

文章编号: 1674-8085(2016)03-0055-07

基于预期 SVM-DTC 的双馈风力发电系统研究

*蒋 慧¹, 戴文俊²

(1.淮南联合大学, 安徽, 淮南 232038; 2.淮南师范学院, 安徽, 淮南 232038)

摘 要: 针对双馈风力发电机的传统直接转矩控制(DTC)会造成转矩和磁链的波形脉动的问题, 提出一种基于预期空间电压矢量的双馈风力发电机直接转矩控制, 利用矢量控制连续平滑和直接转矩控制快速响应的特性, 补偿风速变化引起的扰动, 提高系统的动态性能和稳定性。仿真结果表明, 对于风速变化, 基于预期 SVM-DTC 的双馈风力发电机在磁链轨迹、转速响应与调节、转矩跟随与脉动抑制以及电压波动等方面的控制性能都优于传统 DTC。

关键词: 预期空间电压调制; 直接转矩控制; 双馈发电机

中图分类号: TM315

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.03.011

RESEARCH OF DOUBLY-FED WIND POWER SYSTEM BASED ON EXPECTED SVM-DTC

*JIANG Hui¹, DAI Wen-jun²

(1.Huainan Union University, Huainan, Anhui 232038, China; 2.Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China)

Abstract: In order to address the waveform pulsation from magnetic flux linkage and torque caused by traditional DTC of doubly-fed induction generator (DFIG), a new kind of DFIG based on expected SVM-DTC is proposed. With SVM-DTC, disturbance from wind velocity changes can be compensated by the continuity and smoothness of vector control and the rapid response of DTC. The simulation results in wind velocity changes show that DFIG based on expected SVM-DTC is easier to be controlled than traditional DTC in flux linkage, speed response and adjustment, torque follow performance, ripple rejection and voltage fluctuation.

Key words: expected voltage space vector modulation; DTC; DFIG

0 引言

风能作为可再生清洁能源, 已经被应用到风力发电中。目前, 大多数风力发电系统采用的双馈风力发电机(DFIG), 但是风能的随机性、爆发性以及不稳定性等特征, 增加了风力发电机控制与并网的复杂性。因此, 使得变速恒频发电技术在风力发电领域体现了显著的优越性^[1-2], 即风

机转速能根据风速连续调节, 不受发电机输出频率限制, 这样就突破了机电系统必须严格同步运行的传统观念, 提高了机组发电效率, 优化了风机的运行条件^[3]。同时, 将先进控制技术应用到基于变速恒频的风力发电系统中可以改善风力发电系统的动静态性能。如文献[4]将直接转矩控制技术应用到双馈风力发电机控制中, 并通过仿真实验证明了可以减小风力发电机的转矩脉动, 提高了风能利用率。文献[5]针对传统直接转矩控制

收稿日期: 2015-08-12; 修改日期: 2015-10-09

基金项目: 淮南联合大学科学研究项目(LQN1302); 淮南师范学院科研基金一般项目(2015xj18)

作者简介: *蒋 慧(1985-), 女, 安徽全椒人, 讲师, 主要从事电力系统智能控制方面研究(E-mail:aaa-jhui@163.com);

戴文俊(1987-), 男, 安徽长丰人, 助教, 主要从事电力电子与电气传动控制研究(E-mail:dwjkaoyan@163.com)。

的缺点,提出一种基于空间矢量调制的直接转矩控制方法,使其具有矢量控制连续平滑和直接转矩控制快速响应的特性,并通过仿真实验验证了该方法的可行性和有效性。文献[6]将预期空间电压矢量调制策略融入到直接转矩控制中,并将此算法应用到永磁同步电机的控制中,改善了定子磁链和电磁转矩的脉动问题。

本文将基于预期空间电压矢量调制的直接转矩控制(预期 SVM-DTC)算法应用到双馈风力发电机的控制中,利用矢量控制连续平滑和直接转矩控制快速响应的特性,改善风力发电系统的抗扰能力和电能质量。

1 预期 SVM-DTC 算法

双馈风力发电机的传统直接转矩控制的基本原理是将定子绕组接到电网上,通过控制逆变器调制空间电压矢量并施加于转子绕组,控制其磁链沿着圆形轨迹运行。同时通过在逆变器的六个不同方向的非零电压矢量中穿插两个零电压矢量状态来改变转子的转差频率,以控制双馈电机转矩的变化,实现转速控制^[7-8]。

由于传统直接转矩控制系统中使用了转矩和磁链滞环比较器,使得电机三相电流、转矩和磁链存在脉动的问题,为此将传统直接转矩控制进行改进,融入预期电压矢量调制技术,构成预期 SVM-DTC 算法抑制转矩和磁链脉动,补偿风速的变化。

1.1 预期电压估算

预期电压矢量控制的第一步就是要确定下一个周期预期电压矢量的幅值和相位。根据文献[4]得到双馈电机在两相静止坐标系下变换后的转矩方程为:

$$T_e = k |\psi_s| |\psi_r| \sin \theta \quad (1)$$

其中, $k = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s L_r + L_m^2}$; p 为电机极对数; L_m

为定转子互感; L_s 为定子绕组自感; L_r 为转子绕组自感; $|\psi_s|$ 为定子磁链幅值; $|\psi_r|$ 为转子磁链幅值;

θ 为定转子磁链向量之间的夹角,即磁通角。当定转子磁链幅值恒定时,主要通过控制磁通角 θ 实现对电磁转矩的动态控制,如当风速增大时,风机输入到双馈发电机的输入转矩将会变大,则需控制磁通角 θ 增大以增大电磁转矩 T_e ,使发电机达到转矩平衡。

为了方便分析,在两相静止坐标系中,令定子磁链 ψ_s 向量与 α 轴重合,则定转子磁链之间的关系如图 1 所示。

因为双馈发电机的定子直接连接到工频电网上,所以其定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 基本保持不变,即认定为常数,于是对式(1)求导有:

$$\frac{dT_e}{dt} = k |\psi_s| \left[\frac{d|\psi_r|}{dt} \sin \theta + |\psi_r| \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \right] \quad (2)$$

将(2)式写成变化量的形式:

$$\Delta T_e = k |\psi_s| [\Delta |\psi_r| \sin \theta + |\psi_r| \cos \theta \Delta \theta] \quad (3)$$

当电机稳定运行时,磁通角 θ 很小,则 $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, 且 $|\Delta \psi_r| \ll |\psi_r|$, 则 $|\Delta \psi_r| \sin \theta \ll |\psi_r| \cos \theta \Delta \theta$, 于是电磁转矩的变化量近似等于:

$$\Delta T_e \approx k |\psi_s| |\psi_r| \cos \theta \cdot \Delta \theta \quad (4)$$

由式(4)可知,若保持双馈电机的转子磁链幅值 $|\psi_r|$ 不变,则转矩的增量 ΔT_e 取决于磁通角的增量 $\Delta \theta$, 从而通过控制磁通角实现转矩的动态控制。

当转子磁链 ψ_r 运动到新的位置成为 ψ_r^* (参考磁链), 其相位角 $\theta^* = \theta + \Delta \theta$ 。

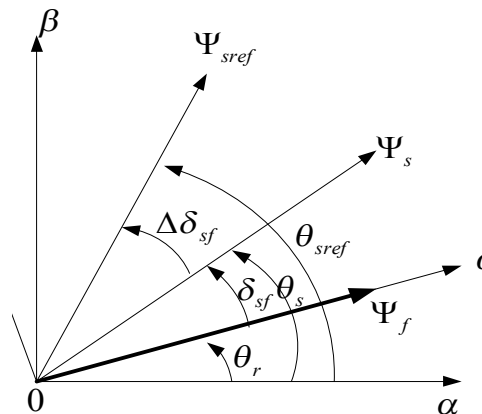


图 1 坐标中各磁链关系

Fig. 1 The relationship between flux linkages in coordinates

双馈电机直接转矩控制的磁链采用 $u-i$ 模型可以不受转速影响, 其表达式为^[9]:

$$\psi_r = \int (u_r - R_r i_r) dt \quad (5)$$

将上式进行变换可得转子电压与转子磁链的关系:

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} \quad (6)$$

在 $\alpha\beta$ 坐标系下此式可变为:

$$\begin{cases} u_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} \\ u_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

由图 1 可知, $\Delta\psi_r = \psi_r^* - \psi_r$, 则分解后有:

$$\begin{cases} \Delta\psi_{r\alpha} = |\psi_r^*| \cos(\theta + \Delta\theta) - \psi_{r\alpha} \\ \Delta\psi_{r\beta} = |\psi_r^*| \sin(\theta + \Delta\theta) - \psi_{r\beta} \end{cases} \quad (8)$$

于是电压方程 (7) 可以表示为:

$$\begin{cases} u_{r\alpha}^* = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = R_r i_{r\alpha} + \frac{\Delta\psi_{r\alpha}}{\Delta T} = \\ R_r i_{r\alpha} + \frac{|\psi_r^*| \cos(\theta + \Delta\theta) - \psi_{r\alpha}}{\Delta T} \\ u_{r\beta}^* = R_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = R_r i_{r\beta} + \frac{\Delta\psi_{r\beta}}{\Delta T} = \\ R_r i_{r\beta} + \frac{|\psi_r^*| \sin(\theta + \Delta\theta) - \psi_{r\beta}}{\Delta T} \end{cases} \quad (9)$$

其中, ΔT 为控制周期; $u_{r\alpha}^*$ 和 $u_{r\beta}^*$ 为期望电压矢量 u_r^* 的电压分量值, 由此得到期望电压矢量 u_r^* 的幅值和相位角分别为:

$$\begin{cases} |u_r^*| = \sqrt{|u_{r\alpha}^*|^2 + |u_{r\beta}^*|^2} \\ \varphi = \arctan \frac{|u_{r\alpha}^*|}{|u_{r\beta}^*|} \end{cases} \quad (10)$$

1.2 预期空间电压调制

逆变器有 8 种开关状态, 但是任何一种单独的开关状态是无法满足式 (10) 提出的要求。因此根据预期电压的估算值, 采用空间电压矢量调制技术 (SVM 模块) 来优化组合逆变器的开关状态使逆变器实际提供的电压矢量尽量逼近预期电压矢量估算值, 其调制原理如下^[10]:

选择与期望电压 u_r^* 相邻的两个开关电压矢量, 再加上一个零电压矢量, 通过它们的线性组合来构成 u_r^* , 矢量关系如图 2 所示, 根据图 2 可得表达式:

$$u_r^* T = u_k T_k + u_{k+1} T_{k+1} + u_0 T_0 \quad (11)$$

其中, $T = T_k + T_{k+1} + T_0$ 。

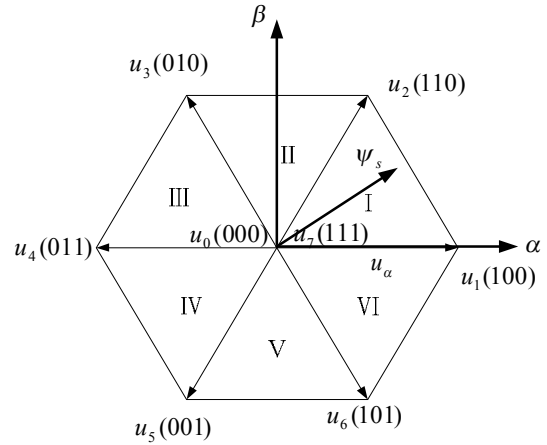


图 2 均分成 6 个扇区的转子空间电压矢量脉宽调制平面图

Fig. 2 The plan of rotor SVPWM divided into 6 sectors

将图 2 中的 u_1 和 u_2 写成下面形式, 即

$$u_k = \sqrt{\frac{1}{3}} V_c e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}}, \quad k = 1, 2 \quad (12)$$

将式 (11) 和式 (12) 分别代入式 (10), 可得:

$$\begin{cases} T_k = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{V_c} (u_{r\alpha} - \frac{1}{\sqrt{3}} u_{r\beta}) T \\ T_{k+1} = \frac{\sqrt{2}}{V_c} u_{r\beta} T \\ T_0 = T - T_k - T_{k+1} \end{cases} \quad (13)$$

SVM 单元根据图 2 中各扇区与 $u_{s\alpha}$ 和 $u_{s\beta}$ 的关系,

首先确定电压空间矢量处于哪个扇区, 然后选择应施加的电压空间矢量, 再根据式 (13) 计算所施加的两个非零电压矢量和零电压矢量所作用的时间, 从而调制出控制逆变器所需的 PWM 信号。

采用表达式 $N = X + 2Y + 4Z$ 确定预期电压所在的扇区。其中变量 X, Y, Z 的取值如下式:

$$\begin{cases} X=1, u_{r\beta} > 0 \\ Y=1, \sqrt{3}u_{r\alpha} - u_{r\beta} > 0 \\ Z=1, -\sqrt{3}u_{r\alpha} - u_{r\beta} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

则到控制变量 N 与各个扇区对应关系如表 1 所示。

表 1 预期电压矢量所在扇区

Table 1 The sector of expected voltage vector

扇区号	I	II	III	IV	V	VI
N	3	1	5	4	6	2

假设预期电压矢量在第 I 扇区时, 则需要的基本电压矢量为 u_0, u_1, u_2 , 其对应的矢量作用时

间分别为 T_0, T_1, T_2 , 则预期电压矢量可表示为:

$$\begin{cases} u_1 T_1 + u_2 T_2 = u_r^* T \\ T_0 + T_1 + T_2 = T \end{cases} \quad (15)$$

1.3 基于预期 SVM-DTC 的 DFIG 系统

根据直接转矩控制和空间电压矢量控制的原理和上述算法, 得到双馈风力发电机的预期空间电压矢量调整的直接转矩控制系统如图 3 所示, 这里研究的重点是电机转子侧的变换器, 因此假设双馈发电机工作在正转状态, 且网侧变换器符合要求。

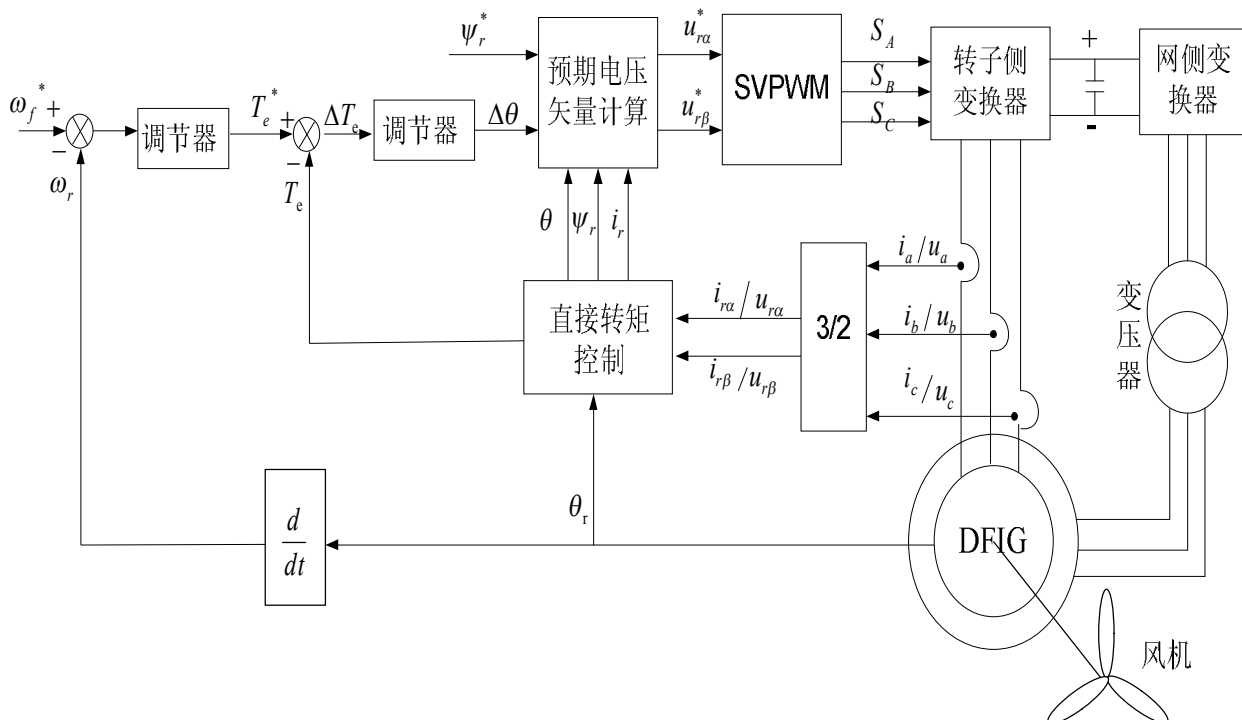


图 3 基于预期 SVM-DTC 的 DFIG 系统

Fig. 3 The DFIG system based on expected SVM-DTC

2 系统仿真结果与分析

按照上述方法对基于预期 SVM-DTC 的双馈风力发电系统进行仿真实验, 双馈电机参数如下: 容量 $S_N = 6 \text{ MVA}$, 定子相电压 $U_s = 575 \text{ V}$, 极对数 $p = 3$, 同步速

$n_1 = 1000 \text{ r/min}$, 其他折算到定子侧的参数为 $R_s = 0.379$, $R_r = 0.314$, $L_s = 0.0428 \text{ H}$, $L_m = 0.043 \text{ H}$, $L_r = 0.045 \text{ H}$ 。假设网侧变换器符合要求, 则在 MATLAB7.1/SIMULINK 中建立的系统仿真模型采用 ode 23tb 方式对系统进行仿真, 如图 4 所示。

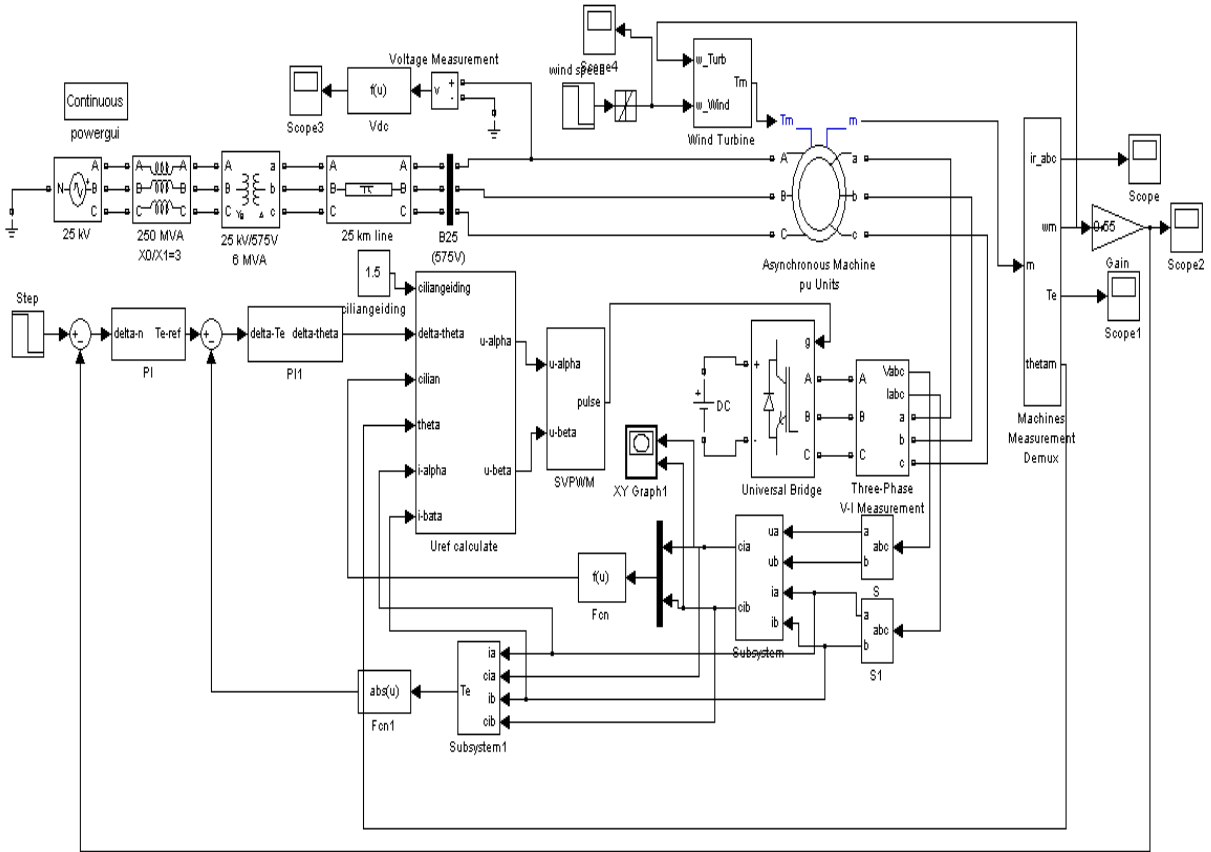
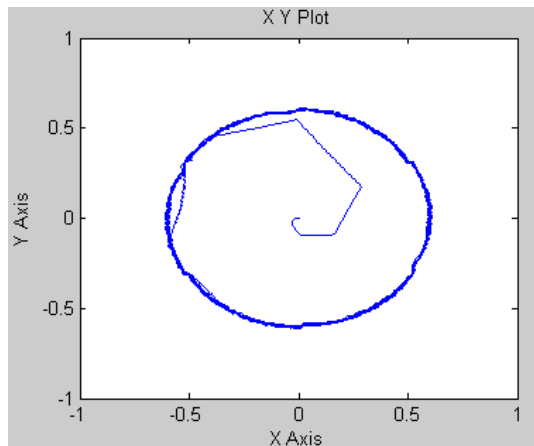


图 4 基于预期 SVM-DTC 的 DFIG 系统仿真图

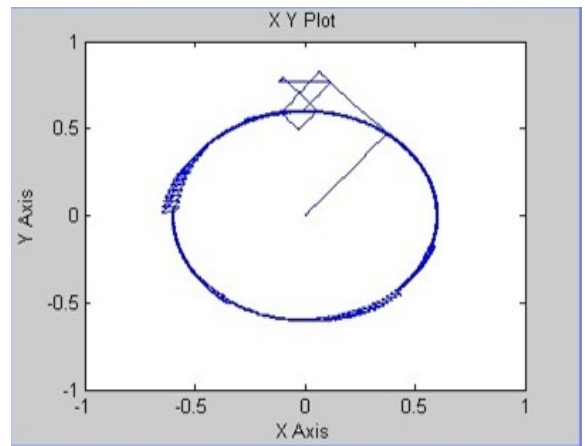
Fig. 4 The simulation diagram of DFIG system based on expected SVM-DTC

首先给定本风力发电系统的风速 8 m/s 恒定值, 则基于预期 SVM-DTC 的系统仿真的转子观察磁链轨迹如图 5 (a) 所示, 图 5 (b) 为基于传

统直接转矩控制 (DTC) 的磁链轨迹。通过比较发现, 图 5 (a) 中的磁链轨迹相对于图 5 (b) 能快速收敛稳定, 轨迹相对平滑且波动较小。



(a) 基于预期SVM-DTC算法的磁链轨迹



(b) 基于传统DTC算法的磁链轨迹

图 5 基于预期 SVM-DTC 算法和传统 DTC 算法的磁链轨迹

Fig. 5 The flux linkage locus based on expected SVM-DTC algorithm and traditional DTC algorithm

将风速在 5 s 时刻改变, 按照图 6 所示曲线从 8 m/s 上升到 14 m/s, 整个过程大约持续 9 s,

则引起的发电机各参数的变化分别如图 7 至图 9 所示。

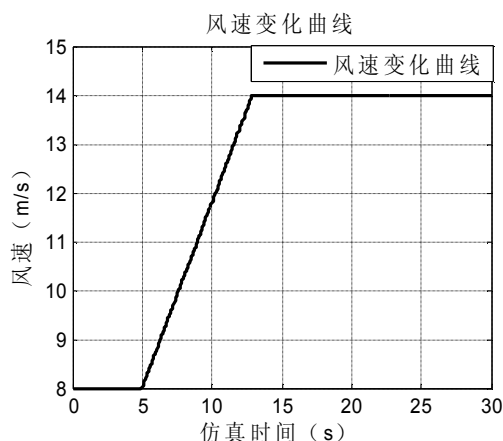


图6 风速变化曲线

Fig. 6 The curve of wind speed change

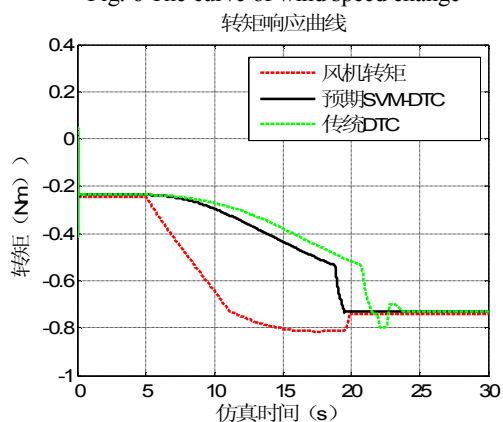


图8 电磁转矩响应曲线

Fig. 8 The response curve of electromagnetic torque

从图7中可以看出,当风速发生变化时,基于预期 SVM-DTC 的风力发电机的转速能快速响应跟随风速变化,转速跟随风速的上升时间和调整时间明显小于传统 DTC 系统的转速响应,其相对于后者,其转速超调量小,平稳过渡且振荡小。这种转速跟随的快速性与稳定性有利于双馈风力发电机的变速恒频控制。

当风速增加使得输入转矩增大,风力发电机的电磁转矩需跟随转矩变化使发电机转矩平衡,从图8中可以看出,基于预期 SVM-DTC 的风力发电机的电磁转矩能平稳过渡,能抑制风机给发电机的转矩波动,而传统 DTC 系统的转矩波动较大,且当输入转矩平稳后还在 20~25 s 之间出现了振荡过程。

为了方便分析与比较,将发电机输出交流电压等效成直流电压,如图9所示,明显可以发现,基于 SVM-DTC 的风力发电系统的直流电压波动

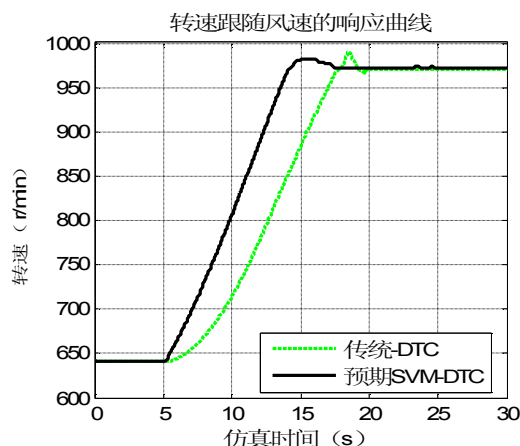


图7 转速跟随风速变化响应曲线

Fig. 7 The response curve of speed following wind speed change

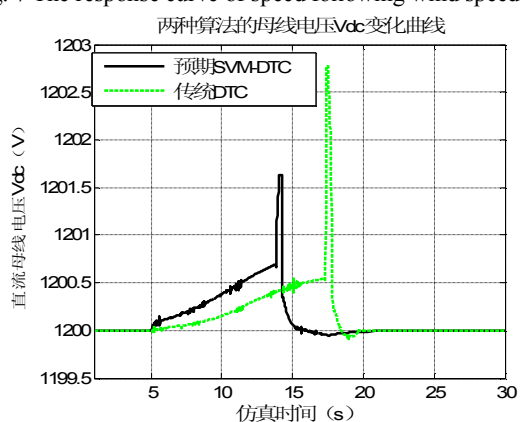


图9 定子等效直流电压波动曲线

Fig. 9 The curve of equivalent DC voltage fluctuation of stator

比基于传统 DTC 系统小,且能快速抑制,前者在风速达到 14 m/s 时有略微一个尖峰电压但快速恢复,但是的响应明显滞后,且尖峰电压相对较大,在恢复是经过一个小的振荡。

因此,通过对图5至图9的仿真结果比较,基于 SVM-DTC 的发电机转子磁链轨迹比传统 DTC 波动小,且当风速变化时,前者的风力发电机的转速和转矩的抗扰能力和响应速度都优于后者。同时,对风速变化引起的电压波动和恢复能力也优于传统 DTC。

3 结论

仿真实验结果证明,对于风速变化的风力发电系统,采用预期 SVM-DTC 算法对双馈风力发电机进行控制磁链、转速和转矩的控制性能相对于传统 DTC 的双馈风力发电系统都有良好的性

能。但是本文的不足之处是没有考虑网侧变换器的控制,因此在本文的基础之上可以做两方面的研究:一是将电机侧和网侧两个变换器同时考虑,对控制器进行综合研究设计,提高变速恒频风力发电的性能;二是在算法上继续优化,将智能算法融入到控制算法中,比如将转速调节器或者转矩调节器由传统 PI 算法改为智能算法,解决系统非线性问题。

参考文献:

- [1] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2005:8-22.
- [2] 林成武,王凤翔,姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):122-125.
- [3] 夏长亮,宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(14):91-94.
- [4] 陶彩霞,张友鹏. 风电系统中双馈电机直接转矩控制系统的研究[J]. 电气自动化,2012,34(4):23-25.
- [5] 张华强,王新生,魏鹏飞,等. 基于空间矢量调制的直接转矩控制算法研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(6): 13-18.
- [6] 陈振,刘向东,戴亚平,等. 采用预期电压矢量调制的 PMSM 直接转矩控制[J]. 电机与控制学报,2009,13(1): 40-46.
- [7] Wei X, Chen D Y, Zhao C Y. Minimization of torque ripple of direct-torque-controlled induction machines by improved discrete space vector modulation [J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796), 2004, 72(8): 103-112.
- [8] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drivers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-536.
- [9] 姚兴佳,井艳军,王文卓,等. 双馈风力发电机直接转矩控制的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006,28(6): 671-674.
- [10] 魏欣,陈大跃,赵春宇. 基于空间矢量调制的异步电机直接转矩控制[J]. 系统仿真学报,2006,18(2): 405-408.