



大联大·芯通路



高速MCU实现小体积300W BLDC马达控制

Orson Chen
应用技术处
友尚集团

大纲

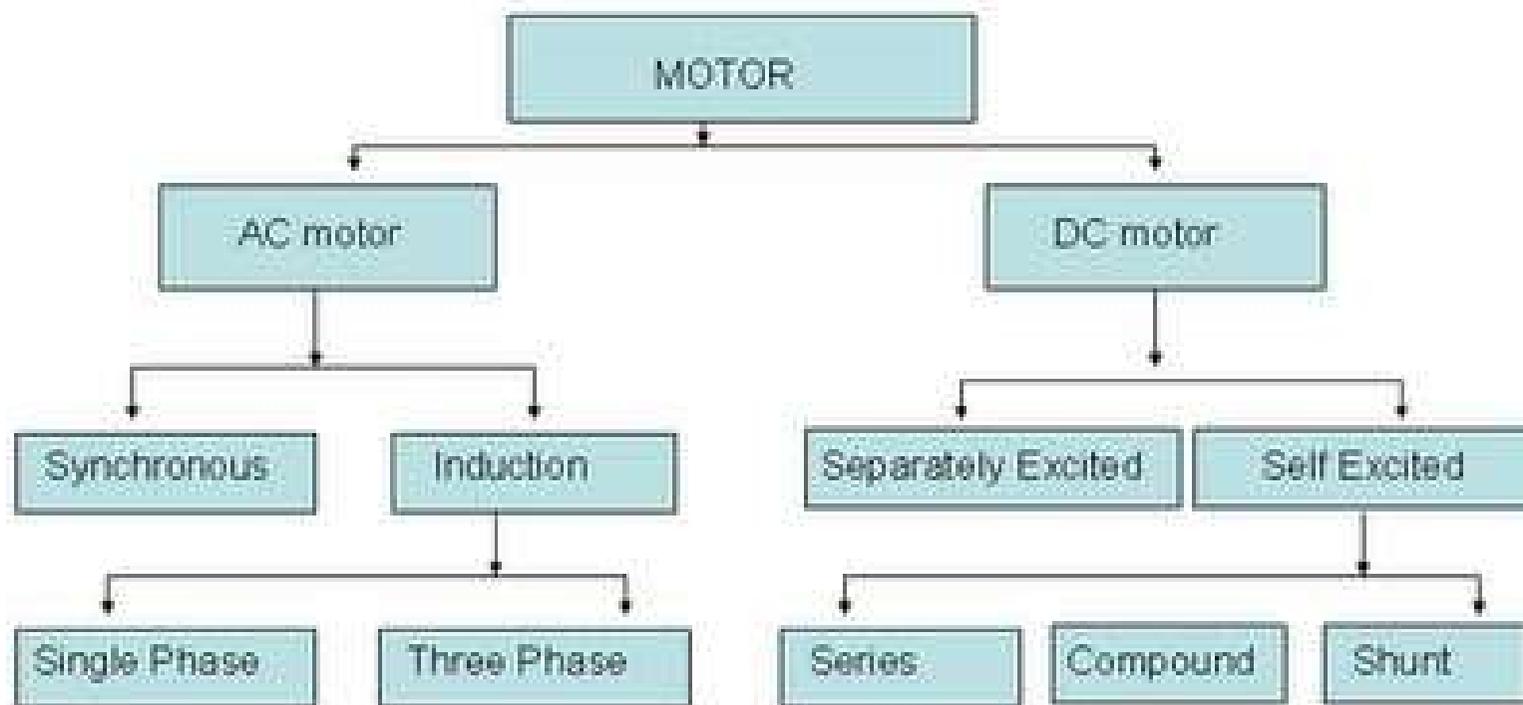
1. 电机简介
2. 永磁同步(PMSM)/直流无刷(BLDC)电机数学模型
3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式
 - 系统架构
 - FOC控制法则
 - 无转子侦测传感器 (rotor position sensorless)
 - 电机启动
4. STM32G4应用

大纲

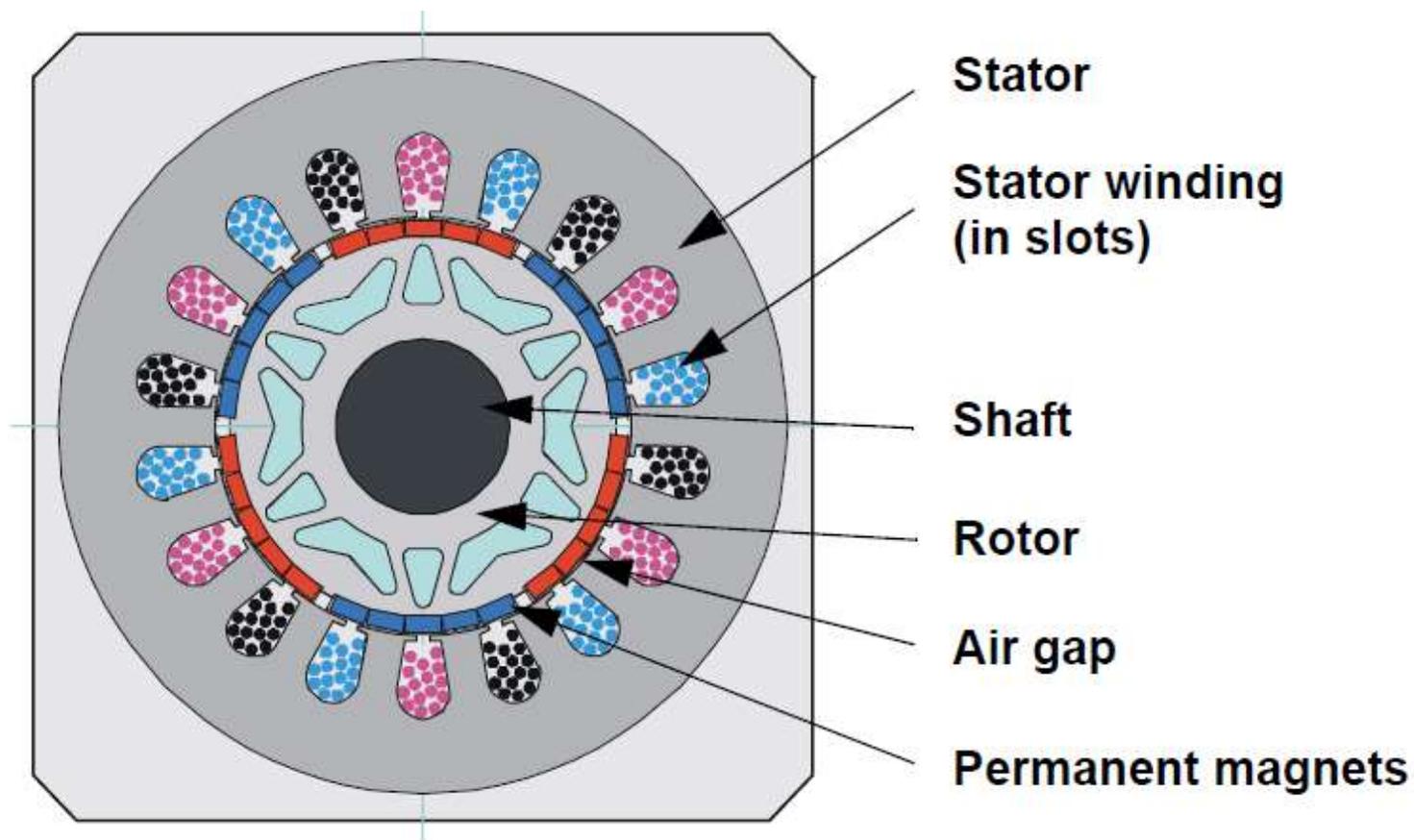
1. 电机简介
2. 永磁同步(PMSM)/直流无刷(BLDC)电机数学模型
3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式
 - 系统架构
 - FOC控制法则
 - 无转子侦测传感器 (rotor position sensorless)
 - 电机启动
4. STM32G4应用

1. 电机简介

电机分类



1. 电机简介



1. 电机简介

分类

1) DC machine ;

2) Brushless DC Machine ;

■ 反电动势(Back EMF)梯形波 → 相与相之间换相差 $T_e = T_E + \Delta T_e$

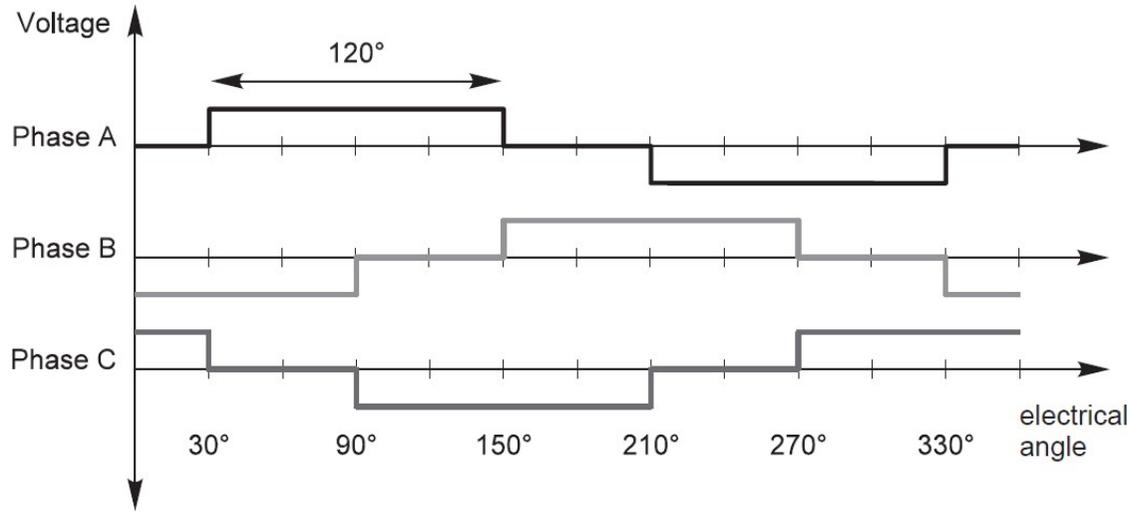
■ 反电动势(Back EMF)正弦波 → (佳) $\Delta T_e \approx 0$

其中 ΔT_e 为顿转转矩(cogging torque)

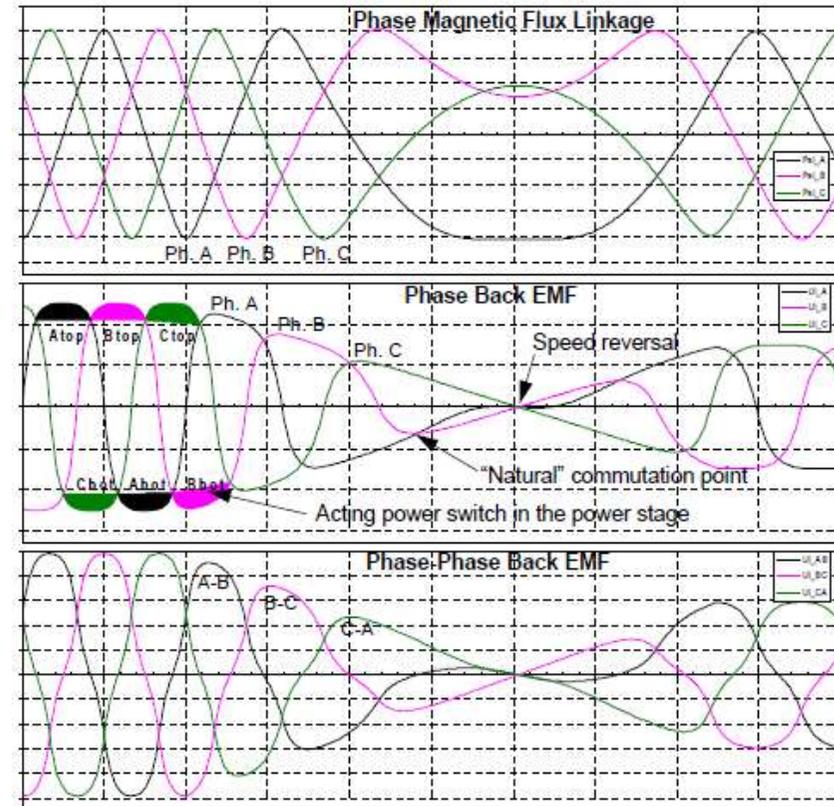
3) 转子可分为圆柱型及凸极式。

1. 电机简介

反电动势梯形波



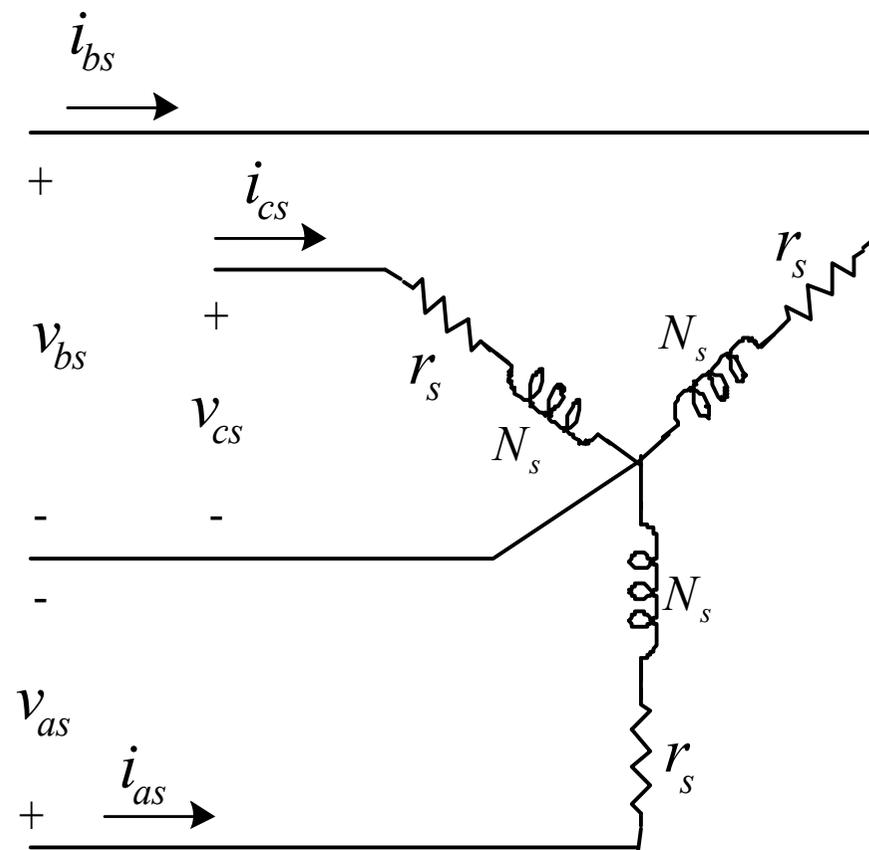
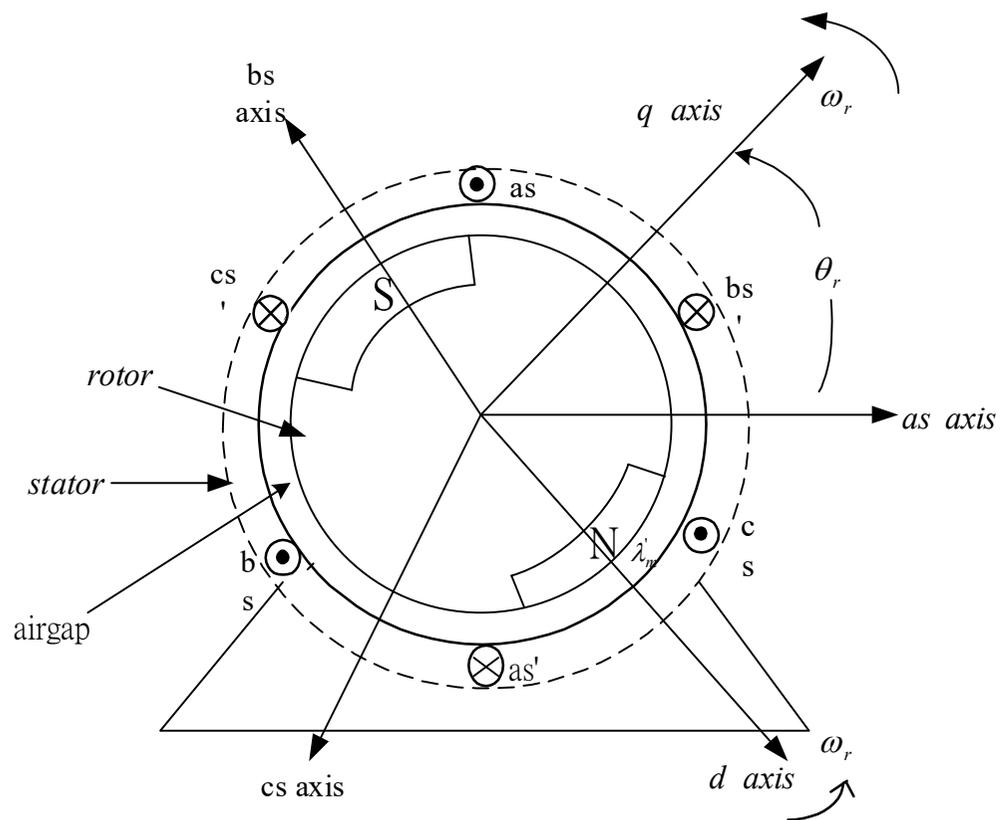
反电动势正弦波



大纲

1. 电机简介
2. 永磁同步(PMSM)/直流无刷(BLDC)电机数学模型
3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式
 - 系统架构
 - FOC控制法则
 - 无转子侦测传感器 (rotor position sensorless)
 - 电机启动
4. STM32G4应用

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型



2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

电压方程式(Voltage Equation)

$$v_{abc s} = \tilde{r}_s i_{abc s} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc s}$$

其中

$$v_{abc s} = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T$$

$$i_{abc s} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T$$

$$\lambda_{abc s} = [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^T$$

$$\tilde{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

磁交链方程式(Flux-linkage equation)

$$\lambda_{abc s} = \tilde{L}_s i_{abc s} + \tilde{\lambda}'_m$$

其中

$$\tilde{L}_s = \begin{bmatrix} \text{自感} & \text{互感} & \\ L_{\ell s} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{\ell s} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{\ell s} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$L_{\ell s}$: 漏感

$$L_{ms} : \frac{N_s^2}{\mathcal{R}_m}$$

$$\frac{N_s^2}{\mathcal{R}_m} \cos(120^\circ) = -\frac{1}{2} \frac{N_s^2}{\mathcal{R}_m}$$

$$\frac{N_s^2}{\mathcal{R}_m} \cos(240^\circ) = -\frac{1}{2} \frac{N_s^2}{\mathcal{R}_m}$$

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

磁交链方程式(Flux-linkage equation)

$$\lambda_{abcs} = \widetilde{L}_s i_{abcs} + \tilde{\lambda}'_m$$

其中

$$\tilde{\lambda}'_m = \lambda'_m [\cos(90^\circ - \theta_r) \quad \cos(90^\circ - \theta_r + 120^\circ) \quad \cos(90^\circ - \theta_r + 240^\circ)]^T$$

$$= \lambda'_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - 120^\circ) \\ \sin(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$= \lambda'_m [\sin \theta_r \quad \sin(\theta_r - 120^\circ) \quad \sin(\theta_r + 120^\circ)]^T$$

λ'_m : 转子等效至定子侧的磁通链

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

电磁转矩方程式(Torque Equation) 输出方程式(Output Equation)

扭力控制

令

$$i_{as} = I_m \cos \theta_i$$

$$i_{bs} = I_m \cos(\theta_i - 120^\circ)$$

$$i_{cs} = I_m \cos(\theta_i + 120^\circ)$$

$$\Rightarrow T_e = \frac{3}{2} \frac{N_P}{2} I_m \lambda'_m \cos(\theta_i - \theta_r)$$

再令 $\theta_i = \theta_r$

$$\text{则 } T_e = \frac{3}{2} \frac{N_P}{2} \lambda'_m I_m = k_T I_m$$

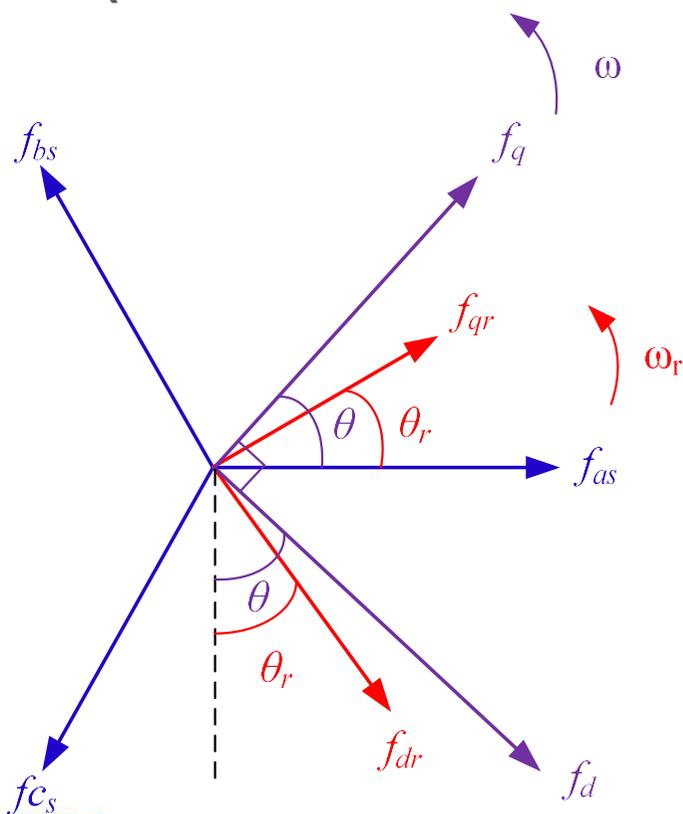
$$\begin{aligned} T_e &= J \frac{d}{dt} \omega_{rm} + B \omega_{rm} + T_L \\ &= \frac{2}{N_P} J \frac{d}{dt} \omega_r + \frac{2}{N_P} B \omega_r + T_L \end{aligned}$$

其中

B	电动机黏滞系数
J	电动机的惯量
T_e	电动机产生的电磁转矩
T_L	负载转矩
ω_{rm}	转子机械角速度
ω_r	转子电机角速度

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

坐标轴转换(Clarke & Park Transformation)



f_{abcs} : 静止三轴

f_{qd0s} : 静止两轴

f_{qd0r} : 旋转两轴

其中

$$\theta = \int \omega dt$$

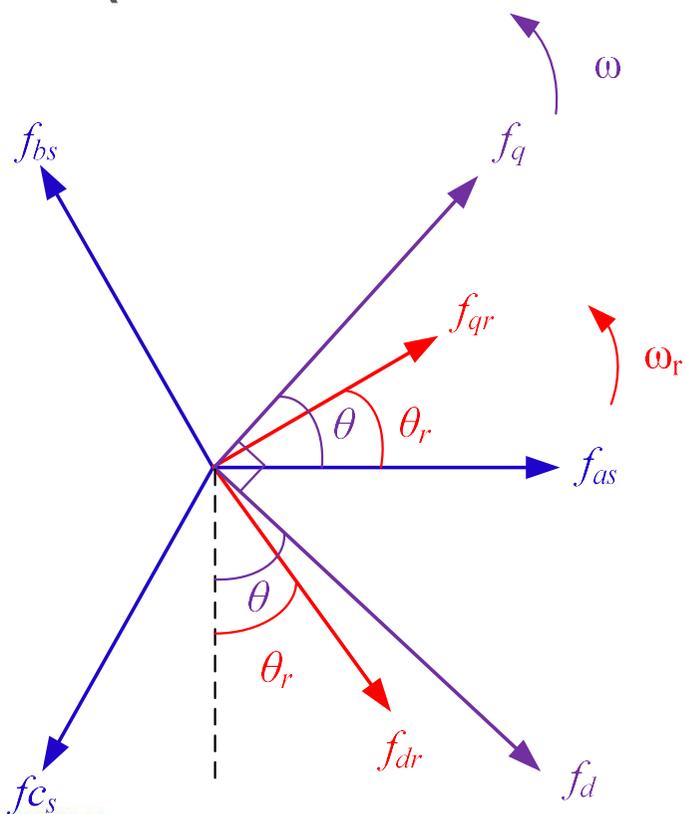
$$\theta_r = \int \omega_r dt$$

$$f_{qd0s} = k_s f_{abcs}$$

$$f_{abcs} = k_s^{-1} f_{qd0s}$$

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

坐标轴转换(Clarke & Park Transformation)



$$K_S = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$K_S^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix}$$

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

电压方程式(Voltage Equation)

$$v_{abcs} = \tilde{r}_s i_{abcs} + \tilde{L}_s \frac{d}{dt} i_{abcs} + e_{abcs}$$

其中

$$\tilde{L}_s = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad L_s = L_{\ell s} + \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$\tilde{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad L_{ms} : \frac{N_s^2}{\mathcal{R}_\ell}$$

$$e_{abcs} = \omega_r \lambda'_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} K_s v_{abcs} &= K_s \tilde{r}_s K_s^{-1} i_{qd0s} + K_s \tilde{L}_s \left[\frac{d}{dt} K_s^{-1} i_{qd0s} \right] + K_s e_{abcs} \\ &= \tilde{r}_s i_{qd0s} + K_s \tilde{L}_s K_s^{-1} \frac{d}{dt} i_{qd0s} + K_s \tilde{L}_s \left(\frac{d}{dt} K_s^{-1} \right) i_{qd0s} + e_{qd0s} \\ &= \tilde{r}_s i_{qd0s} + \tilde{L}_s \frac{d}{dt} i_{qd0s} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L_s & 0 \\ -\omega L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_{qd0s} + e_{qd0s} \\ &= v_{qd0s} \end{aligned}$$

其中

$$e_{qd0s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \omega_r \lambda'_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

磁交链方程式(Flux-linkage Equation)

$$\lambda_{abcS} = \tilde{L}_S i_{abcS} + \tilde{\lambda}'_m$$

其中

$$\tilde{\lambda}'_m = \lambda'_m \begin{bmatrix} \sin\theta_r \\ \sin(\theta_r - 120^\circ) \\ \sin(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow K_S \lambda_{abcS} = K_S \tilde{L}_S K_S^{-1} i_{qd0S} + K_S \tilde{\lambda}'_m$$

$$\Rightarrow \lambda_{qd0S} = \tilde{L}_S i_{qd0S} + K_S \tilde{\lambda}'_m$$

$$\lambda_{qd0S} = \tilde{L}_S i_{qd0S} + K_S \tilde{\lambda}'_m$$

其中

$$K_S \tilde{\lambda}'_m = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \lambda'_m \begin{bmatrix} \sin\theta_r \\ \sin(\theta_r - 120^\circ) \\ \sin(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \lambda_{qd0S} = \tilde{L}_S i_{qd0S} + \lambda'_m \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \theta_r) \\ \cos(\theta - \theta_r) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \lambda_{qS} = L_S i_{qS} - \lambda'_m \sin(\theta - \theta_r) \\ \lambda_{dS} = L_S i_{dS} + \lambda'_m \cos(\theta - \theta_r) \\ \lambda_{oS} \text{ 忽略不考虑 (无 } i_{oS}) \end{cases}$$

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

电磁转矩方程式(Torque Equation) Output Equation (输出方程式)

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} (\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r) \\ &= \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} [(L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r + \lambda'_m i_{qs}^r] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_r &= \frac{N_p}{2J} \left[T_e - B \frac{2}{N_p} \omega_r - T_L \right] \\ &= \frac{N_p}{2J} T_e - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{N_p}{2J} T_L \end{aligned}$$

$$\omega_r = \frac{N_p}{2} \omega_{rm}$$

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

参数量测

- 1) 利用电压、电流与转速回授讯号，针对电机进行参数量测；
- 2) 藉由驱动器来驱动电机带动永磁式同步/直流无刷发电机，使之以发电机模式运转；
- 3) 利用无载时之端电压值之量测，配合应电势的关系，以换算转子等效磁通链 λ'_m
- 4) 在量测交、直轴电感(L_q 、 L_d)时，采用在发电机输出端加入电阻负载，在不同负载下量测定子侧相电压及相电流，将发电机之相电压及相电流回授经程序处理转子旋转坐标轴转换，并配合稳态数学模式，以计算交、直轴电感值。

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

参数量测(转子等效磁通链 λ'_m 量测) λ'_m

回授发电机输出 \Rightarrow

$$\begin{bmatrix} v_{aG} \\ v_{bG} \\ v_{cG} \end{bmatrix} = E_{mG} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

其中 E_{mG} 为内电势之每相相电压峰值。因发电机此时操作于无载状态下，输出之相电压等于发电机应电势。

由永磁式同步机转速可得转子等效至定子侧之磁通链 λ'_m 为

$$\lambda'_m = \frac{E_{mG}}{\omega_r} (V - s/rad)$$

由上式得知，由发电机转速与其输出相电压峰值之比，即可得转子等效至定子侧之磁通链。

三相永磁式同步发电机运转于200 rpm之实测结果：
(a) 三相感应电势；(b) a相感应电势之谐波失真频谱分析

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

参数量测(转子等效磁通链 λ'_m 量测) λ'_m

发电机绕组不同转速下等效至定子侧之磁通链

$\omega_r(\text{rpm})$	50	100	150	200	250	300
$E_{mG}(\text{V})$	19.80	39.60	59.41	79.02	99.03	118.92
$\lambda'_m(\text{V-s/rad})$	0.3438	0.3438	0.3438	0.3438	0.3438	0.3441

三相永磁式同步发电机机械转速 与反电动势峰值关系图

2. 永磁同步/直流无刷电机数学模型

参数量测(交、直轴等效电感 L_q 及 L_d 量测)

发电机运转的稳态电压方程式为 \Rightarrow

$$\omega_r \lambda'_m = v_{qG}^r + R_s i_{qG}^r + \omega_r L_d i_{dG}^r$$

$$0 = v_{dG}^r + R_s i_{dG}^r - \omega_r L_q i_{qG}^r$$

整理上式可得交、直轴电感 L_q 及 L_d 为 \Rightarrow

$$L_q = \frac{1}{\omega_r i_{qG}^r} [v_{dG}^r + R_s i_{dG}^r]$$

$$L_d = \frac{1}{\omega_r i_{dG}^r} [\omega_r \lambda'_m - v_{qG}^r - R_s i_{qG}^r]$$

依上式，则可计算电感 L_q 及 L_d 。

$$L_q = \frac{1}{\omega_r i_{qG}^r} [v_{dG}^r + R_s i_{dG}^r]$$

$$L_d = \frac{1}{\omega_r i_{dG}^r} [\omega_r \lambda'_m - v_{qG}^r - R_s i_{qG}^r]$$

若电器负载箱为三相纯电阻负载，其输出功率 P_o 及 Q_o \Rightarrow

$$P_o = \frac{3}{2} (v_{qG}^r i_{qG}^r + v_{dG}^r i_{dG}^r)$$

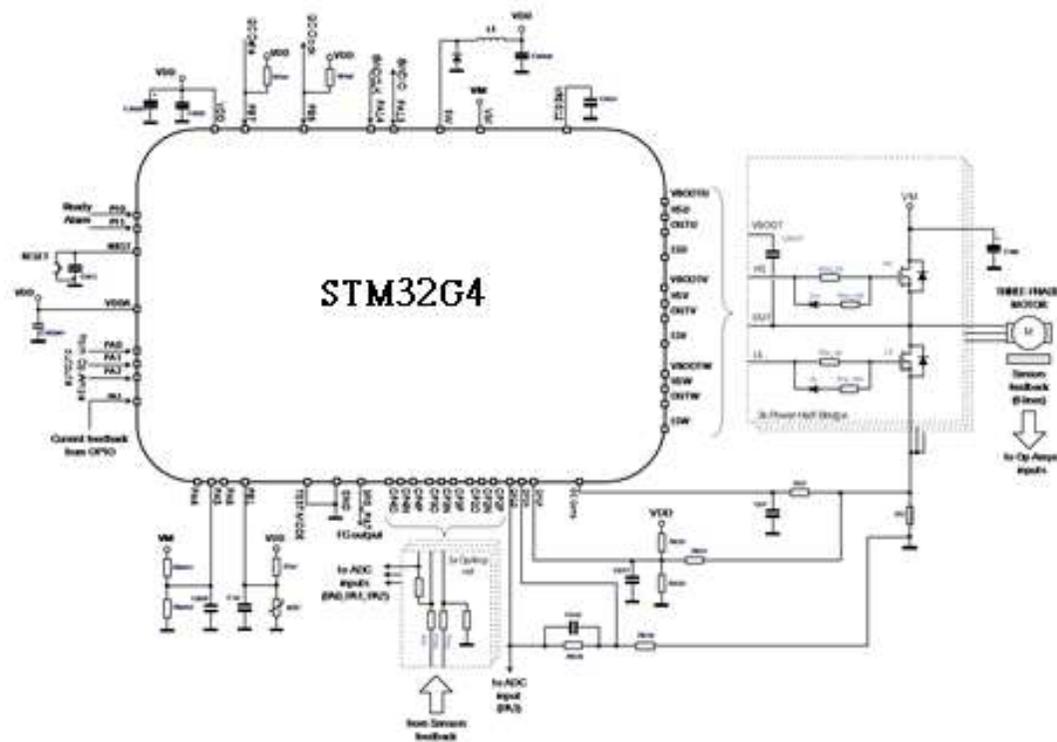
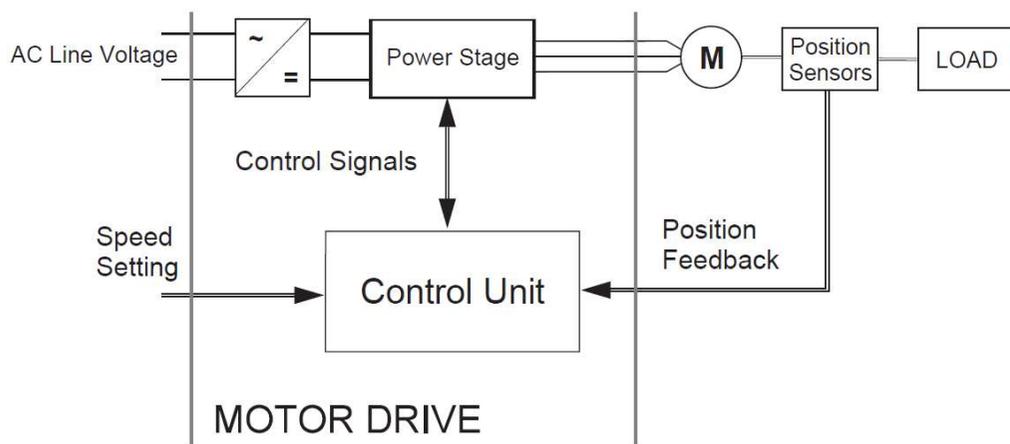
$$Q_o = \frac{3}{2} (v_{qG}^r i_{dG}^r - v_{dG}^r i_{qG}^r)$$

大綱

1. 电机简介
2. 永磁同步(PMSM)/直流无刷(BLDC)电机数学模型
3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式
 - 系统架构
 - FOC控制法则
 - 无转子侦测传感器 (rotor position sensorless)
 - 电机启动
4. STM32G4应用

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

系统架构



3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(开回路)

- 1) 开回路运转由于无法侦测转子磁极位置及转速的变化，所以无法得知正确的转子角度及作电压补偿；
- 2) 如果电压加得太少则加载有失步的可能；
- 3) 电压加得太大于无载时又会使得铁心饱和，电流产生畸变，使得转子抖动的情形更加严重；
- 4) 开回路控制的效率不好且在负载常变动的场合下更控制不易。

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(开回路)

- 1) 在无载转速1200rpm时加载使得转速降至700rpm，此时功率为66W；
- 2) 在电压不足的情形下，无载时还能维持转速，但是一但加载，就失步了；
- 3) 在电压过大的情况下，同步电动机就算减少负载也会一直在高电压下工作，此时会造成铁心饱和使得转子抖动，也会造成不必要的损失，使得效率降低；
- 4) 在负载变动的情形下为了避免转子抖动及提高效率，需要有电压补偿之转速闭回路控制来改善开回路控制之缺点。

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(转速闭环)

- 1) 为了改善开回路控制的缺点，使用**转速闭环**控制系统可使转速稳定并增加系统的可控性；
- 2) 转速闭环须加上**编码器/霍尔传感器**以侦测转子位置及角度但会增加硬件成本；
- 3) 转速闭环系统系利用磁场导向方法，令 $i_{ds}^* = 0$ ，使得磁场磁通固定；
- 4) 在稳态下 q 、 d 轴之电压方程式为 \Rightarrow

$$v_{qs}^* = r_s i_{qs}^* + \omega_r \lambda'_m$$

$$v_{ds}^* = -\omega_r L_q i_{qs}^*$$

由以上二式可知命令电压完全由 q 轴命令电流 i_{qs}^* 及转速决定；

- 5) 利用PI控制器使 i_{qs}^* 经由 $\Delta\omega_{rm}$ 的变化，进而调整 v_{qs}^* 及 v_{ds}^* 使之达到一稳态值，并使**实际转速**与**命令转速**相同；
- 6) PI控制器数字化 \Rightarrow

$$i_{qs}^* = \Delta\omega_{rm} \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right)$$

由 z 转换 $\frac{1}{S} = \frac{T_s z+1}{2 z-1}$ ，上式经 z 转换后可得

$$i_{qs}^* = \left\{ K_p \Delta\omega_r(k) + K_i \frac{T_s}{2} [\Delta\omega_r(k) + \Delta\omega_r(k-1)] \right\}$$

由上式可知当实际转速小于命令转速误差增大时 i_{qs}^* 也随之增加， v_{qs}^* 往正的方向增加， v_{ds}^* 往负的方向增加，使得中断周期的变化角度 $\Delta\theta$ 增加。

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(转速闭环)

- 1) 使用PI控制器作为转速调节器，适当的调整参数值可使系统响应快且稳态误差为零；
- 2) 由动态方程式中 i_{qs}^* 的调整使得电压得以补偿，以维持命令转速；
- 3) 其响应时间随着PI控制器的调整而不同。

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(转速闭环)

- 1) 当负载增加时转速会随之减少，原因是负载电流增加造成定子侧压降增加，实际上作用于转子的电压会不足以维持命令转速，所以会使转速下降；
- 2) 当加载时 i_{ds} 并不为零，此时的 i_{ds} 是虚功电流，电源电流会增大并使得功率因子下降，但是经由调整同步电动机参数值可改善这种情形；
- 3) 不当的参数值也会对系统造成不良的影响，由此可知参数的变动对于转速闭环系统有很大的影响；
- 4) 要可加入电流回路以使实际电流追上命令电流。

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(电流及转速闭环)

- 1) 转速闭环载入后 $i_{ds} \neq 0$ ，
使得功率因子下降；
- 2) 要改善这种情形则须加
电流回路，迫使实际电流
追上命令电流；

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(电流及转速闭环)

- 1) 电流及转速闭环控制方法系利用**磁场导向控制**($i_{ds}^* = 0$) ;
- 2) 磁场导向控制方法并不能得到最大转矩 ;
- 3) 若永磁式同步电动机等效之交直轴电感不相等($L_d \neq L_q$) , 则可藉由控制 $i_{ds} \neq 0$ 增加磁阻转矩 , 在同样的负载下可使马达输入功率下降 , 达到**改善效率**的目的 ;

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

FOC控制法则(电流及转速闭环)

- 4) 在高转速下，由于转子反电势增加太大，直流链电压无法供应足够的电流来驱动马达，转速无法继续上升，因此要使转速继续上升，势必要减弱转子磁通，此即所谓的弱磁控制(Flux-Weakening Control)。

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

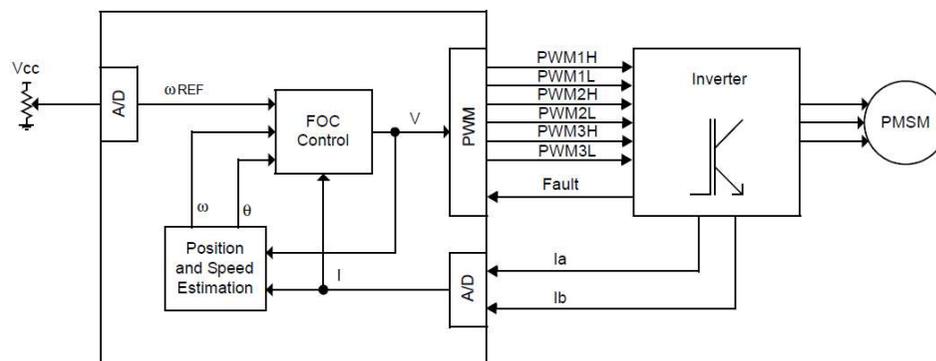
无转子侦测传感器

- 1) Direct back EMF detection
 - 2) Estimation of back EMF
 - 3) Injecting diagnosis signal to the stator winding
 - 4) Monitoring switching states in the inverter
 - 5) Using a special windings or electromagnetic devices
 - 6) Monitoring current or calculation method of the phase inductance
 - 7) **Observer methods**
 - 8) The third harmonic voltage detection
- 转子起始位置：未知
 - $\theta_m \Rightarrow$ 未知

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

无转子侦测传感器

- 1) 无转子侦测传感器FOC控制法是利用估测转子位置算法完成；
- 2) 利用量测电机定子电压及电流实现估计转子位置算法；
- 3) 估测转子位置算法可计算转子角度及转速。



3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

无转子侦测传感器FOC控制

电压方程式 \Rightarrow

$$v_{qd0s} = \tilde{r}_s i_{qd0s} + \tilde{L}_s \frac{d}{dt} i_{qd0s} + e_{qd0s}$$

其中

i_{qd0s} = 电机电流;

v_{qd0s} = 电机电压;

e_{qd0s} = 电机反电动势;

$$\tilde{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

r_s 绕组电阻; L_s 绕组电感

$$\frac{d}{dt} i_{qd0s} = -\frac{r_s}{L_s} i_{qd0s} + \frac{1}{L_s} (v_{qd0s} - e_{qd0s})$$

$$\frac{d}{dt} i_{qd0s} = -\frac{r_s}{L_s} i_{qd0s} + \frac{1}{L_s} (v_{qd0s} - e_{qd0s})$$

数字化后 \Rightarrow

$$\begin{aligned} & \frac{i_{qd0s}(n+1) - i_{qd0s}(n)}{T_s} \\ & = -\frac{r_s}{L_s} i_{qd0s}(n) + \frac{1}{L_s} [v_{qd0s}(n) - e_{qd0s}(n)] \end{aligned}$$

其中 T_s 为控制周期

$$\begin{aligned} & i_{qd0s}(n+1) \\ & = \left(1 - \frac{T_s r_s}{L_s}\right) i_{qd0s}(n) + \frac{T_s}{L_s} [v_{qd0s}(n) - e_{qd0s}(n)] \end{aligned}$$

3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

无转子侦测传感器FOC控制

$$i_{qd0s}(n+1) = \left(1 - \frac{T_s r_s}{L_s}\right) i_{qd0s}(n) + \frac{T_s}{L_s} [v_{qd0s}(n) - e_{qd0s}(n)]$$

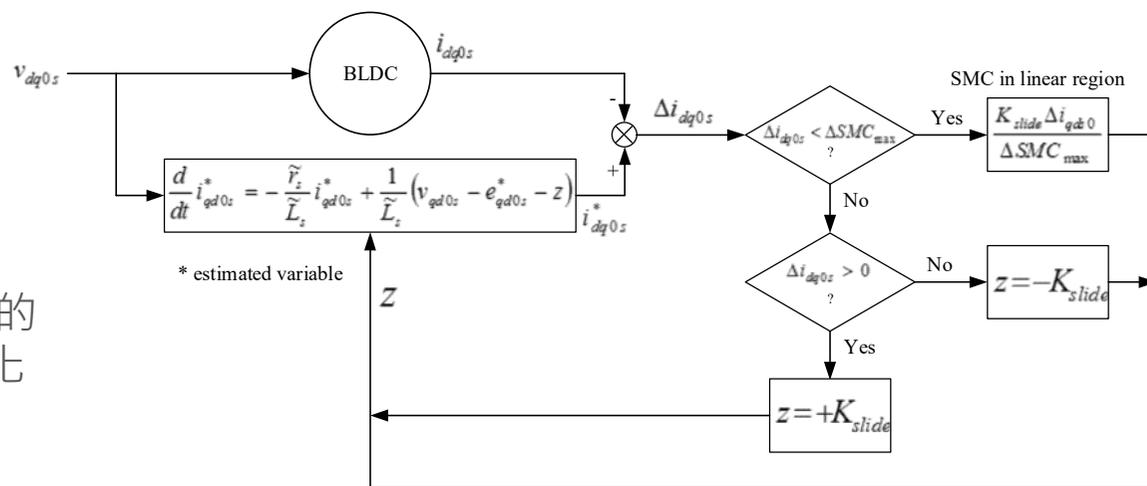
$$\text{令 } F = 1 - \frac{T_s r_s}{L_s}, G = \frac{T_s}{L_s}$$

$$\Rightarrow i_{qd0s}(n+1) = F i_{qd0s}(n) + G [v_{qd0s}(n) - e_{qd0s}(n)]$$

数字化模型提供软件实现，但是为了匹配测量的电流和估计的电流，需要使用闭环校正数字化电机模型。

电流估计器

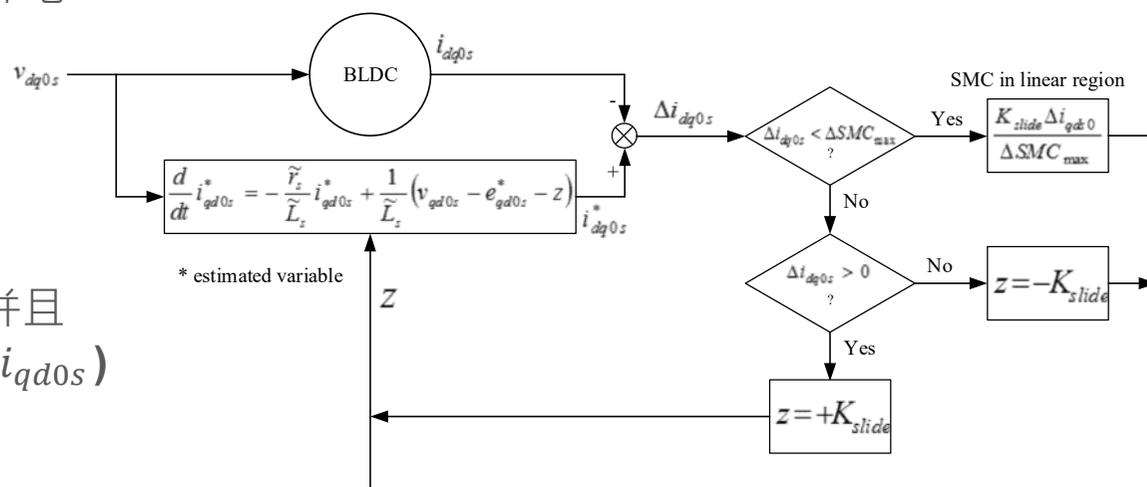
将测得的电流(i_{qd0s})与模型中的估计电流(i_{qd0s}^*)进行匹配，我们可以假设来自数字化模型的电机反电动势(e_{qd0s}^*)与实际电机反电动势(e_{qd0s})相同。



3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

滑模控制器(Slid-mode Controller)

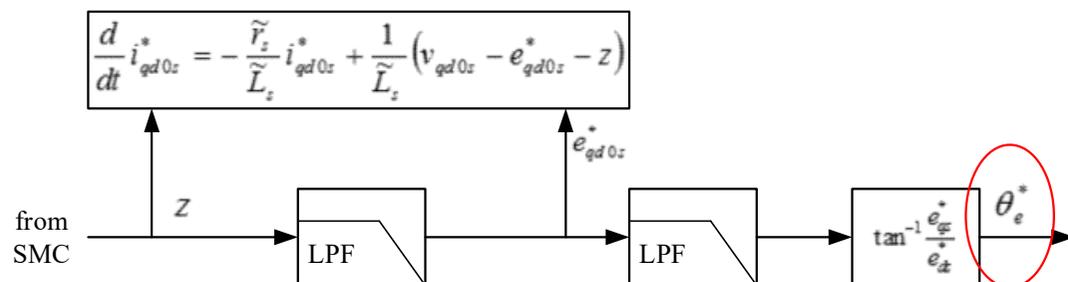
- 1) 滑模控制器(SMC)用于补偿数字化电机模型;
- 2) SMC由求和点组成，该求和点计算来自电动机的测量电流与来自数字化电动机模型的估计电流之间的误差的符号;
- 3) 计算出的误差符号(+1或-1)乘以SMC增益;
- 4) SMC控制器的输出是校正系数(z);
- 5) 该增益被添加到数字化模型的电压项中，并且该过程重复每个控制周期，直到测量电流(i_{qd0s})和估计电流(i_{qd0s}^*)之间的误差为零。



3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

反电动势估计(BEMF Estimation)

- 1) 补偿数字化模型后，电机模型的输入电压(v_{qd0s})和电流(i_{qd0s}^*)的变数值相同；
- 2) 一旦数字化模型得到补偿，下一步就是利用过滤校正因子(z)来估算反电动势(e_{qd0s}^*)；
- 3) 反电动势(e_{qd0s}^*)的估计是对模型的回馈，以在每个控制周期之后更新变量(e_{qd0s}^*)；
- 4) e_{qs}^* 和 e_{ds}^* 的值用于估计角度的计算。



3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式

电机启动(Starting Method)

- 1) 开回路启动法；
 - 2) 产生一个**定电流静止向量磁场**，将转子设定于该静止向量磁场，然后施以定电流的加速磁场向量；
 - 3) 待**反电势**顺利估计出后及到达设定的速度或第一次换相点后，再切换至无转轴侦测组件驱动模式，并进一步达成速度闭回路控制。
- 1) 电机绕组必须以适当的估计角度通电；
 - 2) 电机以固定的加速度旋转，FOC控制电流 I_d 和 I_q ；
 - 3) 转子角度(换向角度)基于加速度增加。

大纲

1. 电机简介
2. 永磁同步(PMSM)/直流无刷(BLDC)电机数学模型
3. 永磁同步/直流无刷电机控制方式
 - 系统架构
 - FOC控制法则
 - 无转子侦测传感器 (rotor position sensorless)
 - 电机启动
4. **STM32G4应用**

STM32 Motor Control SDK overview (part of SDK) Motor Control Ecosystem



life.augmented



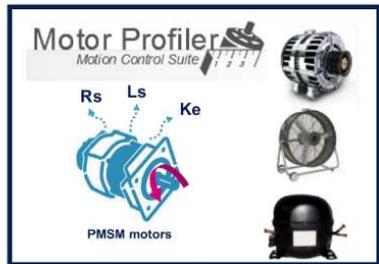
life.augmented



大联大·芯通路



STM32 motor control SDK5.x



Motor profiler



STM32 ADC/OPamp/COMP/ Math Acc.

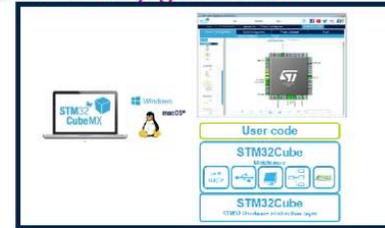
STM32 MC SDK5.x



Monitor window On line tuning



STM32CubeMX for MCU and MC library generation



Ready for use of HW driver boards



Full source code of FOC control



- 1-Shunt / 3-shunt / ICS
- Encoder / HALL/ sensorless
- Single & Dual FOC
- Feed Forward
- Flux Weakening
- Position Control
- Free RTOS Support



Objectives

- The purpose of this tool is :
- Help developers get started with the STM32 PMSM FOC SDK for final purpose to running a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) with ST Evaluation boards.
- Show where to find technical documentation, firmware libraries and other related materials.
- Easy tuning for different PMSM with MC workbench.



152



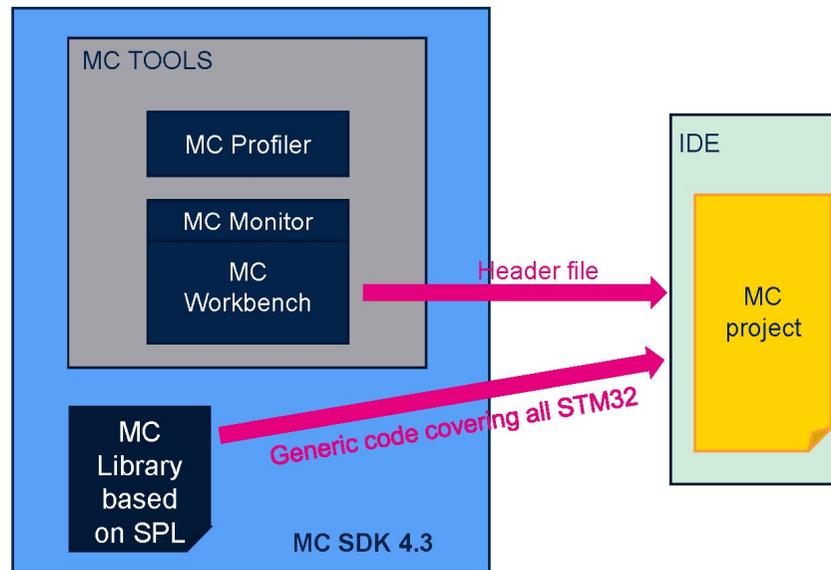
42

Motor control – SDK workflow



Yesterday: Motor Control SDK V4.3

MC library and MC tools

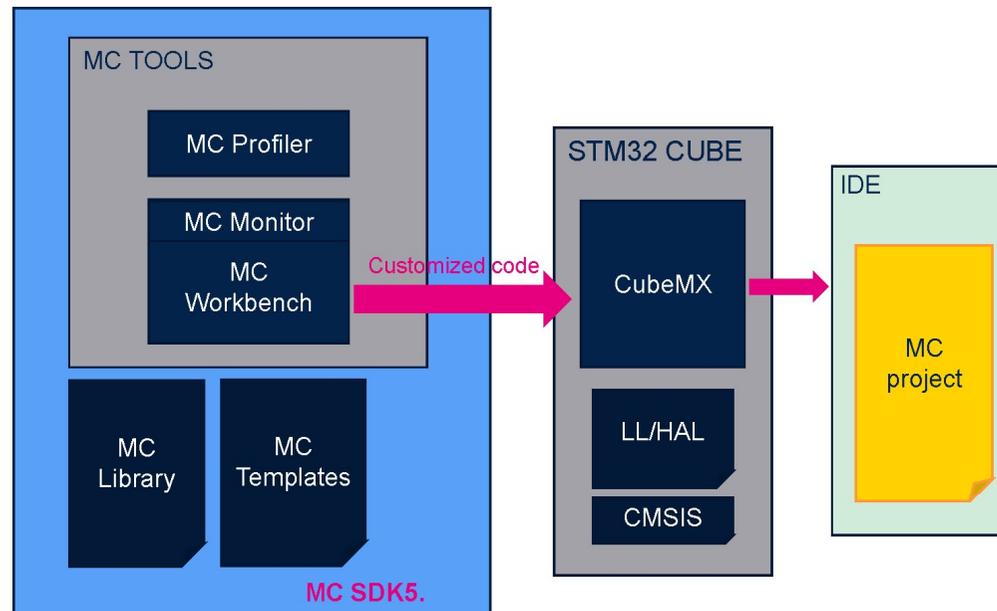


171



Today: Motor Control SDK V5.x

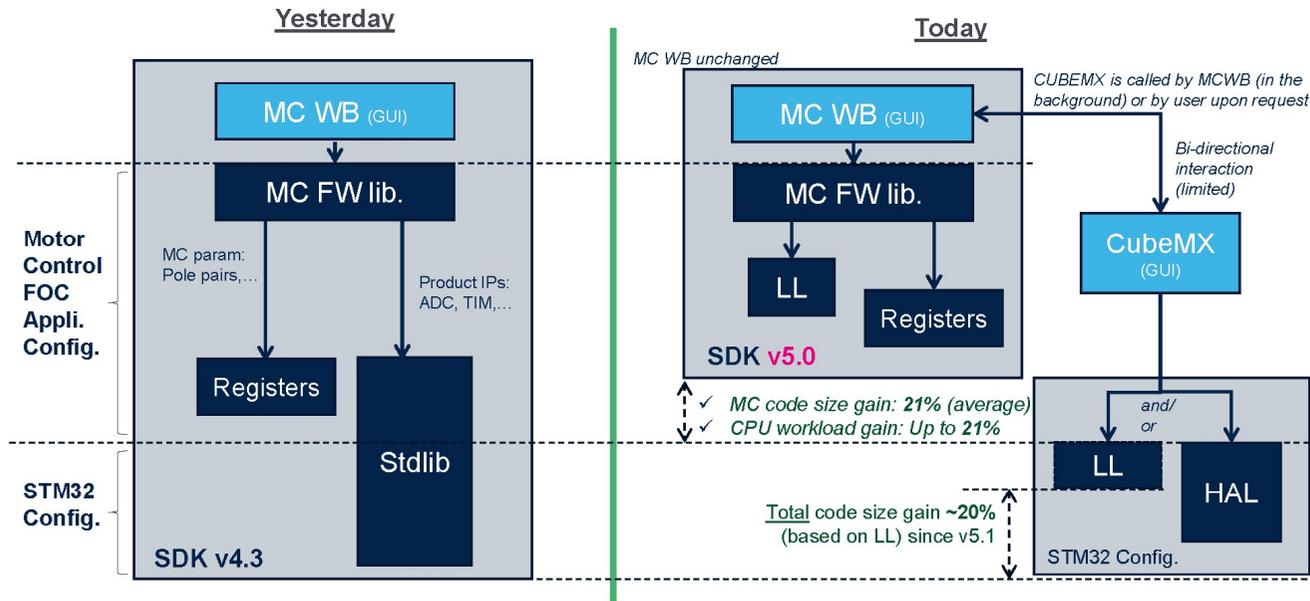
MC library and MC tools



172



MC SDK FW Lib architecture - V4.3 vs V5.x



173



Overview

	Version 4.3	Version 5.4.1	Comment
Installation		STM32CubeMX to be installed	
Microprocessor	F3,F1, F0, F4, F2 but new processors can't be added	(new supported MCU G0 / G4)	
Features	FOC, Dual motor, Flux weakening, feed forward, MTPA, PFC, speed sensor (Hall/Encoder/ Sensorless/HFI), Current sensor (1 shunt/ 3shunt/ ICS)	Same than 4.3 except HFI and PFC	PFC : F1 high density board only HFI : still not available
Code generation from ST solution/board	Direct from WB (header file)	Direct from WB	
Code generation from custom environment	Direct from WB but only with limited number of MCUs	Possible through ST reference board and then MX usage (with same MCU list than 4.3)	Flow will be: WB (initialization of reference design) → Cube MX (ref design modification) → WB (partly)* Apps note to be prepared for region. * <i>CubeMX</i> → <i>WB flow partially enabled in SDK5.0</i>
Motor control design suite	Not available	Available in In 5.x	Get full Motor control ecosystem (by control type) in one click
IDE	Keil and IAR	Keil and IAR , STM32CubeIDE, TrueSTUDIO	V4.3.x and 5.0.0 tested with IAR v7.20 (and before).



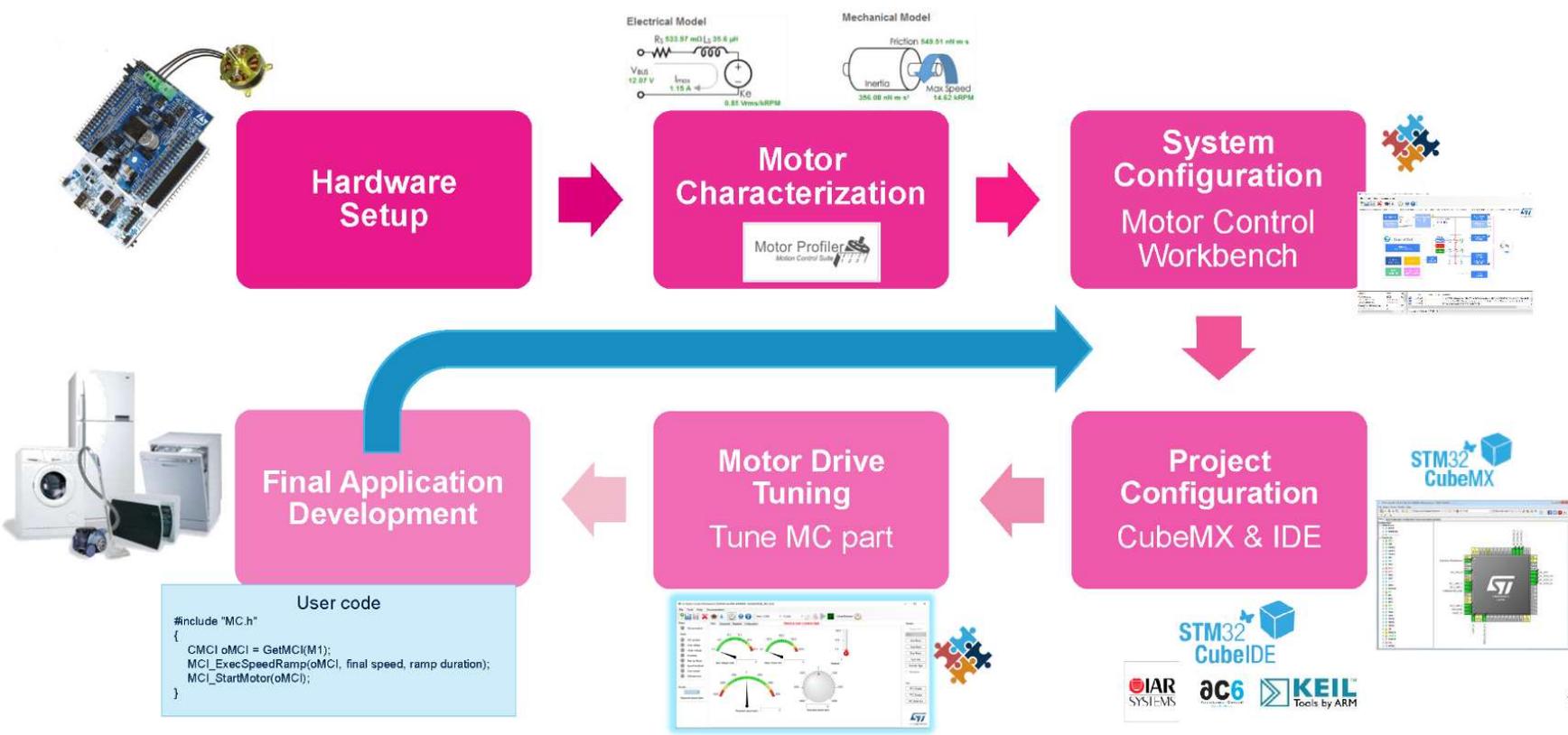
176

FW Library

	Version 4.3	Version 5.x
Architecture	3 main parts: MCAApplication/ MCLibrary and UI_Library	Same concept: Motor Cockpit/ Motor Control library and User Interface Library
Workspace	1 for library/ 1 for application code	Only 1 workspace for library and application code
API	4.3 API used as reference	Simplified/ Per motor
Coding style	Oriented Object C code	Cube Architecture C code
Drivers used	SPL	HAL- LL
Peripheral initialization	Done inside FW main file through #define/ All MCU code present in the code	Done automatically by CubeMx/ Only necessary code generated
Main readability	Main code difficult to modify (Large/ #define parts to understand and handle by customer..)	Done automatically by CubeMx/ Only necessary code generated
Debug	Not straightforward: data hiding and virtual functions used	No more data hiding/ direct function calls
CPU bandwidth	4.3 used as reference	Lightly less than 4.3
Memory size	4.3 used as reference	Similar than 4.3 (lib is shorter than 4.3 but HAL/LL bigger than SPL)
FW Bugs correction versus 4.3	4.3 used as reference	Hall sensor working with F3 (60deg) Encoder overflow, and others...(work in constant progression)



Motor Control – SDK V5.x workflow



178

Motor Control – SDK – workflow

Motor Profile

- When the hardware is ready, if the user does not know the motor parameters, he can identify the motor.
- How? Using the Motor Profiler!!
 - Follow the instruction in following slide.

The screenshot displays the 'Motor Profiler' window within the 'ST Motor Control Workbench'. The 'Motor Profiler' title bar is highlighted with a red dashed box. The main area shows two board options: 'NUCLEO-F302R8' and 'X-NUCLEO-IHM07M1 3Sh'. The 'X-NUCLEO-IHM07M1 3Sh' board is selected. The 'Speed and Current limits' section shows the following settings: Pole Pairs: 2, Max Speed: 4000 RPM, Max Current: 2 Apk, and VBus: 24 V. Below this, there are sections for 'Electrical Model' and 'Mechanical Model'. The 'Electrical Model' shows a circuit diagram with parameters: $R_s = 1.849 \Omega$, $L_s = 84.30 \mu\text{H}$, $V_{\text{BUS}} = 12.05 \text{ V}$, $I_{\text{max}} = 1.27 \text{ A}$, and $K_e = 0.5 \text{ Vrms/kRPM}$. The 'Mechanical Model' shows a motor diagram with parameters: Friction $304.59 \text{ nN}\cdot\text{ms}$, Inertia $209.56 \text{ nN}\cdot\text{ms}^2$, and Max Speed 14.87 kRPM . A 'Faults' section is also visible, listing various fault types like FOC duration, Over voltage, Under voltage, Overheat, Startup failure, Speed feedback, Over current, and FW error.



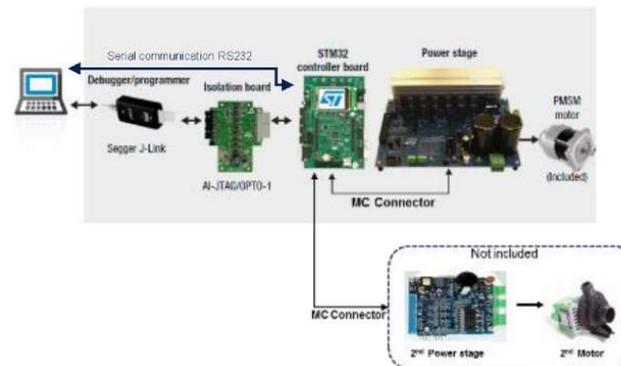
179



Motor Control – SDK – workflow

Hardware select

- First step → Set up the hardware. Depending on the targeted application, it is possible to choose the most suitable hardware configuration from among the different “ready-to-start” ST evaluation boards. (Presented in following slide.)
- Set up the selected board according the specification stated in each of the related user manuals.
- Connect the board (if required) to the power supply and your motor.

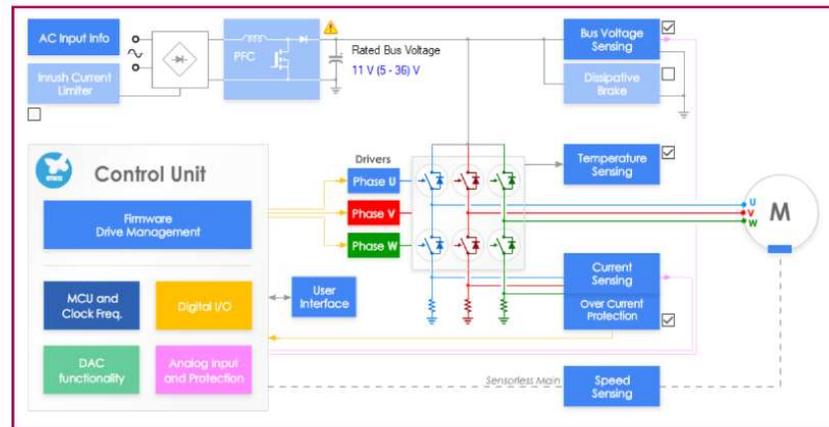


Motor Control – SDK – workflow

Firmware Generate

- When using the Motor Profiler, the motor is running and the user can create new project with their own code!
- Finalize the MC project using Workbench according to the motor parameter.
- Use your favorite IDE to develop your code.

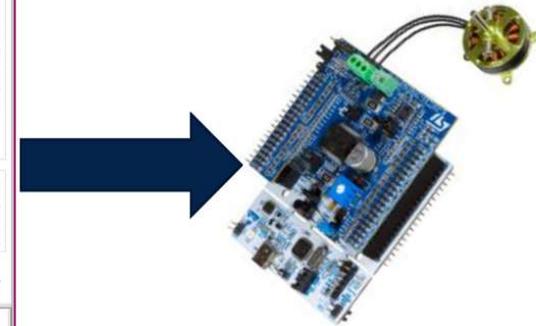
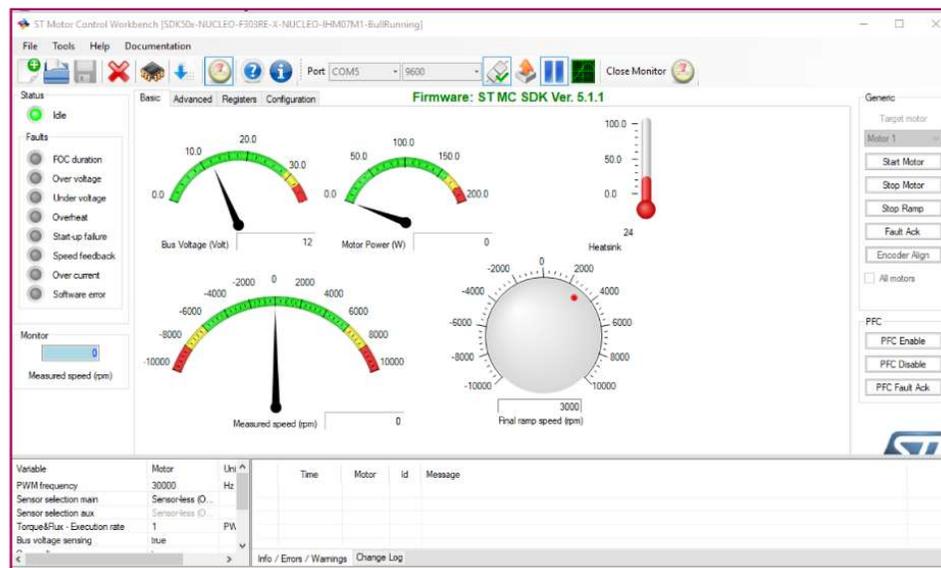
MC Workbench



181

Motor control – SDK – workflow on-the-fly tuning

- Finally, the user can send commands (e.g. start, stop, execRamp, ...) via serial communication.
- Use the Workbench monitor for real time tuning.



182

Reference

1. “3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x”, AN1914, Application Note, Rev. 1, Freescale Semiconductor.
2. “Analysis of Electric Machinery”, P.C. Krawe
3. Ned Mhoan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, "Power Electronics", Third Edition, John Wiley & Sons INC., USA, 2002.
4. “Analysis of Electric Machinery”, P.C. Krawe.
5. “BLDC motor control with LPC1700 ”, AN10898, Application Note, Rev. 01, NXP.
6. “3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x”, AN1914, Application Note, Rev. 1, Freescale Semiconductor.
7. “Sensorless BLDC Motor Control and BEMF sampling Methods with ST7MC”, AN1946, Application Note, Rev. 2, ST Microelectronics.
8. “Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function”, AN1160, Application Note, Microchip Technology Inc.



为您提供在线技术服务体验

一键观看视频介绍: <http://t.cn/AiYVB98S>

设计



1,000+款**系统级解决**
方案参考设计, 1,200+博
客文章 覆盖物联网、车
联网、电源等热门应用
领域

支持



700+位工程师
在线工程答疑与
提供技术支持服务

购买



系统级方案部份链接
电商 wpgdadago.com
贩卖开发板, 套件, 模块,
PCBA 板卡

合作



外部方案商与原厂共同
参与, 取得曝光与媒合
之机会

大大通注册二维码



微信公众号二维码



急速充电黑科技



ST 新推出氮化镓PD适配器方案

Newest
控制芯片

ST-ONE

VIPerGaN

扫码报名



观看直播抽好礼!

			
现场直抽 特别奖 Apple Watch	京东卡RMB.50 或 7-11线上礼券NTD.200	手机消毒机	挂绳行动电源 折香风扇

研讨会日期:2022年08月02日 10:00-11:00

