

矢量投影变换在同步电机换向控制中的应用

李湘林 何志明 林卫中

(长沙工业经济学院·长沙, 410012)

洪奇然

(郴州自来水公司·湖南郴州, 423000)

摘要: 本文介绍了交流同步电动机矢量控制的基本原理, 就电机换向部分进行了矢量的投影计算及总结, 并进行仿真验算, 为同步电机矢量控制分析提供参考。

关键词: 矢量控制; 电机换向; 矢量投影

1 引言

直流电机电磁转矩的表达式为

$$M_d = C_M I \phi. \quad (1)$$

式中, C_M 为电机结构常数; I 为电枢电流; ϕ 为气隙磁通^[1]。

由于气隙磁通 ϕ 与电枢电流 I 互相垂直, 即 ϕ 与 I 互相垂直或直角坐标关系且为两个独立变量, 两者可以独立调节, 互不影响。因而, 分别调节电枢电流 I 和气隙磁通 ϕ 以进行电机转矩 M_d (或转速 n) 的控制。

交流电机电磁转矩的表达式为

$$M_d = C_m I_2 \phi_m \cos \varphi_2. \quad (2)$$

式中, C_m 为电机结构常数; I_2 为转子电流; ϕ_m 为由定子电流和转子电流共同磁化结果而产生的气隙磁通; $\cos \varphi_2$ 为转子功率因数角^[2]。

显然, 交流电机的 ϕ_m 与 I_2 不是两个独立变量, 难以通过调节 ϕ_m 和 I_2 来进行电机转矩 M_d (或转速 n) 的控制。长期以来, 这个问题一直困扰着电机控制工作者, 为了改善交流电机的调速性能, 早在二十年代, 就有人提出了电机的双轴理论^[1], 企图通过对电机结构的改变, 来对电机进行改进, 但是直到 80 年代, 人们才通过矢量分解合成技术, 使这个问题得以解决。随着交流电机矢量控制及变频调速技术的成熟和发展, 目前国内外大有交流传动代替直流传动的趋势。

2 系统工作原理分析

2.1 同步电机矢量控制原理

同步电机矢量控制原理图如图 1 所示。从图 1 可以看出: 1) 定子电流空间矢量 i_s 分解成两个分量: 一个是与磁通 φ_1 轴同向的磁化电流 $i_{\varphi_1}^e$; 另一个是与 φ_1 轴相垂直的力矩电流 $i_{\varphi_2}^e$ 。2) 转子励磁绕组电流 i_e 也分解成两个分量: 一个用来补偿 $i_{\varphi_2}^e$ 的电枢反应的磁化电流 $i_{\varphi_2}^e$, 其大小与 $i_{\varphi_2}^e$ 相等且方向相反; 另一个用来产生气隙电磁通 ϕ_m 的磁化电流 $i_{\varphi_1}^e$ 。

合成磁化电流 $i_M = i_{\varphi_1}^e + i_{\varphi_1}^s$ 产生合成磁通 ϕ_m , 由电机

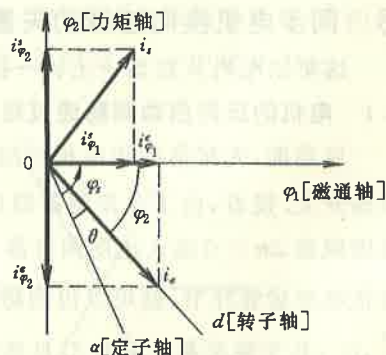


图 1 同步电机矢量图

力矩公式 $M_d = C_m i_{\varphi_2}^s \phi_m$ (C_m 为常数) 可知^[3]: 在控制中保持 ϕ_m 为常数, 则 $M_d \propto i_{\varphi_2}^s$. 因此, 只要改变 $i_{\varphi_2}^s$ 就可以很方便地调节电机的转矩(或转速). 交流同步电机矢量控制就是基于这一分解合成原理实现矢量控制的.

2.2 系统原理分析

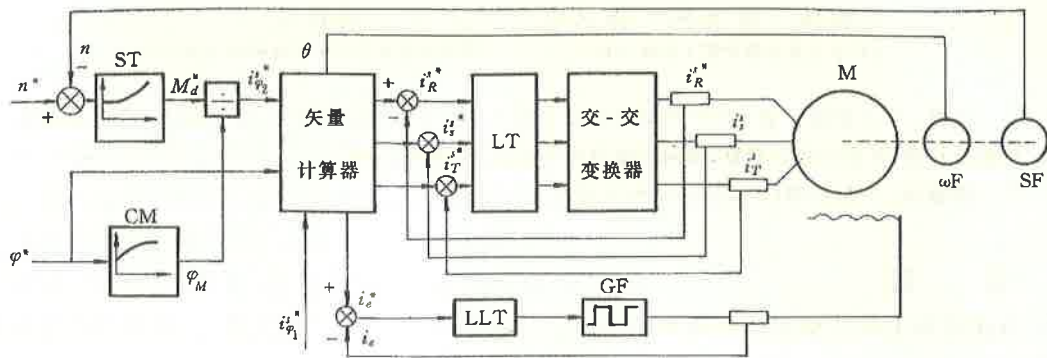


图 2 同步电动机矢量控制系统框图

同步电动机矢量控制系统工作原理, 可由系统工作原理框图加以说明. 同步电机矢量控制系统框图见图 2. 从图 2 可以看出: 系统的速度给定 n^* 与速度反馈 n 相比较的偏差值 Δn , 经速度调节器 ST 输出力矩给定信号 M_d^* , 除以磁通 φ^* , 得到定子电流力矩分量给定值 $i_{\varphi_2}^{s*}$, 但这里磁通是用模型量 φ_M 代替给定值 φ^* , 所谓模型量 φ_M 就是将给定值 φ^* 经过一个滞后环节再输出, 模拟实际磁通变化的滞后. (图 2 中, ST 为速度调节器; LT 为电流调节器; CM 为磁通模型; LLT 为励磁电流调节器; ωF 为编码器; GF 为触发器; SF 为测速机.) 将 $i_{\varphi_2}^{s*}$, $i_{\varphi_1}^{s*}$ (来自磁化电流运算环节), φ^* 和 θ (转子位置角 $\theta = \int \omega dt$, 可以通过转子轴上的编码器得到) 输给矢量计算器, 矢量计算器算出三相电流给定值 i_R^{s*} , i_S^{s*} , i_T^{s*} 及励磁电流的给定值 i_e^{s*} , i_R^{s*} , i_S^{s*} , i_T^{s*} 被送至交-交周期变换器的电流调节器 LT, 通过电流闭环调节, 实际的三相电流 i_R^s , i_S^s , i_T^s 跟随给定电流 i_R^{s*} , i_S^{s*} , i_T^{s*} , i_e^s 送至励磁电流调节系统, 通过励磁电流调节器 LLT, 使同步机转子励磁电流 i_e 跟随 i_e^{s*} , 因而交流电机可按速度给定进行自动调节.

3 同步电机换向控制的矢量投影分析

这里以电机从启动→正转→稳速→停止→反转的过程进行分析.

3.1 电机的正向启动到稳速过程

启动前, 先接通同步电机的励磁绕组, 完成转子定位(即给出初始 φ 值)及合上主回路的快速开关. 接着, 由主令控制器给出正的速度给定值 $+n^*$, 它与实际速度(此时为 0)相比较, 速度偏差 $\Delta n > 0$ 送入速度调节器, 经速度调节器算出输出正的 $i_{\varphi_2}^{s*}$, 见图 3. $i_{\varphi_2}^{s*}$ 经电流运算中的磁化电流运算环节, 就可以得到磁化电流 $i_{\varphi_1}^{s*}$. $i_{\varphi_2}^{s*}$, $i_{\varphi_1}^{s*}$ 通过矢量计算器中的矢量旋转器 VD 得到 i_α^{s*} , i_β^{s*} , 其变换关系亦见图 3. 且选定如图 3 所示的 α, β 的正方向, 由矢量分解可知: $i_\alpha^{s*} > 0$, $i_\beta^{s*} > 0$. i_α^{s*} , i_β^{s*} 再通过 $2/3$ 坐标变换, 即在 R, S, T 三轴方向分解得到一种相序的变换关系 $i_{A_1}^{s*}$, $i_{A_2}^{s*}$, $i_{A_3}^{s*}$ (假定 A_1, A_2, A_3 这种相序为正相序), 其变换关系见图 4, 且选取如图 4 所示的 R, S, T 方向, 则有如式(3)的变换关系式.

$$\begin{cases} i_{A_1}^* = i_a^*, \\ i_{A_2}^* = i_\beta^* \cos 30^\circ - i_\alpha^* \cos 60^\circ, \\ i_{A_3}^* = i_\alpha^* \cos 60^\circ - i_\beta^* \cos 30^\circ. \end{cases} \quad (3)$$

通过 2/3 坐标变换的三相电流 $i_{A_1}^*, i_{A_2}^*, i_{A_3}^*$ 作为同步机定子电流的给定值. 同样分析 $i_{\varphi_1}^*$ 和 $i_{\varphi_2}^*$, 通过电压前馈环节得到 $U_{\varphi_1}^*$ 和 $U_{\varphi_2}^*$, 经矢量旋转器 VD, 输出 $U_\alpha^*, U_\beta^*, U_\alpha^*, U_\beta^*$ 再经过 2/3 坐标变换输出三相电压 $U_{A_1}, U_{A_2}, U_{A_3}$ 作为电机三相给定电压, 其相序也和电流相序一样, 是按 A_1, A_2, A_3 正相序排列的, 该电压(或电流)相序就决定了电机正向启动.

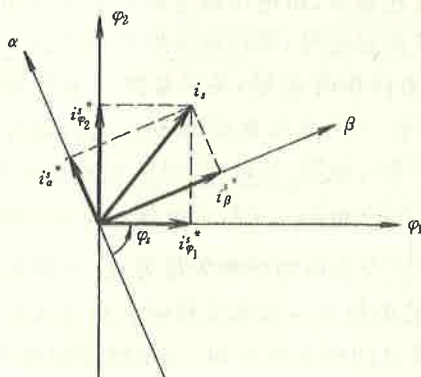


图 3 矢量旋转变换图

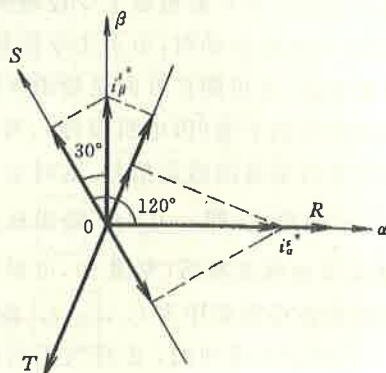


图 4 2/3 坐标旋转变换图

随着同步电机速度升高, 速度偏差 Δn 减小, 由于合理选择速度调节器的参数, 保证在启动过程中 $i_{\varphi_2}^* = \text{常数}$ (恒转矩调速), 使得同步电机加速运动, 当速度达到给定速度 n^* 时, 速度偏差 $\Delta n = 0$, 对应的力矩电流为 $i_{\varphi_2}^*$ (空载力矩电流), 同步电机稳速运转 (恒功率运行).

3.2 同步电机制动过程(从稳速到停车)

停车时, 由主令控制器输出速度指令 $n^* = 0$, 速度偏差由零变成 $-\Delta n$, 速度调节器输出从 $i_{\varphi_2}^*$ 变成 $-i_{\varphi_2}^*$, $i_{\varphi_1}^*$ 的方向不变. 同样, 由 $-i_{\varphi_2}^*, i_{\varphi_1}^*$ 通过矢量变换可得 $-i_\alpha^*, -i_\beta^*$, 其变换关系见图 5. 将 $-i_\alpha^*, -i_\beta^*$ 代入关系式(3)可知: $i_{A_1}^*, i_{A_2}^*, i_{A_3}^*$ 均变成负值, 即 $-i_\alpha^*, -i_\beta^*$ 经 2/3 坐标变换后变成 $-i_{A_1}^*, -i_{A_2}^*, -i_{A_3}^*$. 其三相电流相量图见图 6. 由图 6 可知, 此时的电流相序仍按 A_1, A_2, A_3 相序排列. 同样分析可知, 电压的相序亦不变. 所以, 这时定子电流相序不变, 方向相反, 产生制动力矩, 交-交变换器处于逆变状态, 向电网输送能量, 直到 $\Delta n = 0$ 停车为止.

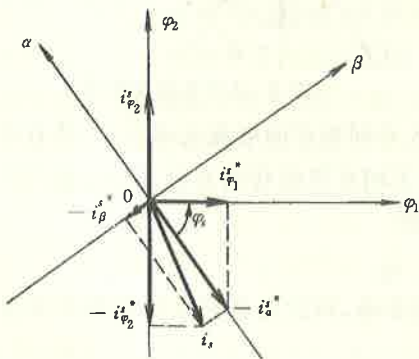


图 5 矢量旋转变换图

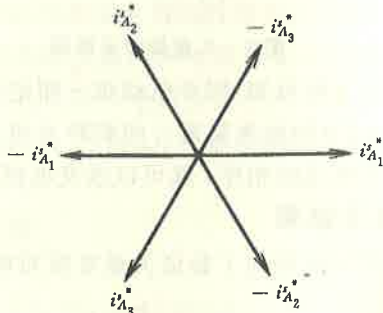


图 6 三相电流相量图

3.3 同步电机反转过程

此时,主令控制器输出速度指令 $-n^*$,速度偏差从0变成 $-\Delta n$,速度调节器输出一 $i_{\varphi_2}^{s*}$ ($i_{\varphi_1}^{s*}$ 方向仍不变).这时有一个重要的角度方向发生变化,即同步电动机定子轴到气隙磁通轴之间的夹角 φ_s 发生变化,因而结论和正向制动时不一致.在电机正转或反转过程中,由于 φ_s 在矢量运算器中一直参与运算,它是由电压模型(高速时)或电流模型(低速时)提供.在整个系统工作之前, φ_s 的大小由初始定位确定;在换向时 φ_s 的大小由式 $\varphi_s = \theta + \varphi_2$ 决定(θ 为定子轴 α 到转子轴 d 的夹角,来自编码器, φ_2 为转子轴 d 到磁通轴 φ_1 的夹角,来自电流模型,在稳态时为一常数).但无论是在初始定位还是在换向时, φ_s 的方向(实际上是 φ_s 在第一象限还是在第四象限),可以认为只能根据主令控制器的给定是正还是负,由电压模型提供 φ_s 的正负.

因此,在正向启动时,由于主令控制器是发的正给定信号,所以电压模型提供的 $\varphi_s > 0$,即位于第四象限,这里的正方向是指由 α 轴按反时针方向指向 φ_2 轴,见矢量图3.在正向制动时,由于电机转向仍不变(因电机没停),所以计算值的 $\varphi_s > 0$,见矢量图5.在反向启动时,由于主令控制器发的是负的给定信号,这时 $\varphi_s < 0$,即位于第一象限.所以,这时的矢量变换关系变成了图7所示的形式,即 $-i_{\varphi_2}^{s*}, i_{\varphi_1}^{s*}$ 经坐标变换后变成了 i_a^{s*} 和 $-i_\beta^{s*}$ (与正向制动时不一样), i_a^{s*} 和 $-i_\beta^{s*}$ 经2/3坐标变换后(见图8),可得到在 R, S, T 三个方向的分解矢量式为式(4)所示.即通过2/3坐标变换得到相序为 $i_{A_1}', i_{A_2}', i_{A_3}'$ 的三相电流,它的相序与原来正转时的相序比较,是按照 A_1, A_3, A_2 的相序排列的,正好与正向相序相反.经过同样分析可知,三相电压的相序亦正好与正向相序相反.所以电机反向起动,加速直到稳定运转.

$$\begin{cases} i_{A_1}' = i_a^{s*} = i_{A_1}^{s*}, \\ i_{A_2}' = -i_a^{s*} \cos 60^\circ - i_\beta^{s*} \cos 30^\circ = i_{A_3}^{s*}, \\ i_{A_3}' = i_\beta^{s*} \cos 30^\circ - i_a^{s*} \cos 60^\circ = i_{A_2}^{s*}. \end{cases} \quad (4)$$

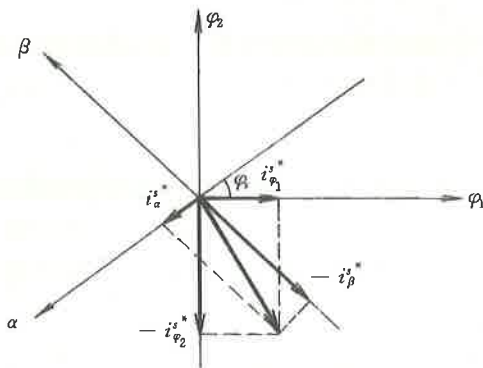


图7 矢量旋转变换图

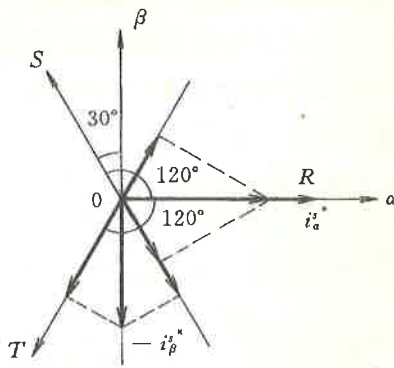


图8 2/3坐标变换图

从以上分析可知:同步电动机三相定子绕组通入不同相序的电流或电压时,就有不同的空间磁势 F_s 或空间电流矢量 i_s 的旋转方向,它就决定了同步机的转动方向.因此,我们只要改变三相电流或电压的相序,就可以改变电机的旋转方向.

4 仿真及结果

仿真的目的是为了验证矢量变换对电机方向的影响,因此电机模型的励磁部分采用如下简单算法:

1) 同步电机励磁绕方程式:

$$U_e = p\Phi_d + i_e r_e. \quad (5)$$

式中, Φ_d 为直轴磁通, i_e 为励磁电流; r_e 为磁场电阻.

2) 同步电机力矩方程式:

$$M_d - M_e = \phi_d I_q + \phi_q I_d - M_e = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (6)$$

式中, M_d 为同步电动机的电磁转矩; M_e 为负载力矩; n 为电机转速; Φ_d 为直轴磁通; Φ_q 为交轴磁通; I_q 为直轴电流; I_d 为交轴电流.

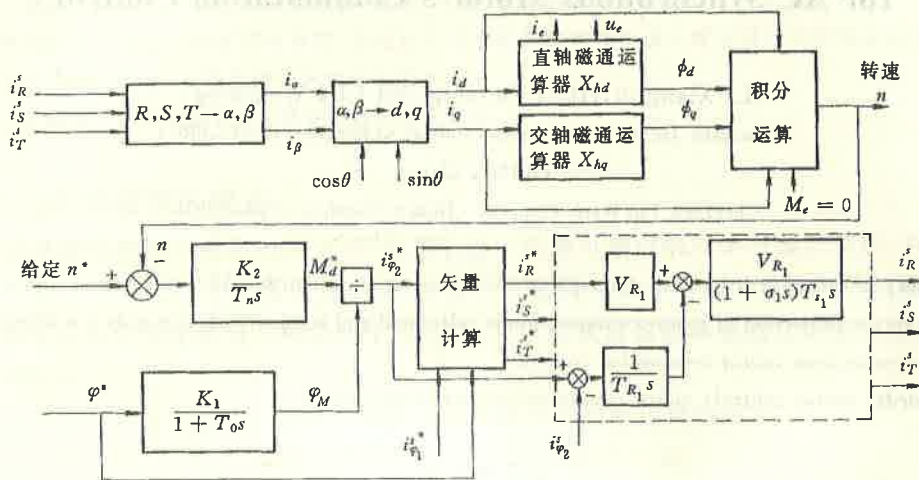


图 9 系统仿真原理图

因此,整个系统仿真模型如图 9 所示,图中带“*”的为给定值或理论值,不带“*”号的为计算值或实际值,已知参数如下:

$$\begin{aligned} n^* &= 100, \varphi^* = 10, k_1 = 2, k_2 = 5, \\ T_0 &= 3, T_N = 6, V_{R_1} = 0.95, \\ V_{S_i} &= 0.375, \sigma_i = 3, T_{S_i} = 2.2, \\ T_{R_1} &= 14, X_{nq} = 1.237, X_{nd} = 0.048. \end{aligned}$$

仿真结果见图 10.

5 结束语

从以上的仿真及分析可以看出,在同步电动机的矢量控制中, φ_i 是一个很重要的量,不但它的大小在整个矢量控制中参与矢量运算,而且它的方向决定电机的转动方向,为电机换向矢量控制提供基础.值得指出的是:对于交-交变换器供电的交流同步电机矢量控制系统国内已有很好的应用,本文是在消化吸收西门子公司 700 初扎机同步电机矢量控制系统资料的基础上,整理而成,主要就电机换向的矢量投影进行计算、总结、仿真,为矢量控制的分析提供参考.

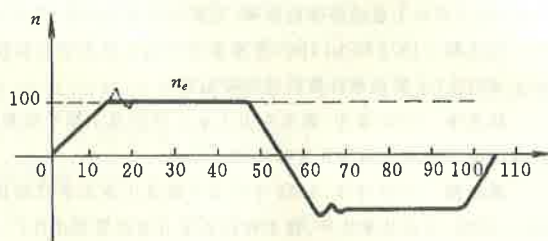


图 10 同步电动运行过程速度仿真曲线

参考文献

- [美]B. 阿德金斯, R. G. 哈利. 交流电流统一理论在实际问题上的应用. 北京:机械工业出版社, 1980
- 符曦. 感应电动机的矢量控制及应用. 北京:机械工业出版社, 1986
- 沈德耀. 交流传动矢量控制系统. 长沙:中南工业大学出版社, 1987

- 4 西门子公司. 矢量控制直接变频器供电的同步电机理论基础. 1987
- 5 西门子公司. 初轧机交流变频装置控制系统测试原理说明. 1987
- 6 西门子公司. 初轧机交流传动装置传动单元操作说明. 1987
- 7 中野孝良等. 交流变速传动的矢量变换控制. 电气传动自动化译丛, 1983
- 8 WOLFGANG. TIMDE. 轧机用交-交变频器传动系统. 电气传动自动化译丛, 1984

The Application of Vector-Projection-Transform for AC Synchronous Motor's Commutation Control

LI Xianglin, HUO Zhiming and LIN Weizheng

(Changsha Technology Economics College • Changsha, 410012, PRC)

HONG Qiran

(Chenzhou Tap Water Company • Hunan Chenzhou, 42300, PRC)

Abstract: In this paper, the basic principle of the transvector control for AC synchronous motor is introduced. The vector projection of motor commutation is calculated and summarized. It is only a reference for the analysis of synchronous motor transvector control.

Key words: vector control; motor commutation; vector projection

本文作者简介

李湘林 1964年生. 1986年毕业于湘潭大学机电工程系自动化专业, 1996年在中南工业大学自动控制工程系获硕士学位. 现为长沙工业经济学院讲师. 主要从事交流调速, 计算机过程控制等方面的教学及研究工作.

何志明 1971年生. 1990年毕业于中南工业大学自动控制工程系, 获工学学士学位. 现为中南工业大学信息工程学院硕士研究生. 主要从事计算机过程控制研究.

林卫中 1937年生. 现为中南工业大学信息工程学院教授, 应用电子研究所所长. 主要从事电机调速, 计算机过程控制及高等电子技术应用与开发的研究工作.

洪奇然 1961年生. 1982年毕业于武汉工业大学自动化专业, 获工学学士学位. 现任湖南省郴州市自来水公司经理助理, 工程师. 主要从事生产、技术和设备等方面的管理工作.