

本文只是简单的叙述一下面贴式 PMSM 弱磁控制内容，而不做较深层次的分析，因为是部分个人的见解，所以难免有错误或者不全面的地方，请大家指正，谢谢！

驹 QQ: 422741349

1. 弱磁控制的原理与控制方法

由于逆变器直流侧电压达到最大值后会引引起电流调节器的饱和，为了获得较宽的调速范围，在基速以上高速运行时实现恒功率调速，需要对电动机进行弱磁控制。

PMSM 弱磁控制的思想源自他励直流电动机的调磁控制，当他励直流电动机端电压达到最大电压时，只能通过降低电动机的励磁电流，改变励磁磁通，在保证电压平衡的条件下，使电动机能恒功率运行于更高的转速。也就是说，他励直流电动机可以通过降低励磁电流达到弱磁扩速的目的。对于 PMSM 而言，励磁磁动势因永磁体产生而无法调节，只能通过调节定子电流，即增加定子直轴去磁电流分量来维持高速运行时电压的平衡，达到弱磁扩速的目的。

1.1. 永磁同步电动机矢量控制的电压、电流轨迹分析

在弱磁高性能调速时，在不同的工作区域内，由于控制规律的不同，为了获得最优的控制效果，通常会选择不同的电流、电压矢量轨迹，因此，非常有必要去分析了解此时的电流、电压矢量轨迹。

1.1.1. 电压极限椭圆

受逆变器输出电压的限制，PMSM 稳定运行时，电压矢量幅值为：

$$u_s^2 = u_d^2 + u_q^2 \leq u_{\lim}^2 \quad (1-1)$$

又知当 PMSM 稳定运行时，且忽略定子电阻压降的情况下，电压方程可以化简为：

$$\begin{cases} u_d = -\omega_e L_q i_q \\ u_q = -\omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (1-2)$$

将式 1-2 代入式 1-1 中可得：

$$(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \Psi_f)^2 = (u_{\lim} / \omega)^2 \quad (1-3)$$

式中 $u_{\lim} = u_{dc} / \sqrt{3}$ 是定子端相电压， u_{dc} 为直流母线电压。当 $L_d \neq L_q$ 时，为一椭圆方程。而当 $L_d = L_q$ 时，式 1-2 可化简得圆心在 $(-\Psi_f / L_0, 0)$ 半径为 $u_{\lim} / (L_0 \omega)$ 的圆方程：

$$i_q^2 + (i_d + \Psi_f / L_0)^2 = [u_{\lim} / (L_0 \omega)]^2 \quad (1-4)$$

以椭圆方程为例，当电流调节器饱和后，定子端相电压为 $u_s = u_{\lim}$ ，此时转速 ω 下对应的运行轨迹为式 1-3 示 dq 坐标系下的椭圆，并称其为转速 ω 下的电压极限椭圆。易知在一定转速 ω 下，定子电流只能运行于该椭圆轨迹内。且随着转速 ω 的增大，电压极限椭圆会逐渐缩小。

1.1.2. 电流极限圆

受逆变器输出电流和电机本身额定电流的限制，PMSM 稳定运行时，电流矢量幅值为：

$$i_s^2 = i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\lim}^2 \quad (1-5)$$

由上式可以看出，电流矢量轨迹在 dq 坐标系下是以原点为圆心的圆，并称该圆为电流极限圆，如图 1-1 所示。电动机稳定运行时，定子电流矢量既不能超过电压极限椭圆，也

不能超出电流极限圆，一定要在电压极限椭圆和电流极限圆内。如 $\omega = \omega_0$ 时，电流矢量 i_s 的范围被限制在阴影区域内。

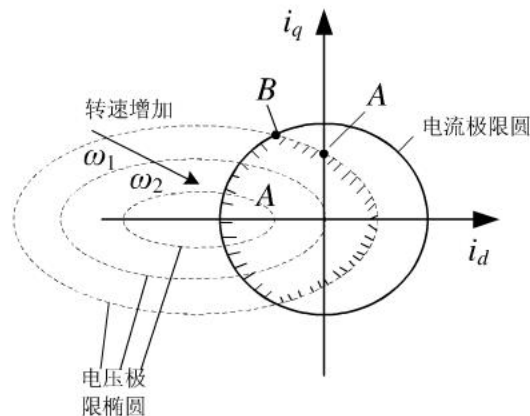


图 1-1 电压极限椭圆与电流极限圆

1.2. 永磁同步电动机弱磁控制方法理论分析

由式 1-1 可以看出，当电动机电压达到逆变器输出电压的极限时，即 $u_s = u_{lim}$ ，如果要继续升高转速则只能靠调节 i_d 和 i_q 来实现，这就是电动机的“弱磁”运行方式。增加直轴去磁电流分量 i_d 和减小交轴电流分量 i_q ，以维持电压平衡，从而得到弱磁效果。但是为确保相电流不超过极限值，应保证弱磁控制时增加 i_d 的同时必须相应减小 i_q 。

下面以隐极电机（ $L_d = L_q$ ）为例分析 PMSM 的弱磁控制过程。

为了解这一过程，先参照图 1-2 了解什么是最大转矩/电流控制。

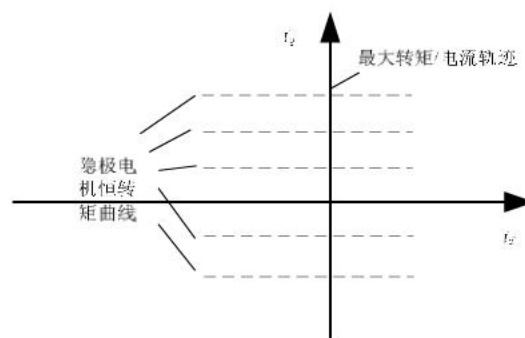


图 1-2 恒转矩与最大转矩/电流轨迹

易知隐极电机的恒转矩轨迹在 i_d 、 i_q 平面上为一系列平行于 d 轴的水平线，其不仅关于 d 轴对称，而且在第二象限为正（运行于电动机状态），在第三象限为负（运行于制动状态）。

不论在第二象限还是第三象限，某指令值的恒转矩轨迹上的任一点所对应的定子电流矢量均导致相同值的电动机转矩。这就牵涉到寻求一个幅值最小的定子电流矢量的问题，因为定子电流越小，电动机效率越高，所需逆变器容量也越低。在 i_d 、 i_q 平面图中，某指令值

的恒转矩轨迹上距离坐标原点最近的点，即为产生该转矩时所需的最小电流的空间矢量。把产生不同转矩值所需的最小电流点连起来，即形成电动机的最大转矩/电流轨迹。由此易知隐极电机的最大转矩/电流轨迹就是 q 轴。因此，隐极电机的 $i_d = 0$ 控制即为最大转矩/电流比控制。

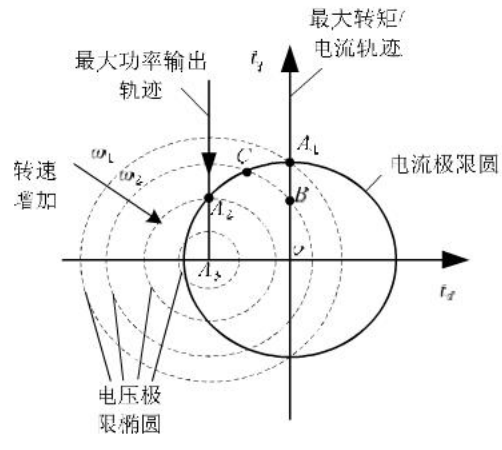


图 1-3 隐极电机定子电流矢量轨迹 ($-\psi_f / L_d < i_{lim}$)

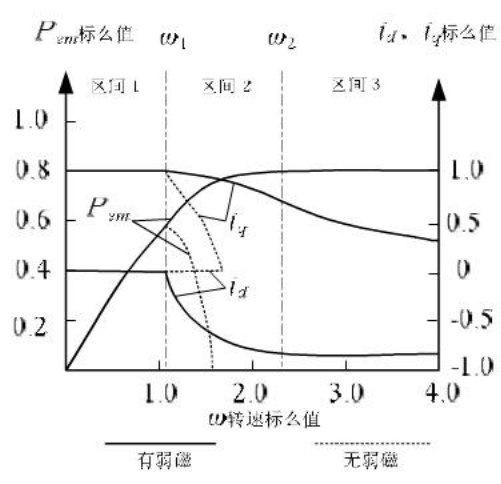


图 1-4 永磁同步电动机功率输出特性

图 1-4 中区间 1 为 $i_d = 0$ 正常控制区间，区间 2 为弱磁升速控制区间。

下面以定子电流矢量轨迹图 1-3 分析隐极式 PMSM 的弱磁扩速控制过程。图 1-3 中 A_1 点对应的转矩是 T_{em1} ，是电动机在转速 ω_1 时输出的最大转矩（电压和电流均达到极限值，故 ω_1 即为电动机最大转矩时的转折速度）。转速升高到 ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) 时，最大转矩/电流轨迹与电压极限椭圆相交于 B 点，对应的转矩为 T_{em3} ，若此时定子电流矢量偏离最大转矩/电流轨迹由 B 点沿着电压极限椭圆移动到 C 点，在此过程中电流并没有达到极限值，但当移动到 C 点时，将会输出更大的转矩 T_{em2} ($T_{em2} > T_{em1}$)，从而提高了电动机超过转折速度运行时的输出功率。如果要继续提高转速，则定子电流可以沿着电流极限圆由 C 点移动到 A_2 点，但是转矩会下降。通过分析可以看出，定子电流矢量在从 $B \rightarrow C \rightarrow A_2$ 变化的过程中， i_d 逐步增大，削弱了永磁体磁通，在逆变器容量不变的情况下，达到了弱磁扩速的目的。并且转速越高，输出的转矩会越小。

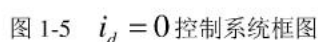
当电动机运行于某一转速 ω_e 时, 由电压平衡方程:

可得到弱磁控制电流矢量轨迹:

由式 1-7 可得到转速表达式为:

弱磁控制式为满足式(1-7)，如图 1-3 所示，通过控制 i_d 可使逆变器输出功率不变，将电动机运行范围扩大到高速区域。但在上述两种控制方案中，当电动机转速达到较高转速时，电机反电势增大，都将会导致定子端电压大于母线电压，迫使定子电流跟踪其指令值所需的电压差减小至 0（甚至为负），此时逆变器的 dq 轴电流控制器都会开始饱和，此时 dq 轴电流控制器输出均是其限幅值从而失去控制，没有达到弱磁控制的目的。因此在实际应用中，PMSM 的弱磁控制主要是在满足电压极限椭圆和电流极限圆的基础上，调整 i_d 、 i_q ，控制电流矢量轨迹，避免电流调节器饱和，从而使 PMSM 由恒转矩调速平稳、快速地过渡到弱磁工作模式。

依上一节弱磁控制原理的分析,下面再结合 PMSM 基本矢量控制系统 ($i_d = 0$) 结构框图分析正常控制时达到极限速度时控制器的状态、弱磁的具体控制原理及过程。



P D 文件 便 " p d f F a c t 试 用 本 版 建 www.fineprint.cn

电动机的定子端电压就会升高，电流 PI 调节器的输出就会逐步接近饱和值，使调节裕量减少，影响调节能力。

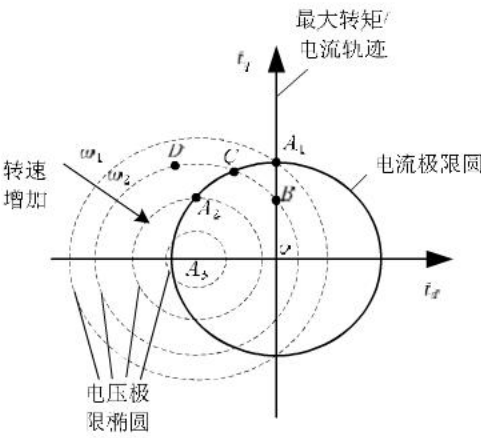


图 1-6 隐极电机定子电流矢量轨迹 ($-\psi_f/L_d < i_{im}$)

如图 1-6 示当电流 PI 调节器饱和后，电动机的定子端电压达到最大值，电流矢量 i_s 达到电压极限圆上的 A_1 点，使电动机电流失去控制。定子电流矢量轨迹将由电压极限方程(式 1-3)和电流极限方程(式 1-5)决定。此时若不加以控制 i_s 将脱离 A_1 ，可能会向 D 点或向 B 点摆动。如果在 A_1 点能够控制 i_s ，使其 i_q 逐渐减小， i_d 逐渐向负增大，那么 i_s 必然会向左摆动，向 C 点靠近，使得反向直轴电流 i_d 抵消永磁体磁通。由式 $u_s = \omega_e \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2}$ 可知，这会使定子电压幅值 u_s 减小， $u_s < u_{lim}$ ，使调节器脱离饱和，与此同时，随着 i_d 的逐渐增大和 i_q 的逐渐减小，转子速度范围会逐步扩大。

实际进行弱磁控制时，主要需要考虑下面的情况：

- ① 相关电流方程必须设定在最极端条件下均能运行，因为其运行在电机反电势极高的情况下，此时电流调节器已饱和，可利用的直流母线电压极小甚至为 0。
- ② 为保证电机稳定运行在弱磁高速区，需要进一步控制输入至电压逆变器的电压。
- ③ 相关的弱磁控制数据取决于电机运行时的电气特性，需要实时地更改这些数据。