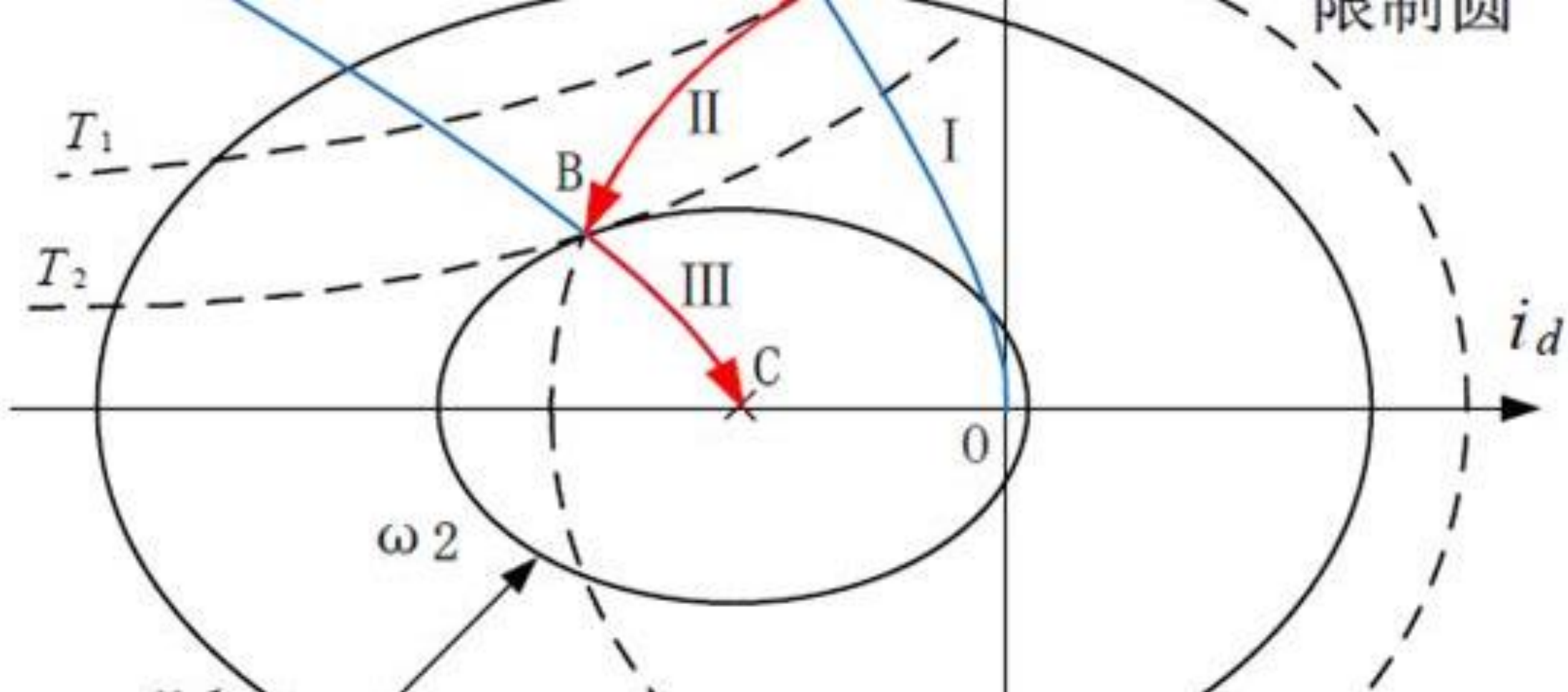




2023.6

贝加莱伺服 - 弱磁控制

当我们谈弱磁的时候，我们谈什么？

By chen.Zhiping@br-automation.com

B&R | A member of the ABB Group



目录

弱磁的含义和目的

开环弱磁

闭环弱磁

MTPA (MTPC)

弱磁问题和限制

弱磁的含义和目的

弱磁的目的: 扩速或提高电流利用率

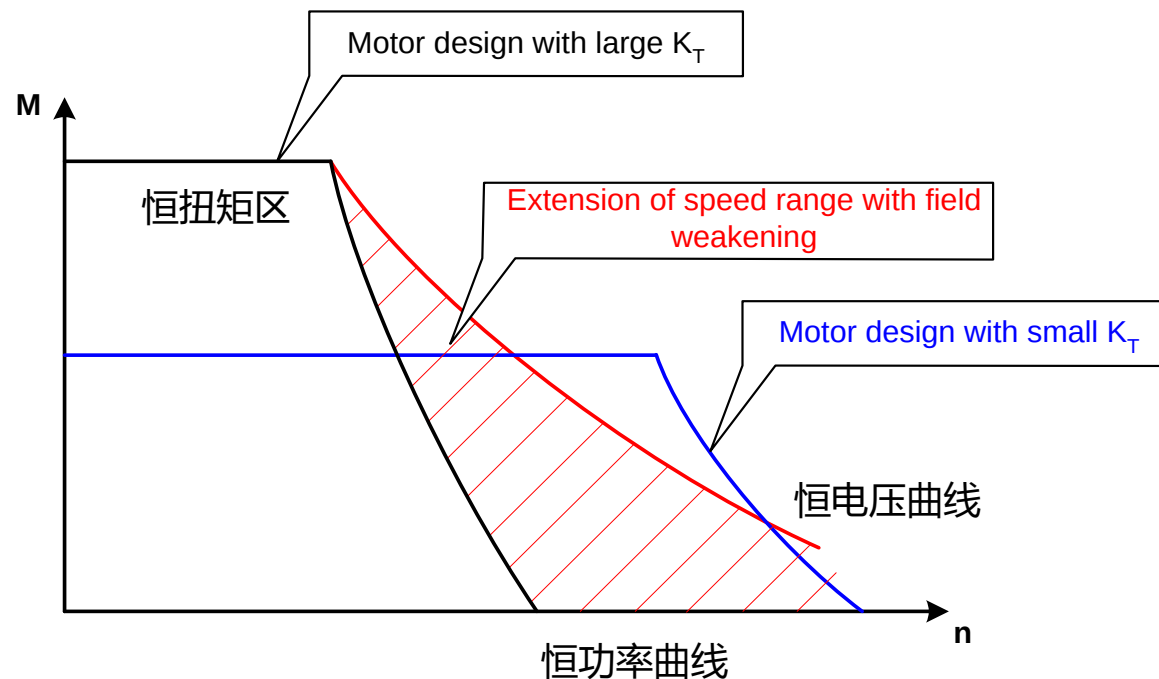
同型号电机选2200还是3000? 电机速度范围取决于

- ① 磁通量 Ψ_p ($\Psi_p \uparrow, K_e \uparrow K_t \uparrow$)
- ② 电机结构 (例如极数) ($60f/p=\text{rpm}$)
- ③ 特别是施加的电压 ($N_{\text{max}} = U_{\text{dc}}/1.414/k_e$)

$$\Psi_d = \Psi_p + L_d i_d \quad \Psi_p = \sqrt{\frac{2}{3}} * \frac{60}{1000} * \frac{k_e}{2\pi z_p}$$

$$\Psi_q = L_q i_q$$

$$\Psi_s = \sqrt{(\Psi_d)^2 + (\Psi_q)^2}$$



应用举例

注塑机上的注射电机: 保压时需要大扭矩, 注射时需要高速度.

光伏切片机的主轴电机: 切割时需要很高转速, 退刀时需要大扭矩.

电机电压公式

面向磁场的电压公式

$$u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_{sd} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot L_{sq} \cdot i_{sq}$$

$$u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_{sq} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot L_{sd} \cdot i_{sd} + \omega_s \cdot \Psi_p$$

忽略阻性部分、动态部分

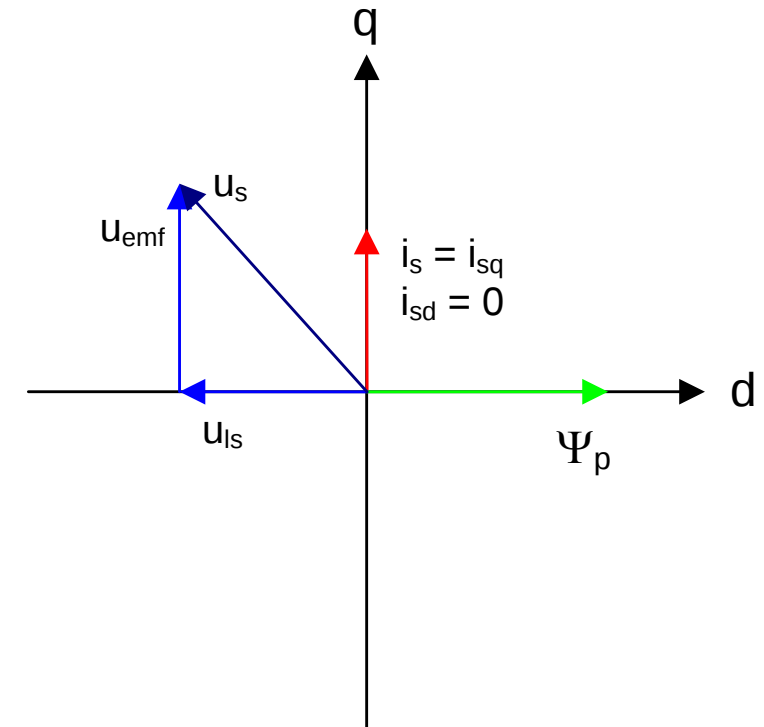
$$R_s \cdot i_s \ll \omega_s \cdot \Psi_p$$

$$\frac{d}{dt} = 0$$

$$u_{sd} = -\omega_s \cdot L_{sq} \cdot i_{sq}$$

$$u_{sq} = \omega_s \cdot L_{sd} \cdot i_{sd} + \omega_s \cdot \Psi_p$$

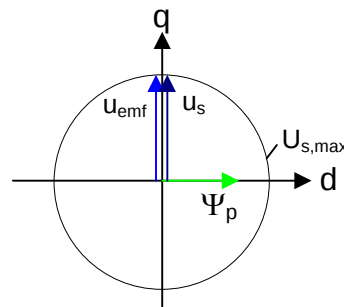
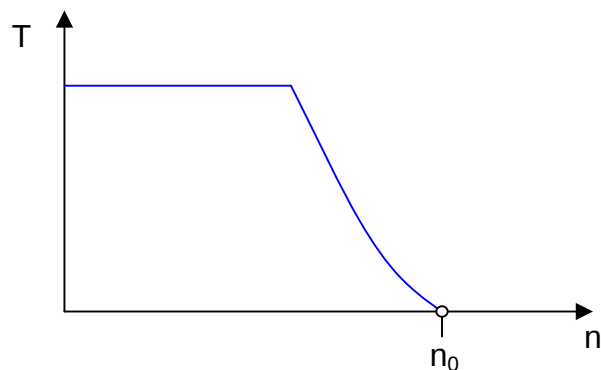
$$U_s = \sqrt{U_{sd}^2 + U_{sq}^2}$$



无弱磁理论最大速度

忽略机械摩擦, 无弱磁理论最大速度可以通过下面公式计算出来, 所有施加电压被EMF反电势抵消。

$$n_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi \cdot z_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot z_p} \cdot \frac{u_{s,\max}}{\Psi_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot z_p} \cdot \frac{u_{dc,act}}{\sqrt{3} \cdot \Psi_p}$$



$$i_{sq} = i_{sd} = 0$$

$$u_{sd} = 0$$

$$u_{sq} = \omega_s \cdot \Psi_p$$

$$\Psi_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{K_t}{z_p}$$

在直流母线电压恒定时, 要增加转速 → 使用弱磁($\Psi \downarrow$)

开环弱磁

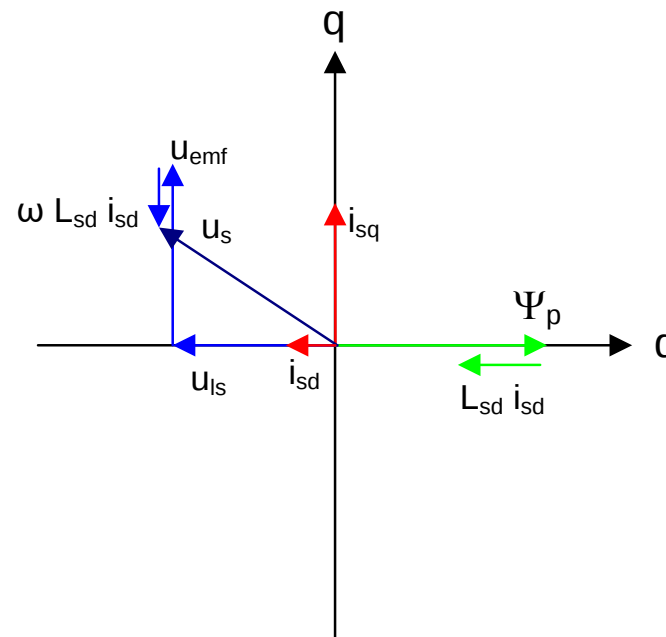
开环弱磁控制 - 相关参数

参数名	读写权限	数据类型	取值范围	单位	说明
FCTRL_MODE	RD,WR	UI4	0, 33, 34, 35		Flux controller mode 0...Field weakening deactivated (PMSM only) 33...Field weakening closed-loop control (PMSM only) 34...Field weakening open-loop control (PMSM only) 35...Field weakening closed-loop control with PI controller (PMSM only)
FWCTRL_ISD0	RD,WR	R4	< 0.0	A	CTRL flux weakening: Demagnetization current
FWCTRL_SPEED0	RD,WR	R4	0.0...MOTOR_SPEED_MAX	1/s	CTRL flux weakening: Field weakening start speed
FCTRL_IM_LIM_MIN	RD,WR	R4		A	CTRL flux: Magnetizing current limiter: Lower limit
FCTRL_IM_LIM_MAX	RD,WR	R4	PMSM: 0.0	A	CTRL flux: Magnetizing current limiter: Upper limit

开环弱磁控制 – 退磁电流(FWCTRL_ISD0)

让d轴上的磁通接近0, 需要什么样的电流?

$$\Psi_{sd} = \Psi_p + L_{sd}^* \cdot i_{sd} = 0$$
$$i_{sd0} = -\frac{\Psi_p}{L_{sd}^*}$$



注意: L_{sd}^* 在d轴施加负向电流时, 会增大. 当计算 i_{sd0} 时, 需要考虑这一点.

$$L_{sd}^* = k_1 \frac{L_{PhPh}}{2} \quad k_1 = 1.17$$

开环弱磁控制 – 开始弱磁速度 (FWCTRL_SPEED0)

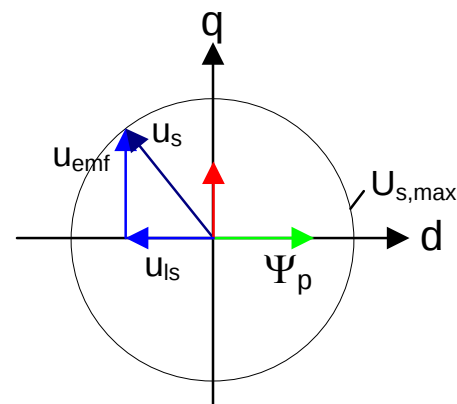
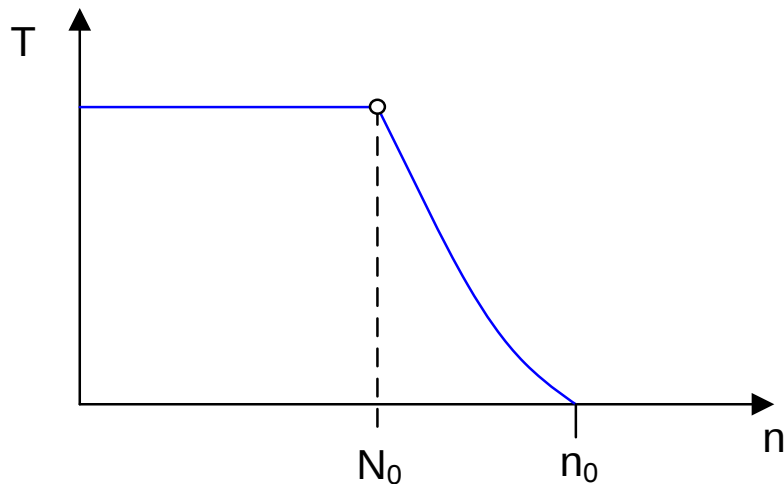
什么速度开始启动弱磁？

条件: 考虑在最大电流时操作

$$N_0 = \frac{u_{dc,nominal}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot z_p \cdot \underbrace{\sqrt{\psi_p^2 + (L_{sq} \cdot i_{s,max})^2}}_{\psi_{max}}}$$

这里

$$i_{s,max} = \text{MIN}(i_{max,motor}, i_{max,servo}) \quad L_{sq} = 1.1 \frac{L_{PhPh}}{2}$$



开环弱磁控制 – 最大速度/最大弱磁电流

什么是禁止超过的最大速度？

确保:

- 运行在理想速度之上 ($n > n_0$)
- 故障导致驱动器关机(此时弱磁关闭)→电机端子上的浪涌可能损坏电机或驱动器

$$N_{\max} = \frac{u_{dc,\max}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot z_p \cdot \Psi_p}$$

→ SCTRL_LIM_V_POS (687)

SCTRL_LIM_V_NEG (688)

最大允许电压由制动电阻动作电压(UDC_BLEEDER_ON)初始化. 然而, 上限依模块最大允许直流母线电压而定

ACOPOS	$U_{dc,\max}$
8Vxxx.00-x	770V
8Vxxx.50-x	369V
8BVIxxxHxxx.xxx-1	800V
8CVIxxxxHCS0.00-1	800V
80VD100Px.xxxx-01	80V

弱磁最小电流(FCTRL_IM_LIM_MIN) 是当故障发生时, 最大电压不会被超过

$$i_{sd,\min} = i_{sd0} \cdot \left(1 - \frac{N_0}{N_{\max}}\right)$$

开环弱磁控制 – 特性曲线

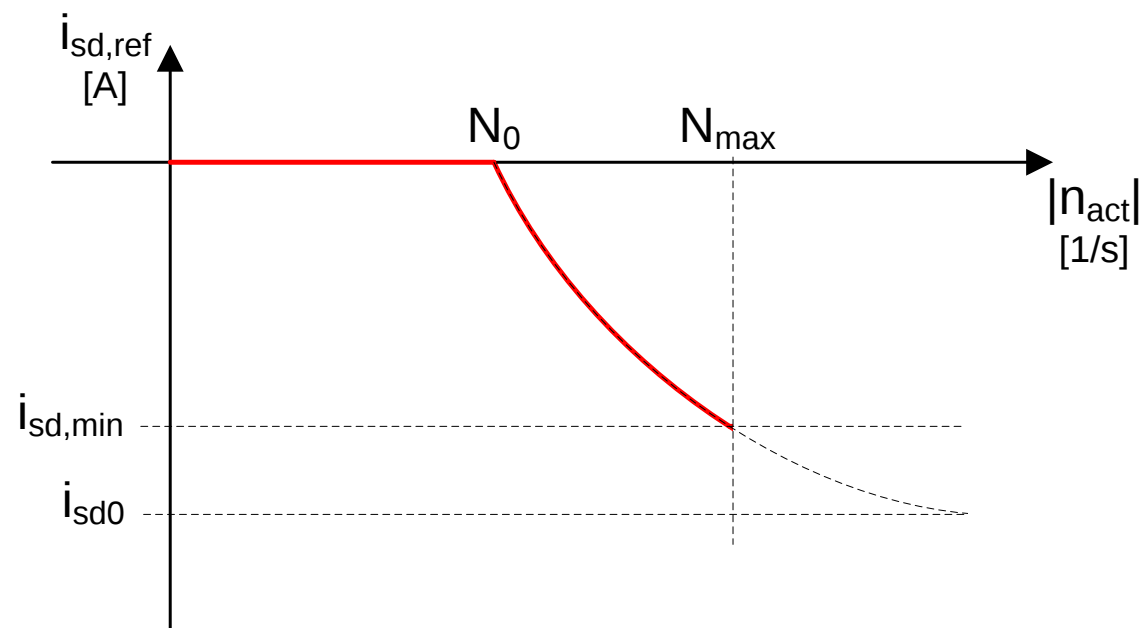
这些要求和基本信息能够生成一个特性曲线

$$|n_{act}| \leq N_0$$

$$i_{sd,ref} = 0.0$$

$$|n_{act}| > N_0$$

$$i_{sd,ref} = MAX \left(i_{sd0} \cdot \left(1 - \frac{N_0}{n_{act}} \right); i_{sd,min} \right)$$



开环弱磁控制 – 点评

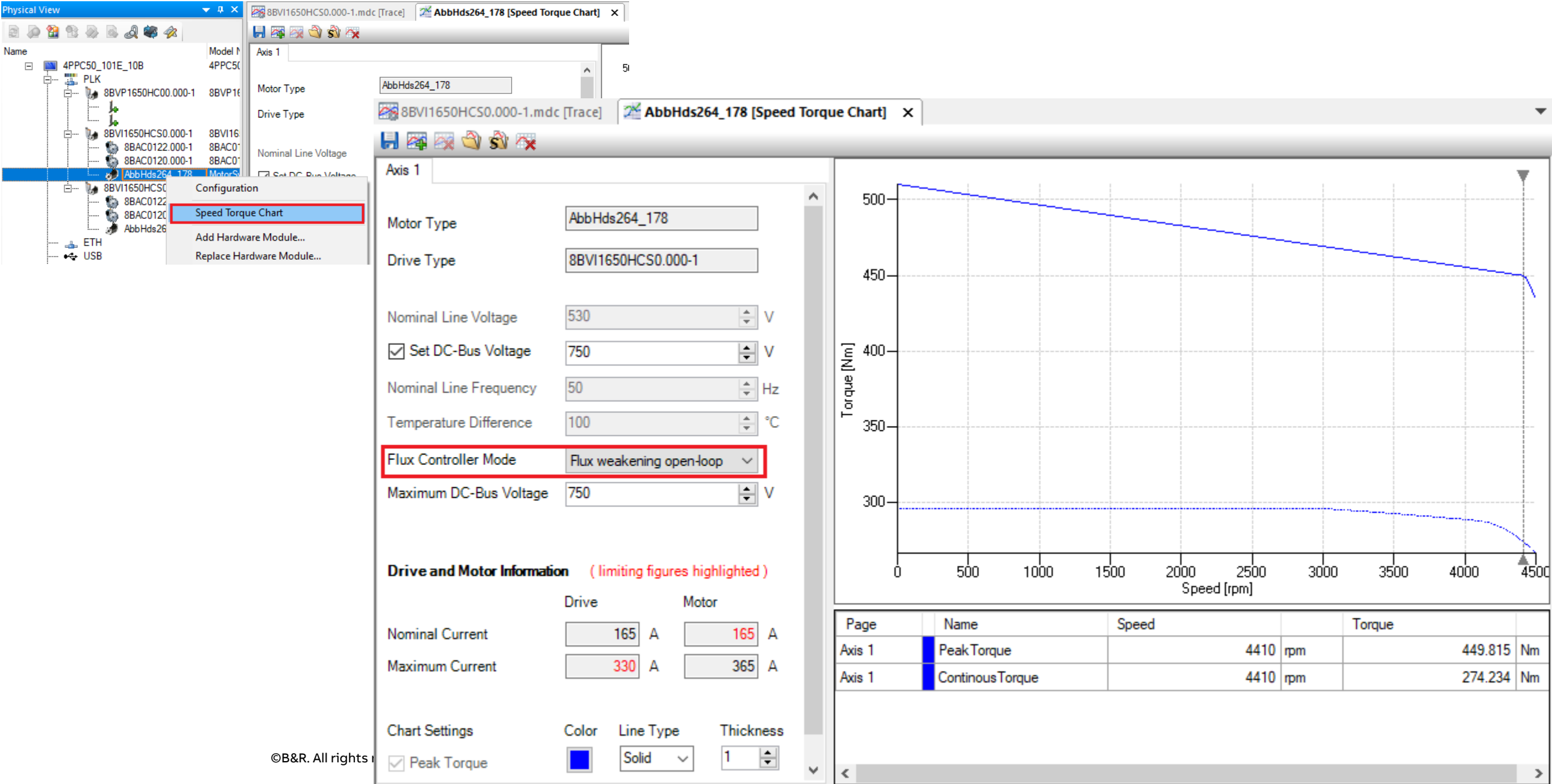
用给定的电机参数可以计算出开环弱磁特性曲线

特性曲线的自动配置工具被设计用来(选择)电机扭矩. (同规格选2200转还是3000转电机?)

参数再初始化, FWCTRL_ISD0, FWCTRL_SPEED0, FCTRL_IM_LIM_MIN 在以下情况下会被重新计算:

- 写电机参数(MOTOR_TYPE - MOTOR_MAGNETIZING_CURR)
- 改变UDC_BLEEDER_ON, UDC_NOMINAL, UDC_DETECTION

Speed Torque Chart – 开环弱磁检查工具



闭环弱磁

闭环弱磁控制 – 相关参数

参数名	读写权限	数据类型	取值范围	单位	说明
FCTRL_MODE	RD,WR	UI4	0, 33, 34, 35		Flux controller mode 0...Field weakening deactivated (PMSM only) 33...Field weakening closed-loop control (PMSM only) 34...Field weakening open-loop control (PMSM only) 35...Field weakening closed-loop control with PI controller (PMSM only)
FWCTRL_TN	RD,WR	R4	>= 0.0	s	CTRL flux weakening: Integral time constant
FCTRL_IM_LIM_MIN	RD,WR	R4		A	CTRL flux: Magnetizing current limiter: Lower limit
FCTRL_IM_LIM_MAX	RD,WR	R4	PMSM: 0.0	A	CTRL flux: Magnetizing current limiter: Upper limit

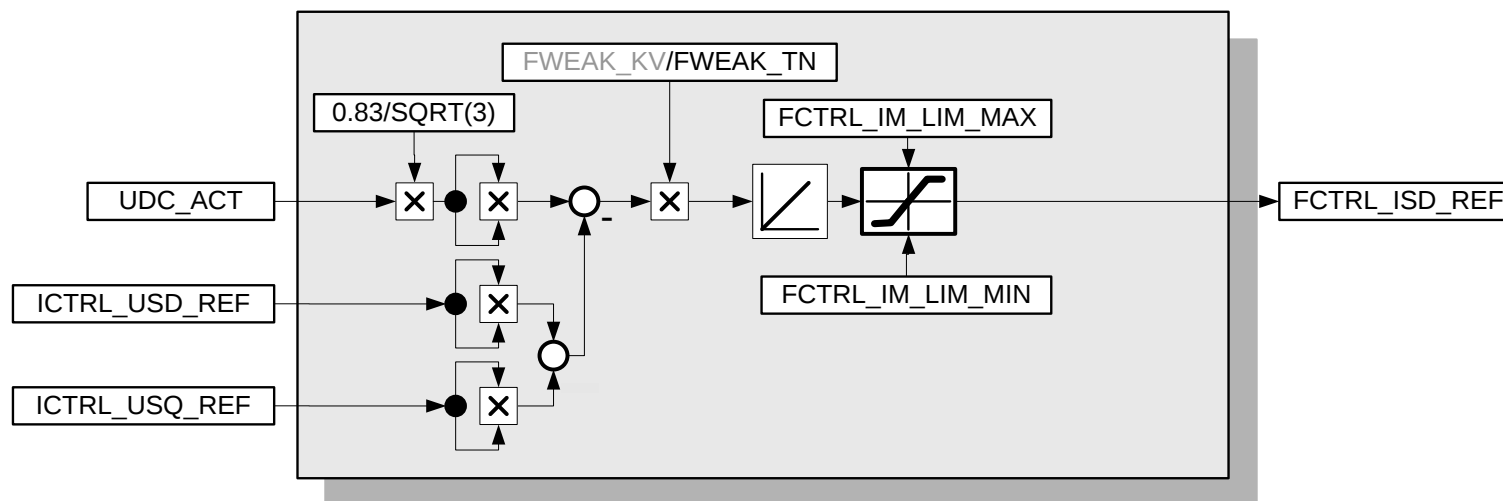
闭环弱磁控制 – 功能性

闭环弱磁控制通过调整 $FCTRL_ISD_REF$, 确保存在设定的电压余量. 假如电压如下:

$$u_s^2 = u_{sd}^2 + u_{sq}^2 > \left(0.83 \cdot \frac{u_{dc,act}}{\sqrt{3}} \right)^2$$

弱磁电流一般比开环更小. 弱磁控制器是一个积分控制器积分时间常数 $FWEAK_TN$ 被预设成如下:

$$T_s = k \cdot \frac{L_s}{R_s} \quad k = 1.75$$



闭环弱磁控制 – 限制

FCTRL_IM_LIM_MAX 预设为 0.0.

FCTRL_IM_LIM_MIN 被配置如下.

$$i_{sd,min} = i_{sd0} \cdot \left(1 - \frac{N_0}{N_{max}} \right)$$

这里 N_{max} , N_0 , 和 i_{sd0} 和开环弱磁一样计算公式计算出来的.

$$N_{max} = \frac{u_{dc,max}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot z_p \cdot \Psi_p} \quad N_0 = \frac{u_{dc,nominal}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot z_p \cdot \underbrace{\sqrt{\psi_p^2 + (L_{sq} \cdot i_{s,max})^2}}_{\psi_{max}}} \quad i_{sd0} = -\frac{\Psi_p}{L_{sd}^*}$$

闭环弱磁控制 – 点评

由于是闭环控制, 磁场被按需要来弱化 电流利用率(效率)更好.

与开环弱磁控制相比, 振荡趋势更大.

以下情况下, `FWCTRL_TN` 会被重新初始化:

写一下电机参数

`(MOTOR_TYPE - MOTOR_MAGNETIZING_CURR)`

闭环弱磁控制(PI) – 参数表

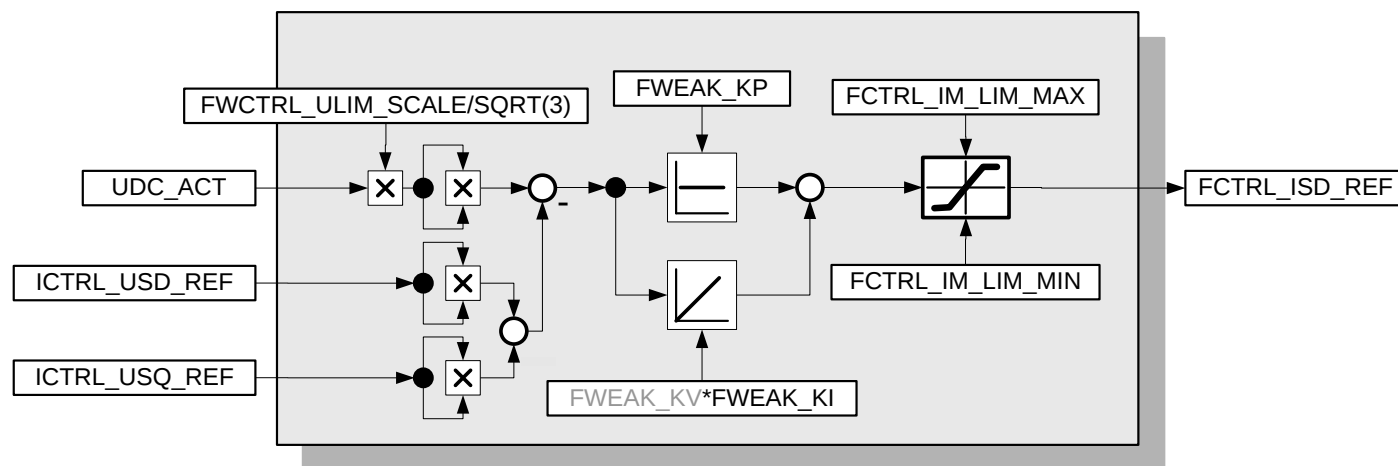
参数名	读写权限	数据类型	取值范围	单位	说明
FCTRL_MODE	RD,WR	UI4	0, 33, 34, 35		Flux controller mode 0...Field weakening deactivated (PMSM only) 33...Field weakening closed-loop control (PMSM only) 34...Field weakening open-loop control (PMSM only) 35...Field weakening closed-loop control with PI controller (PMSM only)
FWCTRL_KP	RD,WR	R4	>= 0.0		CTRL flux: Proportional gain
FWCTRL_KI	RD,WR	R4	>= 0.0		CTRL flux: Integral gain
FWCTRL_ULIM_SCALE	RD,WR	R4	0.0...1.0 (0.83)		CTRL flux: Reserve voltage
FCTRL_IM_LIM_MIN	RD,WR	R4		A	CTRL flux: Magnetizing current limiter: Lower limit
FCTRL_IM_LIM_MAX	RD,WR	R4	PMSM: 0.0	A	CTRL flux: Magnetizing current limiter: Upper limit

闭环弱磁控制特性 (PI) – 功能性

把闭环控制从积分控制扩展到比例+积分控制

可以用FWCTRL_ULIM_SCALE调整母线电压利用率

不能根据电机参数自动计算FWCTRL_KP 和 FWCTRL_KI, 必须手动设置



限制值 (FCTRL_IM_LIM_MAX=0, FCTRL_IM_LIM_MIN) 和开环控制一样计算方法.

闭环弱磁控制 (PI) – 点评

因为是闭环控制, 弱磁强度按需要设定, 提高了电流使用率(效率)

保留电压大小参数 `FWCTRL_ULIM_SCALE` 可调 → 重要: 不要设太小!

归功于比例作用, 振荡趋势能明显减少 → 比纯积分控制器可以设更高的速度环增益!

系统需要重新初始化如下参数 `FWCTRL_KP`, `FWCTRL_KI`, `FWCTRL_ULIM_SCALE` 当发生如下情况:
写以下电机参数 (`MOTOR_TYPE` - `MOTOR_MAGNETIZING_CURR`)

MTPC/MTPA

The background is a solid orange color with a complex, abstract pattern of dots. The dots are arranged in a grid that appears to be moving or undulating, creating a sense of depth and motion. The pattern is more dense in some areas and more sparse in others, giving it a textured, almost 3D appearance.

MTPC/MTPA (Maximum Torque Per Current / Amps)

$$T_m = \frac{3}{2} Z_P (\psi_P i_q + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}).$$

在上述公式中, 一般 $L_d < L_q$

设 $i_{sd} < 0$ 时, $(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}$ 这部分转矩 > 0

凸极比 $\lambda = L_q / L_d$, 值越大, 则第二部分可提供转矩(磁阻转矩)越大.

MTPC/MTPA – 相关参数

Parameter-ID Name	Access	Data type	Value range	Default value	Unit	Description
ICTRL_MODE	RD/WR	UI2	Bit 0: Bit 1: Bit 3:	0		CTRL Current: mode Bit 0; Double Edge Sampling on Bit 1; Zero voltage sequence off Bit 3; MTPC control on
FCTRL_MODE	RD,WR	UI4	0,6,33,34,256			CTRL Flux: 0...Field weakening deactivated (only PMSM) 6...Field weakening open-loop control (only PMSM with MTPC) 33...Field weakening closed-loop control (only PMSM) 34...Field weakening open-loop control (only PMSM) Bit8: Field weakening at zero speed (only IM)
MOTOR_SALIENCY_RATIO	RD, WR	R4	0.2 .. 1.0	1.0		Motor: Factor for inductance saliency
MOTOR_TORQ_CONST	RD, WR	R4	FLT_EPSILON .. FLT_MAX	1.0	Nm/A	Motor: Torque constant
MOTOR_POLEPAIRS	RD, WR	R4	>0			Motor: Number of pole-pairs
MOTOR_VOLTAGE_CONST	RD, WR	R4	FLT_EPSILON .. FLT_MAX		mV/min	Motor: Voltage constant
MOTOR_STATOR_INDUCTANCE	RD, WR	R4	FLT_EPSILON .. FLT_MAX		H	Motor: Stator inductance
MTPC_ISQ_REF	RD	R4			A	CTRL Current: Input current quadrature component at MTPC control
MTPC_ISD_REF	RD	R4			A	CTRL Current: Input current direct component at MTPC control
ICTRL_ISQ_REF	RD	R4			A	CTRL Current: Set stator current quadrature component
ICTRL_ISD_REF	RD	R4			A	CTRL Current: Set stator current direct component
SCTRL_SPEED_ACT	RD	R4			1/s	CTRL Speed controller: Actual speed

MTPC/MTPA – 一个MTPC设置例子

Name	ID	Value	Unit	Enable	Comments
MOTOR_SALIENCY_RATIO	1277	0.827		TRUE	Motor: Magnetic saliency ratio
ICTRL_MODE	869	8		TRUE	CTRL Current: Mode
FCTRL_MODE	870	6			CTRL Flux: Mode

MTPC/MTPA – 点评

总的说来, MTPC不提高电流控制性能

如果是贝加莱标准电机(都是SPM), 不会提高电机性能

对第三方特殊电机, 比如IPM电机有作用

如果电机特性适合(比如高凸极比的IPM内嵌式电机), MTPC可以提高效率, 尤其在重载情况下

弱磁的问题和限制

需求

伺服驱动器: 过压保护: 电机的速度被限制, 如果一个故障发生(失去弱磁), 母线电压不高于制动电阻动作电压(UDC_BLEEDER_ON), 或者依模块而定的最大母线电压

电机: 在弱磁区域, 电机的效率水平更差了(一部分电流不产生扭矩). 在电机选型时, 必须考虑到这一点.

电机: 当增大速度范围时, 电机短路的潜在风险必须考虑(比如瞬间退磁时).

电机: 电机必须有合适的绝缘, 以应对伺服驱动器输出故障时(弱磁消失), 存在的反电势电压过高.

可能存在的问题，方案和限制

弱磁控制运行周期为 $400\text{ }\mu\text{s}$ → 导致控制死区

在高电子速(电频率)下，控制死区导致振荡趋势和不稳定

■ 可能的对策:

- 电流环周期减半(`ICTRL_MODE` Bit 0 = 1, 仅限于ACOPoSMulti, 计算时间加倍)
- 增加开关频率 (会导致损耗和计算时间增加)

■ 其它方面速度限制 (驱动器600 Hz 电频率限制)

比如: 电机额定速度 $n_N = 6000\text{ rpm}$, $z_p = 5$

额定电频率: $f_N = 500\text{ Hz}$ 电频率 → 仅仅20% 速度增加可能(和弱磁无关)

■ ACOPoSMulti: $U_{DC} = 750\text{ Vdc}$ (active, `UDC_BLEEDER_ON` = 800 Vdc) → 弱磁只能增加最大. 6%($800/750=1.0667$)速度

弱磁的术语

相关术语

序号	名称	说明	举例
1	弱磁	减弱磁通，降低反电势，以达到扩速或增加扭矩的目的	MTPV，MTPC
2	开环弱磁	根据计算参数，一定速度下给定一定弱磁电流.	弱磁电流利用率低, 电流偏大，启动弱磁偏早
3	闭环弱磁	根据实际情况, 自动调节弱磁电流, 使母线电压利用率得到保证	弱磁电流利用率高, 缺点：扭矩波动更大
4	恒电压曲线	在闭环弱磁下，反电势被控制在恒定值，转速越高，弱磁电流越大	速度高到需要启动弱磁后，反电势电压恒定.
5	开环弱磁特性曲线	含有开始弱磁速度, 最大弱磁电流的开环弱磁速度-弱磁电流曲线	可看不同速度下弱磁电流大小
6	开始弱磁速度	开环情况下，开始启动弱磁的最低速度.	开始弱磁速度可能比额定转速低→弱磁下波动
7	Speed-torque工具	可检查开环弱磁下，各速度下持续扭矩。	选中电机/右键/
8	母线电压利用率	反电势电压占额定母线电压的百分比。调该参数可调节弱磁深度	利用率越高, 弱磁越浅；利用率越低，弱磁越深
9	退磁电流	在高转子温度下，该电流可瞬间让磁钢退磁。大于最大弱磁电流。	退磁后，因反电势减小，可导致电机短路
10	最大弱磁电流	开启弱磁时，最大弱磁电流限制。	弱磁电流是负的，最大数越小，弱磁电流越大
11	弱磁下最大速度	弱磁因故障关闭时，电机反电势等于逆变最大母线电压下的速度	保护驱动器避免因弱磁关闭被高反电势击穿
12	MTPC/MTPA控制	每单位电流最大扭矩控制，适合低速重载场合	磁阻电机有用，SPM表贴式几乎用不到
13	磁阻转矩	重载下通过D轴电流来获得的转矩	比如IPM内嵌式电机，适合低速重载情况
14	凸极比	D轴电感和Q轴电感的比. 凸极比越大，通过D轴电流获得磁阻转矩大	比如IPM内嵌式电机

?

B&R

A thick, solid orange horizontal bar positioned directly beneath the 'B&R' text.