

Application Note

MCF83xx - 开环到闭环切换调优



Jangamreddy Rajasekhar Reddy, Shubham Tapdia

摘要

MCF83xx 系列器件为客户提供了一种单芯片、无代码、无传感器的 FOC 设计，可为住宅风扇、吊扇、水泵、真空吸尘器等应用驱动 BLDC 电机。BLDC 电机会经历不同的旋转阶段，例如预启动、启动、开环、闭环和电机停止。这些阶段中的每个都需要进行调优，以便每次都能可靠、高效地旋转电机。本应用手册记录了影响 BLDC 电机开环到闭环切换的配置，并介绍了调整这些配置以在各种工作条件下实现可靠切换的实验方法。

本文档中的示例以 MCF8316C 为例进行演示。但是，该文档适用于以下所有器件（本文档中称为 MCF83xx 器件）：

- MCF8315A
- MCF8315C
- MCF8315C-Q1
- MCF8316A
- MCF8316C
- MCF8316C-Q1
- MCF8315D
- MCF8316D
- MCF8329A
- MCF8329A-Q1

内容

1 简介.....	2
1.1 开环和切换阶段.....	2
2 影响开环到闭环切换的 EEPROM 配置.....	3
3 开环到闭环切换调优.....	4
3.1 调优开环和切换阶段级的实验方法.....	4
4 最优切换.....	8
4.1 使用建议设置的开环时间.....	8
4.2 按照最优切换步骤更改开环时间.....	8
5 总结.....	10
6 参考资料.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

MCF83xx 是德州仪器 (TI) BLDC 电机驱动器系列的三相 BLDC 电机驱动器，采用无传感器磁场定向控制 (FOC) 算法。MCF83xx 允许通过 BRAKE、DRVOFF、DIR、EXT_CLK、EXT_WD 和 SPEED/WAKE 引脚控制电机运行和系统，还通过 DACOUT1、DACOUT2、FG、nFAULT 和 SOX 引脚提供用于监控系统变量、速度、故障和相电流反馈的信号。

MCF83xx 器件能够在不同旋转阶段旋转 BLDC 电机，以实现可靠和受控的运行。图 1-1 介绍了 BLDC 电机旋转的不同阶段。

通过 ISD/BRAKE/Hiz 命令，电机从预启动状态开始旋转。电机随后切换到电机启动状态，以估算初始位置。接下来，电机以恒定电流开环运行，直到电机产生足够的反电动势来估算速度和角度，然后电机进入闭环运行。收到停止命令后，电机切换到配置的停止选项，以受控方式停止。

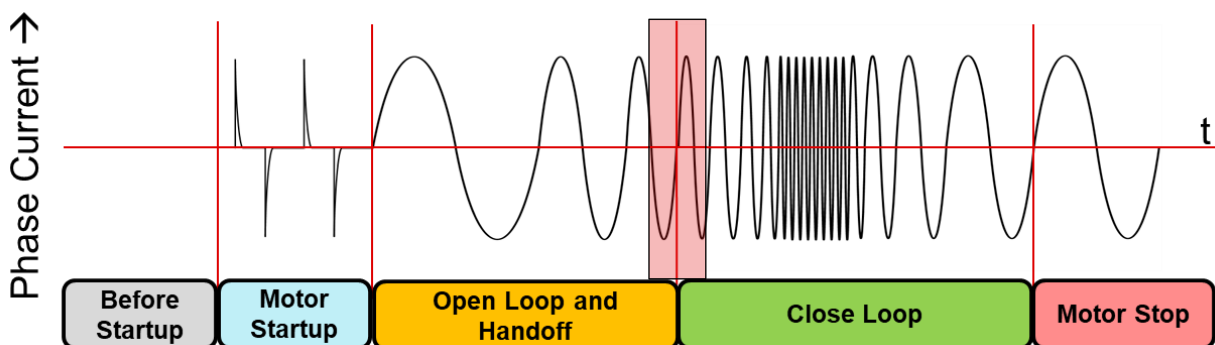


图 1-1. BLDC 电机旋转阶段

1.1 开环和切换阶段

在电机启动阶段检测到电机的初始位置后，MCF83xx 采用开环方式加速电机，任何给定时间的速度参考值由 [方程式 1](#) 确定。开环加速系数 A1 和 A2 分别通过 OL_ACC_A1 和 OL_ACC_A2 进行配置。开环电流限值由 OL_ILIMIT 设置。在开环中提高电机速度，电机相电流的峰值限制为 OL_ILIMIT。开环运行的功能是将电机驱动至电机产生足够 BEMF 的速度，以便反电动势观测器能够准确检测转子的位置。

$$Speed = (A1 \times t) + (0.5 \times A2 \times t^2) \quad (1)$$

在电机达到足以使反电动势观测器估算电机角度和速度的速度，MCF83xx 就会转换到闭环状态。从开环到闭环的过渡称为切换，而该过渡发生的速度称为切换速度。如果 AUTO_HANDOFF_EN 设置为 1b，该切换速度是根据测得的反电动势和电机速度自动确定的。用户还可以选择通过配置 OPN_CL_HANDOFF_THR 并将 AUTO_HANDOFF_EN 设置为 0b 来手动设置切换速度。为了平稳切换到闭环并避免速度瞬变，在以 THETA_ERROR_RAMP_RATE 配置的斜坡速率进行切换后，转换点的 θ 误差 ($\theta_{gen} - \theta_{est}$) 以线性方式减小。

2 影响开环到闭环切换的 EEPROM 配置

表 2-1. 影响开环到闭环切换的参数

SI 否	配置参数	说明
1	OL_ILIMIT	开环电流限制
2	OL_ACC_A1	开环加速系数 A1 (单位 : Hz/s)
3	OL_ACC_A2	开环加速系数 A2 (单位 : Hz/s^2)
4	OPN_CL_HANDOFF_THR	开环到闭环切换阈值 (占 MAX_SPEED 的百分比) 如果 AUTO_HANDOFF_EN = 0h 则发生切换的速度。
5	AUTO_HANDOFF_MIN_BEMF	切换前所需的最小 BEMF。如果 AUTO_HANDOFF_EN = 1h，则切换速度取决于电机反电动势
6	THETA_ERROR_RAMP_RATE	切换后用于线性减小 θ 误差 (开环 θ 与估算 θ 之间的差异) 的斜升速率。
8	CL_SLOW_ACC	θ 误差为非零时的闭环加速率。

备注

如果位字段可在所选器件中进行配置，TI 建议将 OL_ILIMIT_CONFIG 设置为 0b。

3 开环到闭环切换调优

开环和切换阶段的调优是闭环中可靠运行 BLDC 电机的关键部分。在切换到闭环之前，该器件需要准确检测电机反电动势和转子位置。为了平稳切换，请确保满足以下各点。

1. 在开环结束时，电机反电动势需要足以准确地估算电机速度和电机角度。
2. 在开环结束时，电机转速需要遵循内部速度基准，以平稳切换到闭环。
3. 切换后，需要相应地减小电机角度误差 (θ)。

3.1 调优开环和切换阶段级的实验方法

3.1.1 第 1 步：初始配置

1. 将开环 OL_ILIMIT 设置为 $0.5 \times (\text{额定电机峰值相电流})$ A
2. 在 MAX_SPEED 配置中设置电机的最大速度，然后将 OPN_CL_HANDOFF_THR 设置为 20%。
3. 将 OL_ACC_A1 设置为 $(\text{MAX_SPEED}/10)\text{Hz/s}$ ，并将 OL_ACC_A2 设置为零。
4. 使用 DACOUT1 和 DACOUT2 引脚以 8/8 调节 (双极性) 在 MCF83xx 的 DAC 上绘制 SPEED_FDBK 和 SPEED_REF_OPEN_LOOP 变量，并在示波器上进行探测。

向 MCF83xx 器件发出速度命令，并捕获电机速度 (FG_TRACK)、电机相电流 (OUTA)、SPEED_FDBK 和 SPEED_REF_OPEN_LOOP 变量的行为。观察 SPEED_FDBK 是否在开环结束时跟踪 SPEED_REF_OPEN_LOOP，持续时间至少为开环时间的 30%。这样可以确保满足检查点 1 和 2 的要求。

MOTOR1：额定电流 = 1A，最大速度 = 300Hz。图 3-1 演示了正确的切换

备注

迹线 FG_TRACK 是一个以数学方式计算的信号，用于跟踪 FG 输出信号 (C1) 的频率。

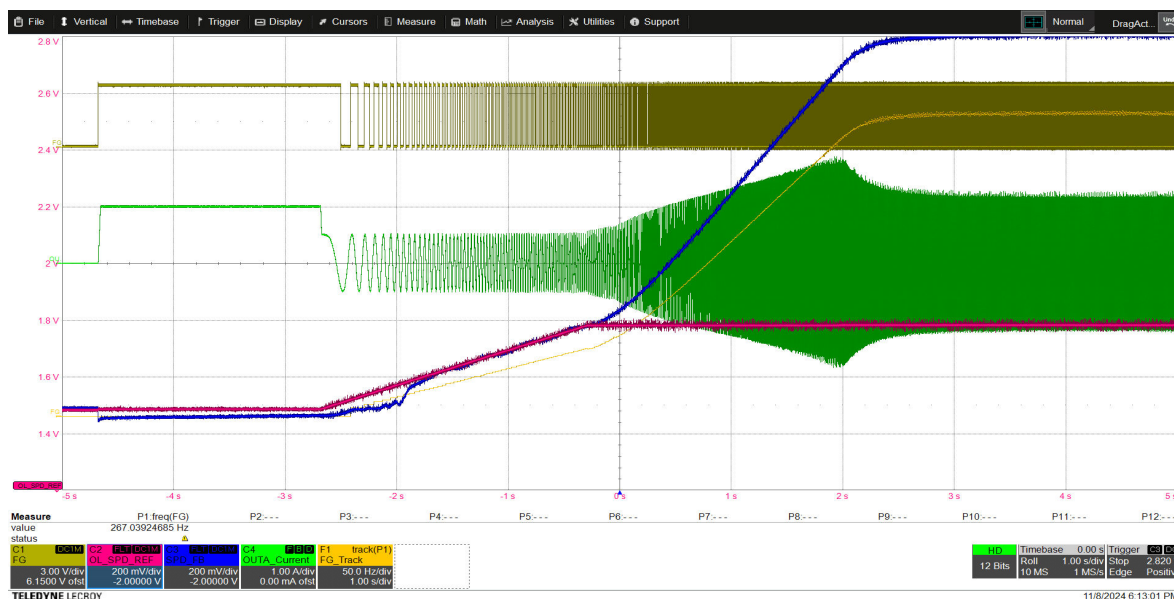


图 3-1. 正确切换 - OL_ILIMIT = 0.5、OL_ACC_A1 = 25Hz/s、OPN_CL_HANDOFF_THR = 20%

如果您没有看到发生这种情况，请转到第 2 步，根据电机行为，了解要调整的参数以及具体的方向。

3.1.2 第 2 步：在切换不当的情况下调优参数

3.1.2.1 OL_ILIMIT 的调优

有时，由于某些电机的较大惯性，将 OL_ILIMIT 设置为 $(0.5 \times \text{额定电流})$ A 不会导致正确切换。在这些情况下，逐级增加 OL_ILIMIT，直至达到电机的额定峰值电流。

MOTOR2：额定电流 0.5A，最大速度为 250Hz。图 3-2 显示设置为节 3.1.1 - A1 = 25Hz/s，切换速度 = 20% 时切换不正确

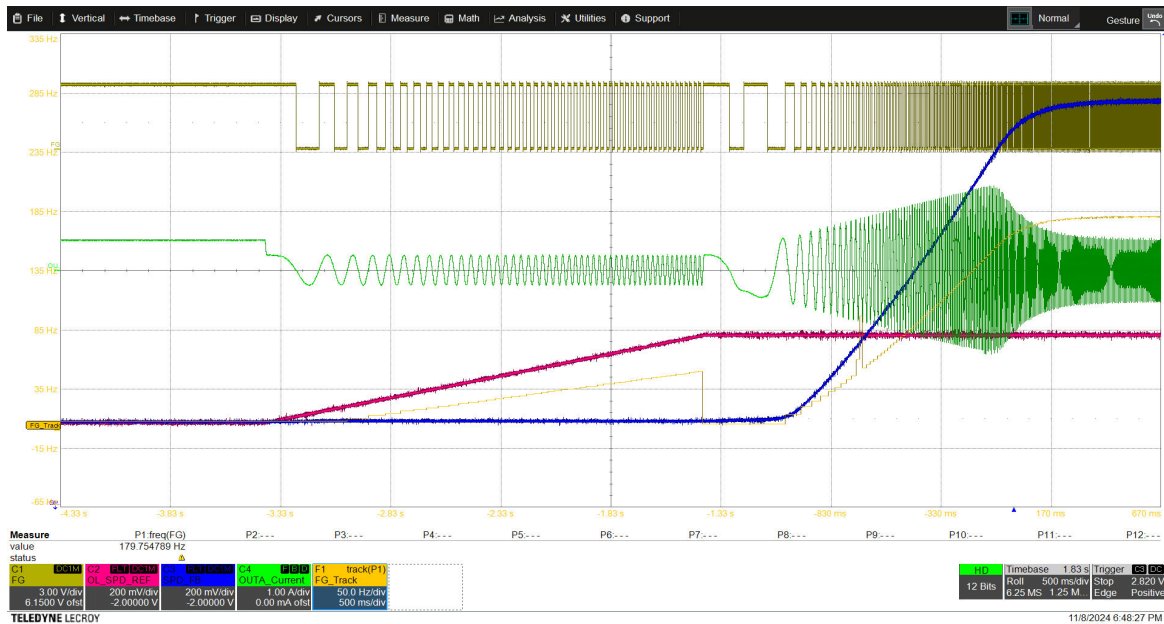


图 3-2. OL_ILIMIT = 0.25A 时切换失败

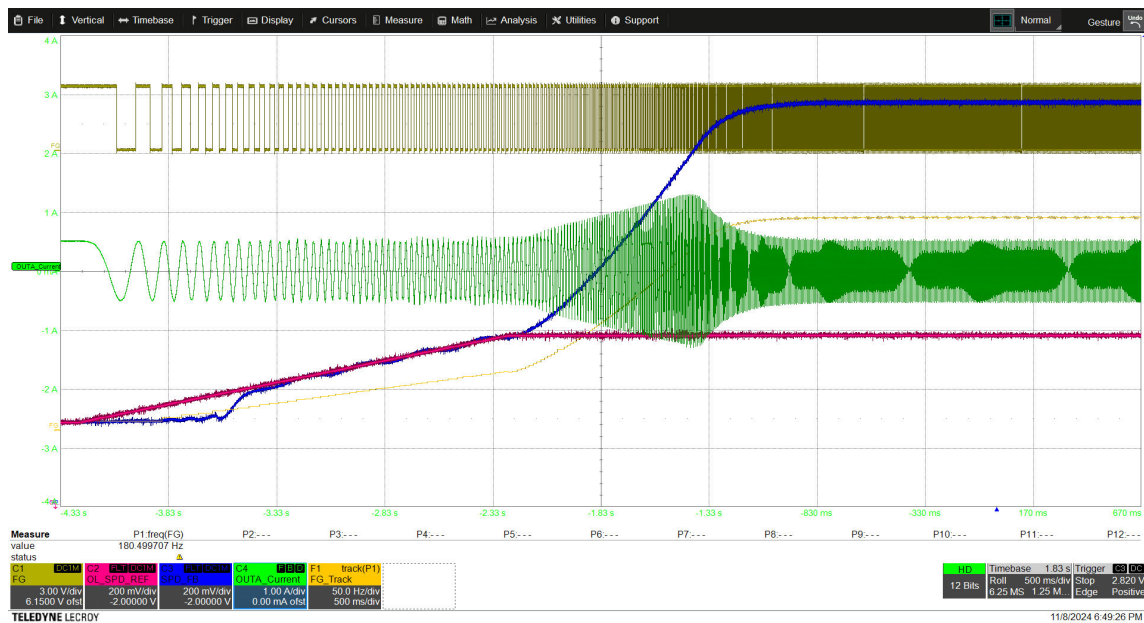


图 3-3. OL_ILIMIT = 0.5A 时，切换正确

3.1.2.2 开环加速系数 A1 的调优

如果速度反馈即使在 OL_ILIMIT 增加后也无法达到开环速度基准，则需要减小开环 A1。此外，建议的设置是使 OL_ACC_A1 等于 (MAX_SPEED/10)Hz/s。

对于 MOTOR1，建议的设置值为 50Hz/，如果设置值较高，则存在切换失败的风险。较高的 OL_ACC_A1 会快速增加速度基准，电机无法使用给定的 OL_ILIMIT 跟踪速度基准，这可能会导致切换失败。

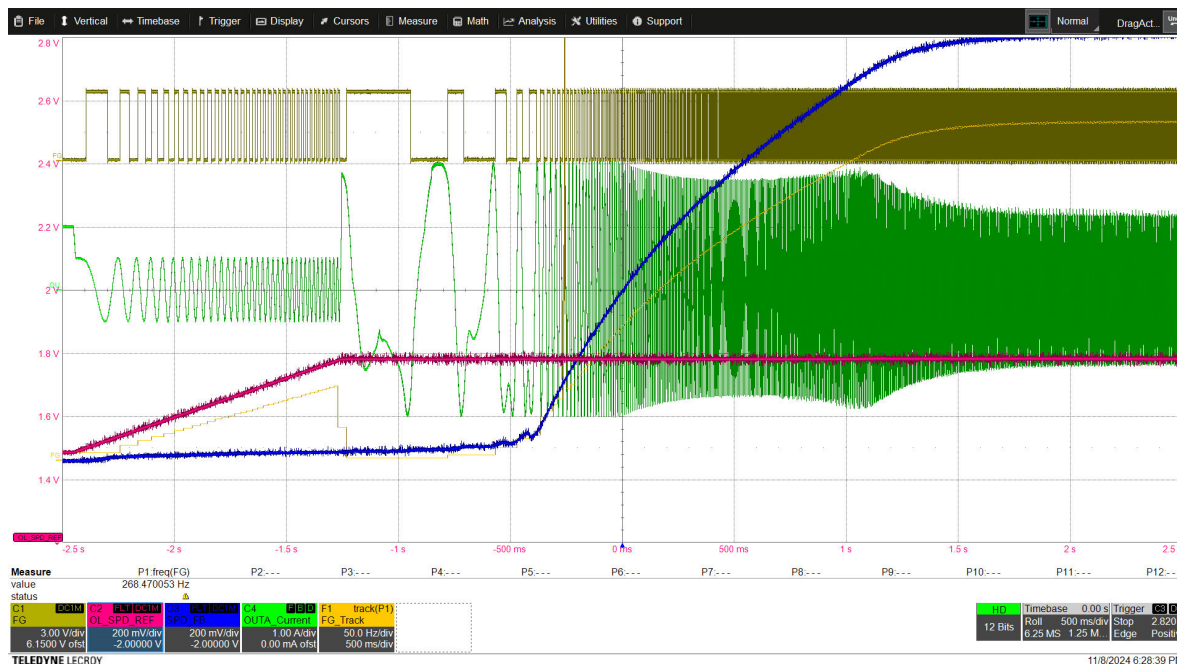


图 3-4. 由于 A1 ($A1 = 50\text{Hz/s}$) 值较高, 切换不正确

备注

在之前的两种故障案例中, 波形看起来是类似的。因此, 首先增加 OL_ILIMIT , 直至达到电机额定电流, 如果仍然切换不正确, 则减小开环加速系数 OL_ACC_A1 , 直至到切换正确为止。

3.1.2.3 切换阈值的调优

建议不要将 $OPN_CL_HANDOFF_THR$ 设置为非常高的值, 因为有时设置的 OL_ILIMIT 不足以达到设定速度。对于 $MOTOR1$, 如果 $OPN_CL_HANDOFF_THR$ 设置为 50%, 则在给定 OL_ILIMIT 和加速度系数 OL_ACC_A1 的情况下, 电机无法达到最大速度的 50%。在这种情况下, 切换会失败。在这种情况下, 请将切换阈值设置为较低的值。

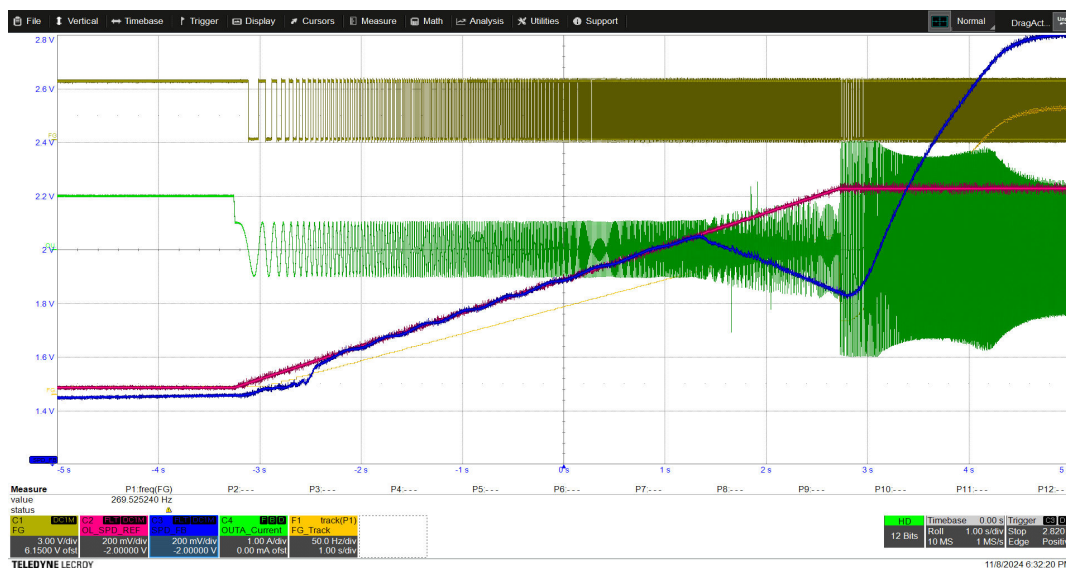


图 3-5. $OPN_CL_HANDOFF_THR = 50\%$ 时, 切换失败

3.1.3 第 3 步：切换配置调优

在以足够的速度切换至闭环后，如果估计器未完全对齐，则仍然可能存在一些 θ 误差。在切换到闭环之前，MCF83xx 器件以 THETA_ERROR_RAMP_RATE 的速率将此 θ 误差降至零。此状态称为 CLOSED_LOOP_UNALIGNED_STATE。此状态下的速度参考值遵循 CL_SLOW_ACC (建议值为 CL_ACC 的一半)。

将对上述参数进行调优，以在切换状态下实现更平滑的相电流曲线，这取决于 IQ_REF_CLOSED_LOOP 在开环状态后的变化方式，而反过来又取决于 THETA_ERROR_RAMP_RATE、CL_SLOW_ACC、SPD_LOOP_KP 和 SPD_LOOP_KI。

以下是一些截图，用于展示 THETA_ERROR_RAMP_RATE 如何在切换阶段影响 IQ_REF_CLOSED_LOOP 变化，进而影响给定 CL_SLOW_ACC、SPD_LOOP_KP 和 SPD_LOOP_KI 的电流曲线。

IQ_REF_CLOSED_LOOP 通过器件的 DACOUT1 引脚输出。

当 THETA_ERROR_RAMP_RATE = 111b 时，IQ_REF_CLOSED_LOOP 以更快的速率变化，我们会在电机相电流中观察到更多的振荡

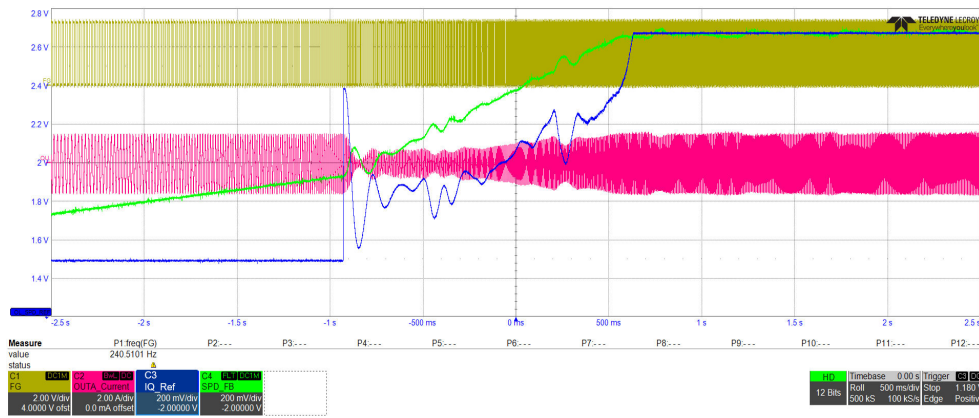


图 3-6. THETA_ERROR_RAMP_RATE = 111b

当 THETA_ERROR_RAMP_RATE = 000b 时，IQ_REF_CLOSED_LOOP 以较慢的速率变化，我们观察到电机相电流中的振荡逐渐衰减。

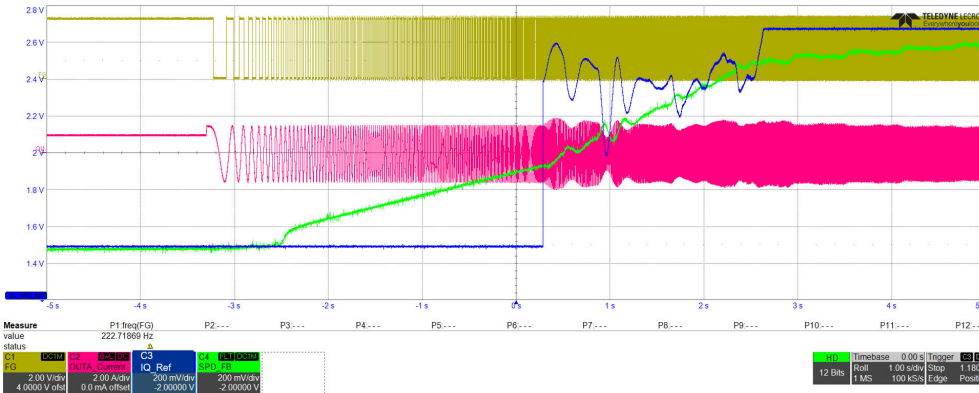


图 3-7. THETA_ERROR_RAMP_RATE = 000b

备注

THETA_ERROR_RAMP_RATE 的建议设置为 100b。增大此设置以在切换点实现更快的 IQ_REF_CLOSED_LOOP 变化，并减小此设置，以减慢切换点的 IQ_REF_CLOSED_LOOP 变化。

4 最优切换

每当我们需要最优切换（开环中的时间最少）时，请使用以下步骤：

1. 为了实现正确切换和适应电机相电阻/相电感的变化（温度引起），DAC 上的变量 SPEED_REF_OPEN_LOOP 和 SPEED_FDBK 需要在 30% 的开环时间保持相符。
2. 将 OL_ILIMIT 设置为额定峰值相电流或 ILIMIT。
3. OL_ACC_A2 = 0（或可用的最低设置）时。将 OL_ACC_A1 设置为 $OL_ACC_A1 = (MAX_SPEED/10)Hz/s$ 的下一个较高值。验证切换是否正确。如果切换不正确，请恢复到先前的设置，否则将 OL_ACC_A1 设置为下一个较高的值并继续该程序。
4. 现在将 OL_ACC_A1 设置为最后一次成功切换设置的一半，然后尝试增加 OL_ACC_A2 的值，直至到切换成功。
5. 将 OPN_CL_HANDOFF_THR 设置为高于 20% 的下一个值。验证切换是否正确。如果切换不正确，请恢复到之前的设置，否则将 OPN_CL_HANDOFF_THR 设置为下一个较高值，并继续该程序。

4.1 使用建议设置的开环时间

MOTOR 3：额定电流 = 2A，最大速度 = 300Hz

OL_ILIMIT = 1A、OL_ACC_A1 = 25Hz/s（因为没有 30Hz/s 配置）、OL_ACC_A2 = 0Hz/s²、
OPN_CL_HANDOFF_THR = 20%

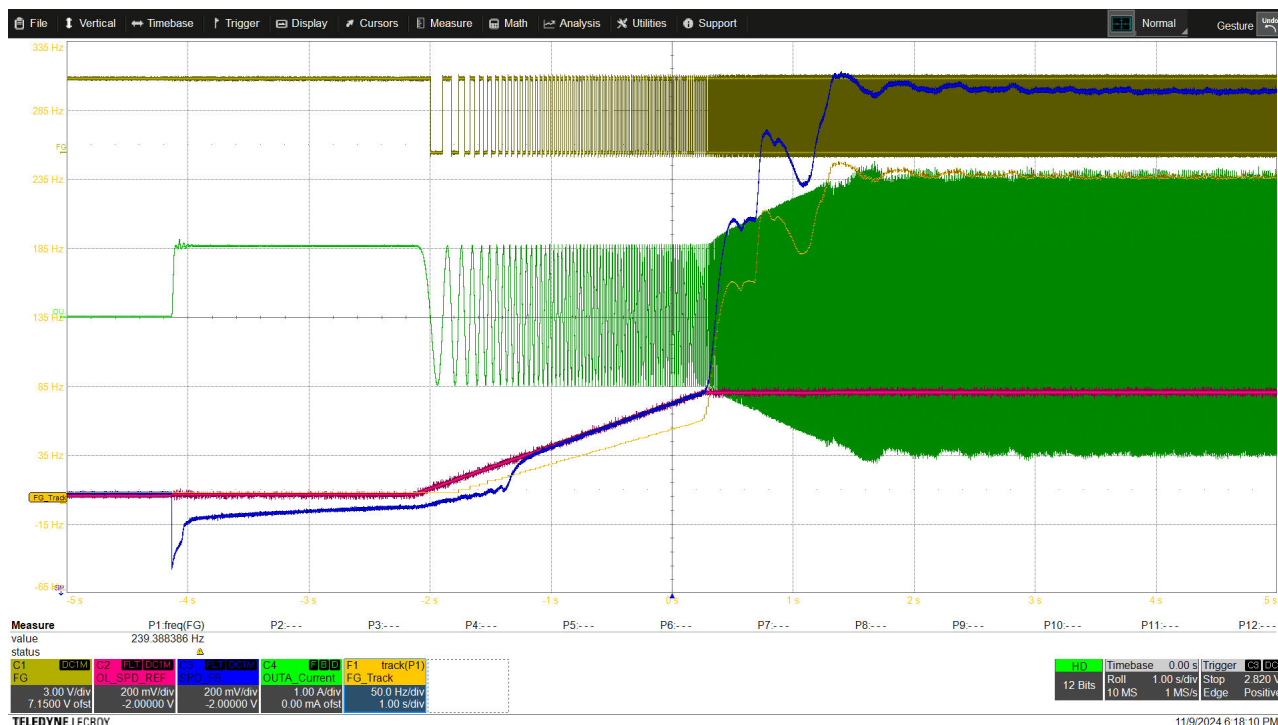


图 4-1. 建议设置的开环时间

从 图 4-1，开环时间约为 $1s \times 2.4 \text{ div} = 2.4s$ 。

4.2 按照最优切换步骤更改开环时间

MOTOR 3：额定电流 = 2A，最大速度 = 300Hz

按照 节 4 中提到的最优切换步骤，可以推导出 MOTOR 3 的以下设置。（对于其他电机可能有所不同，但程序相同）。

OL_ILIMIT = 2A、OL_ACC_A1 = 50Hz/s、OL_ACC_A2 = 25Hz/s²、OPN_CL_HANDOFF_THR = 18%

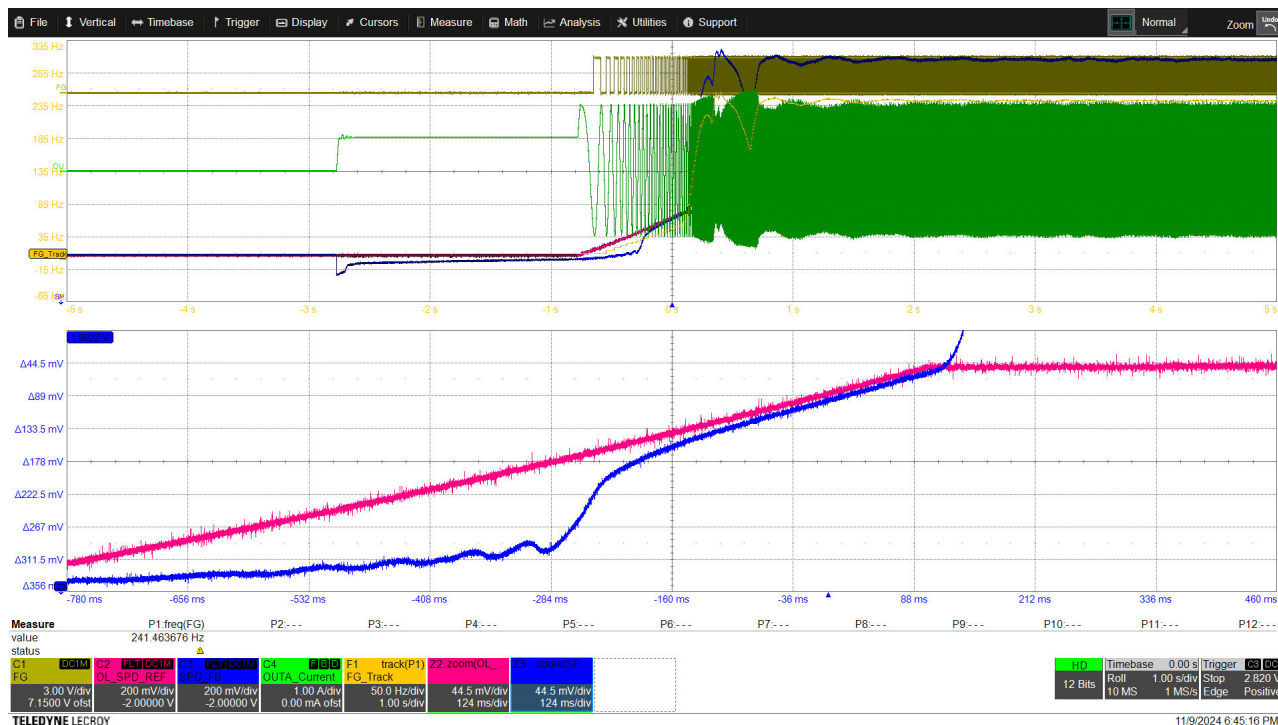


图 4-2. 按照最优切换步骤更改开环时间

从 图 4-2 的开环时间约为 $1\text{s} \times 0.9\text{ div} = 0.9\text{s}$ ，小于 图 4-1 中的开环时间 (2.4s)

5 总结

本应用手册介绍了使用 MCFx 器件旋转 BLDC 电机所涉及的不同阶段。然后介绍了开环到闭环的切换阶段，以及调优切换阶段所需的配置。本文档进一步说明了影响配置的每个参数，并通过实验说明了每个配置如何影响切换，并提供了一种调整配置以实现开环到闭环可靠切换的实验方法

6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [MCF8316C 无传感器磁场定向控制 \(FOC\) 集成式 FET BLDC 驱动器](#) 数据表。

重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司