



电机 FOC 控制的实现

Rev.00—2012/3/13

学习笔记

信息	内容
关键字	FOC 控制；坐标变换；PI 迭代；坐标反变换；SVPWM
摘要	文档描述宏观上讲述 FOC 控制的原理和实现方法，从而可以整体把握电机的 FOC 控制技术。

目 录

1. 概述.....	1
1.1 FOC 历史.....	1
1.2 FOC 概述.....	1
1.3 FOC 总结.....	1
2. PMSM 矢量控制的实现步骤	2
2.1 A/D 转换	2
2.2 Clarke 变换.....	2
2.3 Park 变换.....	2
2.4 反馈控制	2
2.5 计算新的坐标变换角.....	2
2.6 Park 反变换	2
2.7 SVPWM（空间矢量调制）	2
3. AMIC 矢量控制的实现步骤	3
3.1 A/D 转换	3
3.2 Clarke 变换.....	3
3.3 Park 变换.....	3
3.4 反馈控制	3
3.5 计算新的坐标变换角.....	3
3.6 Park 反变换	3
3.7 SVPWM（空间矢量调制）	3
4. 总结	5
版权声明	7

1. 概述

1.1 FOC 历史

1969 年德国的 K.Basse 博士的博士论文提出矢量控制的基本思想，在 1971 年德国西门子公司工程师将这种一般化的观念形成系统理论，并以磁场定向控制（Field Oriented Control）的名称发表。

1.2 FOC 概述

FOC：磁场定向控制（Field Oriented Control），也称为矢量控制。

磁场定向控制（Field Oriented Control, FOC）方法：将某一磁通量（转子、定子或气隙）作为创建另一磁通量参考坐标系的基准，目的是退去定子电流转矩分量和励磁分量的耦合。去耦可以简化对复杂三相电机的控制，从而能像以单独励磁控制直流电机那样控制三相电机。这意味着电枢电流负责转矩的产生，励磁电流负责磁通的产生。例如可以将转子磁通作为定子和气隙磁通的参考坐标系。

坐标变换（如 Clarke 变换、Park 变换及其反变换）通常称为**解耦**。该方法是以电机在转子旋转坐标系下的方程为基础的。当从定子静止坐标系变换到转子旋转坐标系时，需要确定转子的位置，这个位置可以通过**测量**或利用**无传感器控制**等其他方法估计来确定。

1.3 FOC 总结

就是把定子电流分解为与转子磁链同相的直轴分量及正交的交流分量，然后“随心所欲”的控制；所以准确叫法为“转子磁链定向控制”，它需要将定子的静止量（电流）所在的静止坐标系转换到与转子磁链定向的同步旋转坐标系，即选用的是**转子坐标系**，所以，这种控制技术至少需要两次坐标变换。

还有一种控制选用**定子坐标系**，叫定子磁链定向控制，也就是所谓的直接转矩控制（DTC），它是 1985 年德国学者彭布罗克首次提出。

FOC 控制方式的特征是：它把电机（ACIM、PMSM）解析成直流电机一样的转矩发生机构，按照磁场与其正交电流的积就是转矩这一基本的原理，从理论上将电动机的一次电流分离成为建立磁场的励磁分量和与磁场正交的产生转矩的转矩分量，然后进行控制。其控制思想就是从根本上改造电机，改变其产生转矩的规律，设法在普通的三相电动机上模拟直流电动机控制转矩的规律。

2. PMSM 矢量控制的实现步骤

2.1 A/D 转换

测量 3 相定子电流。这些测量可得到 i_a 和 i_b 的值。可通过以下公式计算出 i_c : $i_a + i_b + i_c = 0$ 。

注意：更新 PWM 占空比的实现是在 A/D 中断程序中执行。

2.2 Clarke 变换

将 3 相电流变换至 2 轴系统。该变换将得到变量 i_α 和 i_β ，它们是由测得的 i_a 和 i_b 以及计算出的 i_c 值变换而来。从定子角度来看， i_α 和 i_β 是相互正交的时变电流值。

2.3 Park 变换

按照控制环上一次迭代计算出的变换角，来旋转 2 轴系统使之与转子磁通对齐。 i_α 和 i_β 变量经过该变换可得到 i_d 和 i_q 。 i_d 和 i_q 为变换到旋转坐标系下的正交电流。在稳态条件下， i_d 和 i_q 是常量。

2.4 反馈控制

误差信号由 i_d 、 i_q 的实际值和各自的参考值进行比较而获得。

- ✓ i_d 的参考值控制转子磁通；
- ✓ i_q 的参考值控制电机的转矩输出；
- ✓ 误差信号是到 PI 控制器的输入；
- ✓ 控制器的输出为 V_d 和 V_q ，即要施加到电机上的电压矢量。

2.5 计算新的坐标变换角

估算出新的变换角，其中 v_α 、 v_β 、 i_α 和 i_β 是输入参数。新的角度可告知 FOC 算法下一个电压矢量在何处。

变换角—— $\alpha\beta$ 坐标下的转子位置角，转子磁链的相位信号，即同步旋转变换的旋转相位角。常表示为 ϕ 、Position(Sin,Cos)、 θ_e 等。

2.6 Park 反变换

通过使用新的角度，可将 PI 控制器的 V_d 和 V_q 输出值逆变到静止参考坐标系。该计算将产生下一个正交电压值 v_α 和 v_β 。

2.7 SVPWM（空间矢量调制）

v_α 和 v_β 值经过逆变换得到 3 相值 v_a 、 v_b 和 v_c 。该 3 相电压值可用来计算新的 PWM 占空比值，以生成所期望的电压矢量。

3. AMIC 矢量控制的实现步骤

3.1 A/D 转换

测量三相定子电流，可分别获得 i_a 、 i_b 和 i_c 。同时测量转子速度。

这个步骤是控制器的 A/D 转换器实现，根据实时性要求，电机应用的 MCU 的 A/D 转换器的速度必须非常快，否则，可能满足不了实时性的要求，出现“失步”。

3.2 Clarke 变换

将三相电流变换至 2 轴系统。该变换是将三相相电流测量值 i_a 、 i_b 和 i_c 变换为变量 i_α 和 i_β 。从定子的角度来看， i_α 和 i_β 是互为正交的时变电流值。

由 3 轴系统到 2 轴系统，易于分析、简单!!!

3.3 Park 变换

通过使用控制环上一次迭代计算出的变换角，旋转 2 轴坐标系使之以转子磁通定向并随之同步旋转。 i_α 和 i_β 变量经过该变换可获得 I_d 和 I_q 变量。 I_d 和 I_q 变量为变换到旋转坐标系下的正交电流。在静态条件下， I_d 和 I_q 是常量。

由旋转系统到静止系统，更简化!!! 易于实现各种反馈控制（如 PID 等）!

3.4 反馈控制

通过将实际的 I_d 、 I_q 与给定值进行比较获得各自的误差信号。 I_d 给定值用以控制转子磁通。 I_q 给定则用以控制电机的转矩输出。误差信号作为 PI 控制器的输入。控制器的输出为 V_d 和 V_q ，这两个变量是施加到电机上的电压矢量在双轴上的两个分量。

反馈控制实现精确和快速!

3.5 计算新的坐标变换角

该计算子程序的输入参数包括电机转速、转子电气时间常数、 I_d 和 I_q 。新的角度将告知算法下一个电压矢量在何处以获得当前运行条件下所需的转差率。

转子时间常数 $T_r = L_r / R_r$ （必须通过电机制造商获得）。

Park 变换和 Park 反变换需要一个输入角 θ 。变量 θ 表征转子磁通矢量的角位置。转子磁通矢量正确的角位置应通过已知值和电机参数来估计（磁通估计器——Flux Estimator）。

3.6 Park 反变换

通过使用新的坐标变换角可将 PI 控制器的输出变量 V_d 和 V_q 变换至静止参考坐标系。该计算将产生正交电压值 v_α 和 v_β 。

经过 PI 迭代后，可获得旋转 d-q 坐标系中电压矢量的两个分量。此时需经过反变换将其重新变换到三相电机电压。首先，需从 2 轴旋转 d-q 坐标系变换至 2 轴静止 α - β 坐标系。这个变换过程就是 Park 反变换。

3.7 SVPWM（空间矢量调制）

v_α 和 v_β 值经过反变换得到三相电压值 v_a 、 v_b 和 v_c 。该三相电压值用来计算新的 PWM 占空比以生成所期望的电压矢量。

矢量控制过程的最后一步是产生三相电机电压的脉宽调制信号。通过使用空间矢量调制（SVM）技术，每相脉冲宽度的产生过程可简化为几个公式。实际应用中 SVM 子程序中一

般包含了 Clarke 反变换，进一步简化了计算。

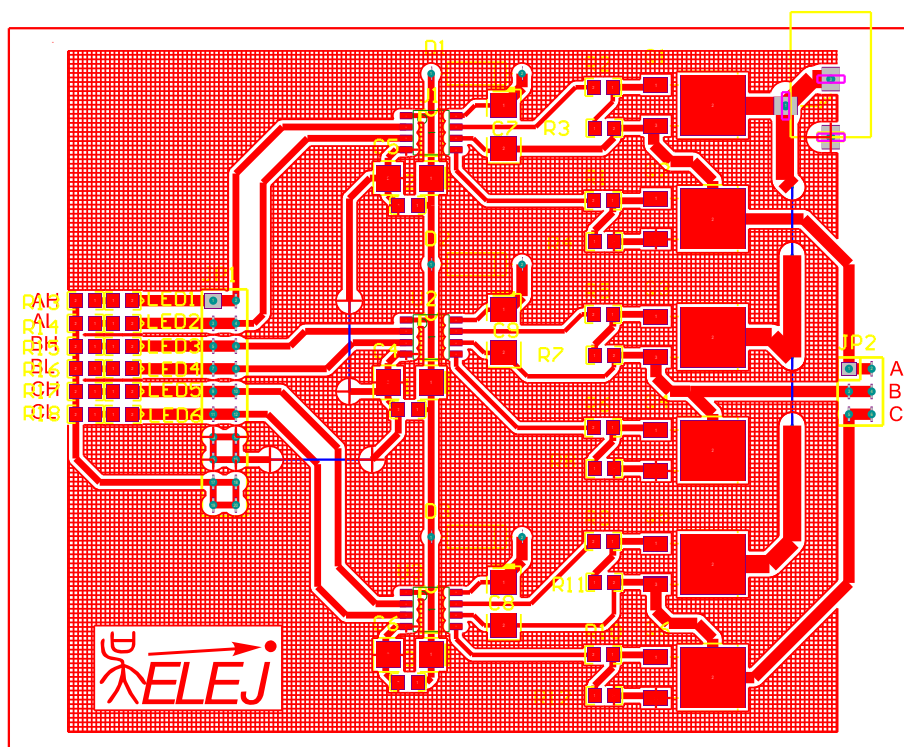
4. 总结

所谓 FOC 控制算法是将电动机在三相坐标系下的定子交流电流 i_a 、 i_b 、 i_c ，通过三相—二相变换（CLARK 变换），等效成两相静止坐标系下的交流电流 i_α 和 i_β ，再通过按转子磁场定向旋转变换（PARK 变换），对于 ACIM 等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_m 、 I_t （ I_m 相当于直流电动机的励磁电流； I_t 相当于与转矩成正比的电枢电流）；对于 PMSM 等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_d 、 I_q （ I_d 相当于直流电动机的励磁电流； I_q 相当于与转矩成正比的电枢电流），然后模仿直流电动机的控制方法，求得直流电动机的控制量。然后利用反 PARK 变换，反 CLARK 变换把直流控制量转变为所需的三相交流量，进而控制电机。

由于 FOC 算法涉及到坐标转换和逆变换、PI 调解、转速和位置估计以及 SVPWM 等诸多模块，软件设计上有一定的难度，对微处理器开发人员都要求较高，开发周期也相对较长。

5. 附

SVPWM 实现的硬件，单面腐蚀板，调试正在进行.....



版权声明

本文档记载的信息，诸如功能概要、原理说明、程序代码和应用电路示例等，仅作参考，是 Elej 的理解，Elej 不做任何形式的保证；Elej 保留在任何时间、没有任何通报的前提下修改文档的权利。

