

PAC52xx BLDC

方波控制原理简介

Power Application Controllers

目录

1 方波控制理论基础.....	3
2 方波算法实现步骤.....	4
2.1 Hall 方波控制.....	4
2.2 BEMF 方波控制.....	5
3 PI Control.....	7
4 三相桥臂开管状态与电机转子位置的关系.....	9
5 方波控制算法运行时三相桥臂开关管驱动方式的配置.....	13
6 AIO7、AIO8、AIO9 作为相比较器工作模式的说明.....	16
6.1 AIO7、AIO8、AIO9 比较器内部说明.....	16
6.2 Back EMF 过零检测时序.....	18
6.3 Back EMF 过零检测及换向延时.....	18
6.4 避开换相消磁时间.....	19
更改履历.....	21

1 方波控制理论基础

方波控制也叫六步控制，在一个电周期中，电机只有六种转态，或者说定子电流有六种状态（三相桥臂有六种开关状态）。每一种电流状态都可看作合成一个方向的矢量力矩，六个矢量有规律地、一步接一步地转换，矢量旋转方向决定了电机旋转方向（顺时针或是逆时针），电机转子会跟着同步旋转。在方波控制里，主要是对两个量进行控制，一个是电机转子位置对应的开管状态，有Hall时，通过Hall信息获取转子位置，无传感器时，通过反电动势信息获取转子位置，从而决定开管状态；第二个是PWM占空比的控制，通过控制占空比的大小来控制电流大小，从而控制转矩和转速。

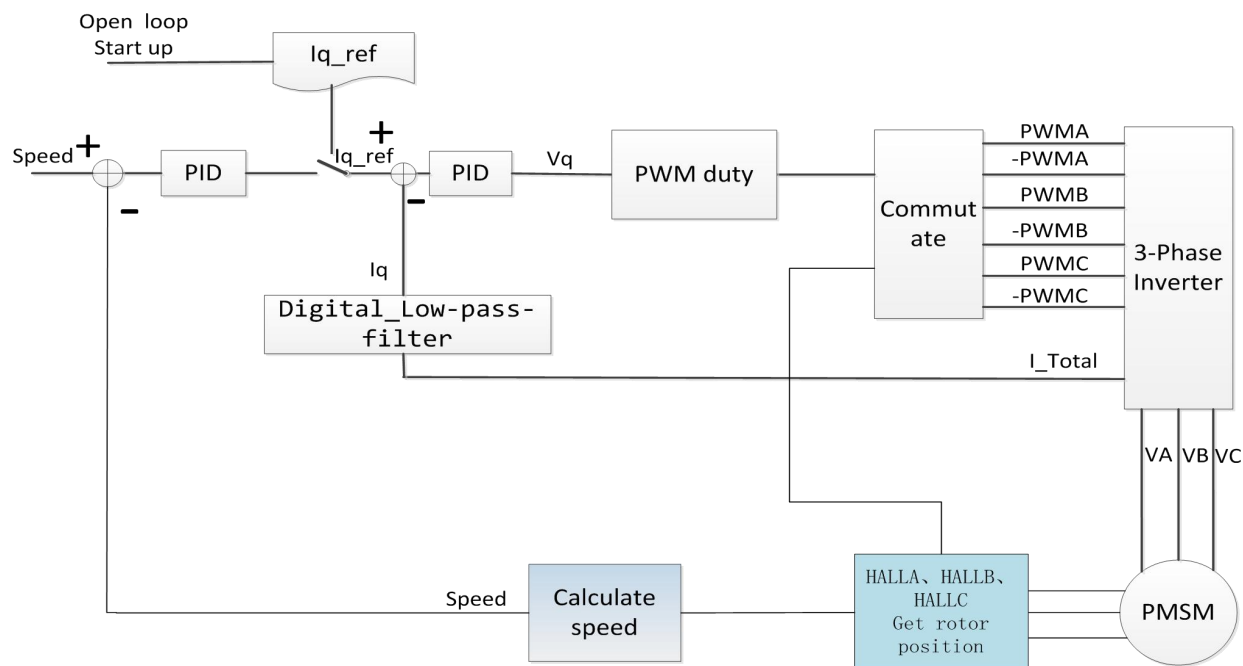
2 方波算法实现步骤

2.1 Hall 方波控制

1. 读取母线电流采样的 AD 值，计算母线电流
2. 电流环计算应该给的 PWM 占空比，控制电流为给定电流大小
3. 读取 hall 状态，根据 Hall 状态与三相桥臂开管状态关系数组，得到相应的开管状态，每次 hall 状态的跳变沿及为三相桥臂状态切换的时间点（也称为换相点）。
4. Hall 相邻状态间的扇区为一个电周期的六分之一，即为 60° ，用定时器可记录 60° 扇区所用的时间，从而计算电流频率，从而得到电机转速。
5. 以电流环作为内环，速度环作为外环，电机进行闭环控制，如 Hall 方波控制框图。

对于 Hall 方波控制来说，电机启动时，就已经知道电机转子位置，直接用 hall 状态对的矢量力矩去拉电机，就可启动电机，并可直接进闭环控制。如以下 Hall 方波控制框图。

Hall 方波控制框图如下：

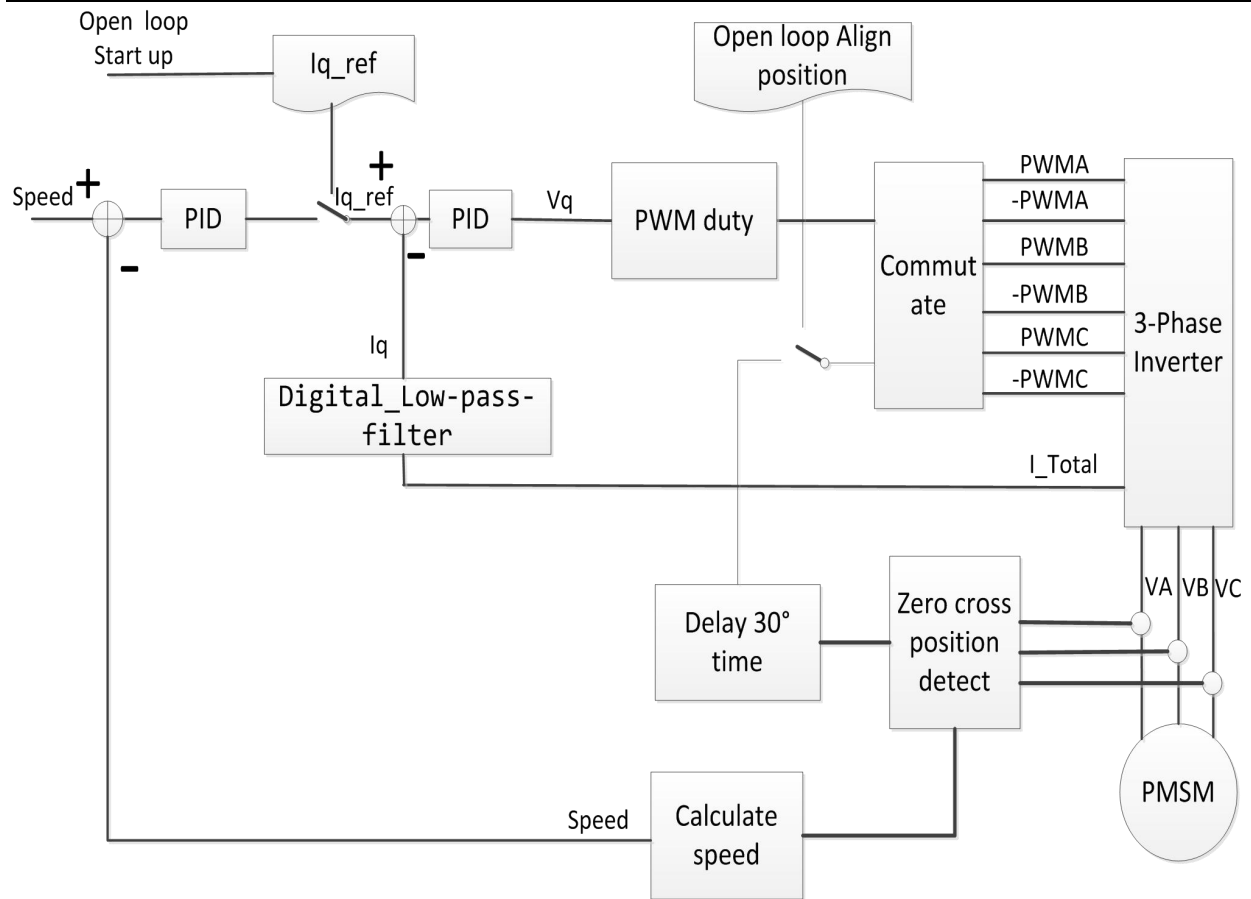


2.2 BEMF 方波控制

1. 读取母线电流采样的 AD 值，计算母线电流。
2. 电流环计算应该给的 PWM 占空比，控制电流为给定电流大小
3. 保持一种开管状态（即保持一个方向矢量定位），定位完成，然后按一定频率改变开管状态，并按规律提升改变频率。到达切换电频率，然后切换到反电动势模式。
4. 用一个较高频率定时器中断读取相比较器输出状态，若相比较器输出电平发生翻转，则说明该相反电动势产生过零，此时，读定时器 D 时基计数值，保存，然后清定时器 D，并配置定时器 D 的比较寄存器 0 的比较值，开定时器 D 开始计时，直到产生 PWM0 中断，在中断中改变开关管状态，也就是找到过零点延迟 30°电角度再换相。
5. 以电流环作为内环，速度环作为外环，电机进行闭环控制，如 BEMF 方波控制框图。

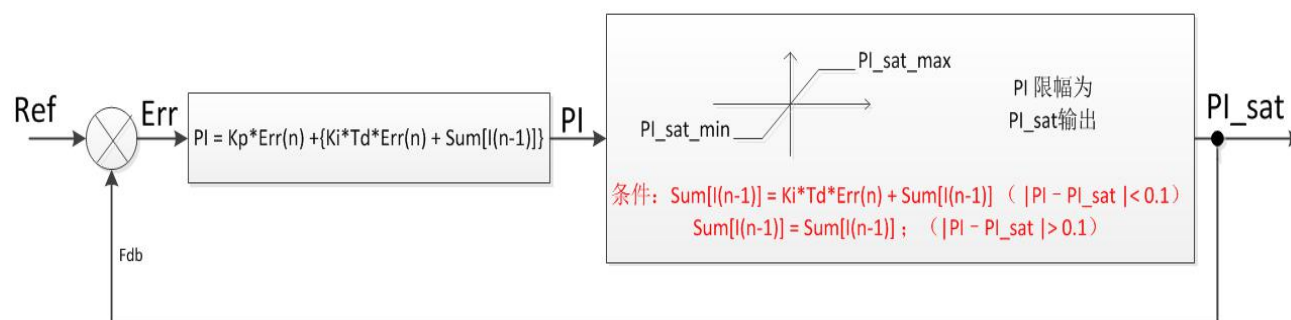
对于 BEMF 方波控制来说，电机启动时，是不知道电机转子位置，所以需要用外同步方式启动电机，让定子电流按给定大小和频率拖动电机转子跑，然后电机达到切换电频率，就可切换到反电动势模式跑电机，并运行速度和电流闭环控制。如以 BEMF 方波控制框图。

BEMF 方波控制框图如下：

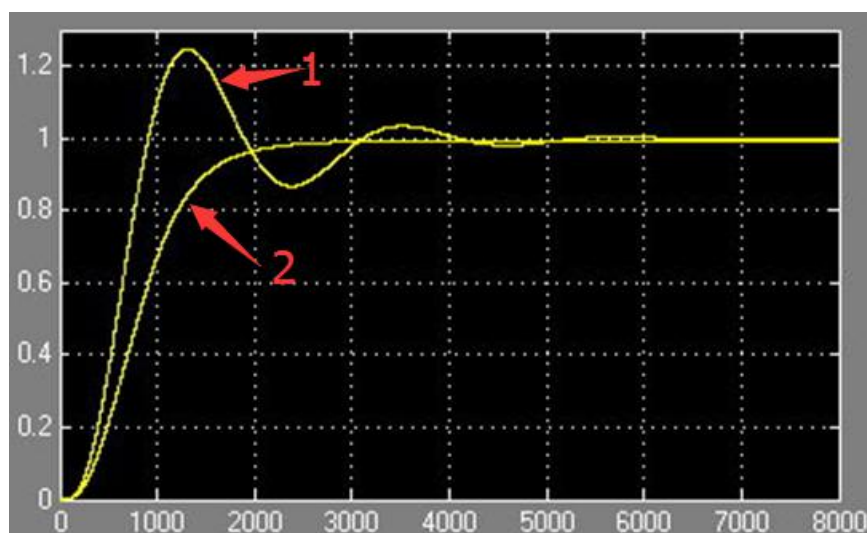


3 PI CONTROL

使用两个 PI 环分别控制相互影响的两个变量: 转子转速 (speed)、转子转矩(Iq)。这里使用的是位置式 PI 控制器，将误差乘上比例系数作为比例项，将每次的误差乘上积分系数和积分时间再求和作为积分项，如果本次 PI 输出超过限幅值太多，则下次的积分项用前一次的，否则用本次的。如下框图，



PI 控制器对闭环控制中的误差信号进行响应，并尝试对控制量进行调节，以获得期望的系统响应。而调节 PI 控制器，主要看四个指标：是否超调、是否震荡、是否存在静差、到达稳态的时间是否足够短。调节 PI 参数，一般来说，没有最好，只有更好。所以，各环路 PI 参数的整定，也是电机控制系统调试的关键。如下图，1 响应曲线就超调了，2 响应不够快。



控制器的比例 (P) 项：比例项是由误差信号乘以一个 P 增益因子形成，可使 PI 控制器产生的控制响应为误差幅值的函数。当误差信号变大时，控制器的 P 项也将变大以提供更大的校正量。随着时间的消逝，P 项有利于减小系统的总误差。但是，P 项的影响将随着误差趋近于零而减小。在大部分系统中，被控参数的误差会非常接近于零，但是并不会收敛。因此始终会存在一个微小的静态误差。

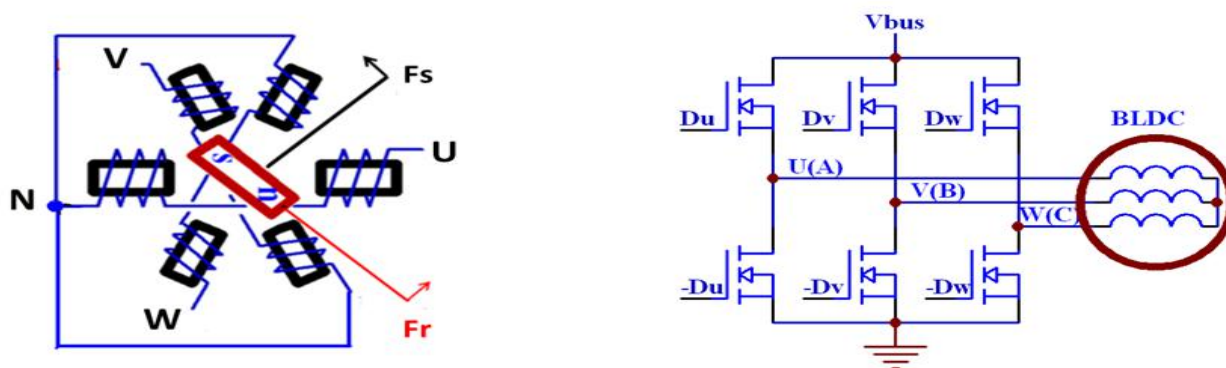
控制器的积分 (I) 项：积分项用来消除小的静态误差。I 项对全部误差信号进行连续积分。因此，小的静态误差随着时间累积为一个较大的误差值。该累积误差信号与一个 I 增益因子相乘，即成为 PI 控制器的 I 输出项。

PI 控制器调试方法：在初次对控制器进行参数整定时，将 I 增益设置为 0，随后可增大 P 增益，直到系统能够很好地响应设定点的变化，不存在过大超调或振荡。使用较小的 P 增益值可较“松”地控制系统，而较大的值则会较“紧”地控制系统。此时，系统将有可能不收敛到设定点。选取了合适的 P 增益后，可缓慢地增加 I 增益以消除系统的误差。对多数系统而言，只需较小的 I 增益。如果 I 增益取值过大，则可能会抵消 P 项的作用，减缓整个控制系统的响应，并使系统在设定点附近振荡。如果发生振荡，通过减小 I 增益并增大 P 增益通常可解决问题。所有三个控制器的输出参数都存在一个最大值和最小限幅值。本应用中存在两个相互关联的 PI 控制环。外环控制电机转速。内环控制变换后的电机电流。

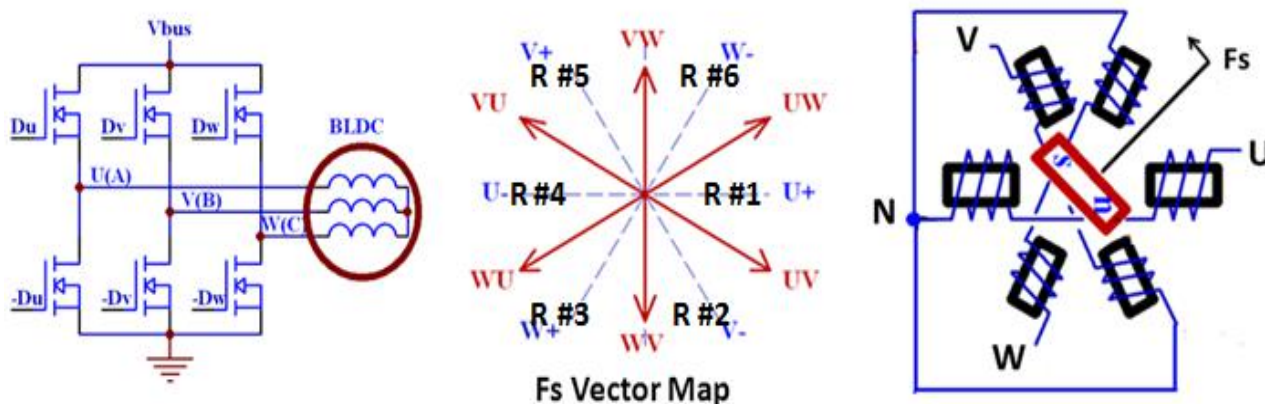
4 三相桥臂开管状态与电机转子位置的关系

首先建立下面矢量模型，方便理解：

- 电机定子：等效成三相互差120°定子线圈
- 电机转子：等效成一对极永磁铁
- 磁场：定子线圈通电流会产生磁场（ F_s ），转子永磁体会产生磁场（ F_r ）
- 控制：要让电机旋转，就需控制定子磁场 F_s 超前于转子磁场 F_r 90°电角度，而三相六步控制只有6个矢量力矩，因此需在电机旋转时，控制定子磁场 F_s 相对转子磁场 F_r 超前角在60°到120°之间



方波控制，一个电周期由 6 个矢量构成，也就是说，一个电周期被六个矢量分成了 6 个扇区，每个矢量由一个桥臂中点接到 Vbus 正极，另一个桥臂中点接到地构成，六个矢量表示为 UV-->UW-->VW-->VU-->WU-->WV,两个字母中在前面的字母表示该相桥臂中点接到 Vbus 正极，在后面的字母表示该相桥臂中点接到地。比如，UV 就表示 U 相接到 Vbus 正极，V 相接到地，电流由 U 相流入电机线圈，由 V 相流出电机线圈。

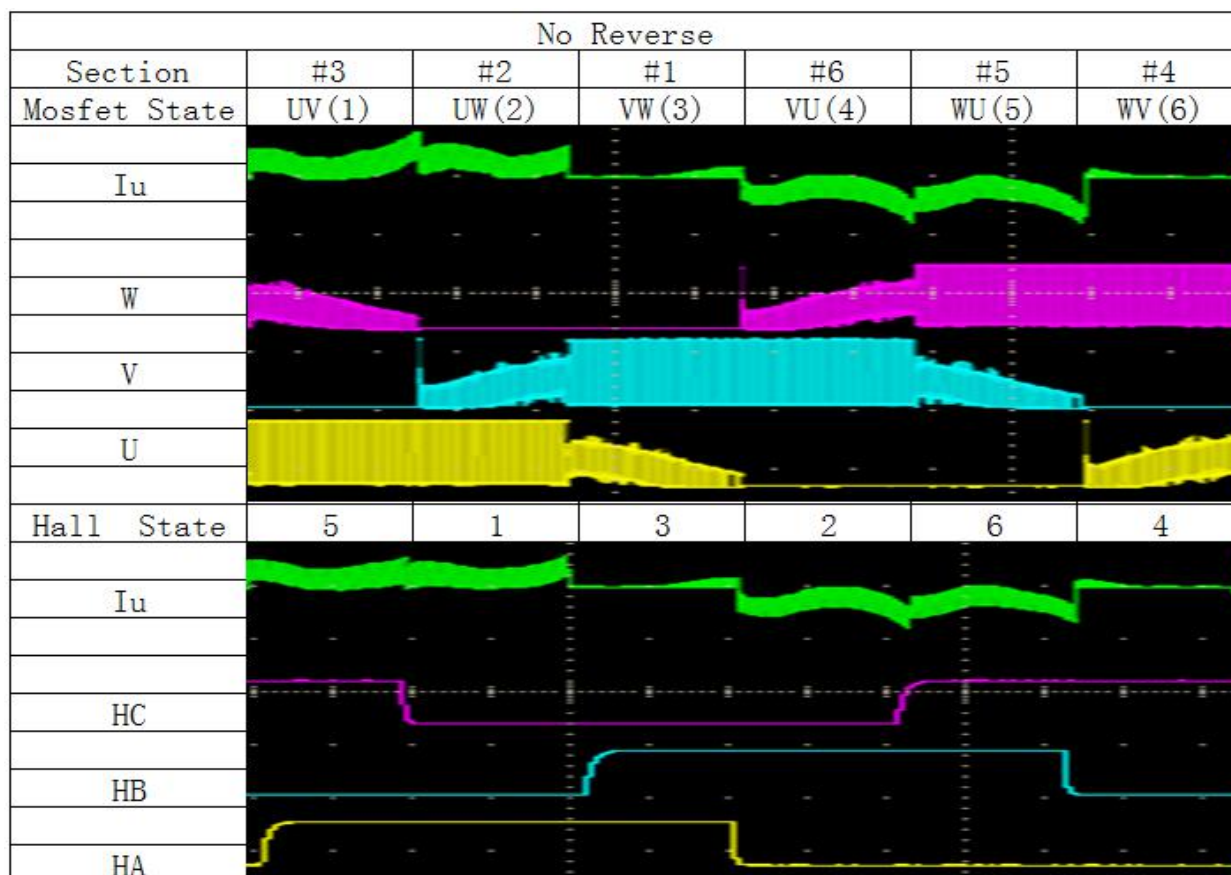


可以给每一个开管状态标定一个对应的数字编号，如下：

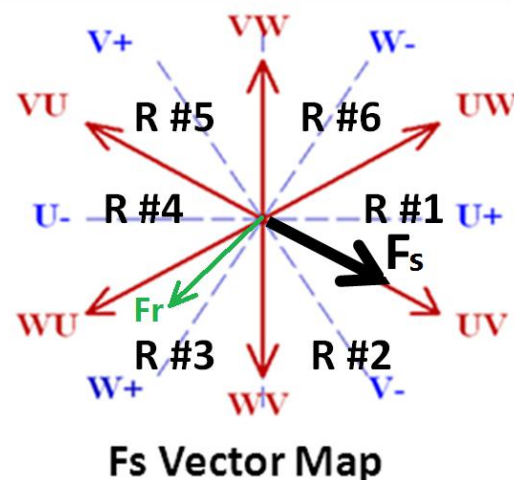
1 (UV) → 2 (UW) → 3 (VW) → 4 (VU) → 5 (WU) → 6 (WV)

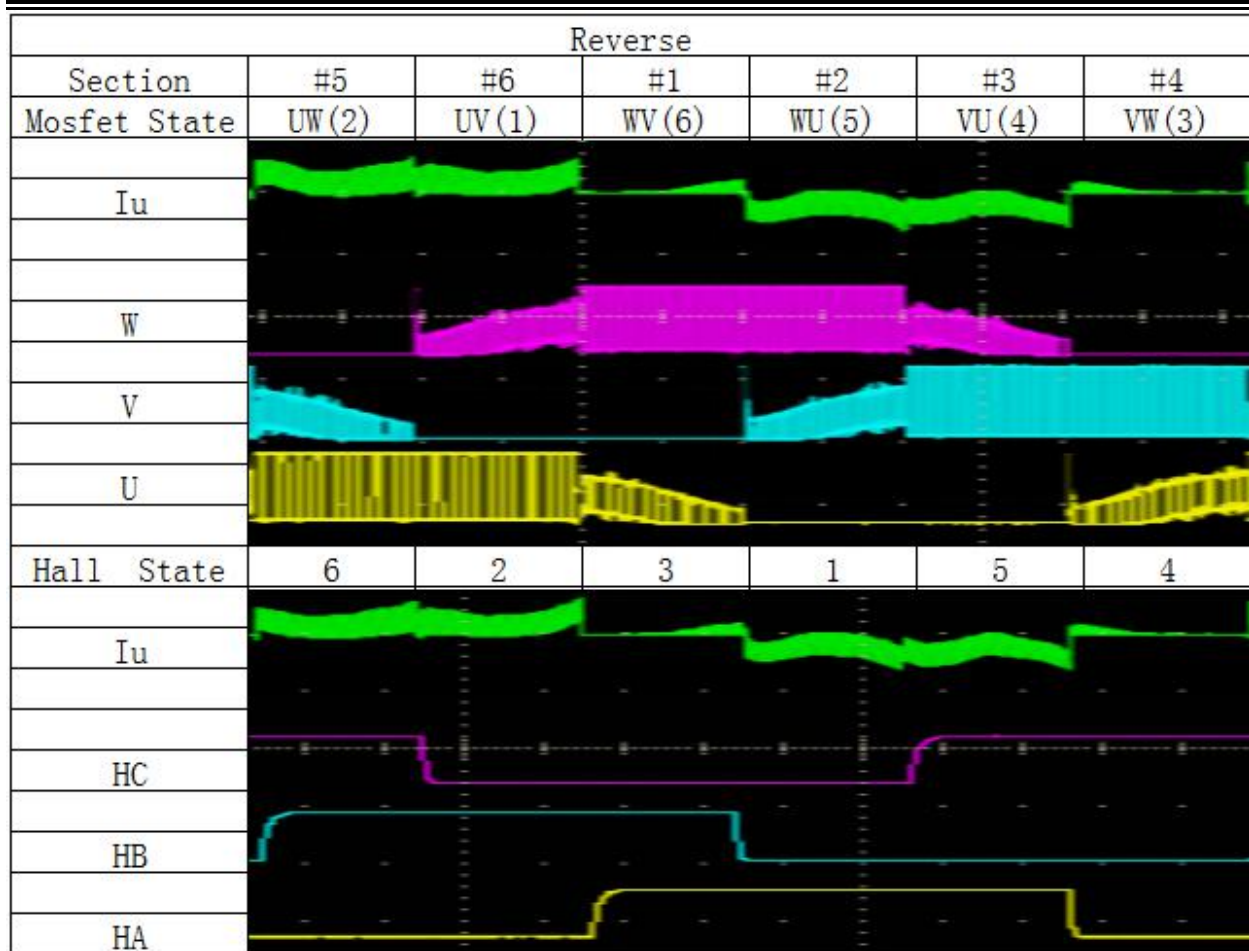
给每一个扇区也标定一个对应的编号如上图中的#1、#2、#3、#4、#5、#6。

以下拿实际转电机的波形来分析说明（No Reverse对应固件中方向标志位为“0”，Reverse对应固件中方向标志位为“1”）：

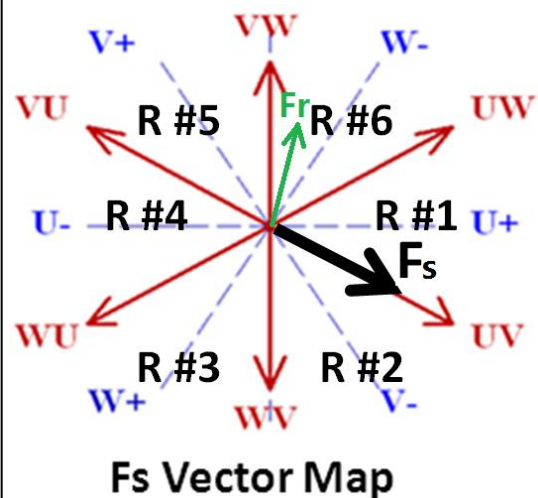


如右图，当电机转子磁场 F_r 在扇区#3时，要想让转子磁场矢量 F_r 逆时针旋转，则应加定子磁场矢量 F_s 为 UV 去拖电机跑，并在转子磁场矢量 F_r 由 WU 位置转到 WV 位置期间定子磁场矢量 F_s 一直保持为 UV，以此类推，当电机转子磁场矢量跑到#2 扇区，则电机定子矢量 F_s 切换成 UW，依次切换 F_s ，所以说 F_s 的状态由电机转子位置决定。扇区与 Hall 有对应关系有：#3(5)/ #2(1)/ #1(3)/ #6(2)/ #5(6)/ #4(4)





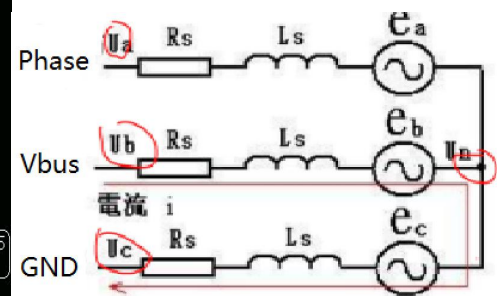
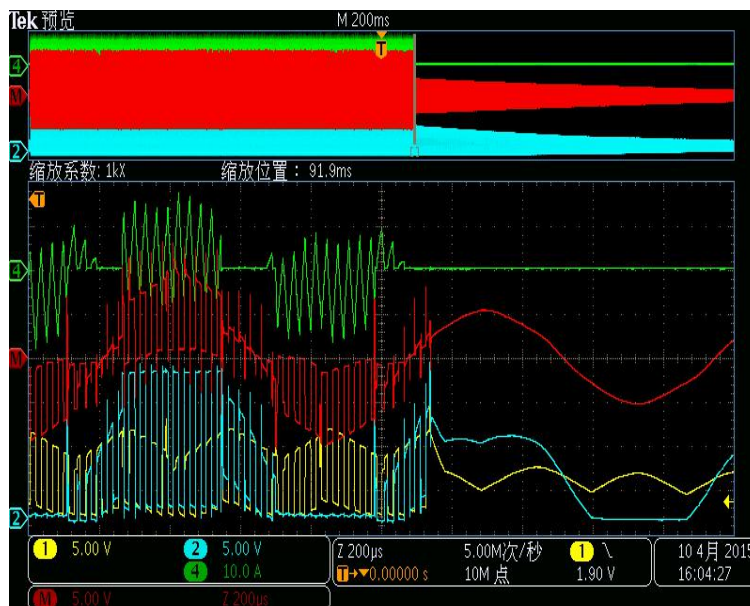
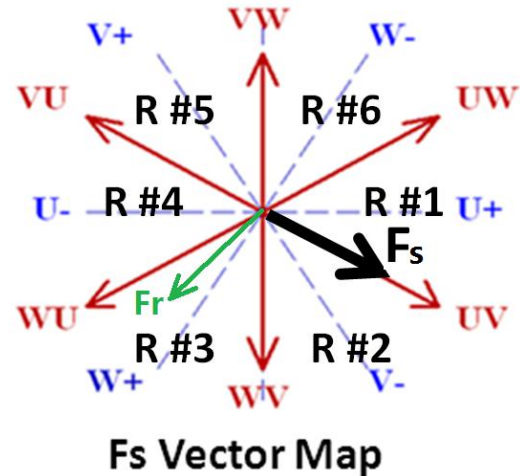
如右图，当电机转子磁场 F_r 在扇区#6 时，要想让转子磁场矢量 F_r 逆时针旋转，则应加定子磁场矢量 F_s 为 UV 去拖电机跑，并在转子磁场矢量 F_r 由 VW 位置转到 UW 位置期间定子磁场矢量 F_s 一直保持为 UV，以此类推，当电机转子磁场矢量跑到#1 扇区，则电机定子矢量 F_s 切换成 WV，依次切换 F_s ，所以说 F_s 的状态由电机转子位置决定。扇区与 Hall 有对应关系有：#3(5)/ #2(1)/ #1(3)/ #6(2)/ #5(6)/ #4(4)



由以上电机正转与反转的波形图及矢量分析图可知，如果有 Hall 传感器输出值与电机转子位置对应关系，则就知道电机定子矢量力矩的切换时刻，然后只需控制流进电机线圈

电流大小就可以控制转矩力量和转速；如果没有传感器，则可通过反电动势过零点信息知道电机转子位置，然后只需控制流进电机线圈电流大小就可以控制转矩力量和转速。

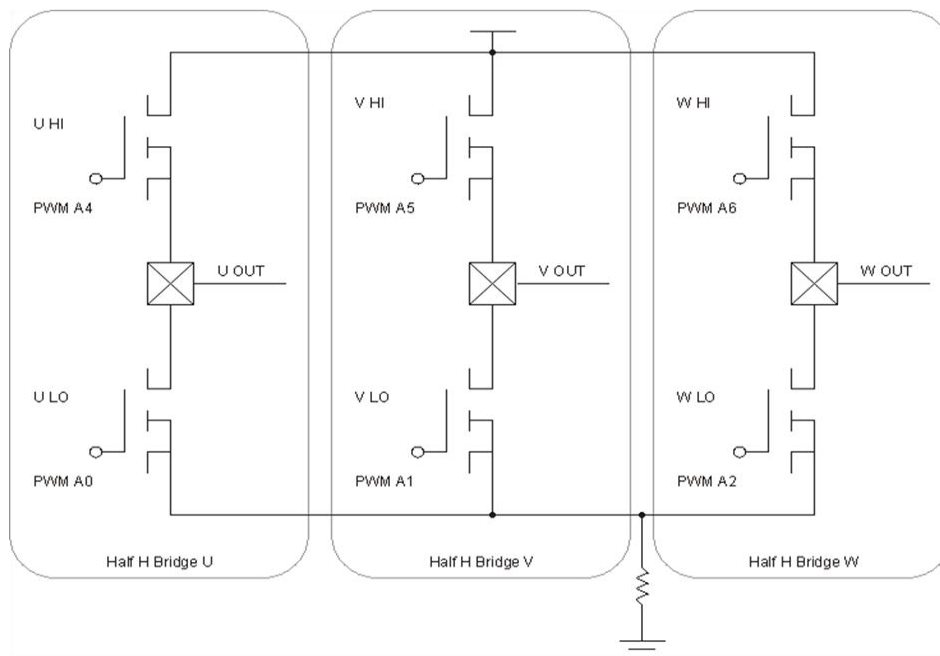
如右图，当电机转子磁场 F_r 在#3 扇区，逆时针旋转，由 WU 位置经过 W+ 到 WV 位置，在 F_r 跨过 W+ 时就产生了过零点，且反电动势电压由正变为负，在 W 相电压上表现为向下的趋势，真正的反电动势电压波形可参考下图，M 通道(红)为反电动势电压，2 通道(蓝)为 W 相桥臂中点电压，1 (黄) 通道为中心点电压，4 通道(绿) 为 W 相电流。因此，可以知道在每个扇区的角平分线上产生过零点。



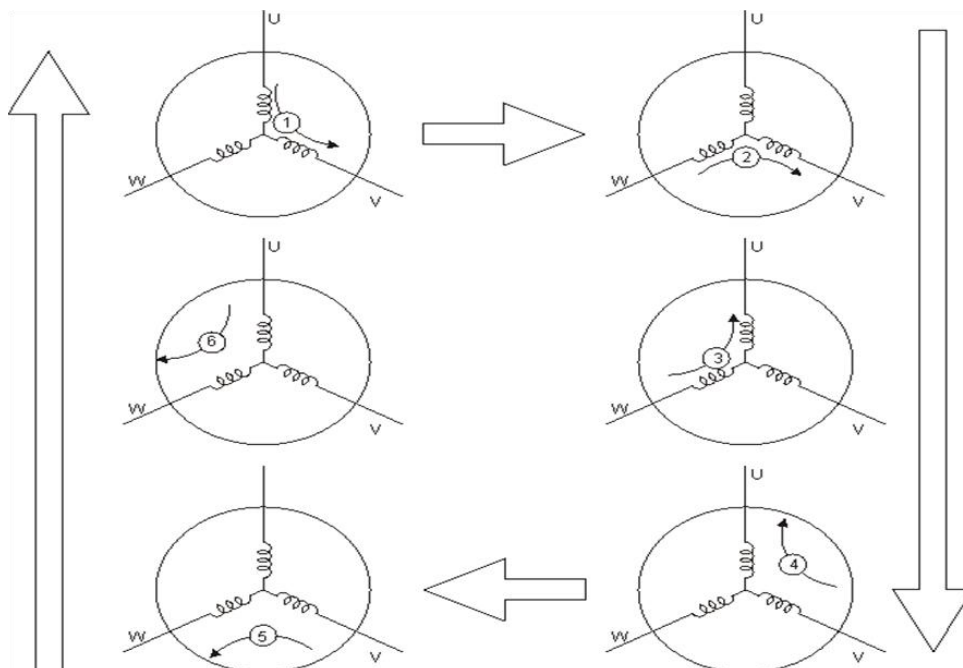
悬空相斜坡电压的解释：如上图，悬空相线圈中没有电流流过时，在悬空相端对地电压成斜坡上升或下降波形，斜坡电压产生有两个因素：其一是电机三相绕组星型接法中心点电机几乎为二分之一母线电压；其二是电机转子在转动时在定子绕组线圈上会产生反电动势，且是正负周期变化的；中心点电压与悬空相反电动势电压就构成了这个斜坡电压。

5 方波控制算法运行时三相桥臂开关管驱动方式的配置

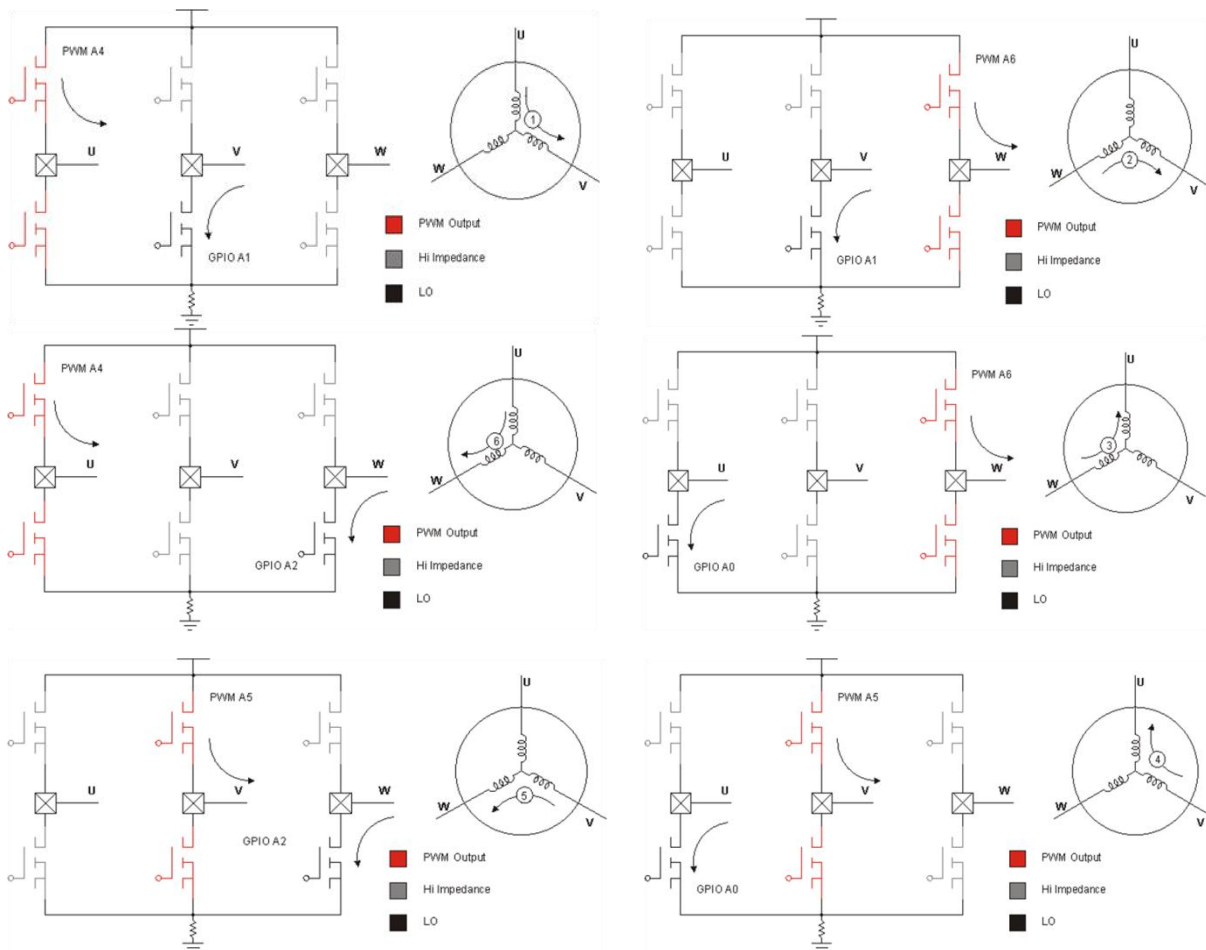
三相桥臂图：



六步状态电流流向



在 Active-semi 提供的 Firmware Demo 里有两种配置，一种方式是一对上下桥臂 PWM 互补方式，另一个桥臂让下管导通，第三个桥臂上下管都不导通；另一种方式是一个桥臂上管 PWM 控制，下管不导通，另一个桥臂下管导通，上管不导通，第三个桥臂上下管都不导通。以下只对第一种方式说明，六种开管状态和电流流向

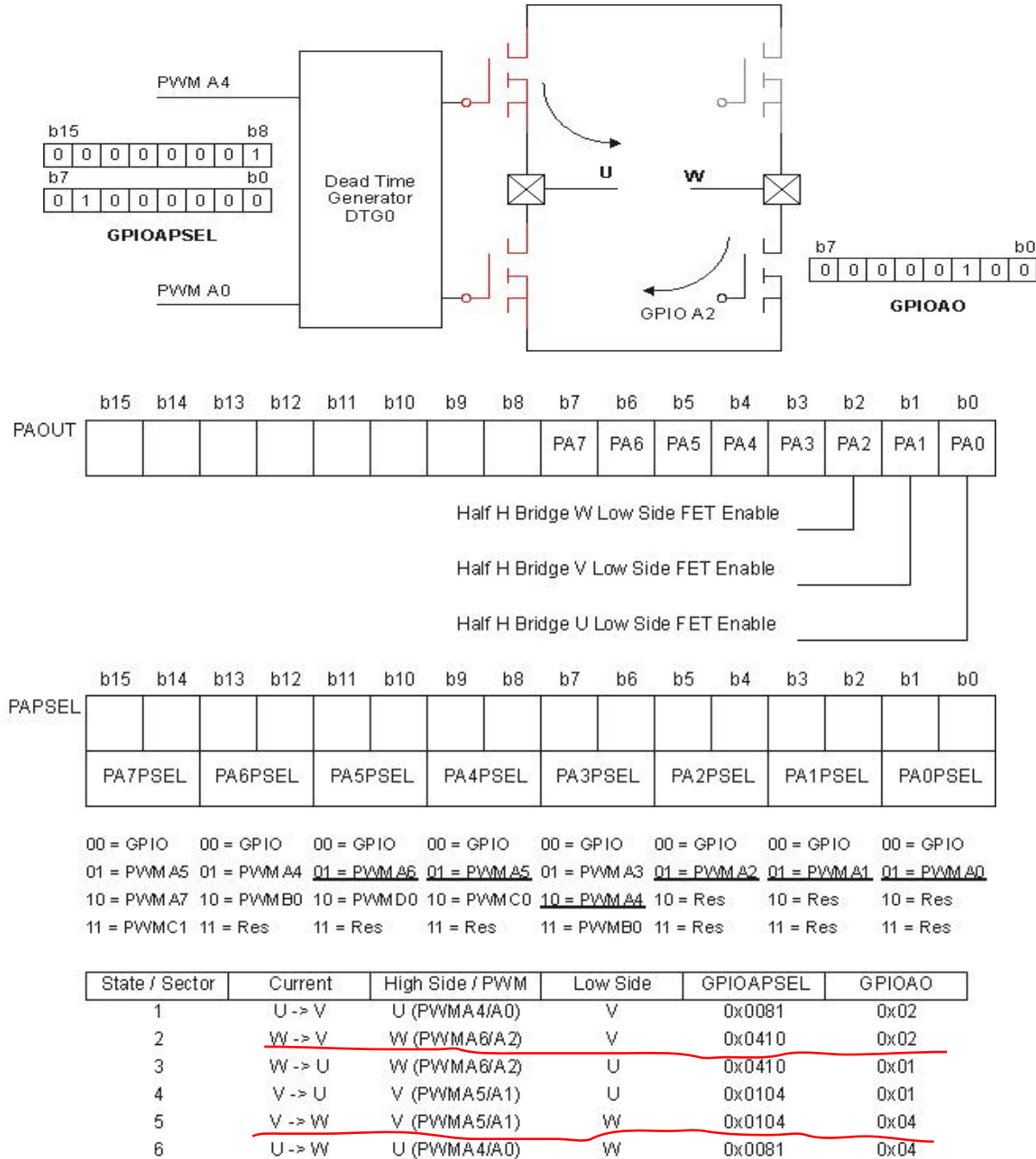


红色：PWM 互补模式
灰色：不导通状态
黑色：GPIO 模式，常导通状态

PAC52xx 驱动的模式配置：

PORT A 必须配置为如下状态之一：

- 引脚如果是驱动 H 桥的低端，必须配置输出位 GPIOA0 为 1. 且引脚 必须被配置配置为 GPIO（GPIOAPSEL）模式。
- 引脚如果是驱动 H 桥的高端，则必须被配置为 PWM 输出模式（GPIOAPSEL）

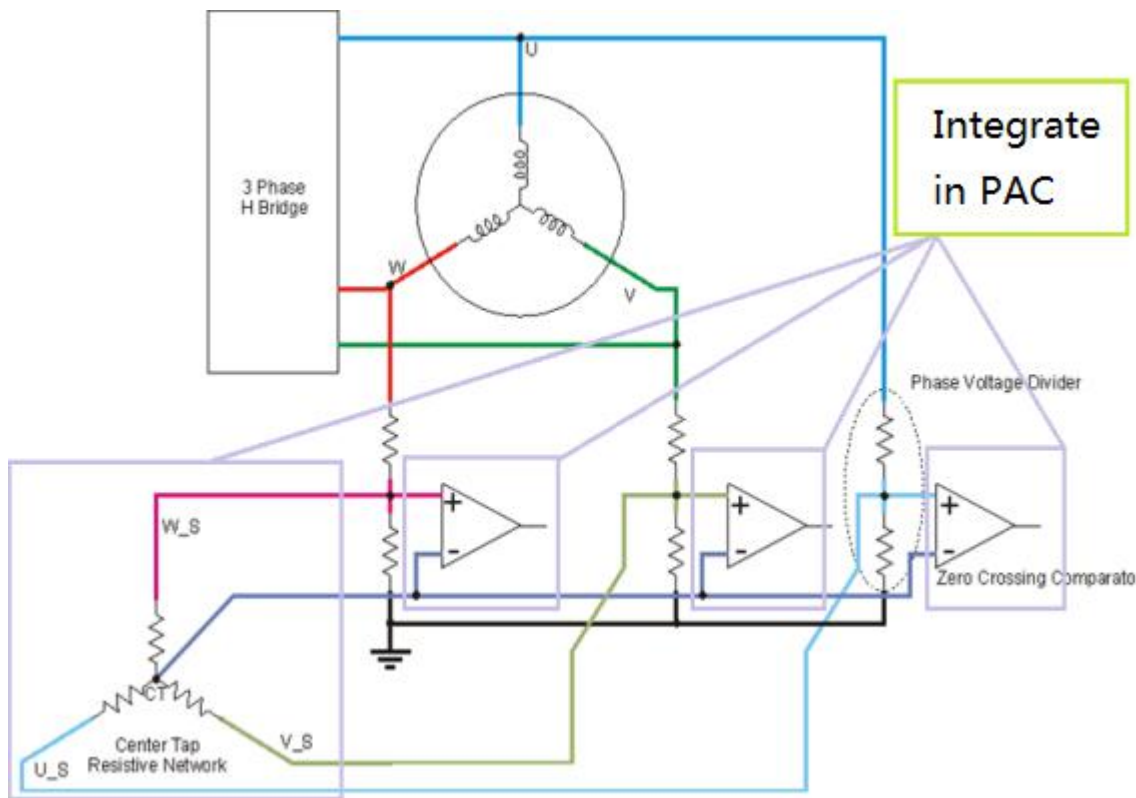


6 AIO7、AIO8、AIO9 作为相比较器工作模式的说明

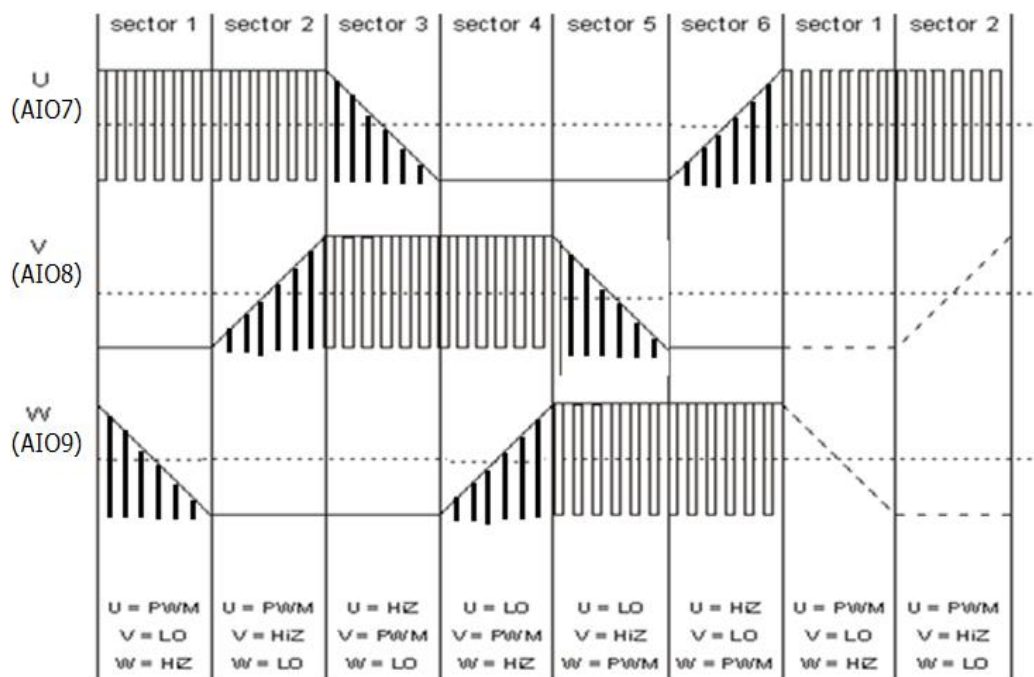
6.1 AIO7、AIO8、AIO9 比较器内部说明

在 PAC52xx 的模拟核里有三个相比较器，三个比较器的同相输入端分别接到 AIO7、AIO8、AIO9 引脚，反相输入端分别接到电阻星型接法的中心点，如上图，三个比较器的输出通过一个多路选择器后接到数字核的 PB7 引脚，想要知道相应比较器的输出，只需打开多路选择器的相应的通道，然后读取 PB7 引脚的电平信号。

系统连接示意图：



反电动势和各相开关管的状态：

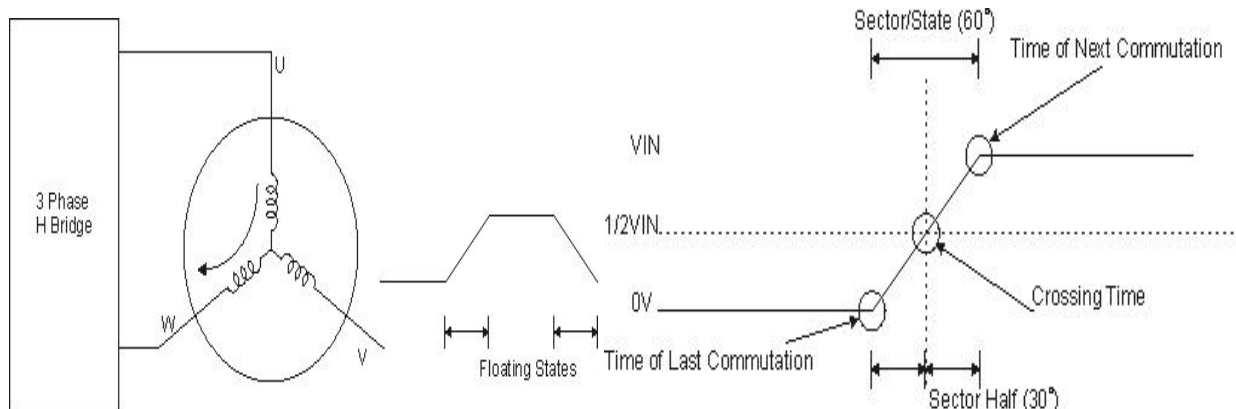


就以上反电动势波形而言，在 sector1/sector4 区间应该将多路选择器设置为读 W 相（AI09）比较器的输出信号，在 sector2/sector5 区间应该将多路选择器设置为读 V 相（AI08）比较器的输出信号，在 sector3/sector6 区间应该将多路选择器设置为读 U 相（AI07）比较器的输出信号。

交叉检测过零点硬件试探法：

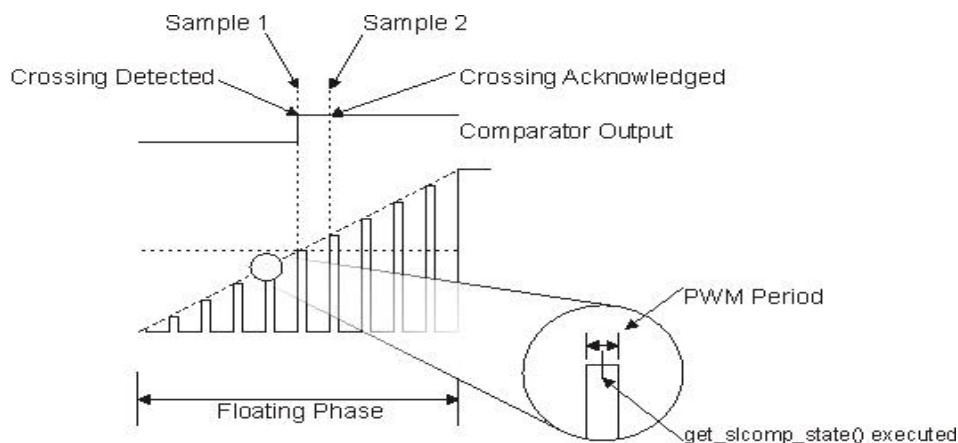
- 相电压必须通过分压电阻网络得到在电压比较器同相输入端额定电压范围内电压（0V—2.5V）。
- 只有比较器被选中，才会读取比较器输出结果，另外两个比较器将被忽略。Firmware 将需要在相应时刻配置选择相应的比较器。
- 以上示意图中的星型连接的电阻（100K Ω ）集成在 PAC 中，中心点可通过寄存器配置连接到比较器的反向输入端。
- 为了获得 $\frac{1}{2}V_{IN}$ （母线电压）值，采用三相星型电阻网络。
- 星型连接的中心点电压总是 $\frac{1}{2}V_{IN}$ 。
- 当发生过零点时一个比较器的输出会发生反转。

6.2 Back EMF 过零检测时序



- 两个绕组通电流, 第三个绕组浮动(高阻抗)。
- 看反电动势上升阶段, 可以被一分为二。
- 当电机转动时浮动的绕组上会产生反电动势, 反电动势电压经过 $\frac{1}{2}V_{IN}$ (母线电压) 值时, 比较器输出会发生反转, 通过读 PB7 引脚电平跳变沿, 可以得到电机转子位置信息。
- 过零点时刻是非常重要的, 因为它提供了一个位置标记, 它告诉我们电机的转子位置和告诉我们下一次换向的时刻和状态。
- 因为我们知道了是哪一相产生了反电动势过零点, 我们可以适当的安排下一个换向。
- 当反电动势电压等于一半的母线电压 ($V_{IN} / 2$) 时, 再过 30° 电角度换相。
- 在这个应用程序中, 定时器 D 将用作测量时间和计算 30° 电频率时间延时, 并产生中断换向。

6.3 Back EMF 过零检测及换向延时



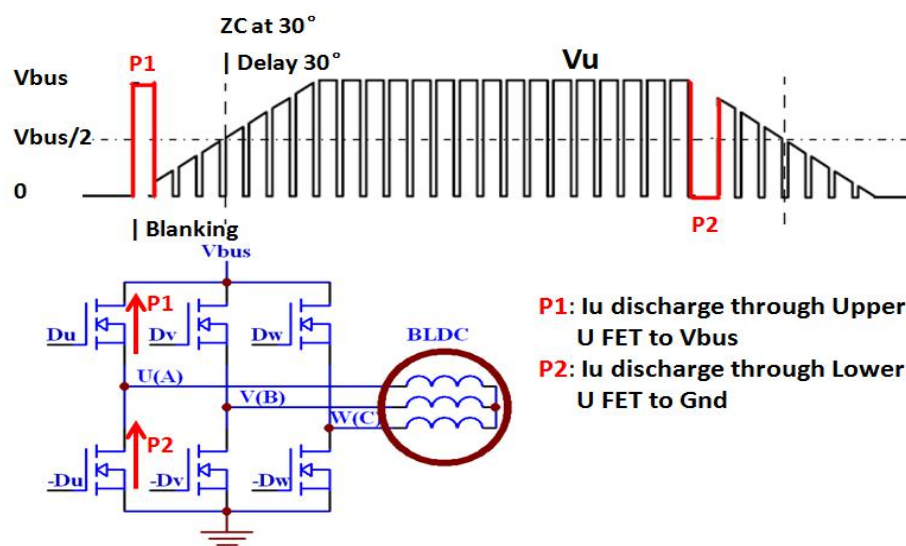
- 一旦预期的过零点发生, 比较器将配置成查询下一个过零点 (`flag_sl_sample = 1`)。
- 在查询比较器过零点的过程中, 每一个 TimerB 周期中断都查询比较器输出结果, 消磁时

间不做查询。

•如果找到预期的比较器输出状态, 并重复确认, 确定是真实过零点后, 读取定时器 D 值。并用定时器 D 值来计算电机运行的转速和 30° 电周期对应的时间, 然后配置定时器 D 的比较寄存器, 等待 30° 电周期对应的时间, 产生定时器 D 比较中断, 安排下一个换向。

6.4 避开换相消磁时间

Blanking & Delay Time in Bemf



在换相时, 不导通相绕组需要一段时间去磁, 在此期间, 因电感上电流不能突变, 电机定子绕组的电流持续在相同的方向, 且电流会持续下降到零, 在此期间, 悬空相线圈电压会拉高到母线和拉低到底 (有电流续流方向决定) 在检测过零点时, 需要避过去磁事件。

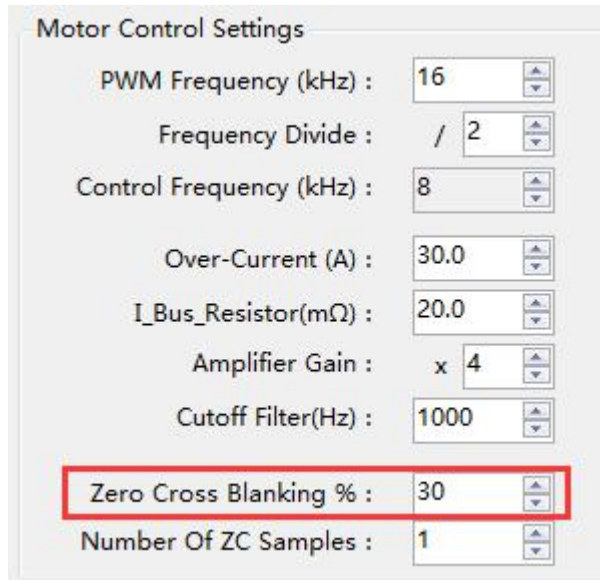
加载后, 随负载功率的增大, 电机绕组电流也增大, 当在换相时, 会突然关断开关管, 由于电感上电流不能突变, 且电感上电压 $U = L \cdot (di/dt)$, 若突然使某一半桥臂上下管都断开, 此时此桥臂对应的电机绕组上的电流需要续流回路减小电流:

P1 的解释: 若此桥臂对应的电机绕组上的电流方向为电机绕组中心点流向上下桥臂中点, 则在此桥臂中点将产生高电压, 又由于在此峭壁上管内部集成了反向二极管, 此时另一桥臂下管闭合接地, 因此形成续流回路, 电机绕组上电流会流向母线正极, 此时此桥臂中点电压将略低于母线电压一个二极管压降。

P2 的解释: 若此桥臂对应的电机绕组上的电流方向为上下桥臂中点流向电机绕组中心点, 由于在此峭壁下管内部集成了反向二极管, 此时另一桥臂下管闭合接地, 因此形成续

流回路，此时，电机绕组上电流会经此桥臂下管流向另一桥臂下管，此时此桥臂中点电压将略高于地电压一个二极管压降。

电机绕组电流越大，需要放电时间越长。因此，在程序控制流程中，需要一段 Blanking 时间，跳过这段时间，此段时间内不去监测过零点。在 GUI 上的参数是如下图红色框的内容，这个百分比指的是以电机运行时 60° 电角度的时间为基准，计算得 $\text{Blanking time} = 30\% * \text{time}_{60^\circ}$ ：



The image shows a screenshot of the 'Motor Control Settings' window. It contains several parameters with input fields and up/down arrows. The 'Zero Cross Blanking %' parameter is highlighted with a red rectangular box. The values for the other parameters are: PWM Frequency (kHz) : 16, Frequency Divide : / 2, Control Frequency (kHz) : 8, Over-Current (A) : 30.0, I_Bus_Resistor(mΩ) : 20.0, Amplifier Gain : x 4, Cutoff Filter(Hz) : 1000, Zero Cross Blanking % : 30, and Number Of ZC Samples : 1.

Motor Control Settings	
PWM Frequency (kHz) :	16
Frequency Divide :	/ 2
Control Frequency (kHz) :	8
Over-Current (A) :	30.0
I_Bus_Resistor(mΩ) :	20.0
Amplifier Gain :	x 4
Cutoff Filter(Hz) :	1000
Zero Cross Blanking % :	30
Number Of ZC Samples :	1

更改履历

(日期) (更改事项)