

Simulation and Analysis of Vector Control and Direct Torque Control for High-Speed Motorized Spindles*

Minghong Zhou, Xiao'an Chen

State Key Lab of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing
Email: zhoumhc@gmail.com, xachen@cqu.edu.cn

Received: Apr. 27th, 2012; revised: May 10th, 2012; accepted: May 11th, 2012

Abstract: Vector control (VC) and Direct torque control (DTC) are both high-performance drive control methods for high-speed motorized spindles, and their control performances have a significant impact on the machining quality of the spindle. To study VC, DTC and their comparison on high-speed motorized spindles, according to their basic control equations, a VC model and a DTC model are constructed respectively to carry out VC and DTC simulation on a type 170MD15Y20 high-speed motorized spindle, whose rated speed is 15,000 rpm. The simulation results are analyzed and compared, and the features of VC and DTC are summarized.

Keywords: High-Speed Motorized Spindle; Vector Control; Direct Torque Control; Simulation

高速电主轴矢量控制与直接转矩控制仿真及分析*

周明红, 陈小安

重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆
Email: zhoumhc@gmail.com, xachen@cqu.edu.cn

收稿日期: 2012年4月27日; 修回日期: 2012年5月10日; 录用日期: 2012年5月11日

摘要: 矢量控制和直接转矩控制是高速电主轴的高性能驱动控制方法, 其控制性能对高速电主轴的加工质量有重要影响。为了研究高速电主轴的矢量控制、直接转矩控制以及它们之间的差异, 本文根据其控制基本方程, 分别建立一个矢量控制仿真模型和一个直接转矩控制模型, 对额定转速为 15,000 转的 170MD15Y20 型高速电主轴进行了矢量控制和直接转矩控制仿真, 并对仿真结果进行了分析、对比, 最后总结了矢量控制和直接转矩控制的特点。

关键词: 高速电主轴; 矢量控制; 直接转矩控制; 仿真

1. 引言

高速电主轴作为高速机床的核心部件, 其驱动控制方法的静、动态性能对高速加工质量有重要的影响。矢量控制和直接转矩控制作为两种高性能控制方法, 是目前高速电主轴的主要控制方法。因此, 研究高速电主轴的矢量控制和直接转矩控制, 是进一步改

善高速电主轴高速加工质量的基础。

鼠笼式异步型高速电主轴结构简单, 坚固耐用, 但要实现其高性能驱动控制, 是比较困难的。上世纪 70 和 80 年代, 德国学者 Blaschke^[1]和 De Denbrock^[2]针对交流异步电动机动态性能较低的问题, 分别提出了矢量控制和直接转矩控制, 实现了对异步电动机磁链和电磁转矩的独立、瞬态控制。之后, De Doncker^[3]、Pandya^[4]等人在这两位学者的基础上, 对矢量控制和直接转矩控制进行了多种改进和深入研究, 使它们在

*资助信息: 国家自然科学基金(51005259)、重庆大学机械传动国家重点实验室访问学者基金项目(KFKT-200801)、中央高校基本科研业务费资助, 基金编号: CDJXS11111143。

交流异步电动机的驱动中得到广泛应用。国内方面, 陈小安^[5]、张珂^[6]等人对矢量控制和直接转矩控制在高速电主轴上的应用进行了较深入的研究, 获得了高速电主轴良好的动态性能。

高速电主轴转速很高, 高达几万、几十万转, 并且是直接用来夹装刀具对工件进行加工的, 对驱动控制提出了更高的要求。上述工作主要对交流异步电动机的矢量控制和直接转矩控制做了深入的研究, 但对矢量控制和直接转矩控制在高速电主轴上的应用及其对比研究, 还不是很充分。本文根据高速电主轴矢量控制和直接转矩控制的基本方程, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了一个矢量控制和一个直接转矩控制仿真系统, 完成了控制器参数整定, 对额定转速为 15,000 转的 170MD15Y20 型高速电主轴进行了额定转速下的空载启动和加载, 并对仿真结果进行了对比分析, 总结了矢量控制和直接转矩控制的特点, 并展望了它们一个发展方向。

2. 高速电主轴矢量控制与直接转矩控制方程

本文研究的高速电主轴的内置电机为无壳异步电动机, 因此异步电动机的控制理论也适用于高速电主轴的驱动控制。

2.1. 矢量控制方程

通过矢量变换, 可把高速电主轴在三相静止坐标系 ABC 上的电磁参量变换到同步旋转坐标系 dq 上, 进而实现励磁电流和转矩电流的有效解耦。将高速电主轴在三相静止坐标系上的数学模型变换到二相同步旋转坐标系上后, 可推导出按转子磁链定向的矢量控制基本方程^[7], 即

$$\boldsymbol{\psi}_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} \mathbf{i}_{ds} \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \boldsymbol{\psi}_r \mathbf{i}_{qs} \quad (2)$$

$$\Delta\omega = \frac{L_m}{T_r \boldsymbol{\psi}_r} \mathbf{i}_{qs} \quad (3)$$

$$\theta_s = \int (\omega_r + \Delta\omega) dt \quad (4)$$

式(1)~(4)中, $\boldsymbol{\psi}_r$ 为转子磁链, \mathbf{i}_{ds} 和 \mathbf{i}_{qs} 分别为定子电流矢量在d、q轴上的分量, 亦称励磁电流分量和

转矩电流分量; $\boldsymbol{\psi}_r$ 为转子磁链; L_m 为定、转子间的互感; L_r 为转子自感; $T_r = L_r/R_r$ 为转子电路时间常数, 其中 R_r 为转子电阻; n_p 为极对数; p 为微分算子; \mathbf{T}_e 为电磁转矩; $\Delta\omega$ 为转差角速度或转差角频率, 且 $\Delta\omega = \omega_s - \omega_r$; ω_r 为转子电角速度; θ_s 为转子磁链位置角。

在矢量控制中, 通过将三相电流变换到二相同步旋转坐标系上, 通过式(1)可算得转子磁链, 通过式(2)可算得电磁转矩, 通过式(3)可算得转差角速度。转差角速度再加上转子机械角速度并积分, 可算得转子磁链位置角, 即式(4)所示。

式(1)~(4)是高速电主轴矢量控制的基本方程, 可由此构成高速电主轴矢量控制系统。

2.2. 直接转矩控制方程

在三相静止坐标系或二相同步旋转坐标系上, 高速电主轴的机、电、磁参数具有关系式^[7]

$$\mathbf{T}_e = n_p \frac{L_m}{L'_s L'_r} \boldsymbol{\psi}_s \boldsymbol{\psi}_r \sin \delta \quad (5)$$

$$T_r \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} + \left(\frac{1}{\sigma} - T_r j\omega_r \right) \boldsymbol{\psi}_r = \frac{L_m}{L'_s} \boldsymbol{\psi}_s \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = \int (\mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s) dt \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_e = n_p \boldsymbol{\psi}_s \times \mathbf{i}_s \quad (8)$$

式(5)~(8)中, L'_s 为定子瞬态电感, 且 $L'_s = L_s L_m^2 / L_r$; $\boldsymbol{\psi}_s$ 为定子磁链(黑体为矢量), δ 为定、转子磁链的夹角; σ 为漏磁系数, 且 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$; j 为复平面的虚轴; \mathbf{u}_s 为定子电压; \mathbf{i}_s 为定子电流。

由式(5)可以看出, 如果能够保持定、转子磁链幅值不变, 那么可以通过改变它们之间的夹角 δ 来调节电磁转矩 \mathbf{T}_e 。又由式(6)可知, 在定子磁链矢量 $\boldsymbol{\psi}_s$ 作用下, 转子磁链 $\boldsymbol{\psi}_r$ 的动态响应具有一阶滞后特性。即在非常短暂的开关时间内, 改变定子磁链 $\boldsymbol{\psi}_s$ 时, 可以认为转子磁链是不变的。由式(7)可以通过定子电压、电流来间接观测定子磁链的幅值和相位。

通过式(8)可算得高速电主轴的电磁转矩, 通过式(7)可算得定子磁链的幅值和相位。再根据电磁转矩、定子磁链的幅值与参考值的比较以及定子磁链的位置角, 选择合适的电压矢量, 实现对电磁转矩的直接控制。

式(5)~(8)是高速电主轴直接转矩控制的基本方程,可依此构成高速电主轴直接转矩控制系统。

3. 高速电主轴矢量控制与直接转矩控制仿真建模

MATLAB 中的 Simulink 是一个强大的动态仿真工具箱,能对各种系统进行动态仿真。MATLAB/Simulink 采用图形化的编程语言,可根据系统的控制框图直接搭建仿真模型,避免了如 VB、VC++等计算机语言的繁琐文本编程,简洁直观。同时,该仿真平台为著名的数学软件 MATLAB 的上层专业工具箱,具有 MATLAB 强大的数学计算能力。其中,Simulink 中的 SimPowerSystems 模块库是专为各种电力系统仿真而设置的,本文的高速电主轴矢量控制仿真正是在该模块库中进行的。

3.1. 矢量控制仿真建模

高速电主轴的矢量控制中,对转子磁链幅值和位置的测量对控制性能好坏甚至控制能否实现是非常重要的。图 1 为矢量控制磁链观测器,通过模块 abc to dq 可以将三相电流变换为二相电流,再由式(1)、式(3)和式(4),可输出磁链的幅值 phir 和相位角 the,以及转矩电流 isq。

磁链观测器可输出磁链、电流,再联系式(2),可

构建成一个带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统,如图 2 所示。

图 2 中,输入为给定转速 n^* 和负载转矩 T_m ; 输出为主轴转速 w_m 、转矩 T_e 。HSMS 为高速电主轴; Flux Obs. 为磁链观测器; Torque Cal. 用于计算实际电磁转矩,由式(2)得到; Current Hist. 为电流滞环比较控制器; APhiR 为磁链调节器, ASR 为转速调节器, ATR 为转矩调节器,这三个调节器都为 PI 调节器; Flux Table 为磁链函数发生器,用于实现高于基速时的弱磁控制。

在图 2 的系统中,按表 1 输入 170MD15Y20 型高速电主轴的参数。Current Hist. 的滞环宽度设为 4 A。通过反复调试,完成 ASR、ATR 和 APhiR 调节器的参数整定,如表 2 所示。

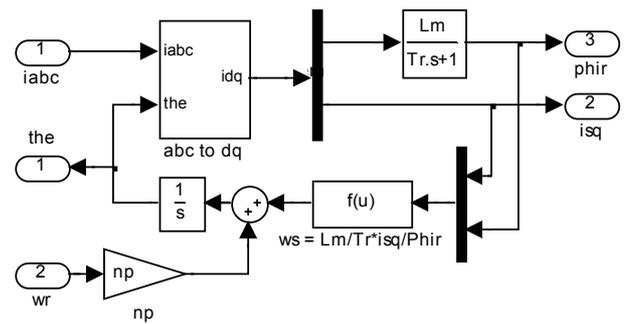


Figure 1. Flux observer of vector control
图 1. 矢量控制磁链观测器

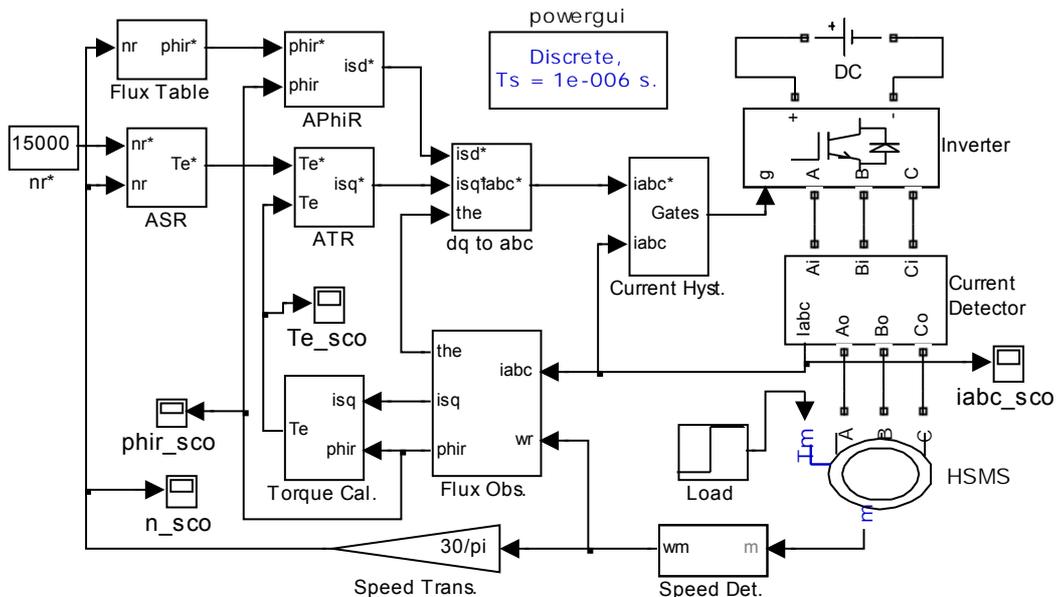


Figure 2. Vector control simulation model of the high-speed motorized spindle
图 2. 高速电主轴矢量控制仿真模型

Table 1. Parameters of the type 170MD15Y20 high-speed motorized spindle

表 1. 170MD15Y20 型的高速电主轴的参数

参数名称	取值	参数名称	取值
额定功率	20 KW	定子电阻	0.11 Ω
额定电压	350 V	转子电阻	0.21 Ω
额定电流	46 A	定子漏感	0.00030 H
额定转速	15,000 rpm	转子漏感	0.00031 H
极对数	2	互感	0.01017 H

Table 2. Parameters of PI Controllers of vector control

表 2. 矢量控制各 PI 调节器的参数

参数名称	ASR	ATR	APhiR
比例系数	2	10	1000
积分系数	50	10	100,000
控制器限幅上限	16	100	50
控制器限幅下限	-16	-100	-50

3.2. 直接转矩控制仿真建模

同样，直接转矩控制中对磁链的观测也是很重要的，只不过跟矢量控制中要观测转子磁链不同，直接转矩控制中观测的是定子磁链。图 3 为本文直接转矩控制所建立的磁链观测器，根据式(7)构建而成。

根据式(8)，可建成图 4 所示的高速电主轴直接转矩控制仿真系统，其输入、输出与矢量控制的相同。

图中，Flux Obs.为磁链观测器，由式(7)建成；Torque Cal.为转矩计算器，可由式(8)得到；Rect to

Polar 是将直角坐标量变换成极坐标量；Sector 用于确定定子磁链所在的扇区；Switch Table 是一个开关表，输出由输入 the、Hphi 和 sec 决定；Te Hist.和 Phi Hist.都为是滞环比较器；ASR 为转速调节器，与矢量控制中的 ASR 一样也为 PI 调节器；Flux Table 是磁链函数发生器，以实现高于基速时的弱磁控制。

其中，开关表按表 3 选取开关电压矢量^[7]，表中①~⑥为扇区，电压矢量 $u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{s8}$ 的空间位置及各个扇区的位置大小如图 5 所示。Te Hist.的滞环宽度设为 2 N·m，Phi Hist.的滞环宽度设为 0.004 Wb。经过反复调试，直接转矩控制 PI 调节器 ASR 参数分别为：比例系数 15，积分系数 10，控制器限幅上限 16，控制器限幅下限-16。

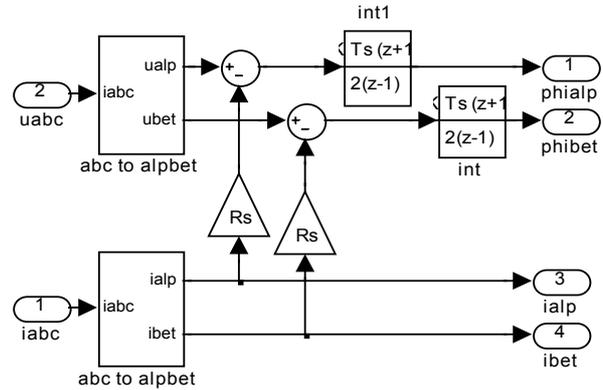


Figure 3. Flux observer of direct torque control
图 3. 直接转矩控制磁链观测器

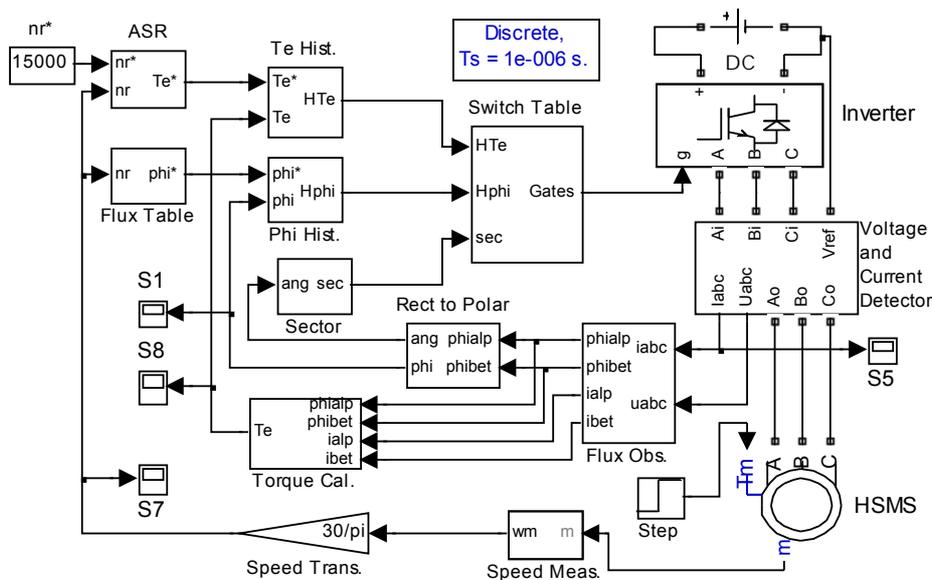


Figure 4. Direct torque control simulation model of the high-speed motorized spindle
图 4. 高速电主轴直接转矩控制仿真模型

Table 3. Switch table rule of direct torque control
表 3. 直接转矩控制开关表 Switch Table 规则

Hphi	HTe	①	②	③	④	⑤	⑥
1	1	u_{s2}	u_{s3}	u_{s4}	u_{s5}	u_{s6}	u_{s1}
	0	u_{s7}	u_{s8}	u_{s7}	u_{s8}	u_{s7}	u_{s8}
	-1	u_{s6}	u_{s1}	u_{s2}	u_{s3}	u_{s4}	u_{s5}
-1	1	u_{s3}	u_{s4}	u_{s5}	u_{s6}	u_{s1}	u_{s2}
	0	u_{s8}	u_{s7}	u_{s8}	u_{s7}	u_{s8}	u_{s7}
	-1	u_{s5}	u_{s6}	u_{s1}	u_{s2}	u_{s3}	u_{s4}

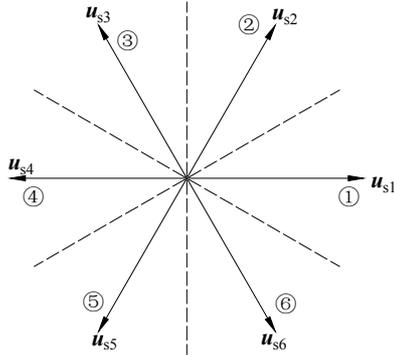


Figure 5. Switch voltage vectors of direct torque control
图 5. 直接转矩控制开关电压矢量

4. 高速电主轴矢量控制和直接转矩控制仿真结果及分析

给定转速设为额定转速 15,000 rpm，空载启动，在 $t = 3\text{ s}$ 时给高速电主轴施加一个 $T_m = 10\text{ N}\cdot\text{m}$ 的阶跃负载，观察高速电主轴的转速和转矩响应。

图 6 为 170MD15Y20 型高速电主轴矢量控制(VC)和直接转矩控制(DTC)仿真的转速响应。从图中可以看出，矢量控制下，高速电主轴在 2.8 s 附近达到给定转速 15,000 rpm，即额定转速，而直接转矩控制响应稍快，在 2.4 s 附近即达到给定转速。在 3 s 时受到 10 N·m 的阶跃负载，都能保持转速恒定，具有很好的抗干扰能力。

图 7 为 170MD15Y20 型高速电主轴矢量控制和直接转矩控制仿真的转矩响应。从图中可以看出，矢量控制具有较大的启动转矩，这是其转速能在短时间内达到给定转速的原因。直接转矩控制的启动转矩比矢量控制的更大，因此能在更短的时间里完成加速。这还说明直接转矩控制比矢量控制的响应速度更快。在 3 s 时，受到 10 N·m 的阶跃负载，电磁转矩都能对负载进行快速跟踪，从而保持转速不变。由于矢量控制的电流和直接转矩控制的磁链、转矩都采用了滞环比

较控制，这实际上是一种开关控制，会导致较大的转矩脉动。

图 8 为高速电主轴在矢量控制和直接转矩控制控制下的磁链响应。总的来说，这两种控制方法都能在

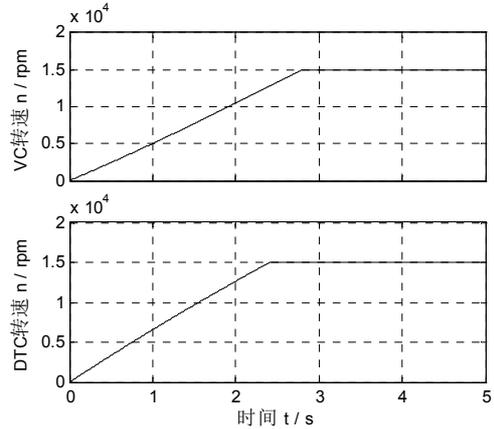


Figure 6. Speed responses of the high-speed motorized spindle
图 6 高速电主轴转速响应

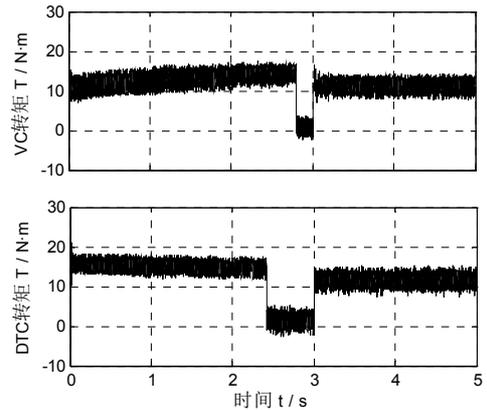


Figure 7. Torque responses of the high-speed motorized spindle
图 7. 高速电主轴转矩响应

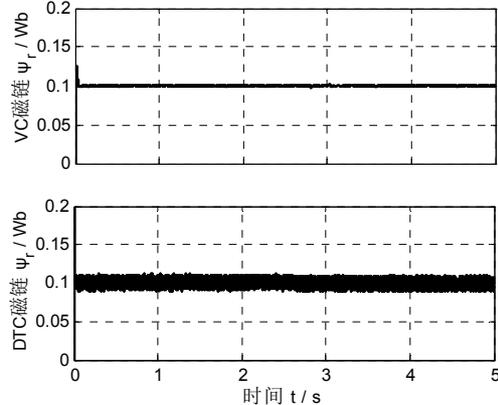


Figure 8. Flux responses of the high-speed motorized spindle
图 8. 高速电主轴磁链响应

极短时间内使磁链达到给定值 0.1 Wb, 并且在 3 s 受到 10 N·m 冲击干扰时, 仍能保持恒定。但是, 直接转矩控制的磁链脉动比矢量控制的要大, 这主要是由于直接转矩控制的磁链、转矩都为滞环控制的缘故。

5. 结论与展望

仿真结果及分析表明, 所建模型是正确的。矢量控制和直接转矩控制都能对磁链和电磁转矩进行瞬态独立控制, 进而实现对高速电主轴的高性能驱动控制。矢量控制通过将高速电主轴的三相交流电参量变换为二相同步旋转坐标系上的直流电参量实现了磁链和转矩的有效解耦, 但需要较多的坐标变换计算。直接转矩控制直接从电磁转矩和磁链的控制出发构建控制系统, 具有结构简单, 更快的动态响应。滞环控制是一种开关控制方式, 结构简单, 快速性好, 但会导致较大转矩脉动。

从本文可以看出, 尽管矢量控制和直接转矩控制的控制理论和实现方法存在较大的差异, 各有优缺点, 但实际上它们存在着很多的相同点。因此, 可以

通过进一步研究它们的共同点, 寻找一种能够统一矢量控制和直接转矩控制的方法, 以集合这两种控制方法的优点, 避免其缺点。这种方法应该具有更少的计算量, 更好的动态性能。

参考文献 (References)

- [1] F. Blaschke. A new method for the structural decoupling of A.C. induction machines. IFAC Symposium, 1971.
- [2] M. Depenbrock. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(4): 420-429.
- [3] R. W. De Doncker, F. Profumo, M. Pastorelli, et al. Comparison of universal field oriented (UFO) controllers in different reference frames. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2): 205-213.
- [4] S. N. Pandya, J. K. Chatterjee. Torque ripple minimization in direct torque control based IM drive Part-I: Single-rate control strategy. In: J. T. Boys, Ed., International Conference of Power System Technology and IEEE Power India Conference, POWERCON, 2008: 1-8.
- [5] 陈小安, 康辉民, 合焯等. 无速度传感器矢量控制下高速电主轴动态性能分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 96-101.
- [6] 张珂, 徐湘辉, 王利杰等. PMAC2 下高速电主轴直接转矩控制系统设计[J]. 沈阳建筑大学学报, 2006, 22(4): 691-695.
- [7] 王成元, 夏加宽, 杨俊友等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.