

六、什么是电压极限圆和电流极限(椭)圆

我们令：

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} = I_m$$

前面我们介绍了 dq 坐标下电压方程为：

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_e \Psi_d$$

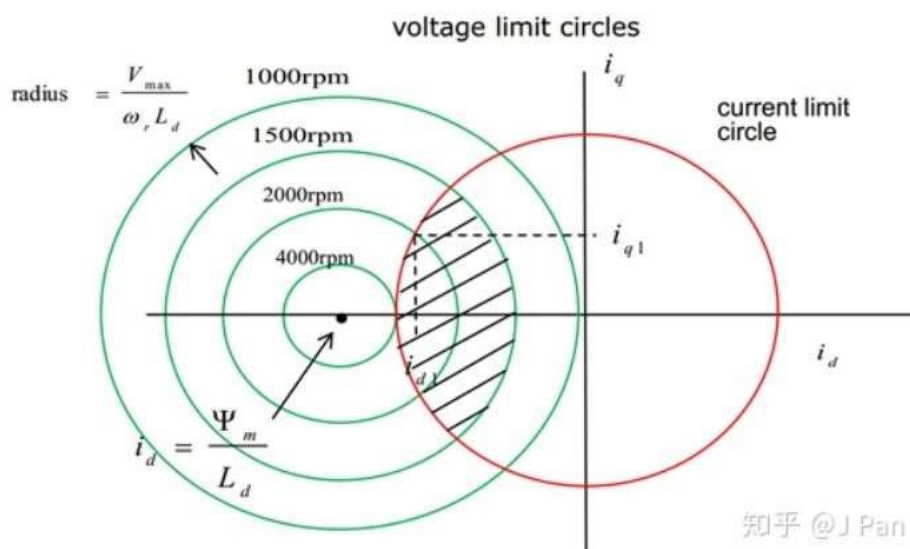
现在我们考虑稳态时情况，先忽略电阻 R_s （通常比较小），稳态时 Ψ_d 、 Ψ_q 不再变化，因此电压平衡方程可以简化为：

$$u_d = -\omega_e \Psi_q = -\omega_e L_q i_q$$

$$u_q = \omega_e \Psi_d = \omega_e (L_d i_d + \Psi_m)$$

为简单起见，先假定 $L_d = L_q = L$ 则：

$$|u|^2 = (u_d)^2 + (u_q)^2 \Rightarrow \left(i_d + \frac{\Psi_m}{L}\right)^2 + (i_q)^2 = \left(\frac{|u|}{\omega_e L}\right)^2$$



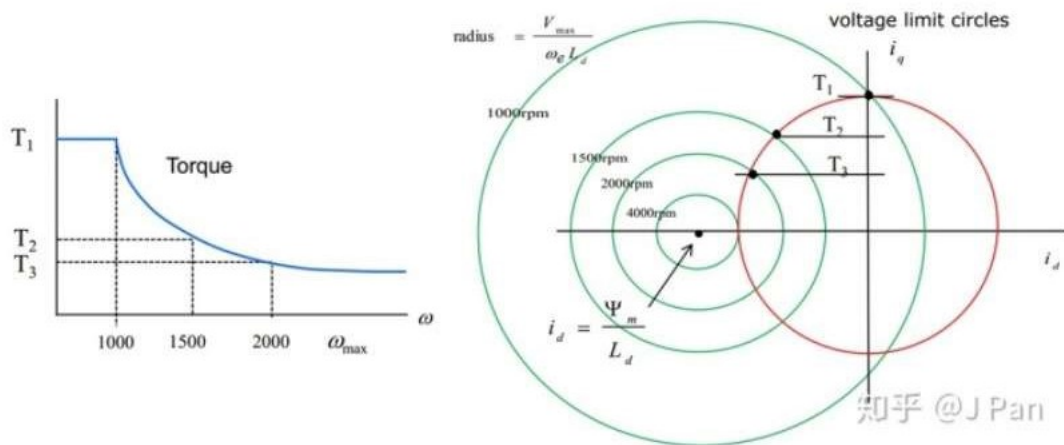
Source: Dr. Galea

其中绿色为电压极限圆，红色为电流极限圆。电机的电压是由逆变器提供的，是有限制的，也就是说 $|u| \leq V_{\max}$ ，很显然能得出以下几个结论：

- 电压极限圆不是正好在电流坐标系的中心，偏置为 Ψ_m/L_d ；
- 转速越高，电压圆的半径越小；
- 电机必须工作在电压圆与电流圆同时覆盖的区域（截面线示意的部位）

当电机转速很低时，电压极限圆很大，电流极限是其主要约束，因此低速下电流可以一直保持在

i_q 为最大值状态，此时称之为恒转矩区，如下图所示的T1区。当转速继续上升时，电压和电流极限圆都成为约束，两者的交点处为工作点，如下图所示的T2和T3区， i_d 开始出现分量，此时成为弱磁状态，即永磁体产生的磁场被 i_d 产生的磁场削弱了，进而在同样的电压下能够产生更高的转速。

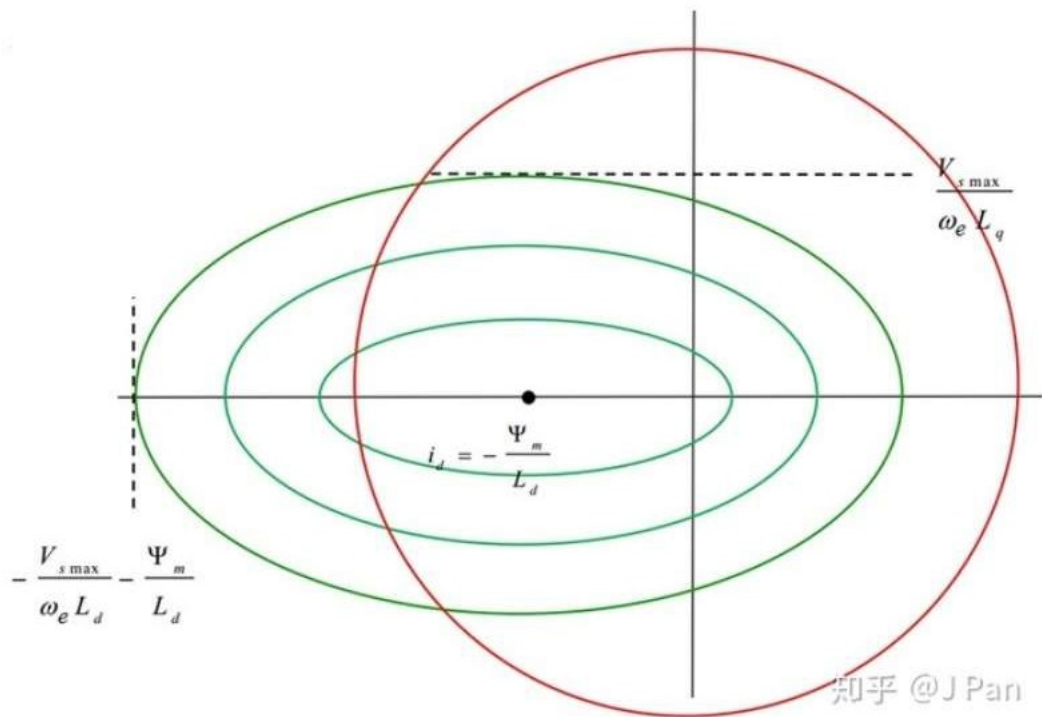


Source: Dr. Galea

上面讨论的是 $L_d = L_q$ （即隐极）的情况，当 $L_d \neq L_q$ 时，电压方程变为：

$$L_d^2 \left(\frac{\Psi_m}{L_d} + i_d \right)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_{smax}}{\omega_e} \right)^2$$

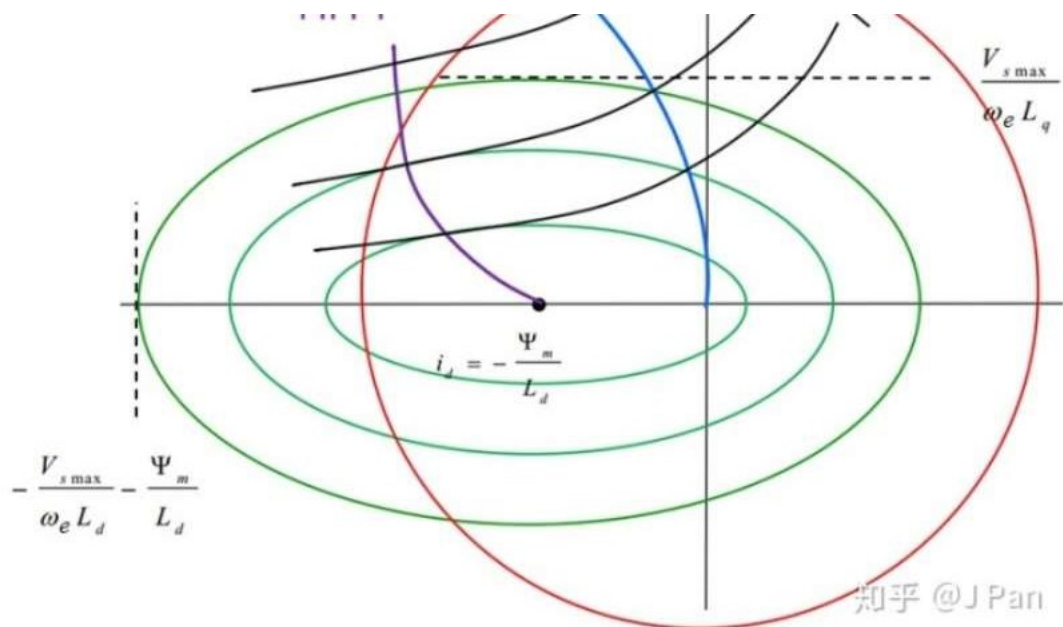
电压极限圆变成了电压极限椭圆，如下图所示：



Source: Dr. Galea

当电机做好之后， $T = f(i_d, i_q)$ ，因此任意的 i_d 、 i_q 都会对应一个力矩值，我们把力矩相同的之用线连起来就得到一族等力矩曲线，如下图所示的三条黑色的等力矩线。





Source: Dr.Galea

- 同一个等力矩的曲线会和不同的**电流圆相切**，产生一系列的切点，这些切点的轨迹就是MTPA（最大力矩比电流）控制点，因为在一定的电流极限下，该切点是力矩最大的点。
- 同一个等力矩的曲线会和不同的**电压椭圆相切**，产生一系列的切点，这些切点的轨迹就是MFPT（最大转速比力矩）控制点，因为在一定电压极限（电压代表着速度）下，该切点是速度最大的点。