

# 使用 TMS320F2837x 实现三相永磁同步电机的场定向控制 (配有传感器)



Ramesh T Ramamoorthy, Brett Larimore, Manish Bhardwaj

## 摘要

此应用报告提出了采用 TMS320F2837x 微控制器来控制永磁同步电机 (PMSM) 的解决方案。TMS320F2837x 器件属于 C2000 系列微控制器，此器件能够通过减少系统组件并提高效率，实现具有成本效益的三相电机的智能控制器设计。借助于这些器件，有可能实现诸如磁场定向控制 (FOC) 等更加精准的数字矢量控制算法。本文档中讨论了这个算法的实现。FOC 算法在很大速度范围内保持高效，并且通过处理一个电机的动态模型来将具有瞬态相位的扭矩变化考虑在内。

这份应用报告涵盖了以下内容：

- 磁场定向电机控制原理的理论背景
- 基于模块化软件块的递增构建级
- 实验结果

## 内容

1 引言.....	2
2 永磁电机.....	2
3 同步电机运行.....	3
4 磁场定向控制 (FOC).....	3
5 FOC 的基本系统配置.....	6
6 32 位 C2000™ 控制器在数字电机控制 (DMC) 方面的优势.....	9
7 TI 文献和数字电机控制 (DMC) 库.....	10
8 硬件配置 (IDDK).....	12
9 递增系统构建.....	16
10 参考文献.....	32
11 修订历史记录.....	33

## 插图清单

图 2-1. 一款具有一个永磁对极转子的三相同步电机.....	2
图 3-1. 转动中的定子磁通和转子磁通间的交感产生了一个导致电机转动的扭矩.....	3
图 4-1. 分激直流电机模型 (单独控制磁通和扭矩，流经转子绕组的电流决定产生的扭矩大小).....	4
图 4-2. 定子电流空间矢量和其以 (a, b, c) 形式表示的分量.....	5
图 4-3. 静止基准框架内的定子电流空间矢量和其分量.....	5
图 4-4. (α, β) 和 d, q 旋转基准框架内的定子电流空间矢量和其分量.....	6
图 5-1. 针对交流电机的 FOC 基本系统配置.....	7
图 5-2. d, q 旋转基准框架内的电流、电压和转子磁通空间矢量以及它们与 a, b, c 和 (α, β) 静止基准框架的关系.....	8
图 5-3. 传感磁场定向控制的总体方框图.....	9
图 7-1. 一个三相感应电机驱动实施.....	11
图 7-2. 系统软件流程图.....	12
图 8-1. 从外部直流电源为 IDDK 供电.....	13
图 8-2. 用交流电源为 IDDK 供电.....	14
图 8-3. 交流电源通过隔离变压器连接到 IDDK.....	15
图 8-4. 观察窗口变量.....	15
图 9-1. 1 级 - 递增系统构建方框图.....	16

图 9-2. SVGEN, Ta, Tb, Tc 和 Tb-Tc 波形的输出.....	17
图 9-3. 显示 Ta 和 Tb 波形的 DAC 1-4 输出.....	18
图 9-4. 观测器角度响应.....	19
图 9-5. 2 级 - 递增系统构建方框图.....	20
图 9-6. 构建级别 2 的表达式窗口.....	21
图 9-8. 被放大的相位 A 电流.....	23
图 9-9. 参考角和转子位置的示波器图.....	24
图 9-10. 表达式窗口.....	24
图 9-11. 3 级 - 递增系统构建方框图.....	26
图 9-13. 4 级 - 递增系统构建方框图.....	28
图 9-14. 无负载和 0.3pu 速度下测得的 theta, svgen 占空比以及相位 A 和 B 电流波形.....	29
图 9-16. 监控自 PWM DAC 输出的 0.33pu 步进负载和 0.3pu 速度下的同步基准框架内定子电流的磁通分量和扭矩分量.....	30
图 9-17. 5 级 - 递增系统构建方框图.....	31
图 9-18. 参考位置到伺服和反馈位置的示波器图.....	32

## 表格清单

表 9-1. 每个递增系统构建中的测试模块.....	16
----------------------------	----

## 商标

C2000™ and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

无刷 PMSM 有一个绕组定子、一个永磁转子组件和可感测转子位置的内部或外部器件。感测器件提供位置反馈以适当地调整定子基准电压的频率和振幅，从而使磁体组件保持旋转。一个内部永磁转子和外部绕组的组合提供低转子惯性、有效散热和电机尺寸减少等优势。此外，无电刷设计减少了噪声、电磁干扰 (EMI) 生成，并且不再需要对电刷进行养护。

这份文档提出了一个使用 TMS320F2837x 来控制永磁同步电机的解决方案。它实现了具有成本效益的无刷电机智能控制器设计，可增强运行效果，包括减少系统组件、降低系统成本以及提高性能。提出的控制方法取决于 FOC。这个算法保持宽速度范围内的频率，并且直接控制来自转子坐标系的磁通量，以将随瞬态相位变化的扭矩考虑在内。这份应用报告提出了正弦 PMSM 电机控制的实现方法。通过使用空间矢量调制技术来生成施加到这个电机上的正弦电压波形。当用正弦电流来驱动这个正弦反电动势 (BEMF) 电机时，出现最少量的扭矩纹波。

## 2 永磁电机

主要有两种三相永磁同步电机：一种电机使用由定子馈电的转子绕组，而另外一种电机使用永磁体。装配有转子绕组的电机需要电刷来获得电流源并生成转子磁通。触点由环组成，并且具有很多的换向器片。这种结构类型的缺点是需要养护和可靠性较低。

用永磁体替代常见的转子磁场绕组和磁极结构可使电机成为无刷电机。可使用任一偶数数量的磁极来构建无刷永磁电机。磁体的使用可有效利用半径空间，并且取代转子绕组，从而减少转子铜损。先进的磁体材料可在保持极高功率密度的同时大大减少电机尺寸。

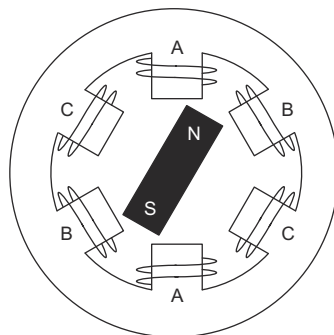


图 2-1. 一款具有一个永磁对极转子的三相同步电机

### 3 同步电机运行

- 同步电机构造：永磁体被牢牢固定在旋转轴上，生成了一个恒定的转子磁通。定子绕组被三相电压接通后，可产生旋转电磁场。为了控制旋转的磁场，有必要控制定子电流。
- 根据机器的功率范围和额定速度，转子的实际结构会有所不同。永磁体适合于范围高达几千瓦的同步机器。为了获得更高的功率额定值，转子通常由支持直流电流循环的绕组组成。转子的机械结构针对所需磁极的数量和需要的磁通梯度而设计。
- 定子和转子磁通的交感产生了一个扭矩。由于定子被牢固地安装在电机架上，而转子可自由旋转，转子的旋转将产生一个有用的机械输出。
- 必须小心控制转子磁场和定子磁场间的角度以产生最大扭矩，并且实现较高的机电变换效率。为了实现这一目的，在同一速度和扭矩条件下，为了汲取最少量的电流，在关闭速度环路后需要进行微调。
- 旋转中的定子磁场的频率必须与转子永磁磁场的频率相同；否则，转子将会经历快速的正负扭矩交替。这会减少最优扭矩产出量，并且在机器部件上产生过多的机械抖动、噪声和机械应力。此外，如果转子因惯性而无法对这些摆动做出响应，那么转子在同步频率上停止转动，并且对静止转子的平均扭矩：零扭矩做出响应。这说明机器经历了一个已知的“牵出”现象。这也是为什么同步机器不能自启动的原因。
- 转子磁场与定子磁场间的角度必须等于  $90^\circ$  才能获得最高的互扭矩产出量。为了产生正确的定子磁场，这个同步需要知道转子位置。
- 将不同转子相位的输出组合在一起，则可将定子磁场设定为任一方向和强度以产生相应的定子磁通。

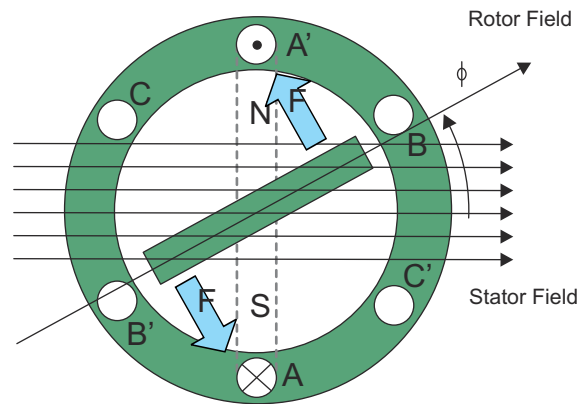


图 3-1. 转动中的定子磁通和转子磁通间的交感产生了一个导致电机转动的扭矩

## 4 磁场定向控制 (FOC)

### 4.1 引言

为了实现更佳的动力性能，需要采用更加复杂的控制系统配置来控制 PM 电机。利用微控制器提供的数学处理能力，可实施高级控制策略，这些策略使用数学变换控制交流电机，就像控制直流电机一样，针对磁通和扭矩产生的电流进行独立控制。这种解耦的扭矩和磁化控制通常称为 FOC。

### 4.2 FOC 主要原理

为了理解 FOC 技术的真谛，从概述分激直流 (DC) 电机开始。扭矩的定义是电枢电流与定子磁通的向量积。针对直流电机的电气研究表明，可单独调节电枢电流与定子磁通。磁场激发的强度 ( 磁场激发电流的振幅 ) 决定了定子磁通的值。如果磁通为常数，则通过转子绕组的电流可决定产生的扭矩大小。转子上的换向器在扭矩产生过程发挥一个非常有意思的作用。换向器与电刷接触，而这个机械构造被设计成将电路切换至机械对齐的绕组以产生最大的扭矩。这样的安排意味着，机器产生的扭矩在任何时候都非常接近于最佳情况。这里的关键点是，绕组会设法保持转子绕组产生的磁通与定子磁场/电流垂直。

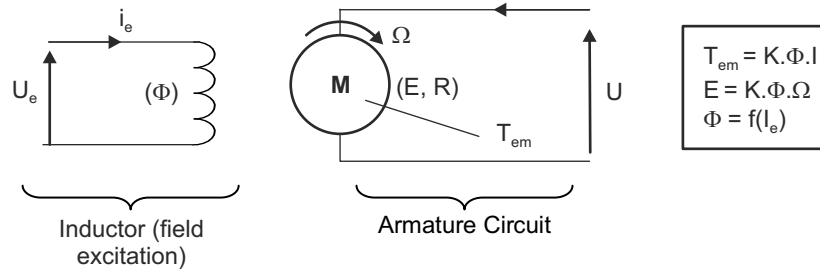


图 4-1. 分激直流电机模型 (单独控制磁通和扭矩, 流经转子绕组的电流决定产生的扭矩大小)

交流机器的关键特性与直流电机不同。磁通与扭矩产生的电流不一定是垂直的。在 PM 同步机中, 转子励磁是由轴上安装的永磁体提供的, 定子带有扭矩产生的电流。在感应电机中, 定子带有磁通和扭矩产生的电流, 其唯一的动力源是定子的相电压。磁通和扭矩产生的电流分量强耦合, 这一点与直流电机不同。

同步机和异步机 FOC (也称为矢量控制) 的目标是, 像分别励磁的直流电机那样对它们进行控制, 即对磁通和扭矩产生的电流分别进行控制。也就是说, 在某种意义上, 控制技术的目标是模仿对直流电机的控制。FOC 控制使我们能够解耦磁通和扭矩产生的电流, 实现对它们的分别控制。为了解耦磁通和扭矩产生的电流, 有必要启用若干种数学变换流程, 而这是最能体现微控制器价值的地方。微控制器提供的处理能力可非常快速地启用这些数学变换流程。反过来, 这意味着控制电机的整个算法可以高速率执行, 从而实现了更高的动态性能。除了去耦合, 现在一个电机的动态模型被用于很多数量的计算, 例如转子磁通角和转子速度。这意味着, 它们的效应被计算在内, 并且总体控制质量更佳。

扭矩可通过多种方式定义, 一种是定子电流与转子磁通的向量积, 或定子磁通与转子电流的向量积, 如 [方程式 1](#) 中所示。

$$T_{em} = \vec{B}_{stator} \times \vec{B}_{rotor} \text{ or } T_{em} = \vec{I}_{stator} \times \vec{B}_{rotor} \quad (1)$$

此表达式表明, 已知定子和转子磁场垂直时, 扭矩为最大值。如果我们能够始终确保满足这一条件, 并且能够正确地磁场进行定向, 将减少扭矩纹波并确保实现更好的动态响应。然而, 获知转子的位置是一个难题, 而这一难题可以通过使用位置传感器来解决, 例如递增或绝对编码器/旋转变压器。对于无法接近转子的低成本应用, 可采用不同的转子位置观测器策略, 这样就不需要使用位置传感器。

在 DQ 坐标系 (其中 D 轴与转子磁通保持一致, Q 轴与 D 轴垂直) 中, 三相 PM 同步机可表示为直流电机。沿 D 轴的电流称为电流的直接分量, 可影响磁场强度, Q 轴的电流称为正交电流, 与 D 轴的磁通相互作用产生扭矩。简单来说, 对于 PM 电机, 目标是保持 D 轴电流为零, 并调整 Q 轴电流的幅度, 以生成所需的扭矩。定子电流的直接分量在某些磁场减弱的情况下可保持为负值, 有减少转子磁通的作用, 还能减少反电动势, 实现更高速的运行。

### 4.3 技术背景

FOC 可有效控制定子电流矢量。这个控制基于以下设计: 即将一个三相时变系统变换为一个两坐标 (d 和 q 坐标) 非时变系统。这些设计形成了一个与直流电机控制结构相似的结构。场定向控制 (FOC) 机器需要两个常数作为输入基准: 扭矩分量 (与 q 坐标对齐) 和磁通分量 (与 d 坐标对齐)。FOC 完全基于这些设计, 因此, 此控制结构可处理即时电量。这使得在每次的工作运转过程中 (稳定状态和瞬态) 均可实现准确控制, 并且与受限带宽数学模型无关。因此, FOC 通过以下方式解决了传统方案存在的问题:

- 轻松达到恒定基准 (定子电流的扭矩分量和磁通分量)
- 轻松应用直接扭矩控制, 这是因为在 (d, q) 坐标系中, 扭矩的表达式如 [方程式 2](#) 中所示:

$$m \propto \frac{\Psi}{R} i_{sq} \quad (2)$$

通过将转子磁通 ( $\Phi_R$ ) 的振幅保持在一个固定值, 使扭矩和定子电流矢量 ( $i_{sq}$ ) 的扭矩分量之间产生了线性关系。然后, 您便可以通过控制扭矩分量来控制扭矩。

#### 4.4 空间矢量定义和设计

交流电机的三相电压、电流和磁通可根据复杂空间矢量进行分析。对于电流，空间矢量可定义如下。假定  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  是定子相位内的即时电流，则复杂定子电流矢量  $\vec{i}_s$  在 [方程式 3](#) 中进行定义。

$$\vec{i}_s = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \tag{3}$$

其中， $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  和  $\alpha^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$  表示空间运算元。[图 4-2](#) 所示为定子电流复杂空间矢量。

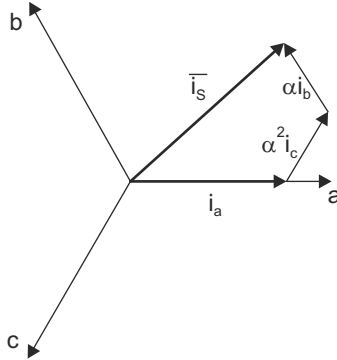


图 4-2. 定子电流空间矢量和其以 (a, b, c) 形式表示的分量

其中，(a, b, c) 是三相系统轴。这个电流空间矢量对三相正弦系统进行了描述。仍然需要将它变换为一个两坐标非时变系统。这个变换可拆分为两个步骤：

- (a, b, c) → (α, β) (Clarke 变换)，其输出了一个两坐标时变系统
- (α, β) → (d, q) (Park 变换)，其输出了一个两坐标非时变系统

#### 4.5 (a, b, c) → (α, β) 设计 (Clarke 变换)

空间矢量可用另外一个基准框架 (只有两个被称为 (α, β) 的正交坐标轴) 来报告。假定轴 a 和轴 α 的方向一致，请见 [图 4-3](#)。

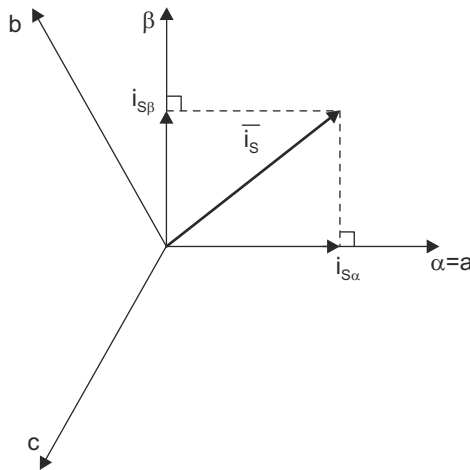


图 4-3. 静止基准框架内的定子电流空间矢量和其分量

[方程式 4](#) 所示为将三相系统修改为 (α, β) 二维正交系统的设计。

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_a \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \end{cases} \quad (4)$$

此两相 ( $\alpha$ 、 $\beta$ ) 电流仍由时间和速度而定。

#### 4.6 ( $\alpha$ , $\beta$ ) $\rightarrow$ ( $d$ , $q$ ) 设计 (Park 转换)

这是 FOC 内最重要的转换。事实上，这个设计修改了  $d$ ,  $q$  旋转基准框架内的两相正交系统 ( $\alpha$ ,  $\beta$ )。如果您认为  $d$  轴与转子磁通对齐，对于电流矢量，图 4-4 显示了两个基准框架的关系。

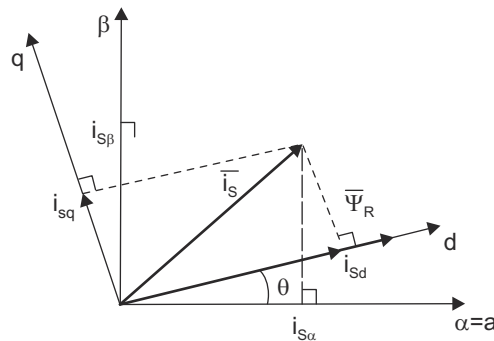


图 4-4. ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) 和  $d$ ,  $q$  旋转基准框架内的定子电流空间矢量和其分量

其中  $\theta$  是转子磁通位置。电流矢量的磁通和扭矩分量由 方程式 5 确定

$$\begin{cases} i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta \\ i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

这些分量取决于电流矢量 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) 分量和转子磁通位置；如果您知道正确的转子磁通位置，那么，通过此设计， $d$ ,  $q$  分量就变成一个常量。现在，两个相位电流转换为直流数量（非时变）。就这一点而言，扭矩控制变得更加简单，在这里，常数  $i_{sd}$ （磁通分量）和  $i_{sq}$ （扭矩分量）电流分量被单独控制。

### 5 FOC 的基本系统配置

图 5-1 总结了用 FOC 进行扭矩控制的基本系统配置。



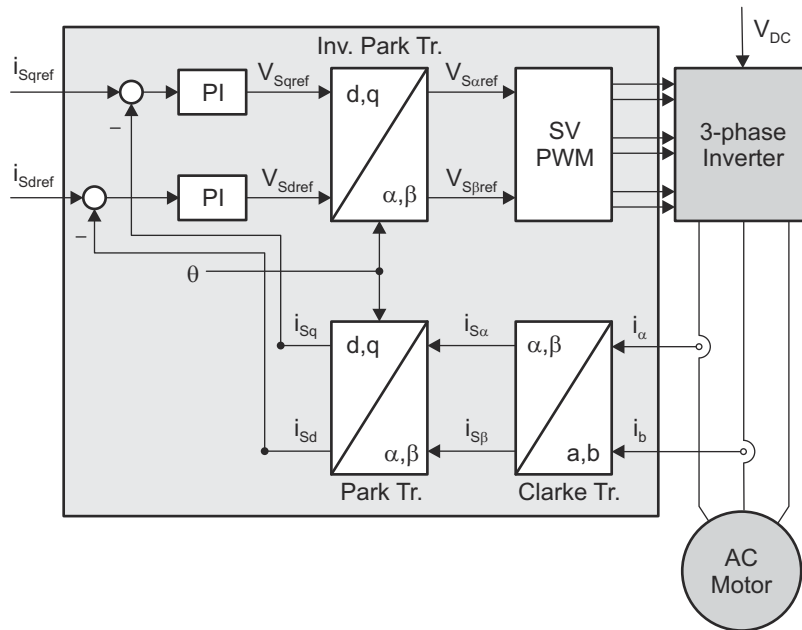
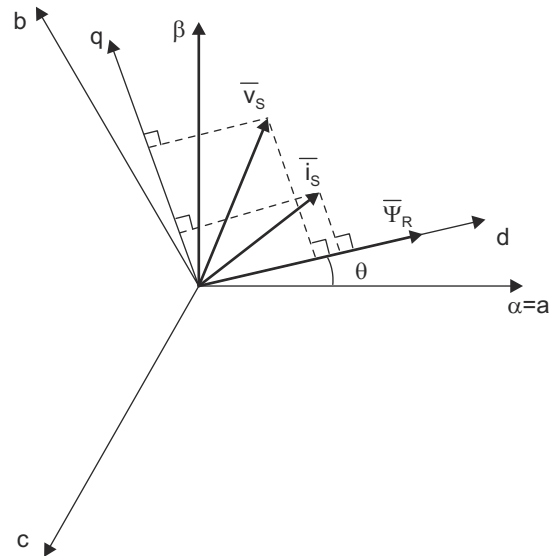


图 5-1. 针对交流电机的 FOC 基本系统配置

测量了两个电机相电流。这些测量值馈入 **Clarke** 变换模块。这个模块的输出为  $i_{s\alpha}$  和  $i_{s\beta}$ 。这两个电流分量以及转子磁通位置是 **Park** 变换的输入，此变换可以将它们转换为 **d、q** 旋转坐标系中的电流 ( $i_{sd}$  和  $i_{sq}$ )。将  $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  分量与基准  $i_{sdref}$  (磁通基准) 和  $i_{sqref}$  (扭矩基准) 进行比较。在这一点上，这个控制结构显示了一个令人感兴趣的优势：它可被用来通过简单地改变磁通基准并获得转子磁通位置来控制同步或 **HVPM** 机器。与在同步永磁电机中一样，转子磁通是固定的，并由磁体确定；所以无需产生转子磁通。因此，当控制一个 **PMSM** 时， $i_{sdref}$  应被设定为 0。**ACIM** 电机的运转需要生成一个转子磁通，因此磁通基准一定不能为零。这很方便地解决了“经典”控制结构的一个主要缺陷：异步至同步驱动的可移植性。扭矩命令  $i_{sqref}$  可以连接到速度调节器的输出端。电流调节器的输出是  $V_{sdref}$  和  $V_{sqref}$ ；它们被应用于 **Park** 的逆变换。利用转子磁通的位置，此设计生成  $V_{s\alpha ref}$  和  $V_{s\beta ref}$ ，它们是固定正交坐标系中定子矢量电压的分量。这些是空间矢量脉宽调制 (**PWM**) 的输入。这个块的输出是驱动此反相器的信号。请注意，**Park** 和反相器 **Park** 变换均需要转子磁通位置。这个转子磁通位置的获得由交流机器的类型 (同步或异步机器) 而定。节 5.1 中讨论了转子磁通位置的相关注意事项。

### 5.1 转子磁通位置

转子磁通位置的相关知识是 **FOC** 的核心。事实上，如果这个变量存在错误，转子磁通将不会与 **d** 坐标轴对齐，而  $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  将表示不正确的定子电流磁通和扭矩分量。图 5-2 所示为 (**a, b, c**)，( $\alpha, \beta$ ) 和 (**d, q**) 坐标系，转子磁通的正确位置，定子电流和定子电压空间矢量，它们随着 **d, q** 坐标以同步速度旋转。



**图 5-2. d , q 旋转基准框架内的电流、电压和转子磁通空间矢量以及它们与 a , b , c 和 ( a , beta ) 静止基准框架的关系**

如果您考虑使用同步或异步电机，对转子磁通位置的测量是不同的：

- 在同步机中，转子速度等于转子磁通速度。 $\theta$ （转子磁通位置）由位置传感器直接测得或由转子速度的积分直接计算得出。
- 在异步机中，转子速度不等于转子磁通速度（有一个转差速度），因而需要使用特定方法来计算  $\theta$ 。基本方法是使用电流模型，此模型需要  $d$  ,  $q$  基准框架内的两个电机模型等式。

理论上，针对 PMSM 驱动的 FOC 可用磁通实现对电机扭矩的单独控制，这与直流电机的运行类似。换句话说，电流的扭矩分量和磁通会相互解耦。从静止基准框架到同步旋转基准框架间的变量变换需要知道转子位置信息。因此，这个系统的关键模块是来自 QEP 编码器的转子位置信息。图 5-3 展示了这个设计的总体方框图。



图 5-3 展示了这个设计的总体方框图。

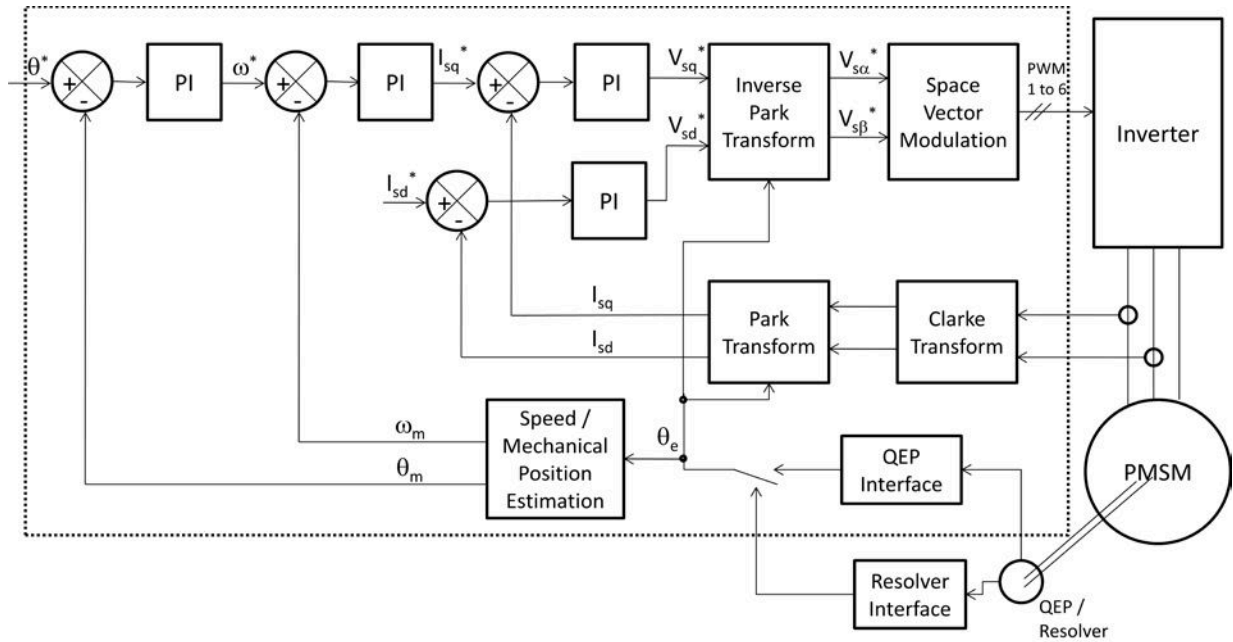


图 5-3. 传感磁场定向控制的总体方框图

## 6 32 位 C2000™ 控制器在数字电机控制 (DMC) 方面的优势

C2000 系列器件具有执行复杂控制算法所需的计算能力，以及可与 DMC 硬件不同组件对接的正确混合外设，诸如模数转换器 (ADC)、增强型脉宽调制器 (ePWM)，正交编码器脉冲 (QEP)，增强型捕捉 (ECAP) 等器件。这些外设具有符合安全标准的用于执行系统所必须的全部钩子程序，如针对 PWM 和比较器的触发区。与这些外设一同使用，C2000 软件（库和应用软件）和硬件（应用套件）系统有助于减少开发数字电机控制解决方案所需的时间和精力。DMC 库提供可被重新使用来执行全新控制策略的可配置块。IQMath 库可实现浮点算法到定点的轻松迁移，从而缩短开发周期。

因此，借助于 C2000 系列器件，可以轻松且快速的执行针对电机控制的复杂控制算法（传感和无传感器）。C2000 器件和高级控制系统配置的使用提供了以下系统改进：

- 全部速度范围内的有效控制使系统成本减少，前提是电源器件电路的尺寸正确
- 通过使用先进的控制算法，有可能减少扭矩纹波，从而降低振动水平并延长电机使用寿命
- 先进的控制算法可减少由逆变器生成的谐波，进而降低滤波器成本。
- 使用无传感器算法后则不再需要速度或位置传感器。
- 减少查询表的数量，这减少了所需存储器的数量
- 平滑接近最优基准配置文件和移动轨迹的实时生成使性能提升
- 使用 ePWM 外设来控制电源开关反相器有可能生成高分辨率 PWM
- 提供单芯片控制系统

对于高级控制，C2000 控制器也可执行以下操作：

- 使用诸如神经网络和模糊逻辑的现代智能方法来实现多变量和复杂系统的控制
- 执行自适应控制。C2000 控制器具有速度功能来同时监视系统并对其进行控制。一个动态控制算法实时适应系统运行方式的变化。
- 针对无传感器控制算法、自我启动、在线参数估算更新执行参数识别
- 执行高级扭矩纹波和可闻噪声减少
- 提供具有频谱分析的诊断监控。通过观察机械抖动的频率频谱，可在早期阶段预测故障模式。
- 产生锐截止陷波滤波来消除窄带机械谐振。陷波滤波移除了电能，否则，这些电能将激发谐振模式并有可能使得系统变得不稳定。

## 7 TI 文献和数字电机控制 (DMC) 库

数字电机控制 (DMC) 库由表示为块的函数组成。这些块被分类为变换和估算器 (Clarke, Park, 滑动模式观察器, 相位电压计算和解算器, 磁通和速度计算器以及估算器), 控制 (信号生成, PID, BEMF 换向, 空间矢量生成) 和外设驱动程序 (针对多个拓扑结构和技术的 PWM 提取, ADC 驱动程序和电机传感器接口)。每个块都是一个模块化软件宏, 是具有源代码、使用和技术原理的单个文档。要获得宏区块的源代码和解释说明, 请从 [www.ti.com/controlsuite](http://www.ti.com/controlsuite) 中安装 controlSUITE, 并选择:

- C:\TI\controlSUITE\libs\app\_libs\motor\_control\math\_blocks\v4.0
- C:\TI\controlSUITE\libs\app\_libs\motor\_control\drivers\2803x\_v2.0

这些模块使您能够快速构建, 或者定制自用系统。此库支持三种电机类型: ACI、BLDC、PMSM, 还包括与外设相关 (软件驱动程序) 和与目标相关的模块。

TI 已经利用 DMC 库组件来提供系统示例。初始化时, 对所有 DMC 库变量进行定义和互连。运行时, 系统按顺序调用宏函数。控制系统采用增量构建方法构建, 允许一次构建部分代码, 以便开发人员逐步验证应用程序的每个部分。这在实时控制应用中十分重要, 在这里, 很多不同的变量会影响到系统, 而且需要调整很多不同的电机参数。

### NOTE

为了实现优化用途, TI DMC 模块被以宏的形式写入。有关更多细节, 请参见《优化数字电机控制 (DMC) 库》(SPRAAK2)。宏在头文件内定义。您可以打开各自的头文件, 并在需要时更改宏定义。在宏定义中, 如 Example 7-1 中所示, 在每一行的末尾应该有一个反斜杠 “\”, 这意味着编码在下一行继续。反斜杠后包括诸如 “space” 或 “tab” 等不可见字符在内的任一字符将导致编译错误。因此, 请确保每行的最后一个字符都为反斜杠。在代码开发方面, 宏与 C 函数几乎完全一样, 您可以很轻松地将宏定义转换为 C 函数。

### Example 7-1. 一个典型的 DMC 宏定义

```
#define PARK_MACRO(v) \
    v.Ds = _IQmpy(v.Alpha,v.Cosine) + _IQmpy(v.Beta,v.Sine); \
    v.Qs = _IQmpy(v.Beta,v.Cosine) - _IQmpy(v.Alpha,v.Sine);
```

## 7.1 系统概述

本文档描述了 “C” 实时控制框架, 此框架用来演示 HVPM 电机的 FOC (附有传感器)。“C” 框架被设计成在 Code Composer Studio™ 软件上基于 C2000 的控制器上运行。此框架使用以下模块:<sup>1 1</sup>:

宏名称	说明
CLARKE	Clarke 变换
PARK 和 IPARK	Park 和反相 Park 变换
PI	PI 稳压器

<sup>1</sup> 如需更多信息, 请参考电机控制文件夹内的 pdf 文档, 此文档解释了每个宏的细节和理论背景。

宏名称	说明
PID	PID 稳压器
PI_POS	位置环路的 PI 稳压器
PWM	PWM 驱动器
RC	斜坡控制器 (转换率限制器)
RG	斜坡和锯齿波发生器
QEP	QEP 驱动
SPEED_FR	速度测量 (基于传感器信号频率)
SVGEN	具有正交控制 (包括 IClarke 变换) 的空间矢量 PWM

图 7-1 介绍了 PMSM 实施附有传感器的 FOC 的整体系统。利用各种电流感应方法和位置感应方法进行实验的控制措施，有助于探索反馈方法对系统性能的影响。PM 电机由一个传统的电压源逆变器驱动。TMS320F2837x 控制卡用于为逆变器生成三组互补脉冲宽度调制 (PWM) 信号，而逆变器是使用集成电源模块构建的。

使用以下方法通过逆变器测量 PM 电机的两/三相电流：

- 连接到逆变器半桥底部的分流感应
- 串联到电机相的 LEM 的磁通门传感器
- 分流测量，基于  $\Delta-\Sigma$ ，串联到电机相

前两种方法会使用 ADC，第三种方法会使用片上 SDFM ( $\Delta-\Sigma$  滤波器模块)。出于实验目的，逆变器的直流总线电压是使用 ADC 和 SDFM 测量的。电流传感器的选择取决于客户方的评估需求。但该套件可提供全部三种电流感应结果。

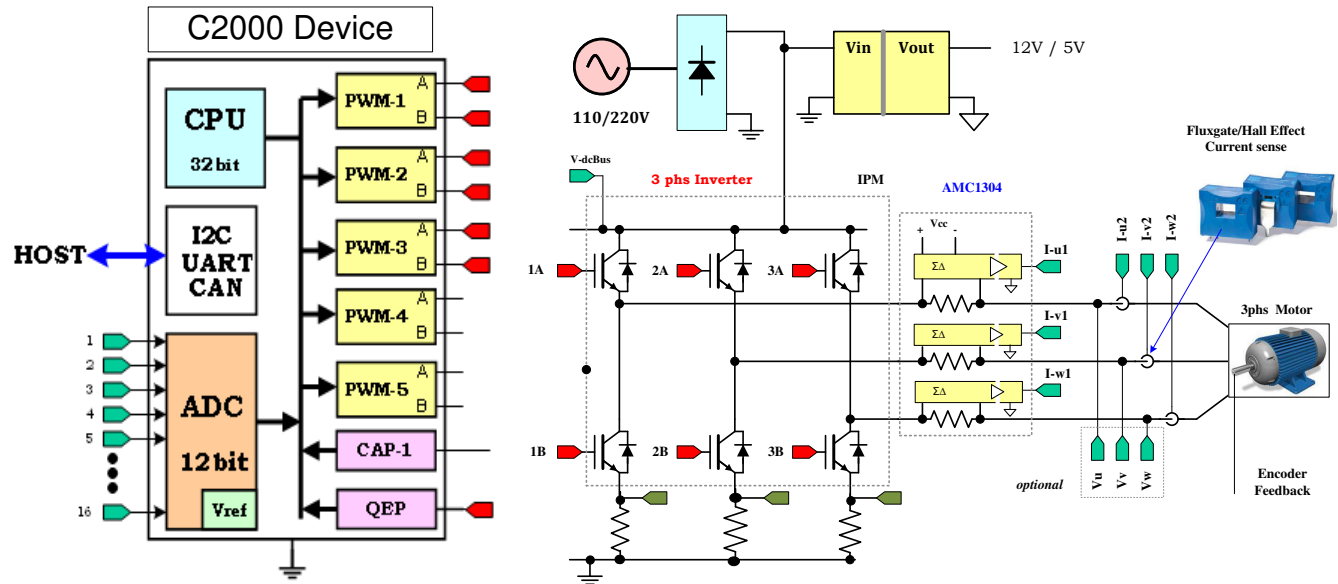


图 7-1. 一个三相感应电机驱动实施

图 7-2 描述了软件流。

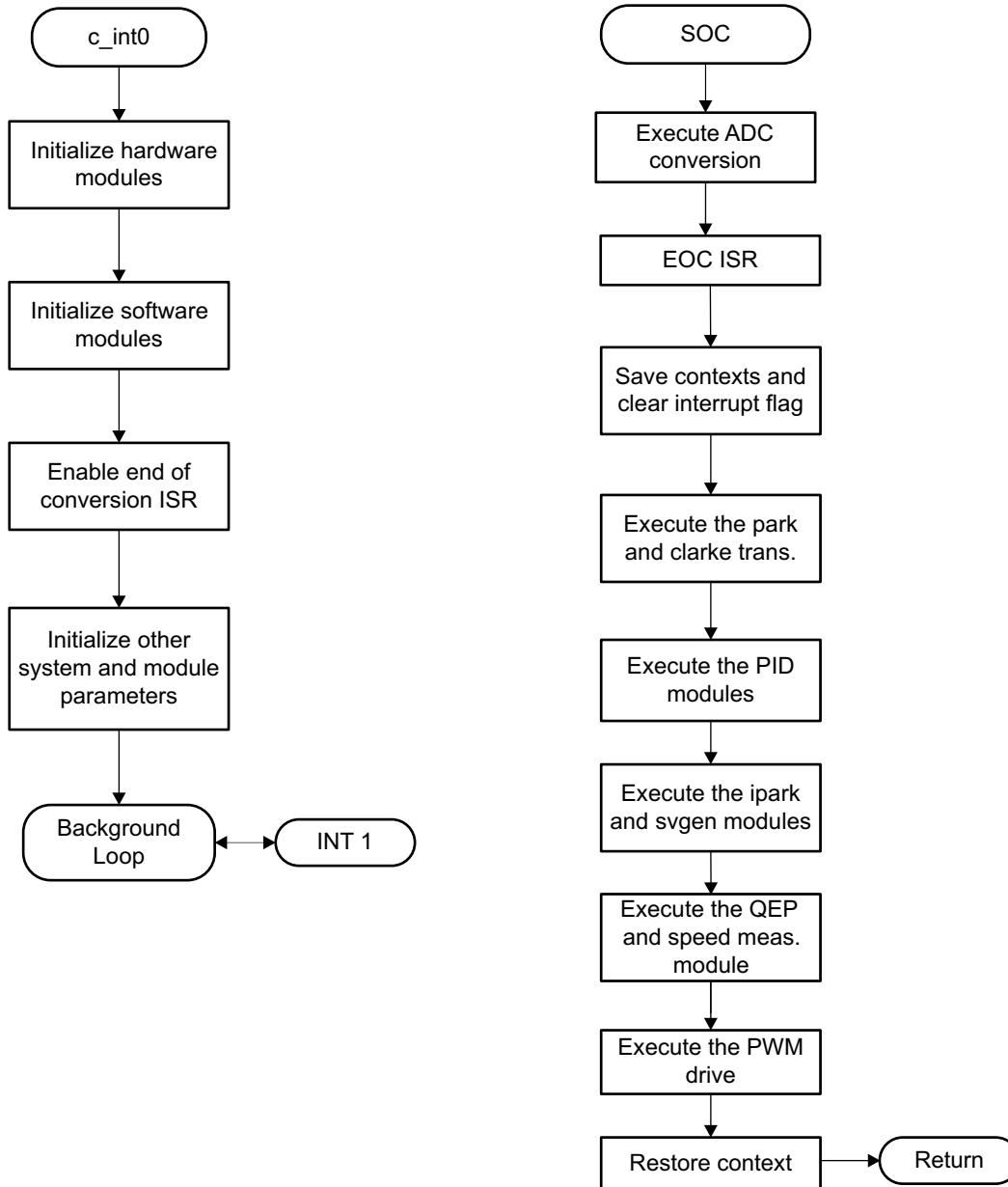


图 7-2. 系统软件流程图

## 8 硬件配置 (IDDK)

如需了解套件的硬件概述和设置此套件的步骤，请访问以下地址，参阅《IDDK 硬件手册》和《IDDK 用户指南》：

C:\TI\controlSUITE\development\_kits\TMDSIDDK\_v2.0\~Docs。

如需查看为电路板供电的相关信息，请参阅图 8-1 了解如何从外部直流电源为其供电。

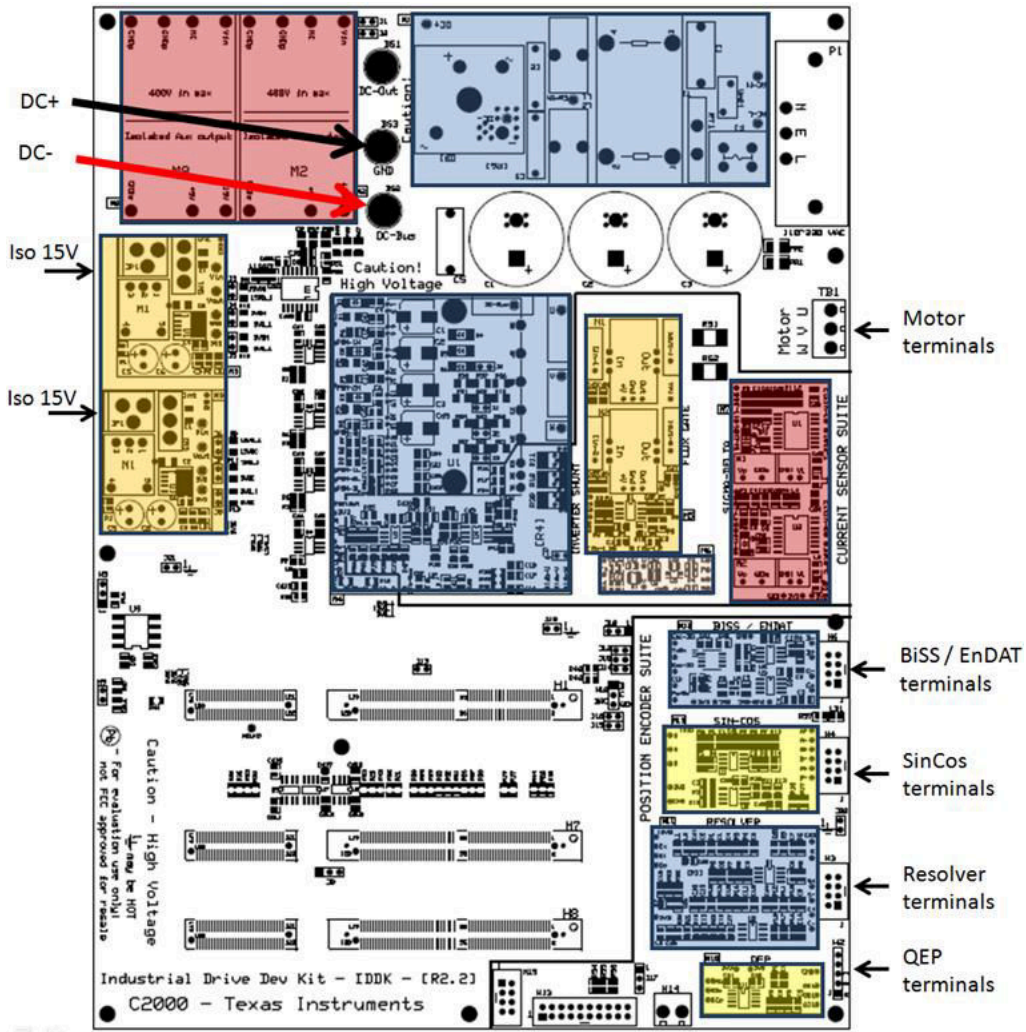


图 8-1. 从外部直流电源为 IDDK 供电

**CAUTION**

在关闭或断开高功率电源线路后，逆变器总线电容器仍会长时间保持带电状态。请小心进行下一步操作！



图 8-2 所示为从交流电源为电路板供电的情况；请记住将 BS1 和 BS3 与香蕉跳线连接，将整流器输出馈入直流总线，如粗红线所示。

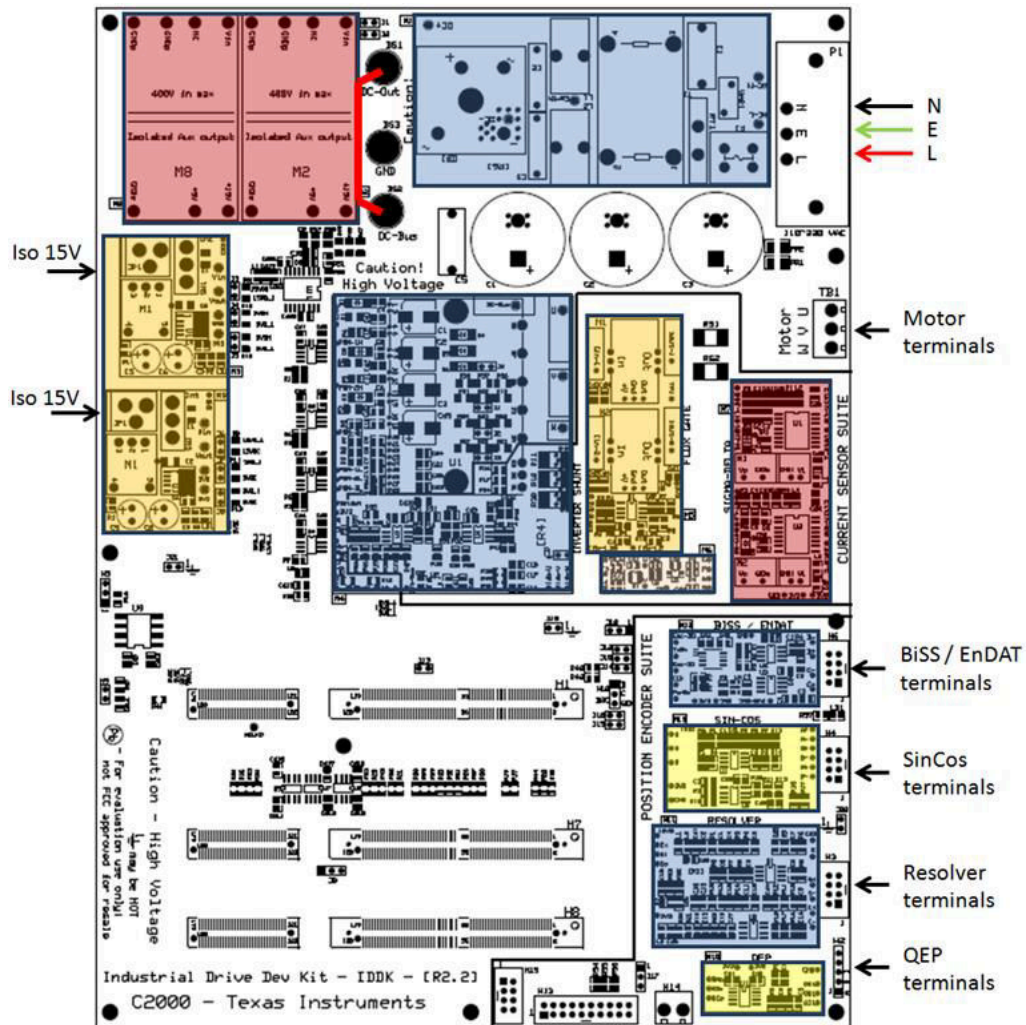


图 8-2. 用交流电源为 IDDK 供电

**CAUTION**

在关闭或断开高功率电源线路后，逆变器总线电容器仍会长时间保持带电状态。请小心进行下一步操作！



在开发期间，建议使用隔离变压器以确保设备和人员安全，如 图 8-3 中所示。

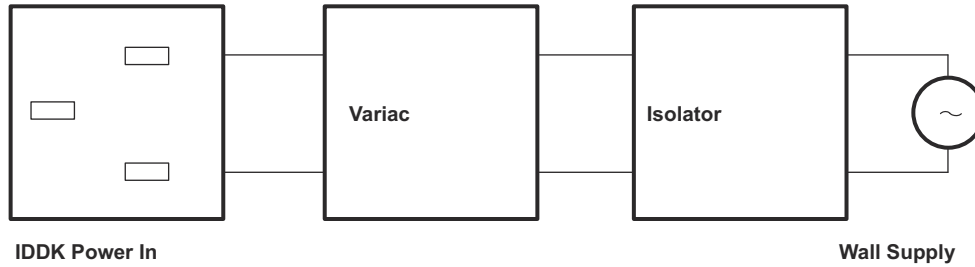


图 8-3. 交流电源通过隔离变压器连接到 IDDK

**CAUTION**

根据电源 GND 和控制 GND 平面互连的不同选择，控制 GND 也可能是 HOT。请小心进行下一步操作！

### 8.1 运行 HVPM\_Sensored 项目的软件设置指令

如需更多信息，请参阅《IDDK 用户指南》：


C:\TI\controlSUITE\development\_kits\TMDSIDDK\_v2.0\~Docs

浏览以下位置，打开 CCS 并加载 IDDK 项目：C:\TI\controlSUITE\development\_kits\TMDSIDDK\_v2.0\IDDK\_PM\_Servo\_F2837x。

1. 将 HVPM\_Sensored 选中为进行中的项目。
2. 选择要设定为 F2837x\_RAM 的有效构建配置。
3. 验证此构建级被设定为 1，然后右键点击项目名称并选择“Rebuild Project”（重建项目）。构建完成后，启动一个调试会话，载入控制器的 CPU1。
4. 在表达式窗口中右键点击，并从根目录中导入“Variables\_IDDK\_Level1.txt”文件，将变量添加到表达式窗口。找到表达式窗口，如 图 8-4 中所示。

Expression	Type	Value	Address
(x) IsrTicker	unsigned long	0	0x0000B0A4@Data
(x) SpeedRef	float	0.15	0x0000B0A8@Data
(x) rc1.SetpointValue	float	0.0	0x0000B16A@Data
(x) rg1.Out	float	0.0	0x0000B108@Data
(x) VdTesting	float	0.0	0x0000B0A0@Data
(x) VqTesting	float	0.1	0x0000B09A@Data
(x) offset_jemV	float	0.0	0x0000B040@Data
(x) offset_jemW	float	0.0	0x0000B03E@Data
(x) offsetA	float	0.0	0x0000B0AC@Data
(x) offsetB	float	0.0	0x0000B0AE@Data
(x) lsw	unsigned short	0	0x0000B00A@Data
(+) svgen1	struct <unnamed>	{...}	0x0000B1D2@Data
+ Add new expression			

图 8-4. 观察窗口变量

5. 从以下位置导入 Graph1.graphProp 和 Graph2.graphProp，设置时间图窗口：  
C:\TI\ControlSUITE\development\_kits\TMDSIDDK\_v2.0\IDDK\_PM\_Servo\_F2837x\。
6. 点击图表选项卡左上角上的“Continuous Refresh”（持续刷新）按钮 ，启用微控制器的数据定期捕捉功能。

## 9 递增系统构建

此系统被逐步构建，所以最终系统可以令人安心地运转。递增系统构建的四个阶段被设计成验证系统中使用的主要软件模块。大多数模块作为软件宏编写，其余的作为可调用函数编写。表 9-1 总结了每个递增系统构建中的模块测试和使用情况。

表 9-1. 每个递增系统构建中的测试模块

软件模块 <sup>(1)</sup>	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5
RC_MACRO	✓✓	✓	✓	✓	✓
RG_MACRO	✓✓	✓	✓	✓	✓
IPARK_MACRO	✓✓	✓	✓	✓	✓
SVGEN_MACRO	✓✓	✓	✓	✓	✓
PWM_MACRO	✓✓	✓	✓	✓	✓
CLARKE_MACRO		✓✓	✓	✓	✓
PARK_MACRO		✓✓	✓	✓	✓
CurrentSensorSuite()		✓✓	✓	✓	✓
PosEncoderSuite()		✓✓	✓	✓	✓
SPEED_FR_MACRO		✓✓	✓	✓	✓
PI_MACRO (IQ)		✓✓	✓✓	✓	✓
PI_MACRO (ID)		✓✓	✓✓	✓	✓
PI_MACRO (SPD)			✓✓	✓✓	✓
PI_POS_MACRO (POS)					✓✓

(1) 符号 ✓ 表示这个模块正被使用，而符号 ✓✓ 则表示这个模块正在这个阶段中进行测试。

### 9.1 1 级 - 递增构建

图 9-1 所示为在 BUILDLEVEL 1 中构建的系统的方框图

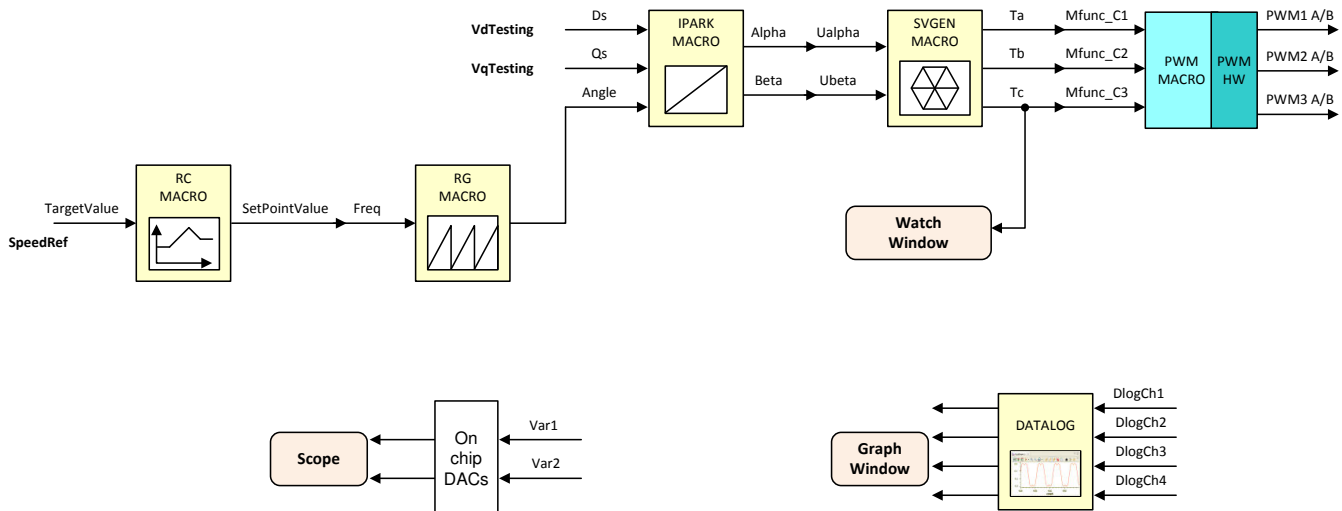


图 9-1. 1 级 - 递增系统构建方框图

1 级验证目标独立模块、占空比和 PWM 周期。在这一级上，电机被断开。

在此步骤中，使电机保持断开状态。假定《DesignDRIVE 开发套件 IDDK v2.2 用户指南》(SPRUI24) 中描述的负载和构建步骤已经成功完成，本节将介绍“超简短”系统检出步骤，这些步骤用于确认系统中断、独立于外设和目标的 I\_PARK\_MACRO (Park 逆变换) 和 SVGEN\_MACRO (空间矢量发生器) 模块，以及独立于外设的 PWM\_MACRO (PWM 初始化和更新) 模块的运行情况。

1. 打开 IDDK\_PM\_Servo\_F2837x-Settings.h 并通过将 BUILDLEVEL 设置为 LEVEL1 (#define BUILDLEVEL LEVEL1) 来选择 1 级增量构建选项。

2. 右键点击项目名称，然后点击 **Rebuild Project**。
3. 一旦构建完成，点击 **debug** (调试) 按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 如果未完成，在表达式窗口中右键点击，并从根目录中导入“Variables\_IDDK\_Level1.txt”文件，将变量添加到表达式窗口。
5. 在观察窗口中将“EnableFlag”设为 1。在观察窗口中看到“IsrTicker”变量递增，可确认中断正常运转。

在软件中，待调整的关键变量汇总如下：

- SpeedRef：用于更改转子速度（标么值）
- VdTesting：用于更改 d 轴电压（标么值）
- VqTesting：用于更改 q 轴电压（标么值）

### 9.2 1A 级 - SVGEN\_MACRO 测试

SpeedRef 值由 RC\_MACRO 模块指定给 RG\_MACRO 模块。IPARK\_MACRO 模块正在生成到 SVGEN\_MACRO 模块的输出。SVGEN\_MACRO 模块的 3 个输出由图 9-2 中显示的曲线图窗口进行监控，在这里，Ta，Tb 和 Tc 波形之间的相位差为 120°。具体来讲，Tb 落后 Ta 120°，而 Tc 在 Ta 前方 120°。检查电路板上的 PWM 测试点以观察 PWM 脉冲（PWM-1H 至 3H 和 PWM-1L 至 3L）并确保 PWM 模块运转正常。

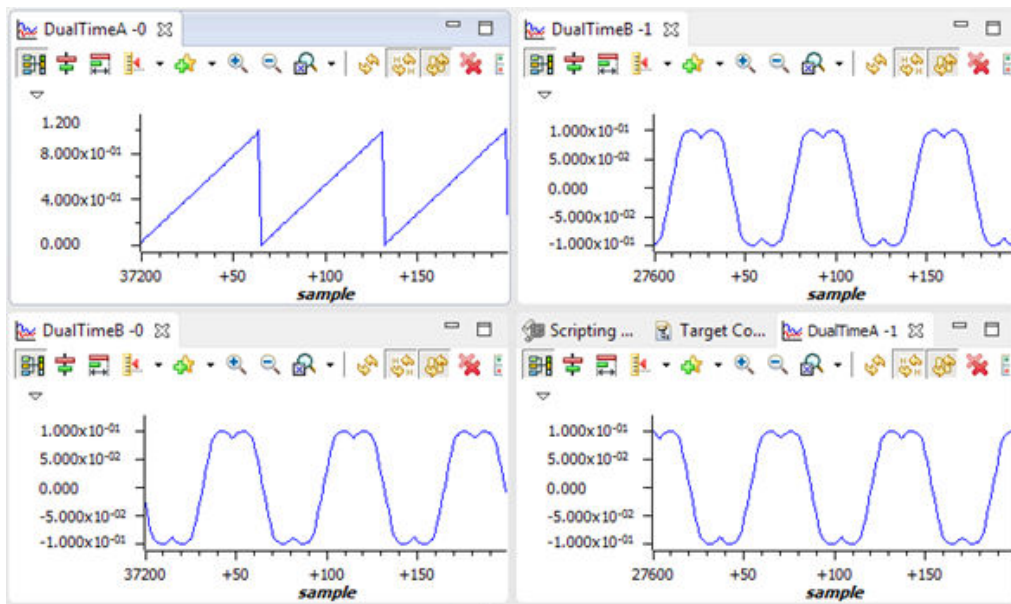


图 9-2. SVGEN，Ta，Tb，Tc 和 Tb-Tc 波形的输出

### 9.3 1B 级 - 测试 DAC

为了实时监测内部信号值，使用了片上 DAC。DAC 是模拟模块的一部分。DAC B 和 C 可用于内部信号值的实时监测。

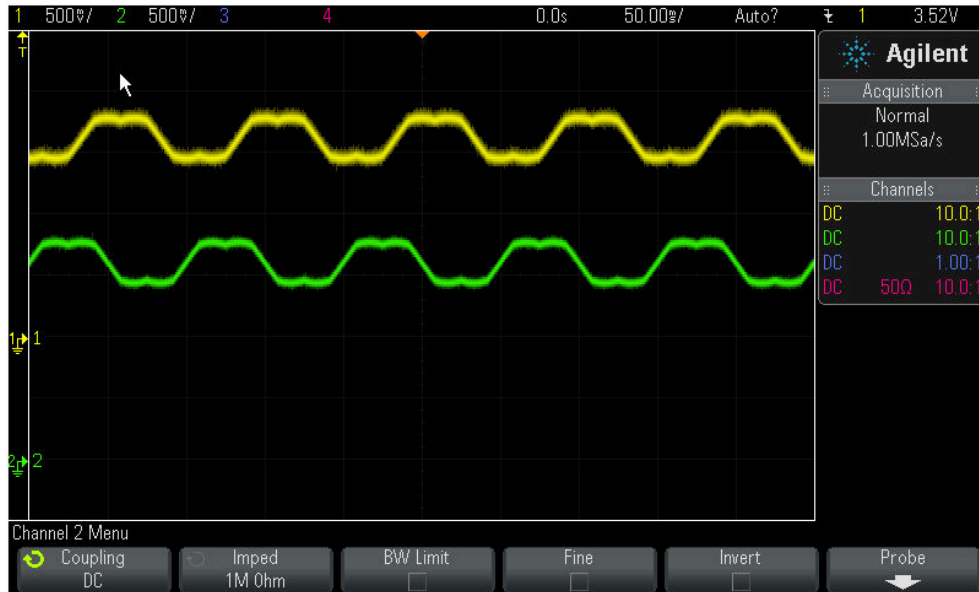



图 9-3. 显示 Ta 和 Tb 波形的 DAC 1-4 输出

### 9.4 1C 级 - PWM\_MACRO 和逆变器测试

在验证了 1A 级内的 SVGEN\_MACRO 模块后，通过查看低通滤波器的输出对 PWM\_MACRO 软件模块和 3 相反相器硬件进行测试。针对这一用途，如果使用外部直流电源的话，逐步增加直流总线电压并使用一个示波器来检查 Vfb-U、V 和 W 测试点，或者如果使用交流电源供电的话，缓慢改变自耦变压器来生成直流总线电压。一旦直流总线电压大于 15V 至 20V，您将开始观察反相器相位电压分压器，而波形监控滤波器 (Vfb-U, Vfb-V, Vfb-W) 启用波形生成功能，这样就能确保反相器正常运转。请注意，缺省 RC 值针对采用相位电压的交流电机状态观察器进行了优化。

#### CAUTION

进行验证后，减少直流总线电压，使控制器退出实时模式（禁用），并且将处理器  复位（详细信息请参见《IDDK 用户指南》）。请注意，每次测试后，出于安全考虑，需要重复此步骤。还需注意，不适当的关断会将 PWM 暂停在某些特定状态，在这些状态下，可汲取高电流，因此，在进行这些实验时要小心。

### 9.5 1D 级 - 调整旋转变压器环路参数

调整旋转变压器参数和旋转变压器的相关信息在以下位置提供：

C:\TI\controlSUITE\development\_kits\TMDSRSLVR\_v1.0\~Docs。

在此测试中，您可以微调旋转变压器环路 PI 控制器的参数，以验证瞬态性能是否令人满意。这一步是可选的。

在“Expressions”窗口中，将“RslvrIn.TUNING”变量设为 1。这样便可将 DAC 变量改为“rslvrOut.angleRaw”和“rslvrOut.angleObs”，并使“rslvrIn.FIR32”成为无关设置。在内部，软件为环路生成了方波角基准，在 0 到 150°（近似值）之间变化。进行实验时此值也可改变。

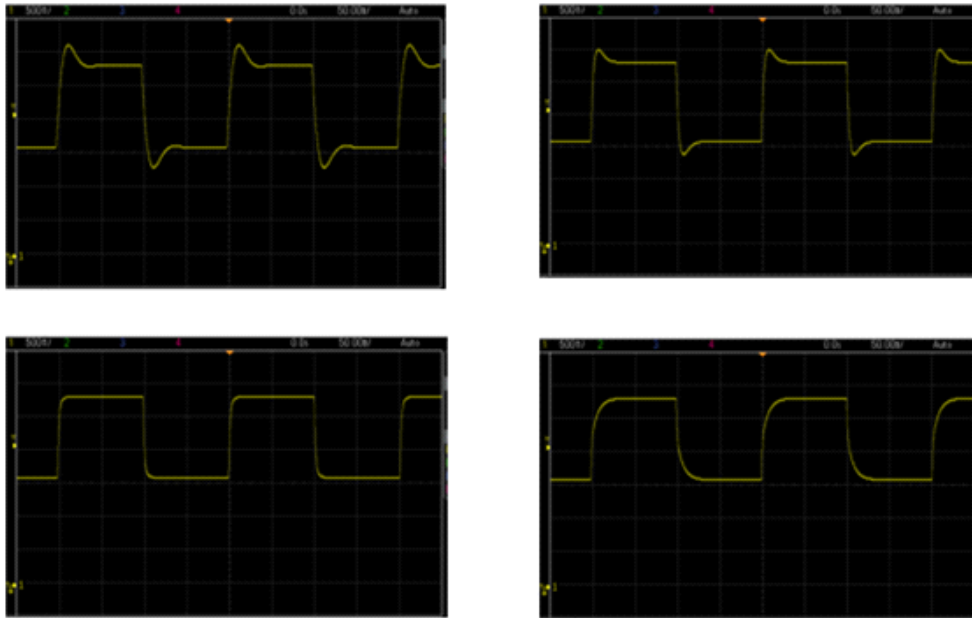


图 9-4. 观测器角度响应

调整旋转变压器环路所需的所有相关变量已在导入期间在“Expressions”窗口中呈现。根据噪声情况调整滤波器转折频率。然后调整 PI 系数，并探测 DAC 输出 B 和 C，在示波器上查看结果。获得满意的响应后，记下为不同参数所选的值，并修改代码，在下次构建时用这些值进行初始化。此时，将 `RslvrIn.TUNING` 设为 0，使用基于 `sin/cos` 的角估计运行环路。图 9-4 所示为测试参考角在  $0^\circ$  和  $150^\circ$  之间切换时，`Kp` 值增加时的“`rslvrOut.angleObs`”。





5. 从根目录中的“Variables\_IDDK\_Level2.txt”文件导入变量，表达式窗口将如图 9-6 中所示。

Expression	Type	Value	Address
(x)= EnableFlag	unsigned int	1	0x0000B001@Data
(x)= IsrTicker	unsigned long	469072	0x0000B02A@Data
(x)= SpeedRef	float	0.05	0x0000B03A@Data
(x)= rc1.TargetValue	float	0.05	0x0000B0D0@Data
(x)= rc1.SetpointValue	float	0.04998922	0x0000B0DA@Data
(x)= rg1.Out	float	0.2480806	0x0000B088@Data
(x)= offset_SDFM1	float	0.0006955105	0x0000B030@Data
(x)= offset_SDFM2	float	0.0002978658	0x0000B018@Data
(x)= offset_JemV	float	0.5498417	0x0000B01C@Data
(x)= offset_JemW	float	0.5518954	0x0000B032@Data
(x)= svgen1.Ta	float	0.09991468	0x0000B154@Data
(x)= RunMotor	unsigned int	0	0x0000B00C@Data
(x)= TripFlagDMC	unsigned int	0	0x0000B002@Data
(x)= clearTripFlagDMC	unsigned int	0	0x0000B00D@Data
(x)= clkPrescale	unsigned int	20	0x0000B013@Data
(x)= sampwin	unsigned int	30	0x0000B015@Data
(x)= thresh	unsigned int	18	0x0000B012@Data
(x)= curLimit	float	8.0	0x0000B026@Data
+ Add new expression			

图 9-6. 构建级别 2 的表达式窗口

6. 在观察窗口中将“EnableFlag”设置为 1。在表达式窗口中看到“IsrTicker”变量递增，可确认中断正常运转。
7. 将“RunMotor”变量设置为 1，如果对直流总线施加了足够的电压，则电机会在几秒钟后开始旋转。

在软件中，待调整的关键变量汇总如下：

- SpeedRef：用于更改转子速度（标么值）
- VdTesting：用于更改 d 轴电压（标么值）
- VqTesting：用于更改 q 轴电压（标么值）

开环测试期间，应该仔细调节 VqTesting、SpeedRef 和直流总线电压，使生成的 B<sub>emf</sub> 低于施加到电机绕组上的平均电压。这样可防止电机失速或振动。

### 9.7 2A 阶段 - 在软件中设置过流限制

该电路板具有多种电流感应方法，例如分流器、LEM 和 SDFM。采用片上比较器子系统 (CMPSS) 模块对分流器和 LEM 产生的信号进行过流监测。该模块具有一个可编程比较器和一个可编程数字滤波器。显然，比较器可产生保护信号。对于正电流和负电流，用户均可对比较器的基准进行编程。数字滤波器模块可以限定比较器输出信号，通过在特定计数窗口的特定计数时间内定期验证信号真实性的方式来确认其完整性（其中的周期、计数和计数窗口可由用户编程）。

在表达式窗口中添加一些新变量：

- “clkPrescale”设置数字滤波器的采样频率
- “sampwin”设置计数窗口
- “thresh”设置最小数量，将信号限定在“sampwin”内
- “curLimit”通过 SHUNT 和 LEM 电流传感器设置最大允许电流

“TripFlagDMC”是一个标志变量，代表逆变器的过流跳闸状态。如果设置了此标志，则可以调整以上设置，并重新尝试通过将“clearTripFlagDMC”设置为 1 来运行逆变器。这将清除“TripFlagDMC”并重新启动 PWM。

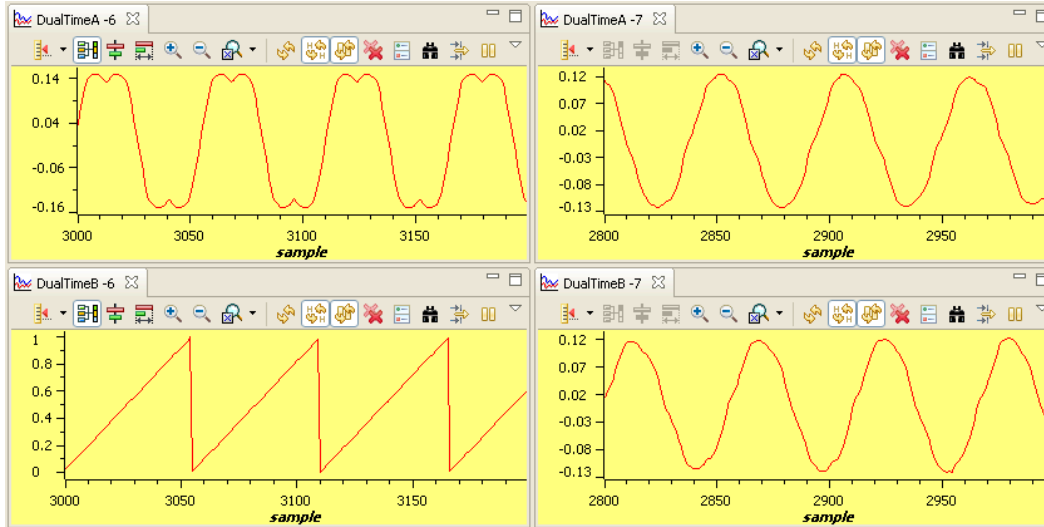
默认电流限制设置在 8A 时关断。所有这些设置都可根据系统需求进行微调。确定符合条件的值后，将这些值写下来，使用这些新值来修改代码；然后重新构建并加载，以进行进一步的测试。

可以通过 H9 使用外部来源的数字信号关闭逆变器。目前不提供代码，但可将其作为试验和学习的练习素材。

## 9.8 2B 级 - 测试 Clarke 模块

在这个部分中，Clarke 模块被测试。这三个被测得的线路电流\* 在一个静止坐标系内被转换为两相  $\alpha$  和  $\beta$  电流。可从曲线图窗口中检查这个模块的输出。

- clark1.Alpha 波形应该与 clark.As 波形一样。
- clark.Alpha 波形应该以同样的振幅领先 clark.Beta 波形  $90^\circ$ 。



\* 死区时间 =  $0.83\mu\text{sec}$  ,  $V_{\text{dcbus}} = 300\text{V}$  ,  $\text{dlog.prescalar} = 3$

图 9-7. Svgen\_dq1.Ta、rg1.Out 和相位 A 和 B 电流的波形

低侧电流测量技术被用来在反相器相位臂上采用并联电阻器，因此，从电流测试点上 ( [M5]-Ifb-U 和 [M5]-Ifb-V ) 观察到的相位电流波形包含图 9-8 中所显示的脉冲。

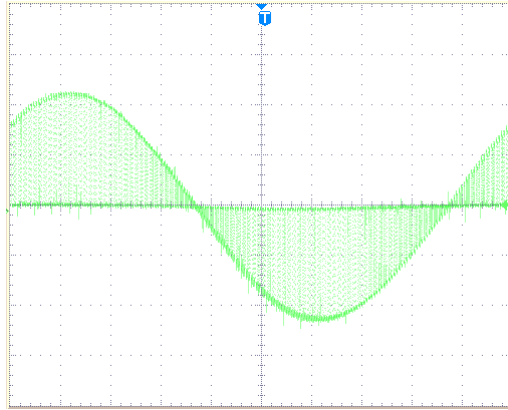


图 9-8. 被放大的相位 A 电流

### 9.9 2C 级 - 调整 PI 限值

请注意，d-q PI 输出的矢量和应少于 1.0，指的是针对 SVGEN 宏的最大占空比。另外一个占空比限制因素是流经并联电阻器的电流，这取决于硬件和软件实施。根据应用需求 3，2 个或一个并联电阻器可被用于电流波形的重建。具有更高编号的并联电阻器可实现更高的占空比运行和更佳的直流总线利用率。

使用缺省 VdTesting，VqTesting 和 SpeedRef 来运行系统，并且逐渐增加 VdTesting 和 VqTesting 值。同时，在曲线图窗口中观察电流波形。持续增加，直到您注意到电流波形失真，并且写下允许的最大 VdTesting 和 VqTesting 值。运行电机的同时，确保这些值与预期的 d-q 电流分量最大值一致。达到这一构建级之后，PI 输出将自动生成基准电压并根据 d-q 电流需求来确定 PWM 占空比，因此，请根据记录的 VdTesting 和 VqTesting 值分别设定 pi\_id.U 最大值和最小值，以及 pi\_iq.U 最大值和最小值。

不使用正确的 PI 限值来运行电机可能会产生失真的电流波形以及不稳定的闭环运行，这有可能损坏硬件。

根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。

### 9.10 2D 级 - 各种电流感应方法

将 CURRENT\_SENSE 更改为 LEM\_CURRENT\_SENSE 后，再次重复此构建，并检查性能。测试完成后，将 CURRENT\_SENSE 更改为 SD\_CURRENT\_SENSE，再次重复此构建。该软件模块可从各种感应方法中获得电流反馈，并供您挑选自己需要的闭合电流环路。您可以选择开发最终将采用的电流感应方法。

### 9.11 2E 级 - 位置编码器反馈/SPEED\_FR 测试

在以上所有测试中，位置编码器接口持续估算位置信息，因此无需新代码来验证位置编码器接口。当电机接到命令后运行时，其将进行初始校准，电角度和 QEP 角度值将设为零。如果使用了旋转变压器或绝对编码器 ( EnDat 或 BiSS-C )，则会识别其电角度零度时的初始位置以实现运行时间校正。DAC-c 上提供估算的位置信息，而 DAC-b 上显示用于执行开环电机控制的参考位置 (rg1.Out)。图 9-9 中提供了 IDDK 上从 H10 发出的这些信号及其示波器图。



图 9-9. 参考角和转子位置的示波器图

通道 2 的波形代表的是参考位置，而通道 1 的波形代表的是估算位置。位置估算值的波动表明电机在运行时有一些较小的速度振荡。由于采用了开环控制，转子位置和参考位置不能对齐。但是，务必确保估算角度变化方向与参考方向相同；否则表明电机旋转方向相反。为解决此问题，可以交换连接到电机的任意两根电线，或在软件中按照伪代码中的方法逆转角度估算。

$$\text{angle} = 1.0 - \text{angle}$$

为确保 SPEED\_MACRO 正常运行，请在表达式窗口中更改“SpeedRef”变量（如图 9-10 中所示），并检查估算速度变量“speed1.Speed”是否遵循命令速度。永磁同步电机不存在转差，因此无论是不是采用开环控制，运行速度都将遵循命令速度。

Expression	Type	Value	Address
(0) EnableFlag	unsigned short	1	0x0000B01A@Data
(0) IsrTicker	unsigned long	1560964	0x0000B0A0@Data
(0) SpeedRef	float	0.06	0x0000B0A4@Data
(0) rc1.SetpointValue	float	0.05999288	0x0000B136@Data
(0) speed1.Speed	float	0.06078392	0x0000B1EC@Data
(0) VdTesting	float	0.0	0x0000B08E@Data
(0) VqTesting	float	0.1	0x0000B0A6@Data
(0) offset_lemV	float	0.4940864	0x0000B06E@Data
(0) offset_lemW	float	0.4990874	0x0000B064@Data
(0) offset_shntV	float	0.5023013	0x0000B08A@Data
(0) offset_shntW	float	0.503071	0x0000B086@Data
(0) lsw	unsigned short	2	0x0000B015@Data
svgen1	struct <unnamed>	{...}	0x0000B1C0@Data
(0) RunMotor	long	1	0x0000B030@Data
(0) Run_Delay	int	0	0x0000B008@Data

图 9-10. 表达式窗口

### 9.11.1 使用 QEP

注意“Expressions”窗口中的“Qep1.CalibratedAngle”。它表示出现 Index 脉冲时转子的电角度 ( 或 ) 位置。它会根据转子初始位置的不同而有所变化。执行闭环操作时，确定电零位和 QEP 指引脉冲之间的角度偏移量非常重要，这样可将 QEP 计数重置为零。校准角度的公式如下：

校准角度 = 偏移角度 ± n。线编码器

### 9.11.2 使用旋转变压器

注意表达式窗口中的“resolver1.InitTheta”。它表示开始时旋转变压器的角度。重申一下，它会根据转子初始位置的不同而有所变化。对于闭环操作，它表示旋转变压器和电机的电零位之间的角度偏移量。

测试完成后，根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。现在，电机将会停止。

### 9.11.3 使用 EnDat 编码器：

注意表达式窗口中的“endat1.InitTheta”。它表示开始时 EnDat 编码器的角度。重申一下，它会根据转子初始位置的不同而有所变化。对于闭环操作，它表示 EnDat 编码器和电机的电零位之间的角度偏移量。

---

#### NOTE

有关 EnDat22 库和使用 IDDK 的更多详情，请参阅 [controlSUITE/libs/app\\_libs/position\\_manager/vxx\\_xx\\_xx\\_xx/endat22](#)。

---

测试完成后，根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。现在，电机将会停止。

### 9.11.4 使用 BiSS-C 编码器：

注意“Expressions”窗口中的“biss1.InitTheta”。它表示开始时 BiSS-C 编码器的角度。重申一下，它会根据转子的初始位置不同而有所变化。对于闭环操作，它表示 BiSS-C 编码器和电机的电零位之间的角度偏移量。

测试完成后，根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。现在，电机将会停止。

---

#### NOTE

有关 BiSS-C 库和使用 IDDK 的更多详情，请参阅 [controlSUITE/libs/app\\_libs/position\\_manager/vxx\\_xx\\_xx\\_xx/bissc](#)。

---



### 9.12 3 级 - 递增构建

图 9-11 所示为在 BUILDLEVEL 3 中构建的系统的方框图。

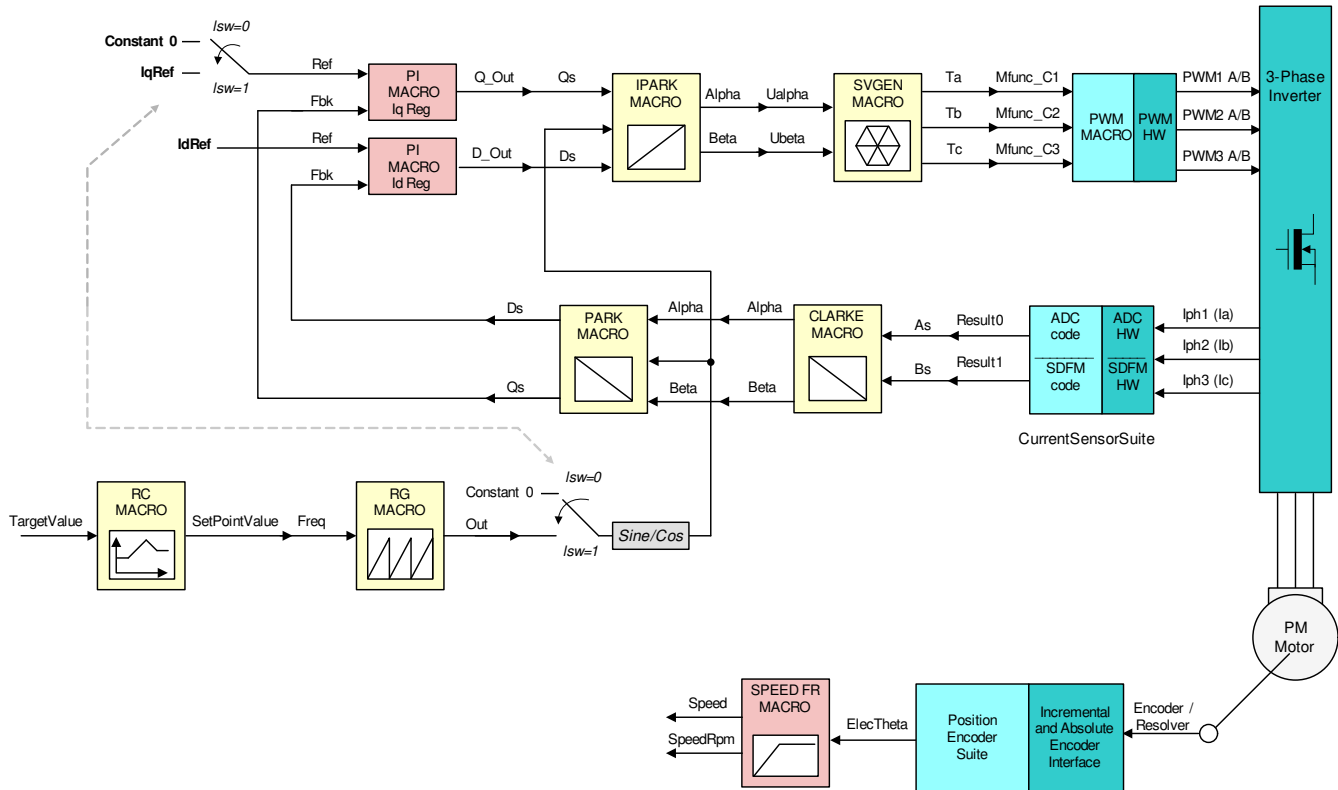


图 9-11. 3 级 - 递增系统构建方框图

3 级验证 PI 宏和速度测量模块所执行的 dq 轴电流调节。

假定前一节的任务已经成功完成，本节将验证 PI 模块执行的 dq 轴电流调节。若要确认电流调节功能的运行情况，有必要调节两个 PI 控制器的增益以实现正常运行。在此构建中，变换基于手动生成的坐标角度完成，而非取决于实际转子位置。这是为了确保进行此测试时不会对电机产生较大负载；否则无法轻松完成 Iq 循环测试。当电机接到命令后运行时，其将进行初始校准，电角度和 QEP 角度值将设为零。如果使用了旋转变压器或绝对编码器 (EnDat 或 BiSS-C)，则会识别其电角度零度时的初始位置以实现运行时间校正。

1. 打开 IDDK\_PM\_Servo\_F2837x-Settings.h 并通过将 BUILDLEVEL 设置为 LEVEL3 (#define BUILDLEVEL LEVEL3) 来选择 3 级增量构建选项。可选择三种 CURRENT\_SENSE 支持方法中的任意一种。
2. 右键点击项目名称，然后点击 Rebuild Project。
3. 一旦构建完成，点击 debug (调试) 按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 在观察窗口中将“EnableFlag”设为 1。在观察窗口中看到“IsrTicker”变量递增，以确认中断正常运转。

在软件中，待调整的关键变量汇总如下：

- speedRef：用于更改转子速度 (标么值)。
- IdRef：用于更改 d 轴电流 (标么值)。
- IqRef：用于更改 q 轴电流 (标么值)。

在这个构建中，电机由交流输入电压供电，而 (PM) 电机电流由 PI 模块通过对电机电流的 Park 变换来动态地调节。

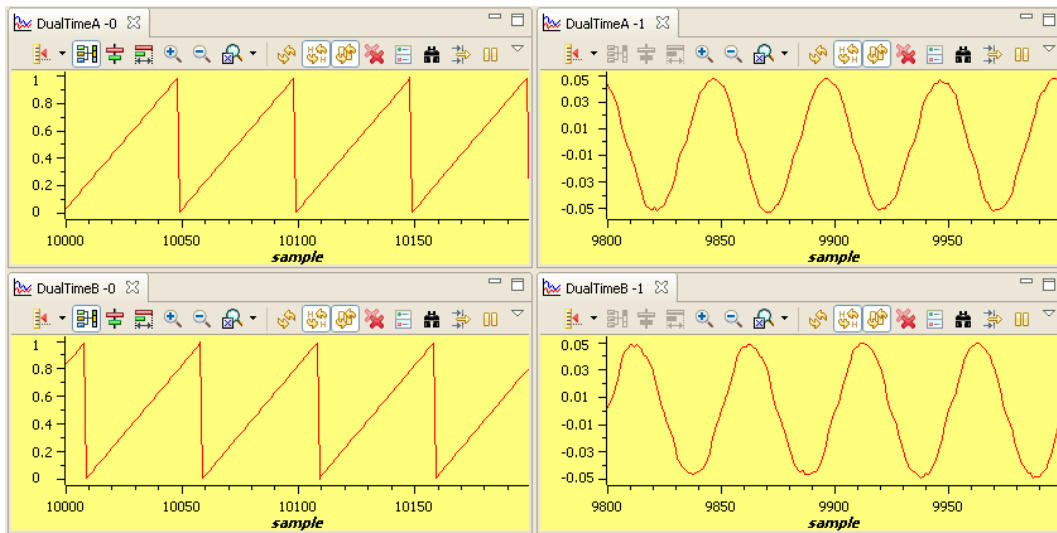
关键步骤解释如下：

1. 实时编译、载入和运行程序。
2. 将 SpeedRef 设置为 0.3pu (如果基速不同的话，设置为其他合适的值)，将 Idref 设置零，并将 Iqref 设置为 0.05pu (或其他合适的值)。



3. 将变量“pi\_id.Fbk”、“pi\_id.Kp”和“pi\_id.Ki”以及“pi\_iq”的相应元素添加到表达式窗口中。
4. 逐渐增加自耦变压器和直流电源上的电压来获得适当的直流总线电压。
5. 将“RunMotor”标志设为 1。
6. 利用持续刷新特性在观察窗口中检查 pi\_id.fbk，以确定是否应针对 PI 模块持续跟踪 pi\_id.Ref。如果不是这样的话，请适当调整它的 PI 增益。
7. 利用持续刷新特性在观察窗口中检查 pi\_iq.fbk，以确定是否应针对 PI 模块持续跟踪 IqRef。如果不是这样的话，请适当调整它的 PI 增益。
8. 尝试使用不同的 pi\_id.Ref 和 pi\_iq.Ref 值或 SpeedRef 来确认这两个 PI 模块。
9. 对于两个 PI 控制器，可重新调整比例、积分、微分和积分校正增益以获得满意的响应。
10. 根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。现在，电机将会停止。

当运行这个构建时，CCS 曲线图内的电流\*波形应如 图 9-12 中所示。



\* 死区时间 = 0.83 $\mu$ sec, Vdcbus = 300V, dlog.trig\_value = 100

图 9-12. 测得的 theta、rg1.out、相位 A 和 B 电流波形

### 9.13 4 级 - 递增构建

图 9-13 所示为在 BUILDLEVEL 4 中构建的系统的方框图。

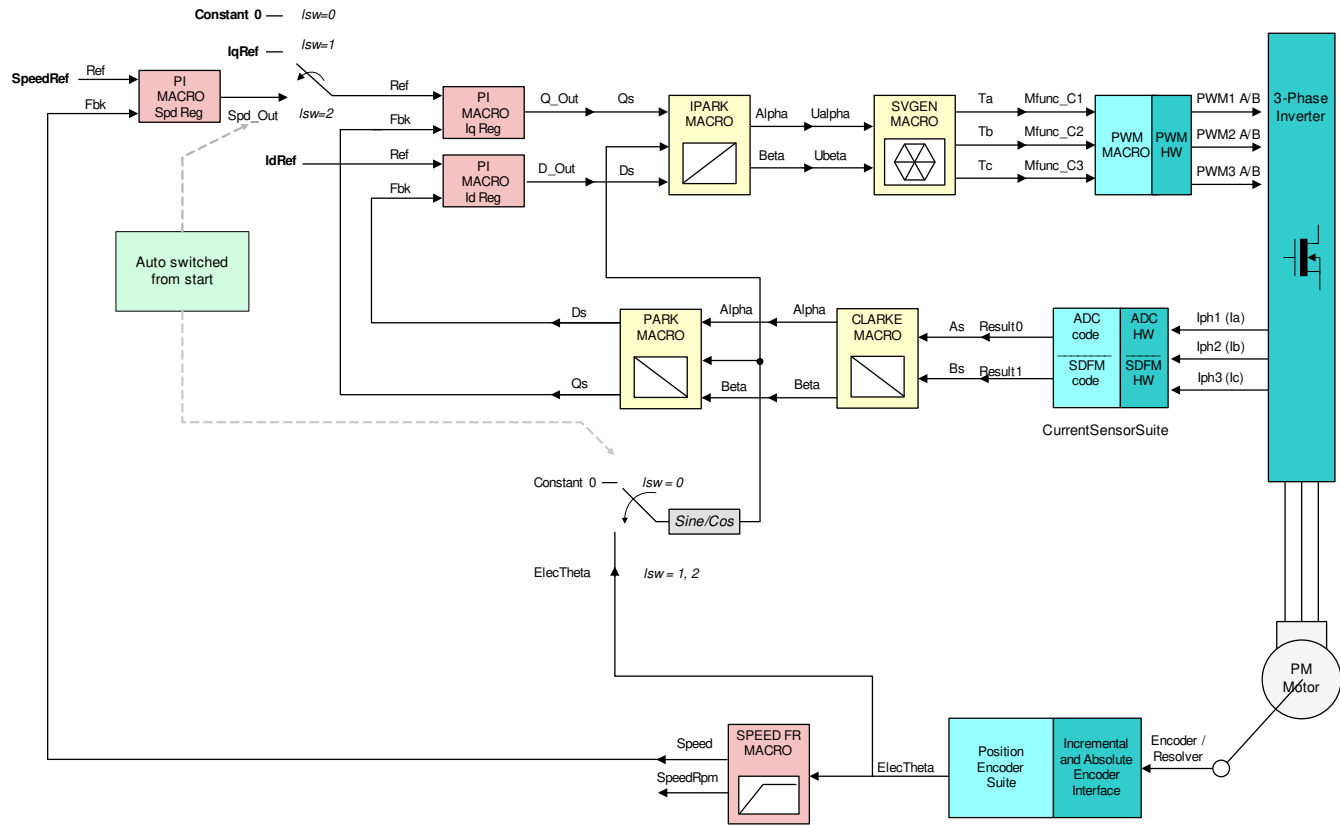


图 9-13. 4 级 - 递增系统构建方框图

4 级验证速度 PI 模块和速度环路。

假定之前的部分已经成功完成；这个部分验证速度 PI 模块和速度环路。所有转换都是基于转子的实际位置完成的。当电机接到命令后运行时，其将进行初始校准，电角度和 QEP 角度值将设为零。如果使用了旋转变压器或绝对编码器 ( EnDat 或 Biss-C )，则会识别其电角度零度时的初始位置以实现运行时间校正。

1. 打开 HVPM\_Sensored-Settings.h 并通过将 BUILDLEVEL 设定为 LEVEL4 ( # define BUILDLEVEL LEVEL4 ( 定义构建级 4 级 ) ) 来选择 4 级递增构建选项。
2. 右键点击项目名称，然后点击 Rebuild Project。
3. 一旦构建完成，单击 debug ( 调试 ) 按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 在观察窗口中将 “EnableFlag” 设为 1。在观察窗口中看到 “IsrTicker” 变量递增，以确认中断正常运转。

在软件中，待调整的关键变量汇总如下：

- speedRef：用于更改转子速度 ( 标么值 )。
- IdRef：用于更改 d 轴电流 ( 标么值 )。
- IqRef：用于更改 q 轴电流 ( 标么值 )。

关键步骤可解释如下：

1. 实时设定编译、载入和运行程序。
2. 将 SpeedRef 设定为 0.3pu ( 或者在基速不同时，设定为其他合适的值 )。
3. 逐渐增加自耦变压器上的电压以获得适当的直流总线电压。现在，电机的运行速度接近于基准速度 (0.3pu)。
4. 在观察窗口中添加开关变量 “RunMotor” 以启动电机。软开关变量 (lsw) 按顺序自动增加。在此代码中，lsw 按如下方式管理环路设置：
  - a. lsw = 0，锁定电机的转子
  - b. lsw = 1，仅适用于 QEP 反馈 - 电机处于运行模式并等待 QEP Index 脉冲的第一个实例
  - c. lsw = 2，电机处于运行模式，适用于所有编码器 ( 对于 QEP - 出现第一个索引脉冲 )
5. 将 “RunMotor” 设为 1。使用持续刷新特性来比较速度与观察窗口中的 SpeedRef，看看是否应几乎完全一样。
6. 若要确认此速度 PI 模块，请尝试使用不同的 SpeedRef 值 ( 正值或负值 )。对于速度 PI 控制器，可重新调整比例、微分和积分校正增益来获得满意的响应。
7. 在极低速度范围下，速度响应的性能严重依赖于 QEP 编码器提供的准确转子位置角。
8. 根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。现在，终止调试会话。

当运行这个构建时，CCS 曲线图内的电流\*波形应如 图 9-14 到 图 9-16 中所示。

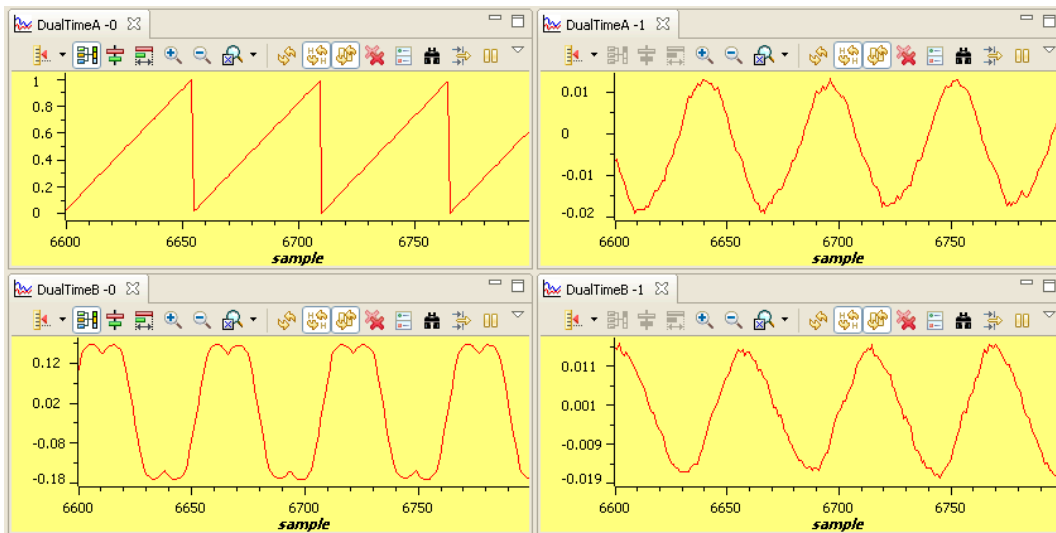
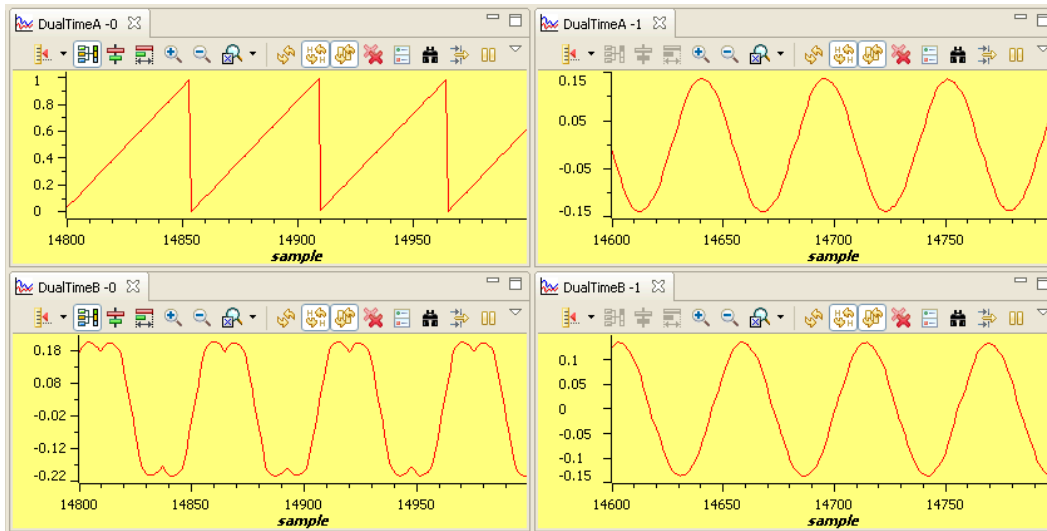


图 9-14. 无负载和 0.3pu 速度下测得的 theta，svgen 占空比以及相位 A 和 B 电流波形



\* 死区时间 = 0.83 $\mu$ sec , dlog.trig\_value=100 , Vdcbus=300V

图 9-15. 0.33pu 负载和 0.3pu 速度下测得的 theta , svgen 占空比 , 以及相位 A 和 B 电流波形

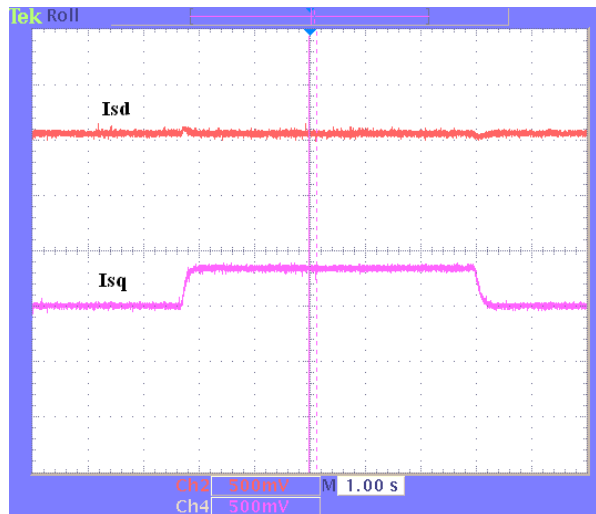


图 9-16. 监控自 PWMDAC 输出的 0.33pu 步进负载和 0.3pu 速度下的同步基准框架内定子电流的磁通分量和扭矩分量

## 9.14 5 级 - 递增构建

图 9-17 所示为在 BUILDLEVEL 5 中构建的系统的方框图。

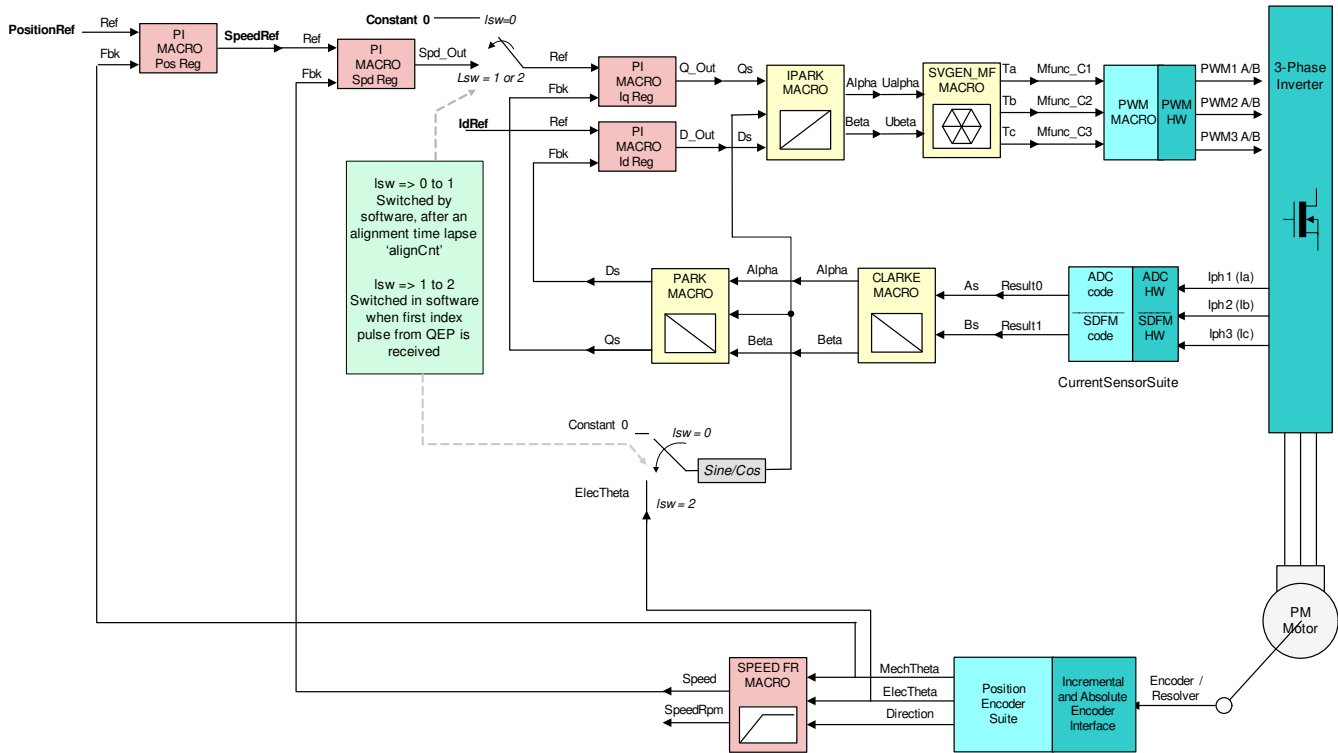


图 9-17. 5 级 - 递增系统构建方框图

5 级将验证位置 PI 模块和位置环路。

本节将利用 QEP 或旋转变压器验证位置 PI 模块和位置环路。为了使该环路正常工作，必须成功完成节 9.13。当电机接到命令后运行时，其将进行初始校准，电角度和 QEP 角度值将设为零。如果使用了旋转变压器或绝对编码器 (EnDat 或 Biss-C)，则会识别其电角度为零度时的初始位置以实现运行时间校正。确保稳定对齐后，转子开始进入 FOC。

1. 打开 HVPM\_Sensored-Settings.h 并通过将 BUILDLEVEL 设定为 LEVEL5 (#define BUILDLEVEL LEVEL5) 来选择 5 级递增构建选项。
2. 右键点击项目名称，然后点击 Rebuild Project。
3. 一旦此构建完成，点击 debug 按钮，复位 CPU，重新启动，启用实时模式并运行。
4. 在观察窗口中将 “EnableFlag” 设为 1。在观察窗口中看到 “IsrTicker” 变量递增，以确认中断正常运转。
5. 在 “Expressions” 窗口中将 “RunMotor” 设置为 1。设置此标志，通过由 “refPosGen()” 模块设定的预定义运动曲线和位置设置来运行电机。

refPosGen() 模块主要通过一组在数组 “posArray” 中定义的值来循环参考位置。这些值表示相对于初始对齐位置的转数。一旦达到数组中定义的某个位置值，电机会暂停一会儿，然后再转向数组中的下一个位置。因此，这些数组值可称为停驻位置。在从一个停驻位置过渡到下一个停驻位置期间，过渡速率 (或速度) 由 “posSlewRate” 设置。从第一个值重新开始之前在 “posArray” 中通过的位置数由 “ptrMax” 决定。因此，请向 “Expressions” 窗口中添加变量 “posArray”、“ptrMax” 和 “posSlewRate”。

关键步骤可解释如下：

1. 实时编译、载入和运行程序。
2. 向“Expressions”窗口中添加变量“pi\_pos”、“posArray”、“ptrMax”和“posSlewRate”。
3. 逐渐增加自耦变压器上的电压以获得适当的直流总线电压。
4. 设置 RunMotor = 1 以运行电机。电机应在旋转以跟随命令的位置。如果电机不能正常旋转，请参阅 ( 1 )。
5. 可将“posArray”中的停驻位置更改为不同的值，以确定电机是否按照设置的转数旋转。
6. 也可更改停驻位置数量“ptrMax”以设置旋转模式
7. 可通过使用“posSlewRate”来更改位置压摆率。它表示每个采样瞬间的角度 ( 以 pu 为单位 )。
8. 为获得满意的响应，可重新调整速度和位置 PI 控制器的比例和积分增益。建议先调整速度环路，然后再调整位置环路。
9. 根据构建 1 末尾所述，减小总线电压、使控制器退出实时模式并复位，以使系统安全停止。现在，电机将会停止。

在图 9-18 中绘制了参考位置和反馈位置。可以看出，它们保持一致，滞后可忽略不计，这一点归功于软件。如果没有正确选择位置环路控制器的 Kp、Ki 增益，则可能导致反馈振荡或响应滞后。



1. 如果电机响应不稳定，则电机轴和编码器的旋转方向可能相反。交换与电机任何两相的连接，然后重复进行测试。
2. 此处实现的位置控制基于初始对齐的电气位置 (= 0)。如果电机有多个极对，这种对齐方式会使轴处于不同的机械位置，具体取决于转子的预启动机械位置。如果需要机械位置具有可重复性或一致性，则应使用 QEP Index 脉冲来设置一个参考点。这一任务可以用作练习。
3. 利用绝对编码器 ( 例如旋转变压器、EnDat 或 Biss-C )，以上情况将不是问题，因为它们可提供每个位置的独特角度值

图 9-18. 参考位置到伺服和反馈位置的示波器图

## 10 参考文献

- 《在 TMS320F280x 数字信号控制器上将 PWM 输出用作数模转换器》(SPRAA88)
- 《优化数字电机控制 (DMC) 库》(SPRAAK2)



## 11 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

<b>Changes from Revision * (February 2016) to Revision A (May 2021)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	<b>2</b>

## 重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据 (包括数据表)、设计资源 (包括参考设计)、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源, 不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保, 包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任: (1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品, (2) 设计、验证并测试您的应用, (3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更, 恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.ti.com) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司