

异步电机矢量控制变频调速系统的 Simulink 仿真研究

魏祥林^{1,2} 周启华³ 宁俊保¹(1. 兰州理工大学 电信学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050;
3. 兰州铁路技师学院 电工教研组, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在分析异步电机矢量控制原理和矢量控制变频调速系统结构的基础上, 利用 Simulink 和 PSB 工具箱中的库元件, 建立了异步电机矢量控制调速系统的仿真模型并进行了仿真实验。仿真结果验证了该模型的有效性和矢量控制调速系统动态性能的良好性。

关键词: 矢量控制 Simulink 变频调速 仿真

[中图分类号] TN773; TM343 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2011)05-0048-04

Simulation Study of the Vector Controlled Variable Frequency Drives for Asynchronous Machine Based on Simulink

Wei Xianglin^{1,2} Zhou Qihua² Ning Junbao¹(1. College of Electrical and Information Engineering Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;
2. Key Laboratory of Advanced Control for Industrial Process in Gansu Province Lanzhou Gansu 730050, China;
3. Lanzhou Railway Technician College, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: Having analyzed the principle of Vector Control used in an asynchronous machine, using the elements in Simulink and PSB a simulation model for the vector controlled variable frequency drive of an asynchronous machine was set up. A simulation experiment was carried out. The result of the simulation verified the validity of the model, and tested the good performances for the vector controlled variable frequency drive of an asynchronous machine.

Keywords: Vector control Simulink Variable frequency drives Simulation

0 引言

交流异步电机具有坚固耐用、维护方便、可靠性高、容量大、调速范围宽和价格低廉等优点, 在现代交流传动系统中得到了广泛应用。然而, 由于异步电机是一个多变量、强耦合、参数时变的非线性对象, 很难对其进行高性能的控制^[1]。

20 世纪 70 年代, 德国西门子 F. Blaschke 等提出的“感应电机磁场定向的控制原理”和美国 P. C. Custman 与 A. A. Clark 申请的专利“感应电机定子电压的坐标变换控制”奠定了矢量控制(VC)的基础。其主要思想就是通过坐标变换将异步电动机等效为一台直流电动机, 从而像直流电动机那样进行快速的转矩和磁链控制, 因此矢量控制也被称为解耦控制或磁场定向控制(FOC)^[2]。

矢量控制已在交流电机高性能变频调速领域得到最广泛应用, 特别是在异步电动机变频调速系统中用得最多。然而矢量控制的原理抽象、坐标变换运算量大、结构复杂、实现起来较为困难, 因此要通过一个真实的物理实验平台用于学习和研究矢量控制则非常不易, 不但成本大, 而且费时费力, 而 MATLAB 软件为我们提供了一个非常有力的虚拟实验平台。

本文以 MATLAB 软件下的 Simulink 环境为建模和仿真平台, 应用电力系统工具箱 Power System Block(PSB)中各种电力元件构建异步电机变频调速系统的仿真模型, 详细介绍各模块的构建方法及其参数设置, 使读者对矢量控制变频调速系统的结构和原

理有一个更加清晰的认识, 对矢量控制变频调速系统的性能有更加直观的感受。

1 异步电机的数学模型及矢量控制原理

要对异步电机实行有效的控制首先要认识异步电机的数学模型。根据电机学原理, 异步电机在三相静止坐标系上以向量形式表达的数学模型见方程组(1)^[1], 可见, 异步电机是一个多变量、高阶、非线性、强耦合的被控对象。

根据电机统一理论和空间矢量等效变换原理, 得到的异步电机在同步旋转 MT 坐标系上的模型, 即按转子磁链定向坐标系上的异步电机数学模型如方程组(2)^[3]。

由式(2)可见, 该模型相对于异步电机在三相静止坐标系上的模型而言不但变量数减少、阶数降低, 而且实现了电磁转矩和转子磁链的解耦, 转子磁链 ψ_r 唯一地取决于定子电流矢量的磁链分量 i_{sM} , 而电磁转矩 T_e 在转子磁链已经确定的情况下

$$\begin{cases} \bar{U} = R\bar{i} + \rho\bar{\Psi} \\ \bar{\Psi} = L\bar{i} \\ T_e = -n_p \bar{\Psi}_r \times \bar{i}_r \\ T_e = T_1 + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

唯一地取决于定子电流矢量的转矩分量 i_{sT} , 因此可以模仿直流电机的控制策略, 通过对定子电流转矩分量 i_{sT} 的控制来实现对

电磁转矩的控制,这就是矢量控制的基本原理。

$$\begin{cases}
 u_M = \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r} \right) i_{sM} + \sigma L_s \rho i_{sM} - \omega_s \sigma L_s i_{sT} - \frac{L_m R_r}{L_r} \psi_r \\
 u_T = R_r i_{sT} + \sigma L_s \rho i_{sT} + \omega_s L_m \frac{\psi_r}{L_r} + \omega_s \sigma L_s i_{sM} \\
 \psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sM} \\
 T_e = \frac{n_p L_m}{L_r} i_{sT} \psi_r \\
 \omega_f = \frac{L_m i_{sT}}{T_r \psi_r}
 \end{cases} \quad (2)$$

为了提高调速系统的动态性能,需要对电磁转矩进行有效控制,故在矢量控制变频调速系统的转速环内加入转矩内环,以转速调节器 ASR 的输出作为转矩调节器 ATR 的给定 T_e^* ,则构成带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统的结构图如图 1 所示。

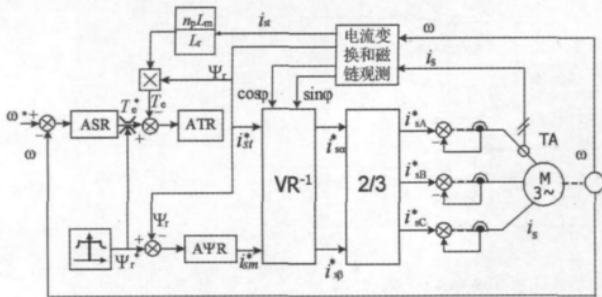


图 1 异步电机矢量控制调速系统的结构图

2 异步电机矢量控制变频调速系统的建模

异步电机矢量控制变频调速系统中大部分功能单元的仿真模型均可以用 Sim Power System 和 Simulink 下的库元件来实现,部分较复杂的功能单元则用 M 函数编程实现^[4]。

2.1 电压源逆变器仿真模型

为异步电动机供电的电压源型逆变器仿真模型,采用 Power electronics 库中的 Universal Bridge 构造,功率器件类型选择为 IGBT,功率变换器的模型如图 3 所示:

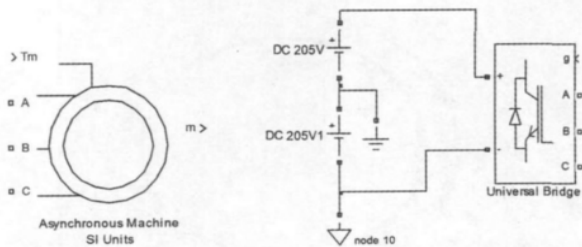


图 2 异步电机仿真模型 图 3 电压源逆变器仿真模型

2.2 异步电机的仿真模型

异步电动机的仿真模型采用 Sim Power Systems/Machines 库中的 Asynchronous Machine SI Unit 模块,如图 2 所示。参数设置为:转子类型 Squirrel cage, Pn = 3000VA, U_n = 380 V, R_s = 1.889 Ω, L_s = 9 mH,折算到定子侧的 R_r = 2.079 Ω, L_r = 9 mH, L_m = 0.187 H, p = 2, J = 0.2 kgm²。

2.3 电流滞环跟踪 PWM 控制器

电流滞环跟踪 PWM 控制器仿真模型是以 Simulink/Discontinuities 下的 Relay 模块为基础构成的,该模块输出六路 PWM 脉冲作为 Universal Bridge 模块的 gate 输入。该仿真模型如图 4 所示。

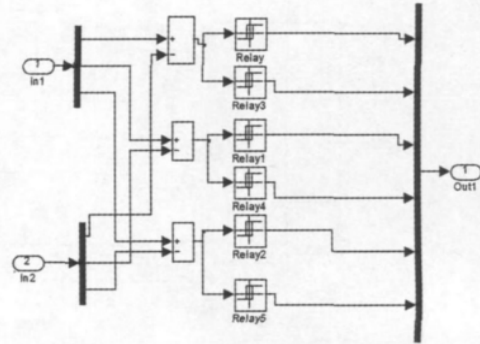


图 4 电流滞环跟踪 PWM 控制器仿真模型

2.4 PI 调节器仿真模型

转速调节器、转矩调节器采用 PI 控制,它们的仿真模型采用 Simulink 中的库元件构造,如图 5 所示。

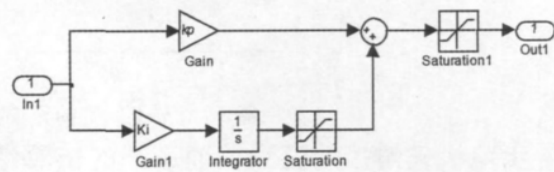


图 5 PI 调节器仿真模型

2.5 磁链观测器仿真模型

为了实现磁链闭环控制,构造的磁链观测器如图 6 所示。

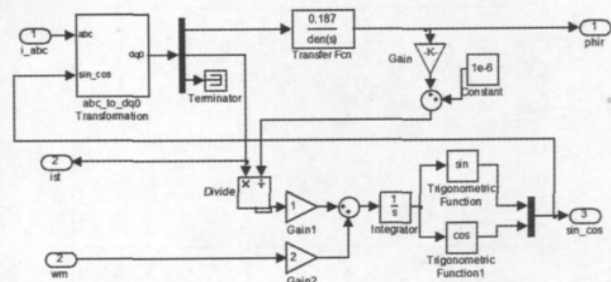


图 6 磁链观测器仿真模型

2.6 转矩观测器仿真模型

转矩观测器仿真模型如图 7 所示。

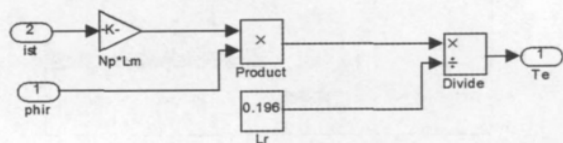


图 7 转矩观测器仿真模型

2.7 带转矩内环异步电机矢量控制变频调速系统的仿真模型

主要功能单元的建模过程如上所述,其他次要单元建模过程

不再详述。带转矩内环的异步电机矢量控制变频调速系统的仿真模型如图8所示。

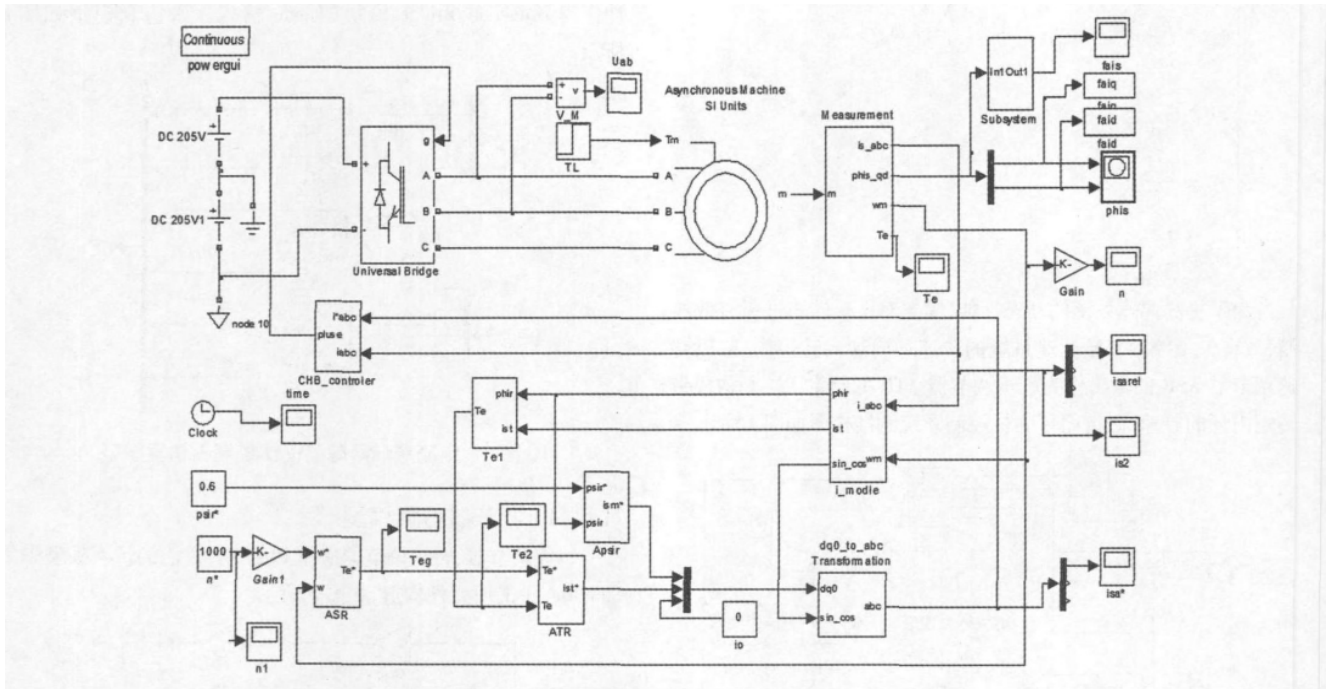


图8 带转矩内环的异步电机矢量控制变频调速系统的仿真模型

3 异步电机矢量控制变频调速系统的仿真结果分析

为了验证仿真模型的有效性,进行了如下仿真实验:电机在空载情况下启动,给定转速为 $n^* = 1000 \text{ r/min}$,当 $t = 1.2 \text{ s}$ 时,突加负载转矩 $T_L = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。仿真结果如图9~13所示。

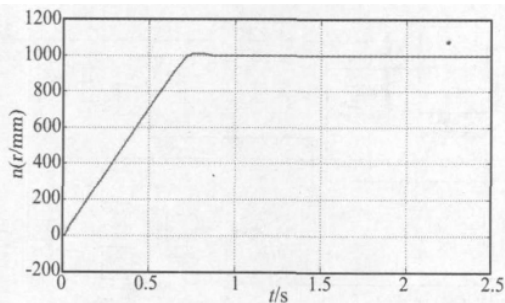


图9 转速响应波形

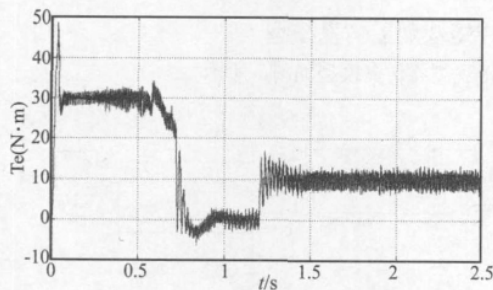


图10 转矩响应波形

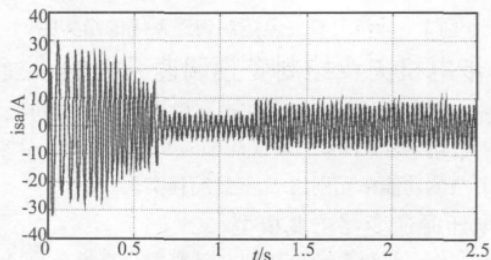


图11 定子A相电流波形

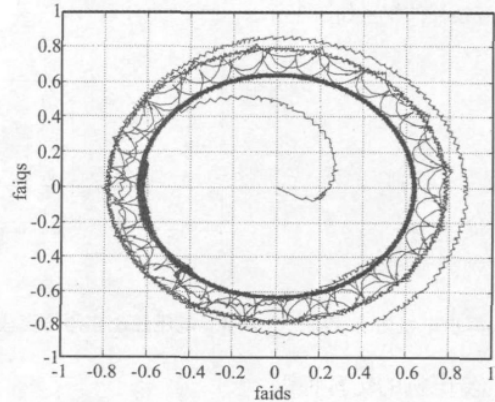


图12 定子磁链轨迹

由图9和图10可见,在空载启动阶段转矩快上增大到所允许最大值保持恒定,转速则线性升高,上升时间大约为0.7s,超调量小于5%。

从图11可见,空载启动阶段,正是因为定子电流幅值维持最

大才使得电磁转矩维持最大值,而且可以发现定子电流的频率在此阶段也是逐渐增大的,即实现了电机的软启动。

由图 12 可见,定子磁链轨迹很逼近理想圆形轨迹,这正是矢量控制所追求的控制效果。矢量控制的实质是在定子绕组上施加连续的定子电流矢量^[1],故而磁链轨迹接近圆形,只是在动态过程中磁链轨迹偏离期望轨迹较大。

图 13 为稳态运行时的转速、转矩、定子电流和定子磁链波形,为了清晰观察做了局部放大,可见尽管系统稳态运行但这些变量都有波动,做定量分析可以发现转速的脉动幅度远远小于转

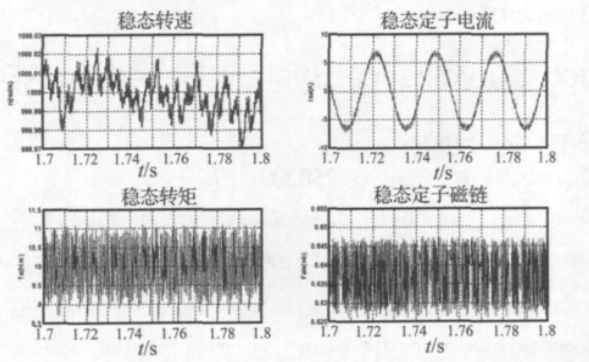


图 13 稳态时转速、转矩、电流和磁链波形

(上接第 29 页)

反激变换器中高频变压器 T 是电路的核心,设计合理的反激变压器可以使整个开关电源稳定、高效地工作。光伏阵列输出电压为 12~24 V,反激变换器的次级输出为 15 V/2 A 给负载,辅助输出 12 V/1 A 给芯片供电,开关频率为 100 KHz。根据输出功率

$$P_o = V_o \cdot I_o + V_f \cdot I_f = 15 \cdot 2 + 12 \cdot 1 = 42 \text{ W} \quad (3)$$

选择 EE28/22 型的铁氧体磁芯,通过计算得到初级电感 $L_p = 12 \mu\text{H}$,最大峰值电流 $I_{pk} = 10.6 \text{ A}$,初级绕组 $N_p = 6 \text{ TS}$,次级绕组 $N_s = 11 \text{ TS}$,辅助绕组 $N_f = 8 \text{ TS}$,采用初级-辅助级-次级的三明治绕线方式,减小功率开关管的电压应力,从而可以减小吸收电路,间接提高电源的效率。

4 仿真及结果

本文使用 MATLAB 的 Simulink 工具箱进行仿真验证。根据光伏电池模型及所设计的电路进行模拟仿真,光伏组件参数选择如下:内部串联电阻 0.24Ω ,

内部并联电阻 260Ω , $\mu = 25^\circ\text{C}$,光照强度 1000 条件下短路电流 3.8 A,开路电压 22.1 V,峰值工作电流 3.5 A,峰值工作电压 17.5 V,峰值功率 60.4 W。结果如图 7 所示。

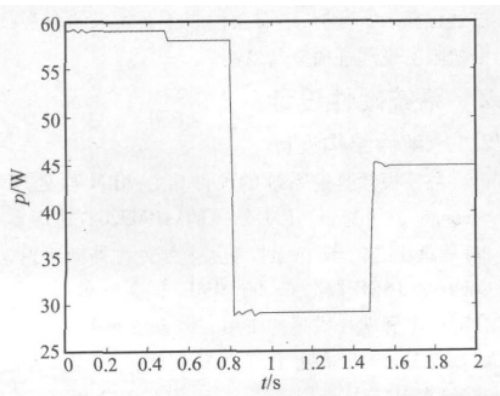


图 7 光强改变时光伏阵列输出功率图

矩、电流和磁链的脉动幅度,这是因为前者的变化同时受机械惯性时间和电磁时间常数影响,而后三者只受电磁时间常数影响,机械惯性时间常数又远大于电磁时间常数。

4 结束语

本文在分析异步电机矢量控制原理与系统结构的基础上,借助 Simulink 和 PSB 工具箱中的库元件,建立了异步电机矢量控制变频调速系统的模型并进行了仿真实验。仿真结果不但验证了该模型的有效性,而且验证了矢量控制变频调速系统的良好动态性能:动态响应快,超调量小^[1],稳态转速脉动小。

参考文献

- [1] 王成元,夏加宽等.电机现代控制技术[M].北京:机械工业出版社,2006:153-161.
- [2] 郝晓弘,魏祥林,李翠明.VC与DTC在PMSM转矩控制中的比较研究[J].电气自动化,2008,30(4):24-27.
- [3] 陈勇,张大明,姜丕杰.电动汽车用异步电机矢量控制系统仿真研究[J].系统仿真学报,2007,19(16):3761-3765.
- [4] 洪乃刚.电力电子、电机控制系统的建模与仿真[M].北京:机械工业出版社,2010.

【作者简介】魏祥林(1978-),硕士,讲师,研究方向为电机控制。周启华(1984-),助教,主要从事电气自动化方向的教学和研究工作。宁俊宝(1987-),硕士研究生,研究方向为电机控制。

图 7 表明在光照强度发生变化时光伏阵列输出功率的变化情况。 $T=0.8 \text{ s}$ 时光强从 1000 变化到 500, $\mu=1.5 \text{ s}$ 时变化到 750,可以看到输出功率基本与理论值符合,且追踪速度比较快。

5 结束语

本文针对充电控制器实时跟踪光伏阵列输出功率的控制方法进行研究,首先分析了光伏阵列输出特性及 MPPT 基本控制原理,其次设计了一个基于 PWM 控制芯片及 DC-DC 电路的充电控制器,并进行了计算机仿真。结果表明该设计方案可行可靠,能够实时准确地追踪光伏阵列的最大功率。

参考文献

- [1] 韩文颖,陈爱国.具有 MPPT 功能的太阳能光伏充电器[J].电子测量技术,2009,32(10):30-32.
- [2] 冯焱生,张森,赵慧,等.太阳能发电技术与应用[M].北京:人民邮电出版社,2009.
- [3] 王震.独立太阳能光伏路灯系统中 MPPT 控制器的研究与设计[D].湖北大学,微电子与固体电子学,2009.
- [4] 杨帆,彭宏伟,胡为兵.DC-DC 转换电路在光伏发电 MPPT 中的应用[J].武汉工程大学学报,2008,30(3):104-106.
- [5] Abraham I, Preeman 著,王志强等译.开关电源设计[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [6] Cabal C, Alonso C, Cid-Pastor A, et al. Adaptive digital MPPT control for photovoltaic applications[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007: 2414-2419.

【作者简介】邓仙玉(1987-),女,广西百色人,硕士研究生,主要从事光伏发电理论和技术的研究;魏学业(1963-),男,山东临朐人,教授,博士生导师,主要从事再生能源、测量与过程控制、智能控制、安全监控技术的研究。