

## 永磁同步电机（PMSM）、无刷直流电机的控制以及开关模式电源（SMPS）的设计

作者: *Daniel Torres*  
飞思卡尔半导体公司应用工程师

### 简介

现在，大部分帮助我们生活得更轻松、更舒适的设备都需要机械运动的控制，诸如洗衣机、冰箱、风扇、空调、电动工具和搅拌器等等。

所有这些设备都需要消耗能量以产生机械运动，而有效利用能源的途径取决于控制系统、电气机构的设计及控制算法等。我们面临的一个最大挑战就是能源的有效利用。对于这个问题，绝大部分的工作都集中在机械运动控制系统上。因此，许多节能方面的进步是通过改进电机控制技术、结构设计、材料和制造精度来实现的。

早在几年前，人们就已经开发出了更高效的控制技术，但执行这类复杂算法和计算所需的 CPU 成本较高，不能满足成本敏感市场（如家电市场）的需求。这种情况在最近几年已经发生了变化，成本更低并且具有执行这些复杂的控制算法所需的所有功能的高性能数字信号控制器已经面世。

实现节能的另一个开发领域是功率转换。功率转换系统用于将电能从一种形式转换为另一种形式，在此过程中，由于系统的固有能耗、拓扑结构的效率、控制技术以及所采用的电子元器件，必然会产生一定的能量损失。大部分功率转换控制是由模拟电路实现的，但新的节能法规提出的要求越来越高，使得模拟控制的系统越来越难以满足这些要求。

MCU 和 DSC 的使用为此开辟了新的前景。现在，借助数字控制技术和由高性能、低成本的数字信号控制器（DSC）实现的复杂数学运算，功率转换系统的效率达到 98%是完全可行的。

## 设计中的难点

### 机械运动控制设计中的难点

在机械运动控制中会使用多种电机，包括无刷直流电机、有刷换向永磁直流电机、线性电机和步进电机等。

系统工程师不但需要选择正确的电机来完成机械动作，还必须选择适当的控制环路结构来满足系统的机械和电子时变响应的要求。控制环的调节通常在电子驱动装置的设计阶段进行。由于不同的电机对电子驱动装置有一系列不同的设计要求，开发人员可能需要处理大量的设计变量。此外，由于电动机的感性特点，它容易造成电磁干扰（EMI）、射频干扰（RFI）和具有破坏性的瞬间高能量，因此，电机本身也使电子驱动装置的设计变得更为复杂。这类电子驱动设备的设计不但要避免电磁干扰（EMI）和射频干扰（RFI），还必须能够承受瞬间过电压和过电流的情形。

BLDC 电机已广泛应用于许多领域。BLDC 电机不带换向器，因而比直流电机更可靠。BLDC 电机在许多方面也优于交流感应电机。BLDC 电机通过转子磁体生成旋转磁通，具有很高的效率，因而它们一般用于高端家用电器（如冰箱、洗衣机和洗碗机）、高端水泵、风扇和其它需要较高可靠性和效率的设备中。也由于 BLDC 电机的结构非常牢固，它们广泛应用于泵、风扇和压缩机等应用中。这些应用的共同特点是它们不需要位置信息，只需要速度信息，而且只需要控制速度。BLDC 电机的使用不需要复杂的控制算法。

在 BLDC 电机中，必须知道转子的位置，才能提供相电压对并控制其电压值。如果用传感器检测转子的位置，那么检测到的信息必须传送到控制单元中去。

这就需要与电机建立额外的连接，可是这在有些应用中是无法接受的。有时候可能无法建立与位置传感器的物理连接。有时，位置传感器和布线所产生的费用可能是无法接受的。虽然物理连接的问题可以通过在电机内部集成驱动器的方法加以解决，但大量的应用由于低成本的特点，需要无传感器的解决方案。

永磁同步电机（PMSM）可以用一个与电源频率同步的恒定速度进行旋转，而不受负载和线路电压的影响。电机运行可以保持恒定的，与电源频率同步的速度，只要转矩不超过电机的极限运行值。因此，PMSM 是高精度定速驱动的理想选择。

3 相 PMSM 是一种永磁电机。它能产生非常高的功率密度、非常高的效率和极好的响应，所以能适应机械工程领域中最复杂的应用。另外它还具有很强的过载能力。PMSM 基本上不需要维护，因此可以确保最高效的运行。

高精确的速度规定使 PMSM 成为特定工业过程的理想选择。PMSM 的速度/转矩特性非常适用于直接驱动大马力、低转速（rpm）的负载。

同步电机能够以较高的功率因数运行，因此能提高整个系统的功率因数，进而能消除或减少功率因数的损失。功率因数的提高还可以减少系统及电机终端的压降。

PMSM 舍弃了励磁线圈，而且转子的转速与定子磁场的转速相同。PMSM 的这种设计可以消除转子铜损，与传统的感应电机相比可以产生极高的效率峰值。PMSM 的功率重量比也高于感应电机。

功率电子和微电子领域的进步使 PMSM 可用于高性能的驱动，而这在过去是只能使用直流电机的。

### 功率转换设计中的难点

电源的主要作用是不论电网的情况如何，都能向负载提供经过调节的稳定的能量。由于具有很高的效率和功率密度，开关模式电源（SMPS）被广泛用于办公设备、计算机、通信系统和其它应用中。

由在数字信号控制器（DSC）上运行的软件进行完全数字化控制的 SMPS 比混合模拟器件与处理器控制的方案具有更多的优势，包括可编程性、适应性、更少的元器件数量、设计重复使用性、处理的独立性、高级调整功能以及更好的性能等等。

采用完全数字化的控制后，SMPS 系统变得更加灵活，能够实现复杂的控制算法，从而提高效率并降低成本。基于控制器的 SMPS 系统将高性能数字信号处理能力与功率电子技术相结合，提供了一种全新的功率电子设计方法、还提供了 SMPS 系统经常需要的高级控制和通信功能等。

### 无刷直流电机的控制原理

BLDC 电机是一种电气旋转机械，具有类似于感应电机的经典的三相定子。其转子表面装有永磁体。它也称为电子换向电机。转子上没有电刷，换向在某些转子位置上以电子方式完成。定子通常由磁铁薄片制成。定子相位绕组插入凹槽中（分布式绕组），或者做成绕在磁极上的线圈。由于气隙磁场是由永磁体产生的，所以转子磁场是恒定的。永磁体的磁化及其在转子上的分布是经过选择的，可以使得反电动势（定子绕组中由于转子运动而感应的电压）的波形是梯形的。这样就可以采用具有矩形波形的直流电压来生成低转矩纹波的旋转磁场。

这种电机的每个相位可以有多对磁极。每个相位的磁极的对数决定了电气旋转与机械旋转之间的比率。例如，所示的 BLDC 电机每个相位有三对磁极，表示三次电气旋转对应于一次机械旋转。

由于所施加的矩形电压很容易产生，所以电机的控制和驱动变得简单。但是必须知道转子的位置在某个角度，才能让所施加的电压与反电动势（back-EMF）对齐。反电动势与换向动作的对齐是非常重要的。只有这样，电机才能作为直流电机以最高的效率运行。因此，控制和实现的简单使 BLDC 电机成为低成本、高效率应用的最佳选择。图 1 显示了加在三相 BLDC 电机上的波形。

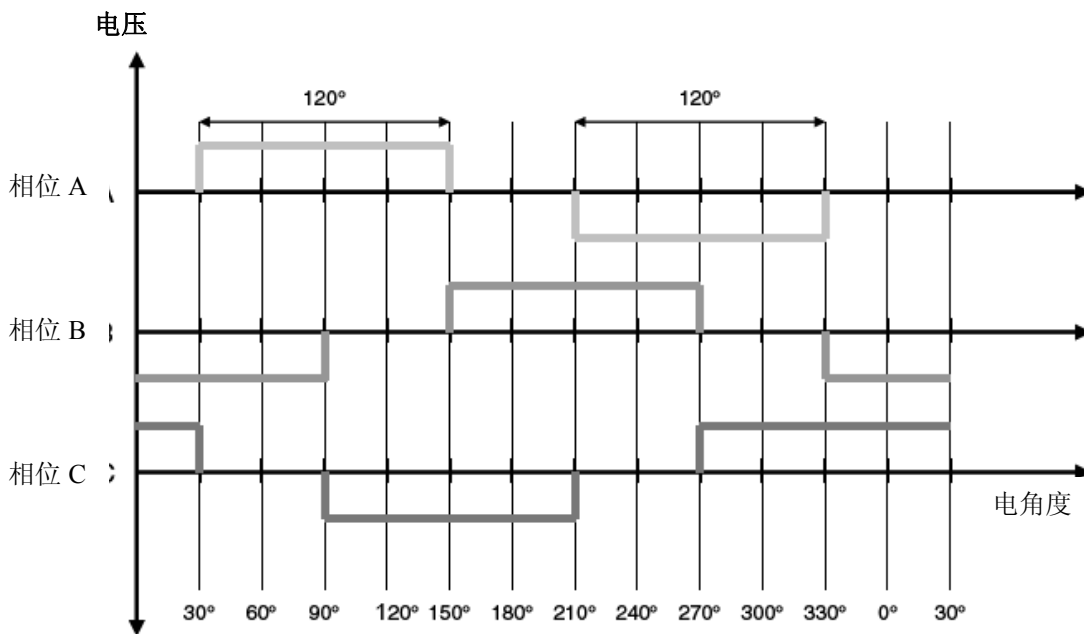


图 1: BLDC 电机的 3 相电压系统

## 永磁同步电机的控制原理

借助诸如矢量控制等复杂的控制方法，PMSM 可以提供与高性能的四象限直流驱动相仿的控制功能。

矢量控制是 PM 同步电机的一种高级控制方法，这种方法利用磁场定向的原理来控制磁通、电流和电压的空间矢量。可以建立一个坐标系统，将矢量分解成磁场产生的部分和转矩产生的部分。这样，电机控制器（即矢量控制器）的结构几乎与分励直流电机完全相同，从而简化了永磁同步电机的控制。过去开发这种矢量控制技术的目的是在永磁同步电机中达到同样出色的动态性能。

在此方法中，必须将定子电流分解为产生磁场的部分和产生转矩的部分，以便分别控制磁通量和转矩。要做到这一点，必须建立与转子磁场关联的转子坐标系统。该坐标系统通常称为“d, q 系统”。将转子坐标系统转换为定子坐标系统通常需要很强的 CPU 运算性能。

图 2 给出了 CPU 在矢量控制技术中需要执行任务的方框图。

要进行矢量控制，必须做以下步骤的工作：

- 测量电机的数值（相电压和电流）。
- 用 Clarker 转换将它们转换成 2 相系统 ( $\alpha, \beta$ )。
- 计算转子磁通空间矢量的大小和角度位置。
- 用 Park 转换将定子电流转换成 d, q 坐标系统。
- 定子电流的转矩 ( $i_{sp}$ ) 和磁通 ( $i_{sd}$ ) 分量由控制器分别进行控制。
- 用去耦模块计算定子电压空间矢量的输出值。
- 通过 Park 反向转换将定子电压空间矢量从 d, q 坐标系统转换回固定于定子的 2 相系统。
- 用正弦调制生成 3 相输出电压。

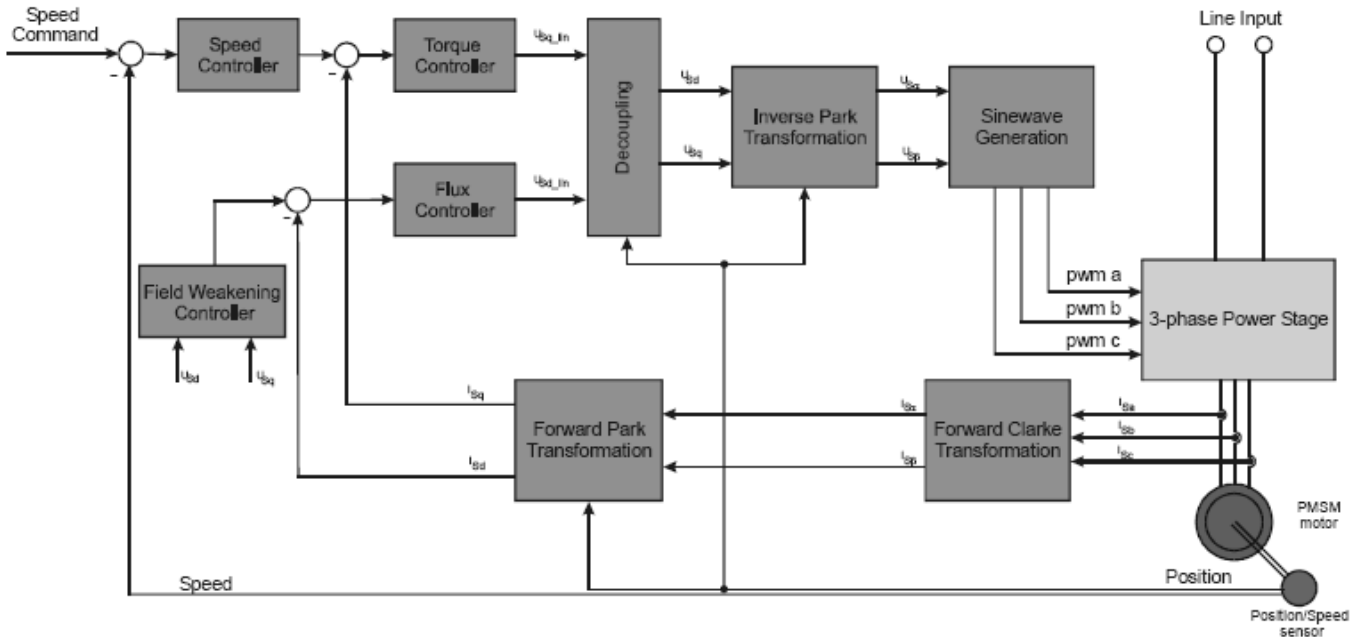


图 2：永磁同步电机向量控制方框图

速度命令、速度控制器、转矩控制器、磁通控制器、去耦、Park 反向转换、正弦波生成、3 相功率平台、磁场弱化控制器、Park 正向转换、Clarke 正向转换、速度、位置、PMSM 电机、位置/速度传感器

### 56F8013 控制器的优点和特性

飞思卡尔的 MC56F801x 系列在单个芯片上结合了 DSP 的计算功能和 MCU 的控制功能，非常适合数字电机的控制。这种混合型控制器提供了多种专用外设，如脉宽调制（PWM）模块（组）、数模转换器（ADC）、定时器、通讯外设（SCI、SPI 和 I<sup>2</sup>C）以及内置闪存和 RAM。

### 特性

56F8000 器件的部分优点如下：

- 高性能 56800E 内核

- 总线结构和控制器内核可提供出众的 16 位定点信号处理能力；
  - 出色的控制和协议处理功能及代码密度；
  - 卓越的 MCU 控制性能。
- 性能领先的闪存
- 无以伦比的可靠性历经最恶劣环境下的考验；
  - 支持模拟 EEPROM 的功能；
  - 灵活、全面的在线闪存编程功能；
  - 性能增强型接口和总线结构，使闪存具备出色的信号处理能力；
  - 闪存加密保护功能提供知识产权的保护。
- 稳压器和电源监控器
- 芯片带有内置稳压器和电源监控器。采用 3.3V 电压供电时，芯片可以产生各种内部所需的电压；
  - 具有上电复位（POR）和低压检测等功能，可减少外部元器件的数量，节约系统成本。
- 内置弛张振荡器
- 部分 56F8000 器件装备了经出厂调整的、精确的内置振荡器（8MHz 之 0.25%），可省去外部晶振，降低系统成本。
- 内置时钟综合模块（OCCS）
- 56F8000 数字信号控制器可以使用外部时钟输入；
  - OCCS 的功能包括灵活、可编程的锁相环（PLL），从而可选择精确的运行频率；
  - OCCS 还具有独特的能够检测晶振故障的失锁检测，以及对安全至关重要的 16 位关断定时器；



- 56F8000 器件配备了功能强大的定时器模块。每个定时器模块有 4 个独立的 16 位定时器，它们可用作：
  - 级联；
  - 输入捕获；
  - 生成输出波形；
  - 触发 ADC；
  - 生成辅助 PWM 波形；
  - 与外部低通滤波器结合使用，作为数模转换器（DAC）；
  - 可选择性地与某个共用起始信号实现同步；
  - 最高运行速率达 96MHz。
- 3 相 PWM 模块
  - 高性能 15 位 PWM 可用于边缘对齐和中心对齐模式，还可用于互补和独立模式，而且能生成可编程的死区时间；
  - 极高的解析度，且时钟高达 96MHz；
  - PWM 模块具有非常复杂的可编程故障保护功能，即使没有系统时钟也能正常工作；
  - 所有这些功能使得这种 PWM 模块成为安全性、可靠性和性能方面的业界翘楚；
  - 增强型功能支持数字功率变换、功率因数调整、照明和电机控制；
  - 硬件支持先进的 PWM 移相技术。
- 模数转换（ADC）模块
  - 每个高性能 12 位 ADC 都有两个采样及保持电路，从而允许以 1.125 微秒的转换速度进行同步或顺序转换；

- ADC 可用于单端或差分模式，且具有一系列独特的精密功能，包括：
  - 杰出的绝对精度；
  - 高/低和过零检测；
  - 偏置。
- ADC 可通过多种不同方法触发，包括 PWM 同步；
- ADC 有一系列复杂的待机和低功耗模式，可改进低功耗性能；
- ADC 的两个采样保持电路可以分别配置成两个独立的采样速率，并启动集成电路互连（I2C）串行总线接口的触发；
- 符合 I2C 总线标准。
- 功能包括：
  - 多主机运行；
  - 软件可编程选择 256 个不同的串行时钟频率；
  - 仲裁失败中断，自动进行主机到从机的模式切换；
  - 呼叫地址识别中断。
- 串行通信接口（SCI）
  - 该模式可用作全双工通用异步收发器（UART）；
  - 可完全由中断驱动而且可编程，能提供多种运行模式和波特率。
- 串行外设接口（SPI）
  - 该同步串行接口具有双缓冲功能；
  - 能以各种不同的模式、速率和位长运行，速率可达 16Mbps，实现与外设和其它处理器的无缝连接。
- 通用输入/输出（GPIO）

- 用于内置外设的所有数字和模拟信号引脚都可以单独地配置为 GPIO，也都可以单独配置其方向；
  - 除了 I/O 功能外，GPIO 还可以产生中断；
  - 每个 GPIO 都有可编程的上拉；
  - GPIO 还具有推—挽模式，可有效地进行键盘接口。
- • 计算机正常运行 (COP)
- 帮助软件从跑飞的代码中恢复；
  - COP 是一个自由计数的反向计数器，启动后，一旦计数到 0 就产生复位；
  - 软件必须定期操作 COP，以清除计数器，防止复位；
  - COP 可以增强终端系统的可靠性和安全性。
- • JTAG/EOnCE™
- 这个增强型内置仿真模块可实现真正的全速仿真而无需价格昂贵的硬件仿真器；
  - 实现功能强大、无干扰的实时调试，采用符合行业标准的 JTAG 接口与处理器简单相连。

### 机械运动控制的推荐方案

无刷直流 (BLDC) 系统结合了交流和直流系统的长处。与有刷直流电机不同，无刷直流系统 (BLDC) 采用的电机一般是一种具有梯形反电动势波形的永磁交流同步电机，而且用电子换向取代了直流电机中的机械电刷。尽管这种控制方法在相位换向过程中会产生转矩跳变，但它还是能满足以控制转子速度为目标的大多数应用的需要。

反电动势波形为正弦波的 PMSM 电机也可应用于 BLDC 系统。但是，定子磁通和转子磁通之间的矢量角度应保持在  $60^{\circ}$ — $120^{\circ}$  电角度之间。运行期间会产生转矩纹

波，但平均转矩可维持恒定，能满足大部分低端应用的要求。图 3 显示了既可用于实现 PMSM 失量控制，也可用于实现 BLDC 电机控制的方框图。

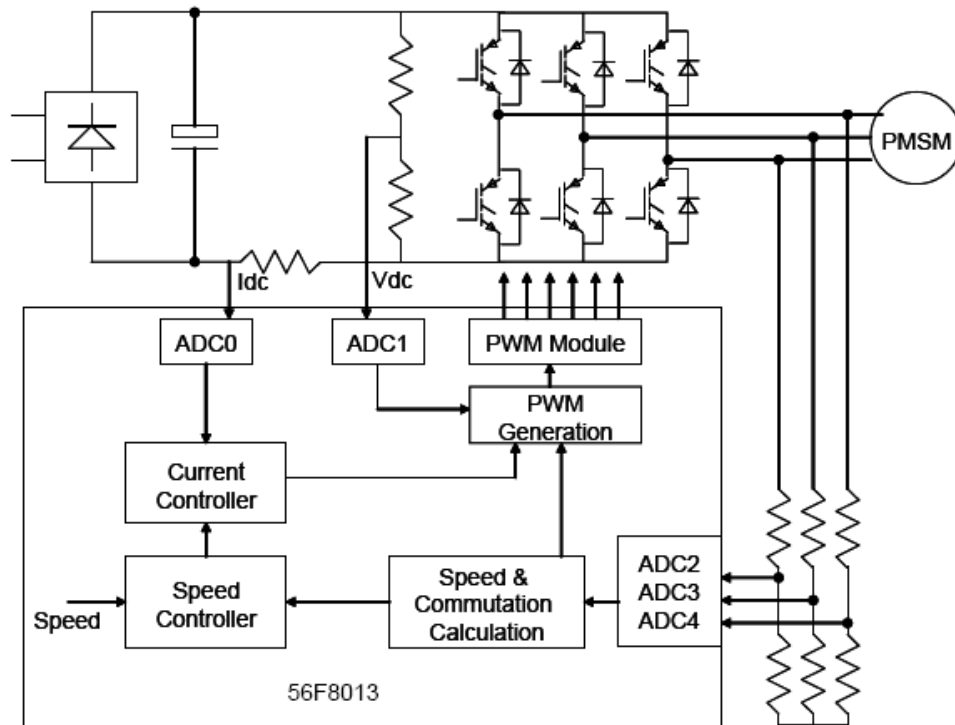


图 3 PMSM/BLDC 电机控制方案通用方框图

电流控制器、速度、速度控制器、PWM 模块、PWM 生成、速度和通信计算

反电动势的过零信息可用于确定定子的位置，以实现正确的换向，并确定开通哪个功率晶体管以获得最大的电机转矩。成本最低、最可靠的反电动势过零信息的采样方法是将电阻网络采集的反电动势信号发送到 ADC 输入端或 GPIO。在有传感器的控制结构中，转子每转动 60°电角度换向一次。这意味着只需 6 个换向信号就足以驱动 BLDC 电机。此外，有效的控制还需要  $B_{emf}$  相与电源相之间的同步，要确保  $B_{emf}$  只在不馈电的 60°区间内过零一次。

由于在某一时刻定子绕组中只有两个有电流，所以这两相电流是相反的，而第三相电流为 0。既然知道三个定子电流总和等于 0（星形绕组定子），就可以计算预期的  $B_{emf}$  瞬间波形。三个定子端的电压之和等于中心点电压 ( $V_n$ ) 的三倍。每个  $B_{emfs}$  在每次机械旋转中过零两次。由于  $B_{emfs}$  的数值计算比较方便，再由于 56F8013 的信号处理能力，因此才能够得到与换向有关的 6 个必需的信息。

### 开关模式电源的推荐方案

一般的 SMPS AC/DC 系统包含两大部分：前端是带功率因数调整的 AC/DC 转换器，后端是一个全桥 DC/DC 转换器。AC/DC 系统采用交错型 PFC 升压控制结构，包括一个全桥整流器、2 个平行交错升压 PFC 电路和 2 个辅助开关，用于实现主开关的过零切换 (ZVS)。采用 ZVS 算法可减小器件的压力，并提高效率，还可以在设计中取消反向恢复输出二极管。DC/DC 转换器采用以软件实现的 ZVS 相移全桥控制结构，带有倍流整流器。这样不仅减小了滤波电感的尺寸，还提高了效率。

图 4 是基于 56800/E 的开关模式电源 (SMPS) 的电路框图。整个系统由 2 个 56800/E 芯片进行控制。前端芯片负责 PFC 系统的全面控制，包括 2 个主开关和 2 个 ZVS 开关。后端芯片负责 DC/DC 相移全桥转换器的全面控制，包括 4 个开关和 2 个同步整流器。软件中用于 PFC 和 DC/DC 转换器的功能包括：电源系统中的 2 个 PI 调整的功能、所有开关的控制、软启动、前端 PFC 正弦参考数字信号的发生、通讯、电源保护和监控功能。

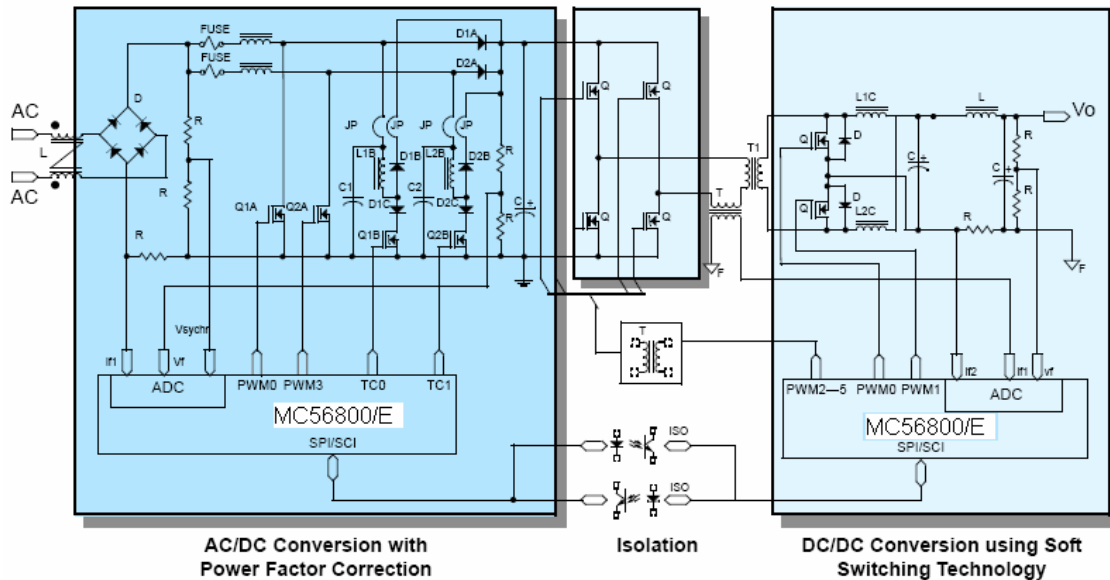


图 4: AC/DC 方框图

带功率因数调整的 AC/DC 转换电路；光隔；采用软交换技术的 DC/DC 转换电路

#### 参考文献:

[www.freescale.com](http://www.freescale.com)

应用笔记 AN1931 “3-Phase PM Synchronous Motor Vector Control using DSP56F80x”

应用笔记 AN3115 “Implementing a Digital AC/DC Switched-Mode Power Supply using a 56F8300 Digital Signal Controller”

设计参考手册 DRM070 “3-Phase BLDC Motor Sensorless Control using MC56F8013”

设计参考手册 DRM077 “PMSM and BLDC Sensorless Motor Control using the 56F8013 Device”