的记忆功能。

实现最大风能跟踪时, 控制对象有转速、功率、转矩, 一般根据控制器使用算法的不同, 再结合最大风能跟踪方式的不同, 来选择控制对象。选择不同的对象进行控制本质上是一致的, 都是保持风力机系统运行于最佳功率点, 但在实现的过程中, 控制难度和运行精度有一定差别。基于叶尖速比的

SVPWM 矢量控制, 控制对象为发电机转速, 在实际应用中, 该方法有着不错的效果, 但相对而言, SVPWM 较为复杂, 需要繁琐的坐标变换和较准确的转子位置信息。随着控制理论的发展, 直接转矩控制开始应用于各种电机控制系统, 控制策略直接简便, 物理概念清晰明了, 实时性较好, 将直接转矩控制技术应用于风力发电系统, 以转矩为控制对象, 开始受到关注, 近年来得到快速的发展^[11,12]。

1 场调制电机原理

图 2 所示为本文所研究的场调制永电发电机的结构示意图^[13], 该新型电机利用定子齿对内外磁场进行调制, 定子齿兼有调磁环的作用, 与常规磁齿轮电机相比^[14, 15], 省去了专用的调磁环, 从而使电机结构简化。分析其磁场时可分步进行, 首先计算外转子建立的磁场, 而后分析定子齿的调磁作用系数, 最后将二者相乘, 得出外转子经过定子齿的调磁之后作用在定子绕组的磁场^[14,15,16]。

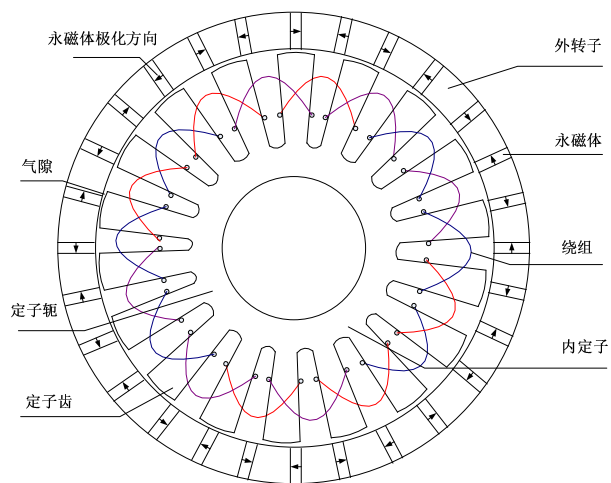


图 2 新型场调制电机结构

外转子永磁体在内层空间建立的磁场可表示为:

$$B_{ri} = \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} a_x \cos[xp_i(\theta_i - \omega_i t + \gamma_0)] \quad (1)$$

$$B_{ti} = \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} b_x \sin[xp_i(\theta_i - \omega_i t + \gamma_0)] \quad (2)$$

式中: B_{ri} ——外转子永磁体所产生的磁场在空间某点磁感应强度径向分量;

B_{ti} ——外转子所产生的磁场在空间某点磁感应强度切向分量;

a_x ——外转子永磁体所产生磁场的 B_{ri} 中第 x

次谐波的傅里叶系数;

b_x ——外转子永磁体所产生磁场的 B_{ii} 中第 x 次谐波的傅里叶系数;

p_i ——外转子永磁体极对数;

ω_i ——外转子旋转角速度;

γ_o ——外转子永磁体形成磁场的初始位置;

θ_i ——外转子永磁体所建立磁场的空间位置角;

定子齿对外转子永磁体所建立的磁场进行调制, 此处引入调制函数来表征其调制作用, 如下式所示:

$$\mu_i = c_0 + \sum_{y=1}^{+\infty} c_y \cos[yN_s(\theta_i + \beta_0)] \quad (3)$$

式中 c_0 ——调制函数中直流量的傅里叶系数;

c_y ——调制函数中第 y 次谐波的傅里叶系数;

N_s ——定子齿数;

β_0 ——定子齿在圆周方向的初始位置;

故, 经过调制之后的空间磁场可表示如下:

$$\begin{aligned} B'_{ri} = B_{ri} \times \mu_i = & \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} a_x c_0 \cos(xp_i(\theta_i - \omega_i t + \gamma_0)) \\ & + \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} \sum_{y=1}^{+\infty} \frac{a_x c_y}{2} \cos((yN_s + xp_i) \times \\ & (\theta_i - \frac{xp_i \omega_i t}{yN_s + xp_i} + \frac{yN_s \beta_0 + xp_i \gamma_0}{yN_s + xp_i})) \\ & + \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} \sum_{y=1}^{+\infty} \frac{a_x c_y}{2} \cos((yN_s - xp_i) \times \\ & (\theta_i + \frac{xp_i \omega_i t}{yN_s - xp_i} + \frac{yN_s \beta_0 - xp_i \gamma_0}{yN_s - xp_i})) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} B'_{ii} = B_{ii} \times \mu_i = & \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} b_x c_0 \sin(xp_i(\theta_i - \omega_i t + \gamma_0)) \\ & + \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} \sum_{y=1}^{+\infty} \frac{b_x c_y}{2} \sin((yN_s + xp_i) \times \\ & (\theta_i - \frac{xp_i \omega_i t}{yN_s + xp_i} + \frac{yN_s \beta_0 + xp_i \gamma_0}{yN_s + xp_i})) \\ & + \sum_{x=1,3,5}^{+\infty} \sum_{y=1}^{+\infty} \frac{b_x c_y}{2} \sin((yN_s - xp_i) \times \\ & (\theta_i + \frac{xp_i \omega_i t}{yN_s - xp_i} + \frac{yN_s \beta_0 - xp_i \gamma_0}{yN_s - xp_i})) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: B'_{ri} ——外转子磁场在空间某点磁感应强度经

调制后的径向分量;

B'_{ii} ——外转子磁场在空间某点磁感应强度经调制后的切向分量。

通过以上公式推导, 可以看出外转子磁场经过定子齿调制后, 建立了含有多种谐波成分磁场, 这些谐波成分的极对数可以表达为:

$$P_{m,k} = |mp_i + kN_s| \quad (6)$$

式中: $m=1,3,5\ldots, +\infty$; $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\ldots, \pm\infty$ 。运用上述方法, 可以推导出, 内定子绕组经过定子齿的调制后, 产生的气隙磁密极对数的表达式也可由类似公式(6)来表示。根据麦克斯韦张量理论, 如果两个谐波分量具有相等的极对数, 并且它们之间的空间相位差不随时间变化, 则这两个谐波分量的相互作用可以传递稳定的转矩。所以可以取外转子永磁体极对数 p_i 、定子绕组极对数 p_o 和 N_s 满足如下关系:

$$N_s = p_o + p_i \quad (7)$$

由两谐波磁场的相位差不随谐波变化可以推导出磁场的转速比为:

$$\frac{\omega_i}{\omega_o} = \frac{p_o}{p_i} = G_r \quad (8)$$

式(8)中的 G_r 为内外磁场的变比, ω_o 为定子绕组形成磁场的旋转角速度, 本文所针对的场调制电机 $p_i=14, p_o=4$, 所以该电机的变比为 4/14。

2 最大风能跟踪

在风场中, 风速变化具有随机性、间歇性等特点, 风力机模型要能反映出实际风场的风力特点, 同时也要模拟出针对一定风机, 其最大风能跟踪的功率曲线。

根据贝兹理论, 风力机从风能中捕获的功率 P_w 为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3 \quad (9)$$

式中 ρ 为空气密度, A 为风力机扫风面积, C_p 为风力机风能利用系数, v 为风速。

对于风轮半径为 R 的风机, 表达式如下:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3 \quad (10)$$

当风力机在最大风能跟踪情况下运行时, 由式 (10) 可得, 风力机的输出转矩为:

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p v^2 / \lambda \quad (11)$$

式中 λ 叶尖速比, 是风力机的一个重要参数, 定义为风轮叶片的叶尖速与风速之比, 即:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (12)$$

式中: ω 为风力机的机械角速度。风能利用系数 C_p 和桨距角以及叶尖速比有关, 当桨距角为定值时, 风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 的函数,

如图 3 所示。可以看出, 对于一台确定的风力机, 在桨距角保持不变时, 总有一个对应着最大风能利用系数 C_{max} 的最佳叶尖速比 λ_{opt} , 此时风力机的转换效率最高。即对于一个特定的风速 v , 风力机只有运行在一个特定的转速 ω 下才会有最高的风能转换效率。

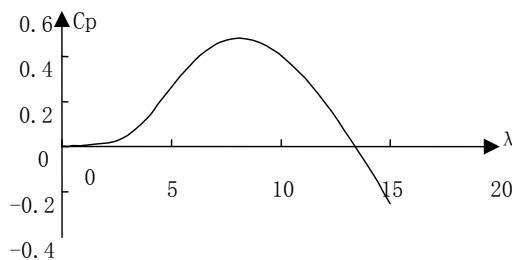


图 3 风能利用系数与叶尖速比的关系曲线

3 爬山法实现原理

3.1 传统爬山法跟踪方式

爬山法为一种扰动跟踪方式, 扰动步长设定以及扰动方向选择, 是实现最大风能跟踪的关键。

图 4 为在某一恒定风速下, 传统定步长爬山法的最大风能跟踪实现过程图, 这种跟踪方式一般利用最佳叶尖速比控制方式, 通过施加一定的转速扰动, 观察下一步的功率变化情况, 利用式 (13) 判断系统是处于上山阶段, 还是下山阶段, 进而决定下一步扰动转速施加方向。以 A 点为例, 施加正的扰动转速 $\Delta\omega$, 则电机输出功率增加, 利用式 (13) 可知, 系统工作点处于上山阶段, 继而继续施加正的扰动转速, 如图 4 工作点变化方向所示, 若在 A 点施加负的扰动转速 $-\Delta\omega$, 电机输出功率减小, 则需改变扰动转速方向, 观察下一步功率变化情况。

按照这种判断逻辑, 进行循环控制, 最后到达山顶, 达到一种震荡平衡的状态。同理, 利用式 (13) 可判断 B 点处于下山阶段。

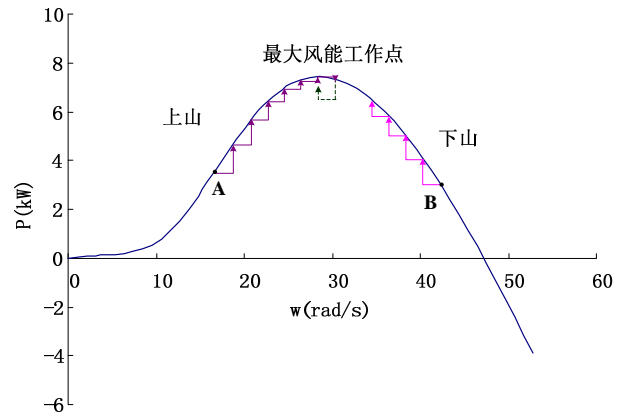


图 4 传统定步长爬山法最大风能跟踪过程

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{\Delta \omega} > 0, & \text{上山} \\ \frac{\Delta P}{\Delta \omega} = 0, & \text{山顶} \\ \frac{\Delta P}{\Delta \omega} < 0, & \text{下山} \end{cases} \quad (13)$$

式中 ΔP 为电机输出功率变化量, $\Delta\omega$ 为电机机械角速度变化量。

定步长爬山法步长为常量, 当风速变化较快时, 受步长的限制, 系统响应较慢, 当风速变化较小时, 一定的步长又会使系统震荡。变步长爬山法, 根据系统反馈, 自动调节步长, 可以快速、稳定的寻找到最佳工作点, 所以最大风能跟踪过程中利用变步长爬山法是必要的。由图 4 可以看出, 上山时 $|\Delta P / \Delta \omega|$ 随着系统工作点向山顶的爬升是逐渐减小的。利用这个特点, 文献[10]引入了一种停止机制, 即当系统工作点到达山顶附近时, 若满足 $|\Delta P / \Delta \omega| < k$, k 为一个系统动作阈值, 则认为系统处于最大风能工作点, 停止施加扰动转速。文献[9]利用 $c \Delta P / \Delta \omega$, 作为扰动转速输入量, c 为变步长爬山法的一个权值, 随着系统工作点向山顶的移动, 扰动步长逐渐减小。这两种方法使风速稳定时, 系统不会再出现震荡搜索的情况, 但是风力发电系统实际工作时, 风速不会始终保持不变, 所以当转速扰动以及风速变化双重影响时, 利用 $\Delta P / \Delta \omega$ 来判断跟踪情况, 必然影响系统跟踪的快速性、准确性, 而且两种方法都引入新的参数, 新参数的选择也会影响系统的工作情况。

3.2 新型变步长爬山法控制框图和变步长原则

与第 3.1 节所述的变步长爬山法不同，本文所提出的新型爬山法比较器不再依赖对 $\Delta P/\Delta \omega$ 的判断，而是将 PI 调节器引入，利用 PI 调节器调节出爬山步长，从而实现变风速时快速、准确控制的控制效果，风速稳定时，很小的稳态震荡。爬山法比较器需要的信号有电机的输出功率、理论最佳转矩、实际电机电磁转矩。具体爬山控制方式如图 5 所示。

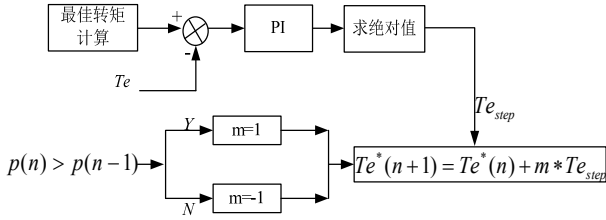


图 5 爬山法调制原则框图

由第 2 节分析可知，当系统处于最大风能工作点时，对应一个唯一的风速，所以在这个风速下必然对应一个最佳转矩，最佳转矩计算公式可由式 (11)、(12) 推得：

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 C_p \omega^2 / \lambda_{opt}^3 \quad (14)$$

因为是与实际的电磁转矩作比较，所以还需要减去空载转矩 T_0 ，作为最终的最佳电磁转矩：

$$T_w^* = T_w - T_0 \quad (15)$$

利用式 (14)、(15) 计算出最佳转矩，然后与实际电磁转矩作差，利用 PI 调节器确定爬山法步长，由第 3.1 节分析可知，爬山法本身具有绕动方向判断功能，所以在 PI 调节器后面加入绝对值环节，对转矩差进行 PI 调节并求绝对值后，就调节出爬山法步长 T_{e_step} 。电机输出有功功率利用三相电压，电流计算得出，与上一步计算出的有功功率比较判断，根据判断结果，给定扰动方向判断因子 m 值，由爬山步长、扰动方向判断因子、本次给定转矩，可确定下一步的给定转矩为

$$T_e^*(n+1) = T_e^*(n) + m * T_{e_step} \quad (16)$$

基于新型爬山法的风力发电 MPPT 控制系统如图 6 所示，由电机的电流、电压信号计算出实时功率，与上一步的功率进行比较，确定扰动方向。由电机的转速信息，计算出该转速下最佳转矩，通过爬山法比较器比较计算，得出施加的转矩扰动大小。综合扰动方向和扰动大小确定下一步的给定转矩，

利用直接转矩控制方式跟随给定扰动，进行爬山寻找最大功率点，一个控制周期以后，得出新的功率值，将新功率值再次作为输入量送入爬山法比较器，新的控制周期开始，将这个闭环控制系统循环进行，最终实现对最大风能利用点的动态跟踪。

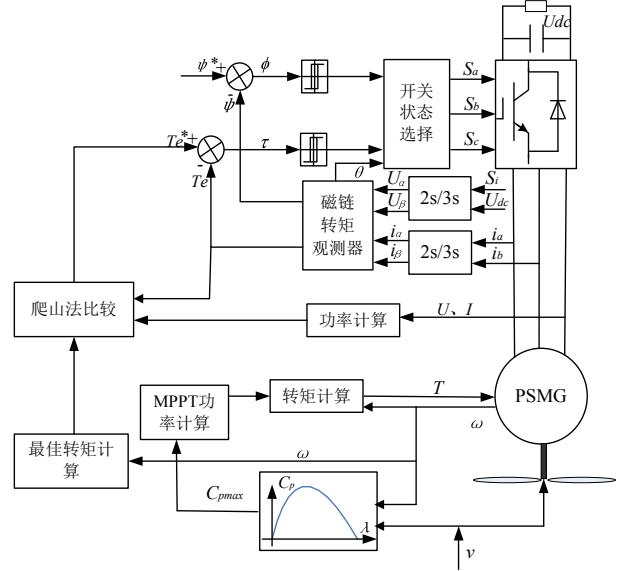


图 6 基于爬山法的风力发电 MPPT 控制系统

3.3 场调制电机直接转矩控制策略

基于磁齿轮原理的场调制电机相较于传统永磁电机加入了磁场调制环节，但仍可以利用类似于传统永磁同步电机的分析方法进行分析。图 7 为场调制电机 α 、 β 坐标系及 d 、 q 坐标系的关系图及电机各向量。图中 A 轴为定子 A 相绕组轴线， Ψ_s 为定子磁链，该磁链包括定子电流产生的磁链 Ψ_a 和经由磁场调制后永磁磁链 Ψ_f [17]。

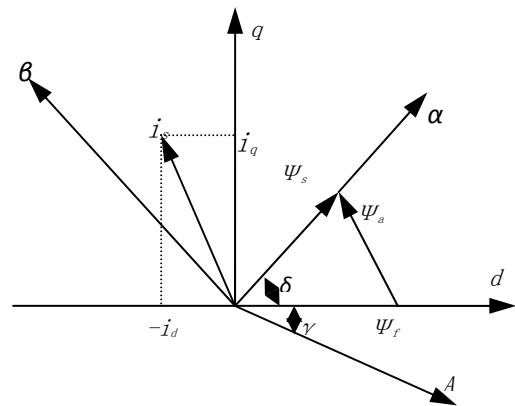


图 7 场调制电机的矢量坐标系

根据图 7 写出场调制电机电磁转矩方程：

$$T_{em} = \frac{3p|\psi_s|}{4L_dL_q} [2\psi_f L_q \sin\delta - |\psi_s|(L_q - L_d)\sin 2\delta] \quad (17)$$

式中 δ 为永磁磁链幅值及定转子磁链夹角, p 为定子绕组极对数, L_d 为电机的直轴电感, L_q 为电机的交轴电感。

场调制电机输出电磁转矩与定子磁链幅值、永磁磁链幅值及定转子磁链夹角 δ 的正弦成正比。在实际运行中, 保持定子磁链幅值为额定值, 以充分利用电机的铁心, 场调制电机的转子磁链幅值也为恒值, 要改变电机转矩的大小, 可以通过改变定、转子磁链夹角的大小来实现, 这就是直接转矩控制理论的指导思想。

根据三相六开关的开关状态可以确定 8 个电压矢量, 当实际电磁转矩小于给定时, 选择使磁链沿原方向旋转的电压矢量, 由于电机的机电时间常数远大于电磁时间常数, 使得定子磁链瞬时转速变得比转子转速快, 造成定转子磁链之间的夹角瞬时增加, 转矩迅速增大, 反之亦然。这样空间电压矢量选择, 使得定子磁链不停地进进退退, 瞬时改变功率角, 使转矩得到快速动态控制^[18,19]。

3.4 场调制电机直接转矩控制系统的实现

在场调制电机直接转矩控制系统中, 定子磁链矢量的幅值和角位置、转矩可由下列式子进行观测计算:

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt \\ \psi_\beta = \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt \end{cases} \quad (18)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \quad (19)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha}\right) \quad (20)$$

$$T_{em} = 1.5p(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (21)$$

$$T_e = \frac{1}{G_r} T_{em} \quad (22)$$

式中 ψ_α 、 ψ_β 为 α 、 β 轴轴向磁链, R_s 为定子电阻, i_α 、 i_β 轴轴向定子电流, T_{em} 为电机电磁转矩, T_e 为电机电磁转矩经磁场调制后作用到外转子上的转

矩。

如图 6 所示, 磁链观测器依据式 (18)、(19) 建立, 利用式 (20) 进行扇区判断, 由式 (21) 进行电磁转矩计算, 因为磁齿轮的调制作用, 所以计算的电磁转矩按照式 (22) 除以电机的变比, 得出实际的作用转矩。最后, 利用分析得出的开关矢量表, 对得出的磁链、转矩进行滞环控制。整个转矩和磁链控制过程中没有使用 PI 调节器, 属于时间最优控制 (Bang-Bang), 即保证两种不同状态之间的过度时间最短, 从而实现快速的转矩响应。

4 仿真结果和实验结果

仿真和实验系统针对一台基于场调制原理的磁齿轮电机, 该电机的额定输出功率为 5 kW, 定子电阻为 1.32 Ω , 电机的自感为 21mH, 此处磁场调制比为 3.5, 永磁体经磁场调制后的磁链为 0.92Wb。

利用 Matlab 的电气控制仿真模块, 对该新型电机进行仿真测试, 仿真过程中, 风速由 8.7m/s 在 1.5s 时变化为 8.1m/s。

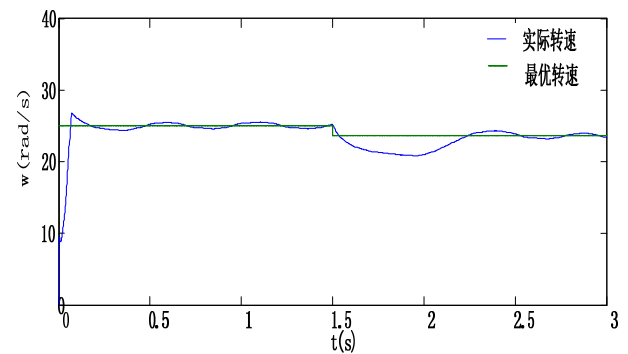


图 8 定步长时电机转速曲线

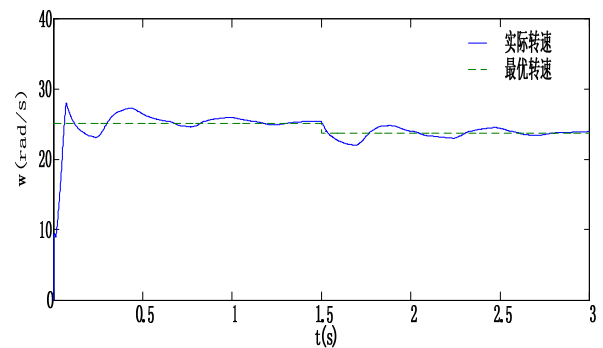


图 9 变步长时电机转速曲线

图 8 是步长设定为 1.5N·m 时转速的变化曲线, 图 9 为采用 PI 调节器得出的转速变化曲线, 从仿真得出的转速曲线上可以看出, 如图 8 所示, 定步长

时因为选择了较小的步长，所以风速稳定时，电机有较好的稳态效果，等幅震荡于最优转速，但风速变化时，控制系统有较长的反应时间，且有较大的转速变化，若选择较大步长，会出现与小步长相反的情况。因此，定步长时的系统反应的快速性和稳定性是相互矛盾的，且鲁棒性较差。采用 PI 调节器的控制效果如图 9 所示，实际转速震荡收敛于最优转速，体现出了 PI 的调节特性，相对于定步长的控制方式，采用 PI 调节的变步长爬山法控制方式，系统控制稳定性较高，风速稳定时，步长不断缩小，最终达到一个稳态情况，在最优转速附近，小幅震荡。

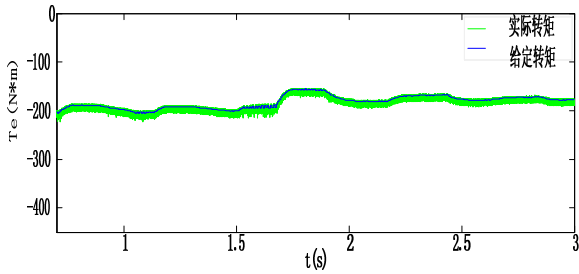


图 10 电机电磁转矩的跟踪情况

图 10 为 DTC 算法的转矩跟踪情况，从图中可以看出，实际转矩可以较好地跟随通过爬山法计算得出的给定转矩，说明了该算法的应用有效性。在 1.5s 风速变化后，因为 PI 调节器一定的记忆效应，步长没有突然改变，而是经过大约 0.15s 的滞后开始较大变化，随着最大功率点的锁定，转矩开始趋于稳定，开始小幅震荡变化。

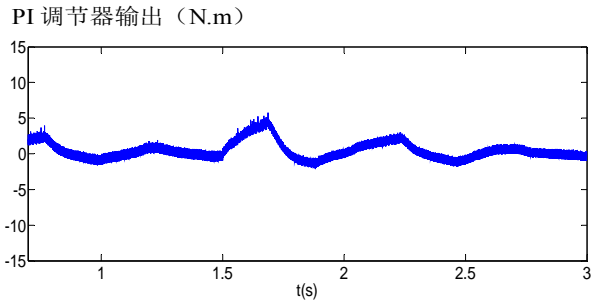


图 11 PI 调节器输出步长的变化

图 11 为 PI 调节器输出步长，对该步长求绝对值后就得到爬山扰动步长。从图中曲线变化可以看出，1.5s 风速变化时，步长是明显增大的，当风速趋于稳定时，步长逐渐减小，最终在零刻度线上下波动，体现出变步长爬山法的控制特性。

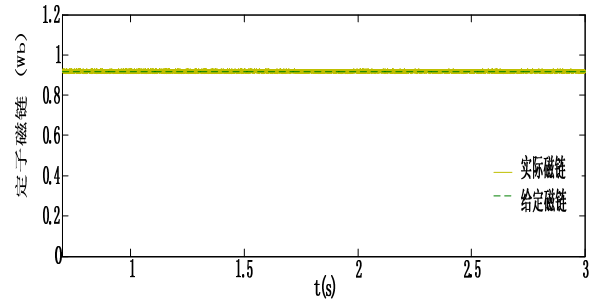


图 12 电机磁链的跟踪情况

图 12 为整个控制过程中电机磁链的跟踪情况，在风速变化过程当中，控制器对电机的磁链保持了平稳准确的控制。

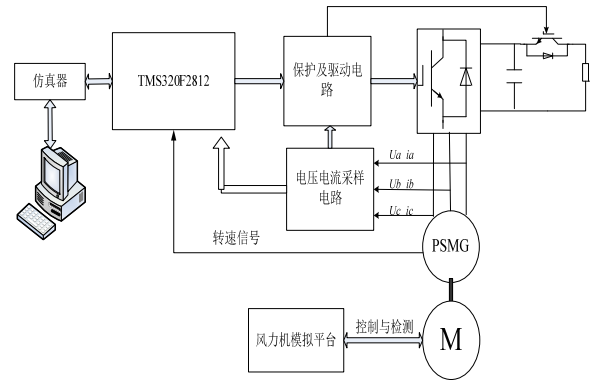


图 13 风力机测控系统原理图

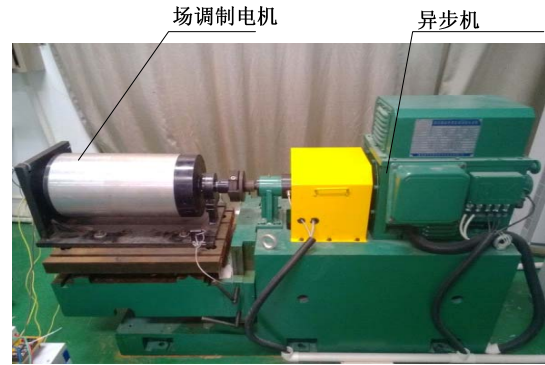


图 14 实验测试平台

为了检验所提出控制算法的可行性和有效性，建立了针对场调制电机的实验平台，如原理图 13 所示。该平台的驱动控制系统中以美国 TI 公司生产的 TMS320F2812 作为控制器的核心，进行信号采集与处理，将计算出的驱动信号，经保护和驱动电路，控制 IGBT 的开通与关断，实现对主电路的发电控制。风力机模拟部分采用了一台利用 ABB 控制器控制的异步机平台进行风力机模拟实验，实际的实验平台如图 14 所示。

图 15 为风速稳定时, 电机电枢电流波形, 电流波形近似于正弦波, 存在一定谐波, 这是因为直接转矩控制方式并非极力获得理想的正弦波形, 而是把转矩直接作为被控量, 来直接控制转矩, 由式 (19)、(22) 可以看出电流和磁链、转矩都存在一定的数量关系, 对电流的控制是间接的, 另外电流波形幅值大小也略有不同, 这和爬山法实质上为一种扰动控制方法有关, 如图 16 所示, 风速稳定时转矩波形也是有小幅波动, 基本在 $172\text{N}\cdot\text{m}$ 上下小幅波动。

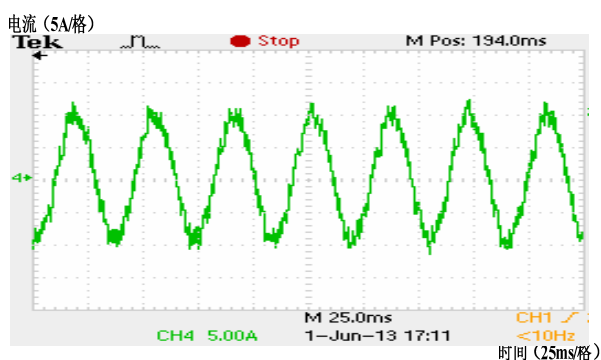


图 15 实验测试的一相电流波形

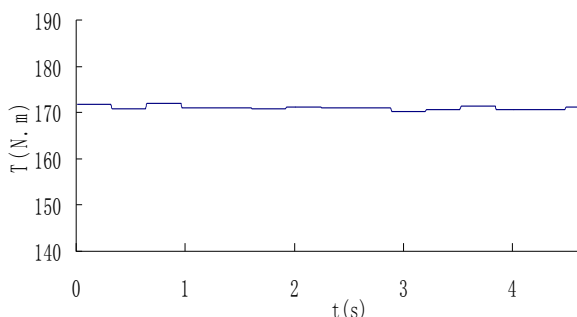


图 16 实验测试的转矩波形

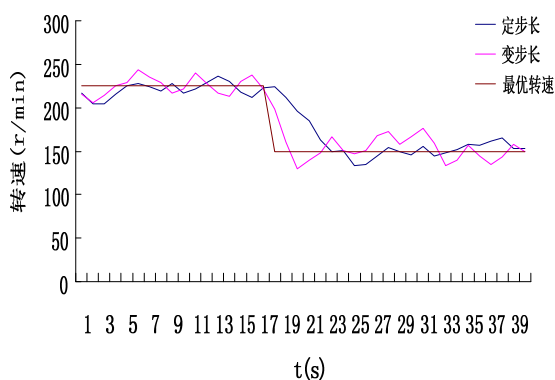


图 17 风速变化时两种不同算法的转速动态响应
风速变化时, 定步长爬山法的步长设置对最大

风能工作点跟踪效果有很大影响, 为了比较定步长爬山法与本文所提出的变步长爬山法动态跟踪效果, 选择一恒定步长, 使得风速稳定时定步长爬山法和变步长爬山法有类似的跟踪效果, 进而可以比较风速突变时二者的动态响应。图 17 为风速变化时变步长爬山法与定步长爬山法的转速响应曲线, 从图中可以看出在定步长爬山法和变步长爬山法稳态效果近似的情况下, 变步长爬山有相对较好的动态响应效果。

5 结论

本文针对低速直驱风力发电系统, 基于一台磁齿轮电机, 利用变步长爬山法对其进行最大风能跟踪控制, 并将直接转矩控制算法应用到其风力发电控制系统当中, 对其进行了理论分析、仿真测试、实验验证。通过本文研究, 验证和得出以下结论:

- 1) 磁齿轮电机具有低速大转矩特性, 因为其有磁场调制功能, 所以在运行当中, 相对于普通的永磁电机, 有较高的转矩电流比。
- 2) 本文提出的新的变步长原则是实际有效的, 能够较好地解决爬山法存在的快速性、稳定性问题。
- 3) 针对磁齿轮电机, MATLAB/Simulink 仿真和实验结果验证了所提将直接转矩控制方法应用于最大风能跟踪的有效性。

参考文献:

- [1] 程明, 张建忠, 王念春. 可再生能源发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 23-33.
- [2] K Atallah, S D Calverley, D Howe. Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear[J]. IEE Proc.-Electr. Power Appl, 2004, 151(2): 135-143.
- [3] Li X., Chau K.-T., Cheng M., and Hua W. Comparison of magnetic-gear permanent-magnet machines. Progress in Electromagnetics Research (PIER), 2013, 133: 177-198.
- [4] R Cardenas, R Pena. Sensor-less vector control of induction machines for variable-speed wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 196-205.
- [5] 余峰. 永磁直驱式风力发电系统中最大功率控制的仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [6] MG Simoes, BK Bose, RJ Spiegel. Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

- 1997, 12(1): 234-239.
- [7] Q Wang, L Chang. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2004, 19(5): 1242-1249.
- [8] Jeong Min Kwon, Jung Hun Kim, Sung Hyo Kwak, Hong Hee Lee. Optimal power extraction algorithm for dtc in wind power generation systems[C]. IEEE International Conference on Date of Conference, Singapore, 2008.
- [9] 钟沁宏, 阮毅, 赵梅花, 等. 变步长爬山法在双馈风力发电系统最大风能跟踪控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 67-73.
- ZHONG Qin-hong, RUAN Yi, ZHAO Mei-hua, TAN Li, Application of variable-step hill climbing searching in maximum power point tracking for DFIG wind power generation system[J], Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 67-73(in Chinese).
- [10] 张小莲, 李群, 殷明慧, 等. 一种引入停止机制的改进爬山算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 128-134.
- ZHANG Xiaolian, LI Qun, YIN Minghui, YE Xing, ZOU Yun, An Improved Hill-climbing Searching Method Based on Halt Mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 128-134(in Chinese).
- [11] Z Xu, P Ge, Dianguo Xuand C H Zhang, Direct Torque and Flux Control of the Converters for a Permanent Magnet Wind Power Generation System [J], Electric Power and Energy Conference (EPEC), Halifax, NS, 2010
- [12] Mao Meiqin, Liu Bin, Shen Kai, Xv Bin. Research on SVM-DTC of Speed Sensorless PMSG for the Direct-Drive Wind Generation System with CSC [J]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, NC, 2012.
- [13] 李祥林, 程明, 邹国棠, 等. 聚磁式场调制永磁风力发电机工作原理与静态特性分析. 电工技术学报, 录用待刊。
- [14] Ying Fan, Xuedong Han, Zhongbing Xue, Hehe Jiang, Design, analysis and control of a permanent magnet in-wheel motor based on magnetic-gear for electric vehicles[C], Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Beijing, China, 2011.
- [15] K T Chau, Dong Zhang, J Z Jiang, Chunhua Liu, Yuejin Zhang, Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles[J], IEEE Transactics on Magnetics, 2007, 43(6): 2504-2506.
- [16] 韩学栋. 电动汽车用新型永磁复合轮毂电机控制系统研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [17] 王秀和等. 永磁电机[M], 北京: 中国电力出版社, 2010: 296-312.
- [18] 刘英培. PMSM 直接转矩控制方法及实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [19] 贾红云. 磁通切换型高性能永磁电机研究[D].南京: 东南大学, 2011.

Variable-step Hill-climbing MPPT Control of A Novel Magnetic-Geared Wind Power Generator

Cheng Ming, Li Shun, Li Xianling

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096)

Abstract: The control of maximum wind power tracking (MPPT) is one of the key technology of the variable speed constant frequency wind turbine to utilize wind energy effectively, In this paper, the electric generator based on magnetic gear principle is analyzed, which exhibits low speed and high torque characteristics. In order to achieve the MPPT control of this motor, a new variable-step hill-climbing method with classic PI regulator to calculate the reference torque is proposed, meanwhile, electric generator is controlled by applying torque parameter to the generator instead of the commonly used speed, the reference torque is calculated by hill-climbing method, which is the real-time tracking target of the direct torque control, finally, the rapidity and robustness of wind power generation system is better guaranteed.

Key words: Variable-step hill-climbing method; Magnetic gear motor; Direct torque control; MPPT