

永磁同步电动机矢量控制仿真研究

邹 慧

(四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要: 由于交流电机的非线性强耦合特性, 使得交流电机无法直接象直流他励电机独立地控制变量, 介绍了新的控制方式来实现交流电机转速和转矩的控制。

关键词: 永磁同步电动机; 矢量控制; 仿真

Abstract: Due to the nonlinear coupling characteristic of alternator, the alternator can not control the variables independently as DC separately excited generators directly. So, a new control mode to realize the control of rotating speed and torque of alternator is presented.

Key words: permanent magnetic synchronous motor; vector control; simulation

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0012-04

直流他励电机之所以具有良好的静动态特性, 是因为定子励磁电流及电枢电流两个参数分别由电动机励磁回路和电枢回路独立产生, 且在空间正交, 是两个可以独立控制的变量, 只要控制定子励磁电流使磁通恒定, 则电磁转矩正比于电枢电流的大小。由于交流电机的非线性强耦合特性, 使得交流电机无法直接象直流他励电机独立地控制变量, 因此需要新的控制方式来实现转速和转矩的控制。

1 矢量控制的基本原理

矢量控制的基本思想是按照产生同样的旋转磁场这一等效原则建立起来的, 通过定转子的三相 ABC 静止坐标到两相 $\alpha-\beta$ 静止坐标再到两相同步旋转 dq 坐标变换, 用等效的两相同步旋转坐标代替三相静止坐标, 通过一系列变换和磁场定向, 交流电机的电磁转矩表达式与直流他励电机相似, 控制 d、q 轴的电流即方便地实现电机的磁场和转矩的控制, 使交流电机具有和传统直流电机同样优良的运行性能。基于转子磁场定向的矢量控制是交流伺服调速系统中使用较为广泛的一种控制方式。转子磁场定向的矢量控制的基本思想是在三相交流电机上设法模拟直流电机转矩控制的规律。在转子磁场定向的同步坐标轴系上, 将定子电流矢量分解为影响磁通的磁场电流分量 i_d 和产生电磁转矩的转矩电流分量 i_q , 并使两个分量相互垂直, 彼此独立, 而后分别进行控制,

使交流电机的转矩控制, 从原理上相似于直流电机。

由于三相交流电机的实际定子电流为三相交流量, 为实现对 d、q 轴电流的控制, 必须以电机矩阵分析的思想为基础, 借助坐标变换法实现 d、q 轴系和三相实际轴系间变量的转换, 以实现 i_d 和 i_q 的控制。

2 坐标变换

1) 静止三相轴系 (ABC) 到静止两相轴系 ($\alpha-\beta$) 的相变换

图 1 为永磁同步电机静止三相实际轴系到对称的静止两相轴系的变换。其中 α 相绕组同三相中的 A 相绕组重合, β 相绕组与 α 相正交。若三相轴系为 A-B-C 相序, 则两相轴系为 $\beta-\alpha$ 相序。

相变换必须保证变换前后绕组中电流产生的磁势守恒。若三相绕组中每相绕组的有效匝数均为 N_a , 而两相绕组中每相的有效匝数均为 N_α , 则得到式 (1)。

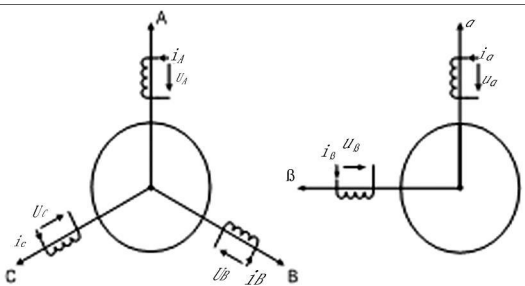


图 1 三相到两相之间的变换

$$\begin{cases} \dot{i}_k N_a = \dot{i}_k N_A - \dot{i}_b N_A \cos 60^\circ - \dot{i}_c N_A \cos 60^\circ \\ \dot{i}_p N_a = -\dot{i}_b N_A \cos 30^\circ + \dot{i}_c N_A \cos 30^\circ \end{cases} \quad (1)$$

设 $N_A = kN_a$, 则式 (1) 可变为

$$\begin{cases} \dot{i}_k = k(\dot{i}_k - \frac{1}{2}\dot{i}_b - \frac{1}{2}\dot{i}_c) \\ \dot{i}_p = k(-\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_b + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_c) \end{cases} \quad (2)$$

经过分析, 当 k 为 $\sqrt{2/3}$ 时, 三相到两相的相变换的电压电流变换矩阵相同且均为正交矩阵, 因而满足恒功率变换。得到三相到两相的相变换矩阵和两相到三相的相变换矩阵分别如式 (3) 和式 (4) 所示, 其中, 变换前的坐标用下角标表示, 变换后的用上角标表示。

$$C_{ABC}^{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{\alpha\beta 0}^{ABC} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则由三相实际轴系到两相对称轴系的电流和电压变换为式 (5), 由两相对称轴系到三相实际轴系的电流和电压变换为式 (6)。

$$\begin{cases} \dot{i}_{ABC} = C_{ABC}^{\alpha\beta 0} \dot{i}_{\alpha\beta 0} \\ u_{ABC} = C_{ABC}^{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta 0} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{ABC} \dot{i}_{ABC} \\ u_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{ABC} u_{ABC} \end{cases} \quad (6)$$

2) 静止两相轴系 ($\alpha-\beta$) 到旋转两相轴系 ($d-q$) 的整流子变换

图 2 为从静止两相轴系到旋转两相轴系的变换。 $d-q$ 轴系同轴系 $\alpha-\beta$ 为正交轴系, 且 $d-q$ 轴系以 ω 的转速相对于 $\alpha-\beta$ 轴系旋转, 旋转正方向为由 β 相相序决定的顺时针方向。其中, θ 为 d 轴轴线同 α 轴轴线的夹角。

其中, ω 为电机转速, $\theta = \omega t + \theta_0$, θ_0 为初始时刻 d 轴与 α 轴之间的夹角。

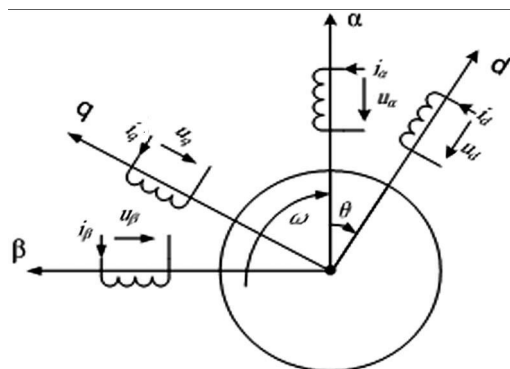


图 2 静止两相绕组到旋转两相绕组的变换

设 4 个绕组的匝数均为 N , 根据变换前后的磁势等效原理, 有

$$\begin{cases} N \dot{i}_k = N \dot{i}_k \cos \theta - N \dot{i}_p \sin \theta \\ N \dot{i}_p = N \dot{i}_k \sin \theta - N \dot{i}_p \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

引入零序电流项, 并写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{i}_p \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{i}_p \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

得到 $d-q$ 轴系到 $\alpha-\beta$ 轴系的变换矩阵和其逆变换矩阵分别为式 (9) 和式 (10) 所示, 其中, 变换前的坐标用下角标表示, 变换后的用上角标表示。

$$C_{dq0}^{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_{\alpha\beta 0}^{dq0} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

容易证明, $C_{dq0}^{\alpha\beta 0}$ 和 $C_{\alpha\beta 0}^{dq0}$ 均为正交矩阵, 故由两相旋转轴系到两相静止轴系的电流和电压的恒功率变换为式 (11), 由两相静止轴系到两相旋转轴系的电流和电压恒功率变换为式 (12)。

$$\begin{cases} \dot{i}_{dq0} = C_{dq0}^{\alpha\beta 0} \dot{i}_{\alpha\beta 0} \\ u_{dq0} = C_{dq0}^{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta 0} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{dq0} \dot{i}_{dq0} \\ u_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{dq0} u_{dq0} \end{cases} \quad (12)$$

考虑到 $d-q$ 轴系相对于 $\alpha-\beta$ 轴系旋转。结合永磁同步电机的运行特点, 可以将 d 轴轴线方向选定为转子磁场方向, 这时 $d-q$ 称为转子磁场定向的同步坐标轴系。这样, 在以上分析的基础上, 通过由 ABC 到 $\alpha-\beta$ 再到 $d-q$ 的变换, 可以将永磁同步电机在 ABC 三相实际轴系下的电压电流量变换到以转子磁场定向的同步坐标轴系下。

由式 (5)和式 (11), 有

$$\begin{aligned} \dot{i}_{dq0} &= C_{dq0}^{\alpha\beta0} \dot{i}_{\beta0} = C_{dq0}^{\alpha\beta0} C_{\alpha\beta0}^{ABC} \dot{i}_{ABC} = C_{dq0}^{ABC} \dot{i}_{ABC} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

同理, 由式 (5)和式 (12), 有

$$\begin{aligned} u_{ABC} &= C_{ABC}^{\alpha\beta0} u_{\beta0} = C_{ABC}^{\alpha\beta0} C_{\alpha\beta0}^{dq0} u_{dq0} = C_{ABC}^{dq0} u_{dq0} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{14}$$

3 永磁同步电动机控制系统模型

永磁同步电动机和感应电动机的控制系统模型大体上相似, 永磁同步电动机通过给定转速与实际电机转速比较的 PI 调节闭环控制, 从而实现转速与给定无偏差。转速偏差经过 PI 调节后产生转矩给定信号, 而转矩给定的大小直接决定同步旋转坐标 i_q 的大小, 通过转矩方程即可以求出 i_q 的大小, 如给定 $i_q=0$ 时, 则永磁同步电动机的转矩方程为 $M=p i_q \psi_f$, 其中 p 为电机极对数, ψ_f 为永磁体产生的磁通, i_q 给定信号及 i_d 给定信号 ($i_d=0$) 和实际检测出来的三相电机电流比较再经过 PI 调节环节, 消除了给定电流和实际电流的偏差, 经过 dq 轴电压方程计算, 得出 dq 轴电压, 经过两相到三相坐标变化得出施加在电机定子的三相电压。坐标变换需要的 θ 角由转子位置传感器直接给出。

4 系统的仿真模型

利用 Matlab 里的 Simulink 的仿真模块, 对两个系统分别仿真, 并结合工程实际采用了离散仿真, 使其更接近实际系统。系统转速给定值为 200 r/min

转矩给定信号为阶跃函数, 初始值为 6 N·m, 末值为 1 N·m, 跃变时间为 0.1 s。仿真结果如下。

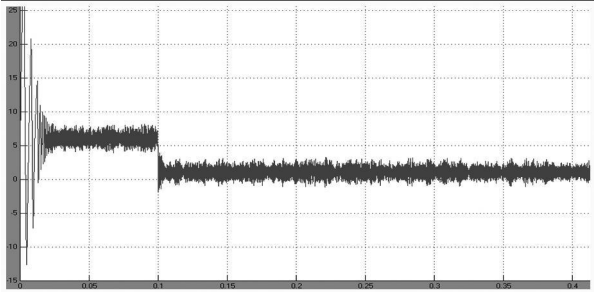


图 3 电磁转矩波形

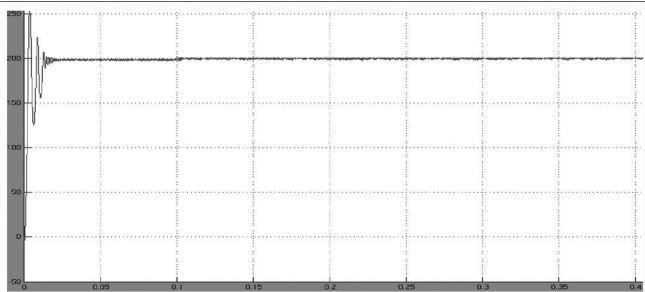


图 4 转速波形

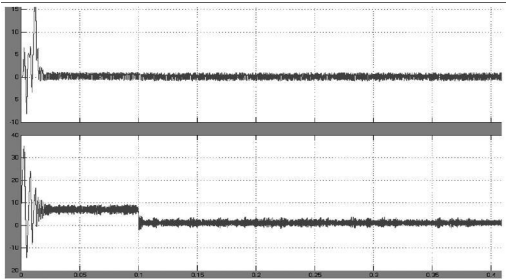


图 5 定子 dq 轴电流波形

由仿真结果的波形可以看出同步电动机启动和稳态性能都是非常好的, 与实际相吻合。

在仿真模型中永磁同步电动机采用了电压交叉解耦, 输出电压值来控制电压型逆变器, 并在解耦的基础上增设了交、直轴电流的给定值与实际值的误差 PI 调节, 可以消除定子电阻受温度变化对定子电压的影响, 同时, 对交、直轴交叉耦合电压项的补偿采用了 dq 轴电流误差的 PI 调节器输出, 其计算出的解耦电压比实际的交叉解耦电压值要大, 当解耦电压迭加到电机的控制电压端时, 加快了电机控制的响应速度, 提高了电机在高速运行的解耦效果, 增强了系统的稳定性, 这是交叉电压解耦的显著优点。

5 结 论

通过建立永磁同步电动机矢量控制仿真模型, 对

电机动态性能进行了研究,得到了符合物理规律的结果。这一事实证明基于对电机矩阵分析原理建立的模型是合理的,对研究电机的动态行为具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 周扬忠,胡育才,黄文新,等. 阻尼绕组对直接转矩控制

同步电动机动态行为的影响[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 476—482.

[2] 扬顺昌. 电机矩阵分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988.

[3] 田淳. 无位置同步电动机转矩控制理论与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.

(收稿日期: 2009—09—15)

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和四川电力试验研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊,主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿,尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求,本刊对来稿提出以下要求。

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 6000 字(包括图表所占篇幅)为宜。

2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组,选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。

3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上方写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰,少而精,插图下方应有图序和图名。能用文字或表格描述的尽可能不用插图。

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

6) 参考文献应尽量选用公开发表的资料,按在正文中出现的先后次序列表于文后,以 [1]、[2]……标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《文后参考文献著录规则, GB/T 7714—2005》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范, CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。

文献类型及其标识为:普通图书 [M];会议论文 [C];报纸文章 [N];期刊文章 [J];学位论文 [D];报告 [R];标准 [S];专利 [P];汇编 [G];档案 [B];古籍 [O];参考工具 [K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册 [Z]。网上期刊 [J/OL];网上电子公告 [EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

7) 投稿可通过 E-mail 提供电子文件,信箱为“cdscdljs@163.com”。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话,并请自留底稿,本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电 028—87082036 或 E-mail 到编辑部了解审稿情况。

8) 本刊投稿自愿,文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改,如不愿被删改,请在原稿上注明。

9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站,稿件一经录用刊登,作者著作权使用费及稿酬已一次付清,如作者不同意收录,请在来稿时提出声明,本刊将作适当处理。

来稿请寄:四川省成都市青华路 24 号《四川电力技术》编辑部收

邮政编码: 610072 电话: (028)87082037, 87082036 E-mail: cdscdljs@163.com