

基于自然坐标的鼠笼异步发电机 控制策略研究

张文元, 车向中, 刘金晶, 姜涛

(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052)

摘要:针对全变速鼠笼异步发电机系统, 发电机侧变流器采用传统基于 $d-q$ 坐标转子磁链定向控制需进行复杂的坐标变换并涉及三角函数运算, 占用了较多的微控器运行时间, 提出一种基于 $a-b-c$ 自然坐标的 SCIG 转子磁链定向控制策略, 该方法不需要任何坐标变换, 具有结构简单、物理意义清晰、代码执行效率提高和易于工程实现的优点。在此基础上提出一种适用于自然坐标系下的变频磁链估计方法, 解决磁链估计中出现的直流偏置、幅值和相位偏移的问题。最后, 通过试验验证了所提控制策略的可行性与有效性。

关键词: 风力发电; 鼠笼异步发电机; 自然坐标控制; 磁链观测器

中图分类号: TM346 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19864

Research on Control Strategy of Squirrel Cage Induction Generator Based on Natural Coordinate

ZHANG Wenyuan, CHE Xiangzhong, LIU Jinjing, JIANG Tao

(CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian 116052, Liaoning, China)

Abstract: In view of the full variable speed squirrel cage induction generator system, the traditional rotor field oriented control based on $d-q$ coordinate for generator side converter requires complicated coordinate transformation and involves trigonometric function operation, which takes up more running time of micro-controller. A new method of rotor flux oriented control strategy of SCIG based on $a-b-c$ natural coordinates was proposed, which has the advantages of without coordinate transformation, simple structure, clear physical meaning, high efficiency in code execution and easy implementation in engineering. Based on this, a variable frequency adaptive flux estimation method was proposed to solve the problems of DC offset, AC amplitude and phase error. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy were verified by experiment results.

Key words: wind power generation; squirrel cage induction generator; natural coordinate control; flux observer

风能作为一种清洁的可再生能源, 被视为解决当前能源短缺、环境污染问题的一种优选方案^[1-6], 引起了广泛的关注。风力发电系统中, 采用2个全功率电压型PWM变流器的“背靠背”结构连接风力发电机与电网, 具有很高的控制灵活性, 发电机与电网之间具有隔离特性, 便于风力发电机的并网控制, 风力机可以在全速范围内运行, 使其能够捕获到最大的风能^[1-3]。在全变速风力发电系统中, 主要采用永磁同步发电机和鼠笼异步发电机(squirrel cage induction generator, SCIG), 与永磁同步发电机相比, 采用SCIG具有

许多优点, 如结构简单牢固、可靠性较高、维护及运行费用低和无永磁体去磁的隐患^[3-5]。因此, 在未来由SCIG和2个全功率电压型PWM变流器构成的交流-直流-交流风力发电系统中, 在成本和性能方面将是一种很好的组合^[1,3], 在中小功率等级的风力发电应用场合, 使用SCIG系统是一个值得考虑的方案。目前, 全速型永磁同步风力发电机系统技术相对较为成熟, 而全速型鼠笼异步风力发电系统是一种新兴技术^[1], 有待进一步研究。

文献[2-5]针对全速型鼠笼异步风力发电机

系统的控制策略进行了研究,其机侧变流器控制方法都是基于 d - q 旋转坐标的发电机转子磁链定向控制,此方法涉及旋转坐标变换、三角函数计算,增加了控制器的计算负荷,且转子磁链的估计中运用的电流模型依赖于发电机转速的精确性。文献[6-7]分别针对静止无功补偿器和并网逆变器系统采用了三相 a - b - c 自然坐标控制,和传统 d - q 坐标的矢量控制相比,无需坐标变换,结构简单,为本文的SCIG的自然坐标控制提供了借鉴。针对上述问题,本文提出一种发电机侧变流器采用基于自然坐标的转子磁链定向控制策略,实现发电机定子电流的励磁、电磁转矩分量独立控制,不需要旋转坐标变换,结构简单。

需要说明一点,转子磁链定向矢量控制本身已是一种成熟的控制方法,但是该方法的实施需要2次 d - q 旋转坐标变换,涉及三角函数的计算,占用较多的微控制器运算时间。本文的研究重点在于基于 a - b - c 自然坐标系的SCIG转子磁链定向控制,此方法不需要任何坐标变换,结构简单,代码执行效率高,易于工程实现,为基于SCIG的风力发电系统的控制策略提供一种新的思路。

1 基于 a - b - c 自然坐标的鼠笼异步发电机转子磁链定向控制原理

全变速鼠笼异步风力发电机系统结构如图1所示。

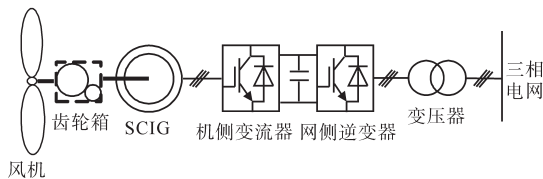


图1 鼠笼异步风力发电机系统结构
Fig.1 Structure of squirrel-cage induction wind power generator system

由于鼠笼异步发电机没有专门的励磁装置,不能独立建压,必须通过机侧变流器为其提供无功励磁。除了为SCIG提供励磁,机侧变流器还要调节发电机的转速,使风力机在额定风速以下能够捕获到最大的风能。通过网侧逆变器将发电机输出电能并入电网。

电力电子电机系统中,电机电流和电压的频率、幅值均为时变量,一般非正弦。电机的绕组无中线引出,采用复时变空间矢量进行描述,对三相交流电机系统的动态过程分析及控制设计

有许多便利之处^[8-9]。由定子相电流 i_{sa} , i_{sb} 和 i_{sc} 的时间函数,定义定子电流空间矢量:

$$\mathbf{i}_s = \frac{2}{3} (i_{sa} + e^{j2\pi/3} i_{sb} + e^{j4\pi/3} i_{sc}) \quad (1)$$

式中: j 为单位虚数。

与其它复时变空间矢量定义相似,定子、转子的电压和电流的正方向按电动机惯例,则电机的电磁动态模型^[8-9]为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\mathbf{\Psi}_s}{dt} \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt} - j\omega \mathbf{\Psi}_r \\ \mathbf{\Psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \\ \mathbf{\Psi}_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\omega = n_p \omega_r$$

式中: L_s, L_r, L_m 分别为定、转子电感及互感; R_s, R_r 分别为定、转子电阻; $\mathbf{u}_s$ 为机端电压矢量; $\mathbf{\Psi}_s$ 为定子磁链矢量; $\mathbf{\Psi}_r$ 为转子磁链矢量; $\mathbf{i}_r$ 为转子电流矢量; n_p 为电机的极对数; ω_r 为电机转速。

由电机的电磁功率可得其电磁转矩方程^[9]为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{3}{2} n_p (j\mathbf{\Psi}_r) \cdot (-\mathbf{i}_r) \quad (3)$$

在定子电流 d - q 旋转坐标系下,将 d 轴电流分量定向于转子磁链矢量 $\mathbf{\Psi}_r$ 方向(基于转子磁链定向控制(RFOC)),其 q 轴电流滞后于 $\mathbf{\Psi}_r$ 方向 90° ,则电机定子电流矢量 $\mathbf{i}_s$ 在 d 轴方向的分量 i_{sd} 为纯励磁电流分量,其在 q 轴方向的分量 i_{sq} 为纯转矩电流分量。则电机的转子磁链方程可以表示为

$$\begin{cases} \tau_r \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt} + \mathbf{\Psi}_r = L_m i_{sd} \\ \frac{d\rho}{dt} = \omega_r + \omega_s = \omega_r + \frac{L_m i_{sq}}{\tau_r \mathbf{\Psi}_r} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\tau_r = L_r / R_r$$

式中: τ_r 为电机转子电磁时间常数; ω_s 为转差频率; ρ 为转子磁链角度。

则电磁转矩方可以表示为

$$T_e = -\frac{3}{2} n_p \mathbf{\Psi}_r i_{rq} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} n_p \mathbf{\Psi}_r i_{sq} \quad (5)$$

由此实现了定子电流的励磁分量和转矩分量的解耦控制,上述过程为传统基于 d - q 坐标系转子磁场定向控制思想。

但是,上述的矢量控制设计需要进行2次坐标变换,其一是在进行磁链观测时需要采用 $3s/2r$ 坐标变换:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{2}{3} [i_{sa} \cos \rho + i_{sb} \cos(\rho - \frac{2\pi}{3}) + i_{sc} \cos(\rho + \frac{2\pi}{3})] \\ i_{sq} = -\frac{2}{3} [i_{sa} \sin \rho + i_{sb} \sin(\rho - \frac{2\pi}{3}) + i_{sc} \sin(\rho + \frac{2\pi}{3})] \end{cases} \quad (6)$$

其二是控制需要进行2r/3s逆变换:

$$\begin{cases} i_{sa} = i_{sd} \cos \rho - i_{sq} \sin \rho \\ i_{sb} = i_{sd} \cos(\rho - \frac{2\pi}{3}) + i_{sq} \sin(\rho - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{sc} = i_{sd} \cos(\rho + \frac{2\pi}{3}) - i_{sq} \sin(\rho + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (7)$$

以上2种形式的旋转坐标变换都涉及三角函数运算,需要耗费较多微控制器的运算时间。为此,本文提出一种基于 a - b - c 自然坐标的转子磁场定向控制方法,以简化控制系统的设计,该方法无需坐标变换和三角函数的运算,减少控制算法的运算时间。

对式(2)的第1个方程积分可得定子磁链矢量方程为

$$\Psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt \quad (8)$$

结合式(2)和式(8)可得发电机转子磁链矢量方程为

$$\Psi_r = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_s - R_s i_s) dt - \sigma L_s i_s \right] \quad (9)$$

其中

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

式中: σ 为电机的漏磁系数。

空间矢量与 a - b - c 自然坐标分量的关系^[9]为

$$\mathbf{x}(t) = \frac{2}{3} [x_a(t) + e^{j2\pi/3} x_b(t) + e^{j4\pi/3} x_c(t)] \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} x_a &= \text{Re}[\mathbf{x}(t)] \\ x_b &= \text{Re}[e^{j4\pi/3} \mathbf{x}(t)] \\ x_c &= \text{Re}[e^{j2\pi/3} \mathbf{x}(t)] \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 为发电机电流、磁链、电压矢量; $x_{a,b,c}$ 为发电机三相电压、电流、磁链的瞬时值。

由空间矢量与自然坐标分量的关系结合转子磁场定向控制的思想,可在自然坐标中直接构造转子磁场定向控制的三相电流的励磁及转矩电流分量。自然坐标中,电机转子磁链各相可表示为

$$\Psi_r = \sqrt{\frac{2}{3}} [\Psi_{ra}^2 + \Psi_{rb}^2 + \Psi_{rc}^2] \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} \Psi_{ra} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{sa} - R_s i_{sa}) dt - \sigma L_s i_{sa} \right] \\ \Psi_{rb} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{sb} - R_s i_{sb}) dt - \sigma L_s i_{sb} \right] \\ \Psi_{rc} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{sc} - R_s i_{sc}) dt - \sigma L_s i_{sc} \right] \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得与转子磁链同相的 a, b, c 单位励磁电流分量为

$$\begin{cases} \phi_a = \frac{\Psi_{ra}}{\Psi_r} \\ \phi_b = \frac{\Psi_{rb}}{\Psi_r} \\ \phi_c = \frac{\Psi_{rc}}{\Psi_r} \end{cases} \quad (13)$$

与磁链正交的 a, b, c 单位转矩电流分量为

$$\begin{cases} v_a = \frac{\sqrt{3}}{3} (\phi_b - \phi_c) \\ v_b = \frac{\sqrt{3}}{3} (\phi_c - \phi_a) \\ v_c = \frac{\sqrt{3}}{3} (\phi_a - \phi_b) \end{cases} \quad (14)$$

单位转矩、磁链电流分量的空间向量关系如图2所示。

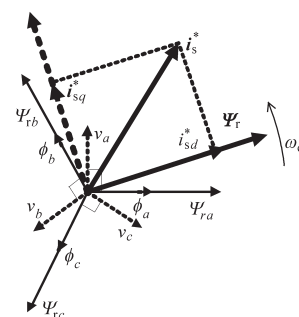


图2 单位转矩、磁链电流分量

Fig.2 Unit torque and flux current components

由此可计算得到自然坐标 a, b, c 各相转矩电流指令:

$$\{v_a i_{sq}^*, v_b i_{sq}^*, v_c i_{sq}^*\} \quad (15)$$

式中: i_{sq}^* 为定子转矩电流的参考值。

同理可得与转子磁链同相的励磁电流指令:

$$\{\phi_a i_{sd}^*, \phi_b i_{sd}^*, \phi_c i_{sd}^*\} \quad (16)$$

式中: i_{sd}^* 为定子励磁电流参考值。

a, b, c 各相转矩电流指令与励磁电流指令直接相加,可得到发电机定子电流各相参考值:

$$\begin{cases} i_{sa}^* = v_a i_{sq}^* + \phi_a i_{sd}^* \\ i_{sb}^* = v_b i_{sq}^* + \phi_b i_{sd}^* \\ i_{sc}^* = v_c i_{sq}^* + \phi_c i_{sd}^* \end{cases} \quad (17)$$

由此,通过设置磁链/转矩外环,将磁链/转矩调节器的输出直接计算出发电机定子三相电流的瞬时电流指令,无需进行任何坐标变换,仅采用电流反馈,只要电流控制内环的带宽足够高,就可以实施瞬时励磁/转矩电流的解耦控制。鼠笼异步发电机自然坐标转子磁链定向控制框图如图3所示。

图3中,机端电压信号可由机侧变流器驱动占空比信号 $d_{sa, sb, sc}$ 和直流侧电压 u_{dc} 估算:

$$\begin{cases} u_{sa} = \frac{2}{3} u_{dc} \times d_{sa} - \frac{1}{3} u_{dc} \times d_{sb} - \frac{1}{3} u_{dc} \times d_{sc} \\ u_{sb} = \frac{2}{3} u_{dc} \times d_{sb} - \frac{1}{3} u_{dc} \times d_{sa} - \frac{1}{3} u_{dc} \times d_{sc} \\ u_{sc} = \frac{2}{3} u_{dc} \times d_{sc} - \frac{1}{3} u_{dc} \times d_{sa} - \frac{1}{3} u_{dc} \times d_{sb} \end{cases} \quad (18)$$

依据“最佳转速—电磁转矩曲线”可得电磁转矩指令 T_e^* ^[10]:

$$T_e^* = K_{opt} \omega_{wtopt}^2 \quad (19)$$

其中

$$K_{opt} = \eta \pi r^2 C_{opt} r^3 / 2 \lambda_{opt}^3$$

式中: η 为空气密度; r 为风轮机的半径; λ_{opt} 为最佳叶尖速比; C_{opt} 为风能最大利用系数。 ω_{wtopt} 为最佳转速指令

将式(19)代入式(5)可得发电机电磁转矩电流分量指令:

$$i_{sq}^* = \frac{L_r}{n_p L_m \Psi_r^*} T_e^* \quad (20)$$

整个鼠笼异步发电机在自然坐标系下转子磁链定向控制,不涉及坐标变换及三角函数计算,即可实现励磁电流和转矩电流的独立控制。

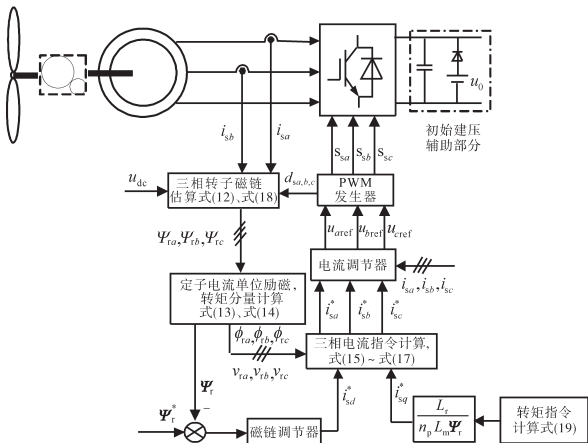


图3 基于a-b-c自然坐标系鼠笼异步发电机控制策略框图

Fig.3 Control schematic diagram of SCIG based on a-b-c natural coordinate

2 基于自然坐标的变频磁链估计方法

本文在计算发电机的转子磁链时,需要对定子反电势进行积分运算,如式(12)所示。但是,由于系统电磁干扰、采样电路误差的存在,采用纯积分器时会导致直流偏置和积分饱和^[11]。在实际工程运用中,采用一阶低通滤波器来等效纯积分器,可以有效抑制直流偏置。而变速运行的发电机中交流信号的频率也随时间变化,低通滤波器的截止频率固定容易导致发电机在不同转速时,电机磁链观测的幅值和相位出现严重偏移。

参考文献[11],本文提出一种针对自然坐标系下变频交流量的积分器——变频自适应滤波器,解决纯积分器引起的直流偏置、交流量幅值和相位偏移问题。改进的鼠笼异步发电机定子磁链观测器如图4所示。

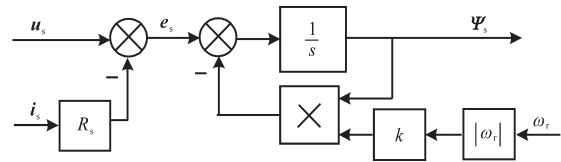


图4 发电机定子磁链观测器

Fig.4 Flux observer of generator stator

图4中, k 为滤波系数,不同的滤波系数将对磁链观测器产生较大的影响,以下具体分析。

发电机稳态运行时,定子磁链矢量为幅值一定、转速固定的旋转变量,可表示为

$$\Psi_s = |\Psi_s| e^{j\omega_e t} = |\Psi_s| \angle \omega_e t \quad (21)$$

式中: ω_e 为定子磁链的同步旋转角速度。

由式(8)和式(21)可得:

$$\Psi_s = \frac{u_s - R_s i_s}{j\omega_e} \quad (22)$$

当采用一阶低通滤波器观测发电机定子磁链时有:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_s'}{dt} + \omega_e \Psi_s' &= j\omega_e \Psi_s' + \omega_e \Psi_s' \\ &= u_s - i_s R_s \end{aligned} \quad (23)$$

由式(23)可得:

$$\Psi_s' = \frac{u_s - i_s R_s}{j\omega_e + \omega_e} \quad (24)$$

将式(22)代入式(24)可得:

$$\Psi_s = \Psi_s' - j \frac{\omega_e}{\omega_e} \Psi_s' \quad (25)$$

由式(25)可得:

$$\frac{\Psi_s'}{\Psi_s} = \frac{|\Psi_s'|}{|\Psi_s|} \angle \theta' - \theta = \frac{\omega_e}{\sqrt{\omega_e^2 + \omega_e^2}} \angle \phi \quad (26)$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega_c}{\omega_e}\right) \quad (27)$$

由式(26)和式(27)可知,当 $\omega_e \gg \omega_c$ 时,采用一阶低通滤波器观测得到的 Ψ_s' 可以近似逼近实际的电机定子磁链 Ψ_s 。由于发电机的转速是变化的,使得 $\omega_e \gg \omega_c$ 条件不能实时满足。为此,本文采用变截止频率的自适应变频滤波器改进传统的低通滤波器。取截止频率 ω_c 为 $k\omega_e$,其中 k 为滤波系数。图5为不同滤波系数时,自适应滤波器的伯德图。当 k 增大时,自适应滤波器与纯积分器的幅频和相频特性相差较大;当 k 较小时,对直流偏置的抑制能力变差,综合考虑并结合实验,本文 k 取0.1。

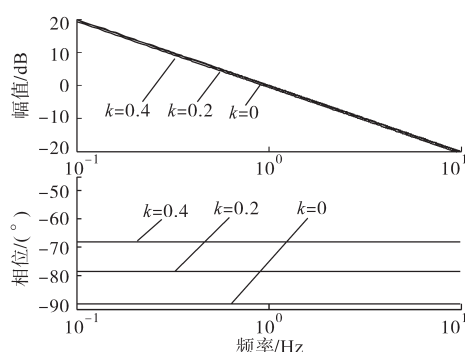


图5 自适应滤波器的伯德图

Fig.5 The bode diagram of variable frequency filter

由于发电机在稳态运行时转差较小,可用 ω_r 取代 ω_e ,则自适应变频滤波器的传递函数为

$$G(s) = \frac{\Psi_s}{e_s} = \frac{1}{s + \omega_c} = \frac{1}{s + k|\omega_r|} \quad (28)$$

3 实验验证及分析

由2.2 kW永磁同步电动机模拟风力涡轮机拖动2.2 kW鼠笼异步发电机,经过2个“背靠背”连接的7.5 kW电压型变流器和升压变压器,将发电机输出电能并入电网。“背靠背”变流器系统控制器采用单板dSPACE1104快速控制原型控制器,完成A/D采样和控制算法的实现,最后通过其D/A口和Textronix示波器观测实验波形。网侧逆变器直流侧电容取2 000 μ F,滤波电感取3 mH。实验中电机主要参数为:额定功率2.2 kW,额定电压380 V,额定转速1 422 r/min,额定频率50 Hz,极对数为2,定子电阻3.4 Ω ,转子电阻2.438 Ω ,定子漏感9.5 mH,转子漏感8.4 mH,磁化电感0.262 9 H。为了保证实验的安全性,在进行并网实验时,逆变器端口线电压取50 V,通过隔离变压器和自耦调压器连接到电网。

3.1 串励建压分析

为验证所提机侧变流器控制算法的有效性,先不将机侧变流器和网侧变流器连在一起,单独进行发电机串励建压实验。实验系统结构和控制框图见图3,由2.2 kW的永磁同步电动机拖动鼠笼异步发电机,经过机侧变流器,通过所提控制策略为发电机励磁,使其建压、发电运行。如图3所示,虚线框部分为建压辅助装置,在变流器的直流侧接入12 V的蓄电池和二极,开始时为发电机建压提供初始能量,在发电机建压成功后,直流侧电压将高于12 V,自动将蓄电池切断。图6为发电机串励建压实验结果。

图6a为在1 s时启动机侧变流器的实验结果,此时发电机转速为200 r/min,磁链给定为0.3 Wb。由图6a可知,投入控制后,发电机的励磁电流和转子磁链迅速达到稳态值,而由变流器直流侧电压可知,发电机逐渐建压,并在8 s时达到稳态,此时直流侧电压为80 V。当发电机转速不变,保持200 r/min,在4.6 s时将磁链给定由0.3 Wb增加到0.4 Wb时,实验结果如图6b所示,转

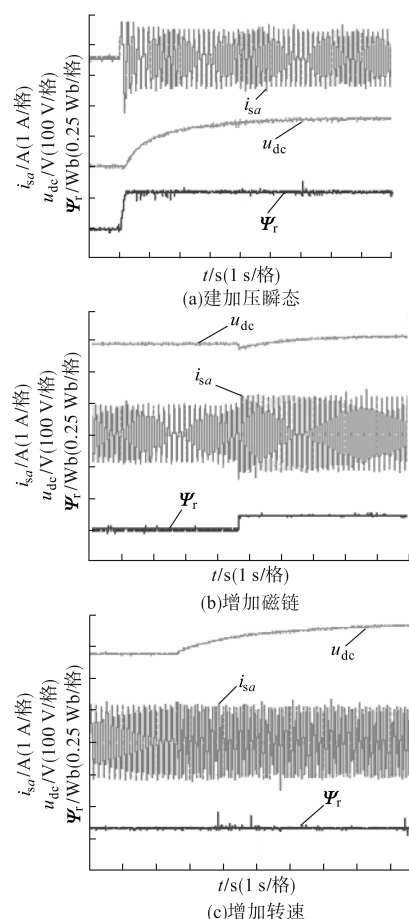


图6 发电机串励建压实验结果

Fig.6 Experimental results of generator series excitation

子磁链幅值由0.3 Wb增加到0.4 Wb,同时定子电流也随之增大,直流侧电压上升20 V。图6c为2.8 s时将发电机转速由200 r/min增加到300 r/min,磁链给定为0.4 Wb的实验结果,可知转子链保持不变,发电机定子电流幅值不变,频率随转速的增加而增加,直流侧电压开始上升达到另一稳定值。上述实验结果说明,发电机输出电压正比于转子磁链和发电机转速。同时也验证了本文所提的基于自然坐标转子磁链定向控制策略的有效性。

3.2 并网实验

为进一步验证本文所提异步发电机自然坐标控制策略的有效性,通过双PWM变流器连接发电机和电网进行并网实验。双PWM变流器动态实验结果如图7所示。转子磁链给定值为0.65 Wb,发电机转速由550 r/min升到630 r/min的实验结果如图7a所示,在发电机转速升高时,发电机的定子电流幅值和频率也随之增大。图7b为升速时网侧逆变器直流侧电压、a相电流和b相电流实验波形。由图7b可知,在转速增加时,直流侧电压出现一个小的波动之后迅速恢复到给定值100 V,电流幅值也随之增大并达到一个新的稳态值,可知并网功率也随之增大。保持转子磁链给定值为0.65 Wb,电机转速由630 r/min降到550 r/min的降速实验结果如图7c、图7d所示。图7c为降速时发电机转子磁链幅值和定子电流的波形,由图7c可知,在发电机转速降低时,发电机的定子电流幅值和频率也随之减小。图7d为降速时逆变器直流侧电压和并网电流波形。上述异步发电机升降速动态实验进一步验证所提机侧变流器控制策略的可行性。

3.3 代码运行时间测试比较

为了验证本文所提控制策略相比传统基于 $d-q$ 坐标的矢量控制节省微控制器代码执行时间,在其他条件相同的情况下,利用dSPACE1104平台的turnaround time功能分别测试文献[4]中基于传统 $d-q$ 坐标下转子磁场定向矢量控制策略和本文所提控制策略的转换时间,结果如表1所示。由表1可知,机侧变流器自然坐标控制方法较传统的 $d-q$ 坐标控制方法节省代码时间约15 μs ,速度提高36.6%。由上述实验结果可知,本文所提控制策略节省了微控制器的代码执行时间。

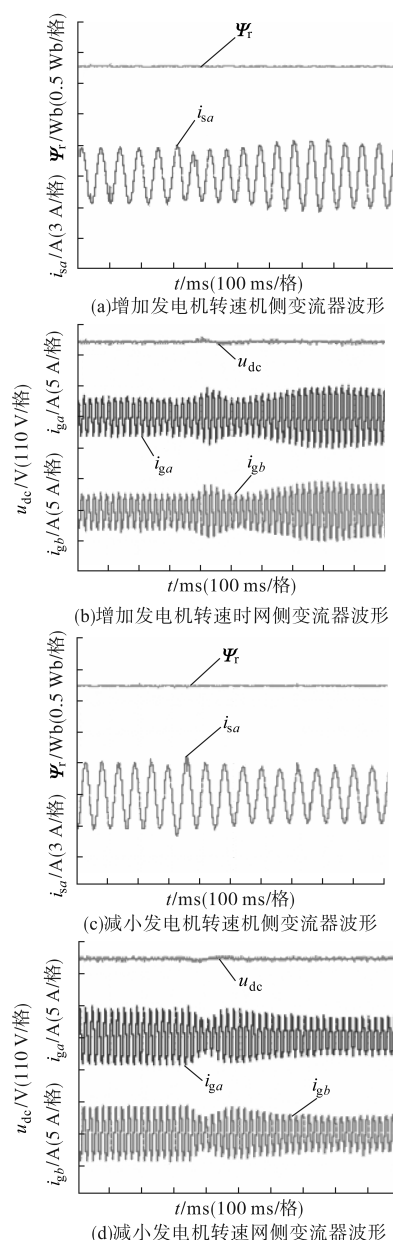


图7 双PWM变流器动态实验结果

Fig.7 Dynamic experimental results of dual PWM converter

表1 2种控制方法代码时间比较

Tab.1 Comparison of two control methods code time

比较项目	测试结果
文献[4]中 $d-q$ 坐标控制 代码时间/ μs	41
本文 $a-b-c$ 自然坐标控制 代码时间/ μs	26
代码节约时间/ μs	15
代码效率提升	36.6%

4 结论

本文针对全变速鼠笼异步风力发电机的机侧变流器,提出基于自然坐标系的SCIG转子磁

链定向控制策略,通过发电机建压实验、双PWM变流器并网实验数据,验证了所提控制策略的有效性。通过与传统基于 $d-q$ 旋转坐标系的SCIG转子磁链定向矢量控制比较,本文方法结构简单、物理意义明晰,特别是在微控制器代码执行效率方面有一定优势。

参考文献

- [1] Yaramasu V, Wu B, Sen P C, *et al.* High-power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-art and Emerging Technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(5): 740-788.
- [2] Konstantopoulos G C, Alexandridis A T. Full-scale Modeling, Control, and Analysis of Grid-connected Wind Turbine Induction Generators with Back-to-back AC/DC/AC Converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):739-748.
- [3] Tan K H. Squirrel Cage Induction Generator System Using Wavelet Petri Fuzzy Neural Network Control for Wind Power Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7):5242-5254.
- [4] 王晗,王鹏,张建文,等.鼠笼型全功率风电变换器控制策略研究与实验[J].电力电子技术,2011,45(6):1-3.
- [5] Mesemanolis A, Mademlis C, Kioskeridis I. Optimal Effi-

ciency Control Strategy in Wind Energy Conversion System with Induction Generator[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(4):238-246.

- [6] Singh B, Murthy S S, Gupta S. STATCOM-based Voltage Regulator for Self-excited Induction Generator Feeding Non-linear Loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5):1437-1452.
- [7] 卢子广,王森,胡立坤,等.分布式发电并网逆变器的虚拟电机自然坐标控制[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6435-6441.
- [8] Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(8):1359-1394.
- [9] Leonhard W. Control of Electrical Drives[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [10] 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追踪控制[J].中国电机工程学报,2009,29(27):106-111.
- [11] Stojic D, Milinkovic M, Veinovic S, *et al.* Improved Stator Flux Estimator for Speed Sensorless Induction Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2363-2371.

收稿日期:2019-01-10

修改稿日期:2019-04-10

(上接64页)

控,实现在远端计算机或手机上监控设备运行相关数据,包括数据采集、监控组态、报警设置、曲线查询等功能。不仅解决了偏远地区的污水厂维保困难、维护成本高等问题,同时利用远程可视化充分提高了污水处理效率,实现了分散的“无人化”污水处理厂。通过数据库存储数据,解决了以往人工记录准确率低下等问题,实现集中化数据分析管理,保证污水处理企业的集中化管理,具有巨大的经济和社会价值。本方案采用阿里云作为云平台,需要一定的平台维护费用,但对于污水处理厂远程维保的成本来说相对较低,节省了生产成本。

参考文献

- [1] 栢莺.我国水务市场规模到底有多大?[EB/OL].[2017-10-30]. https://www.xianjichina.com/news/details_53410.html.
- [2] 常辉.分布式污水处理监控系统的研制[D].安徽:合肥工业大学,2009.
- [3] 远程运维的大数据创新应用——数网星[EB/OL].[2017-02-

20]. http://www.sohu.com/a/126690641_615868.

- [4] 陈其伟,孙一兵,许光眉,等.基于物联网的太阳能农村污水处理技术应用[J].水处理技术,2015,41(6):116-118,122.
- [5] Jiri Skovranek, Martin Pies, Radovan Hajovsky. Use of the IQRf and Node-red Technology for Control and Visualization in an IQMESH Network[J]. IFAC PapersOnLine, 2018, 51(6):211-212.
- [6] 李明河,郭建忠,王健.基于GPRS的村镇污水处理远程监控系统设计[J].控制工程,2017,24(4):799-803.
- [7] 刘琪.污水处理厂远程监控系统的构建分析[J].居舍,2018,42(25):201-202.
- [8] 余蕊蕊,王丽香,郭新超,等.污泥龄对好氧MBR处理黄姜皂素厌氧出水影响[J].水处理技术,2018,44(7):69-73.
- [9] 王海.切入西门子MindSphere阿里云工业物联网再下一城[EB/OL].[2018-07-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1605521123258777194&wfr=spider&for=pc>.
- [10] 谢碧峰.控制网在自来水厂中的应用[J].水处理技术,2001,31(2):118-120.

收稿日期:2018-12-13

修改稿日期:2019-04-20