

電流・電圧制限を考慮した IPMSMの最大出力制御

大阪府立大学 工学研究科
清水 悠生

電流・電圧制限値

- ✓ インバータがモータに供給できる電流・電圧には素子耐圧などの理由から上限が存在

$$I_{am} \geq I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

$$V_{am} \geq V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}$$

I_a : 電機子電流ベクトルの大きさ

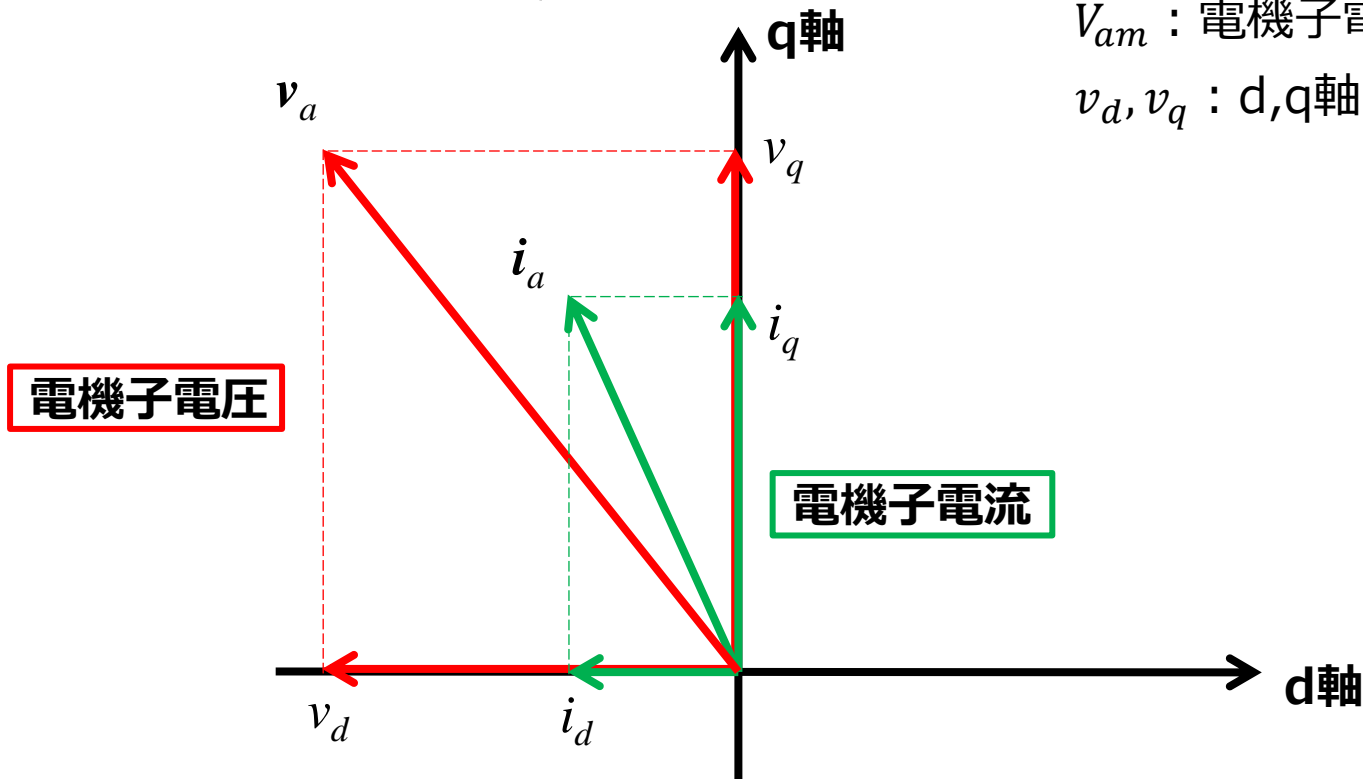
I_{am} : 電機子電流制限値

i_d, i_q : d,q軸電流

V_a : 電機子電圧ベクトルの大きさ

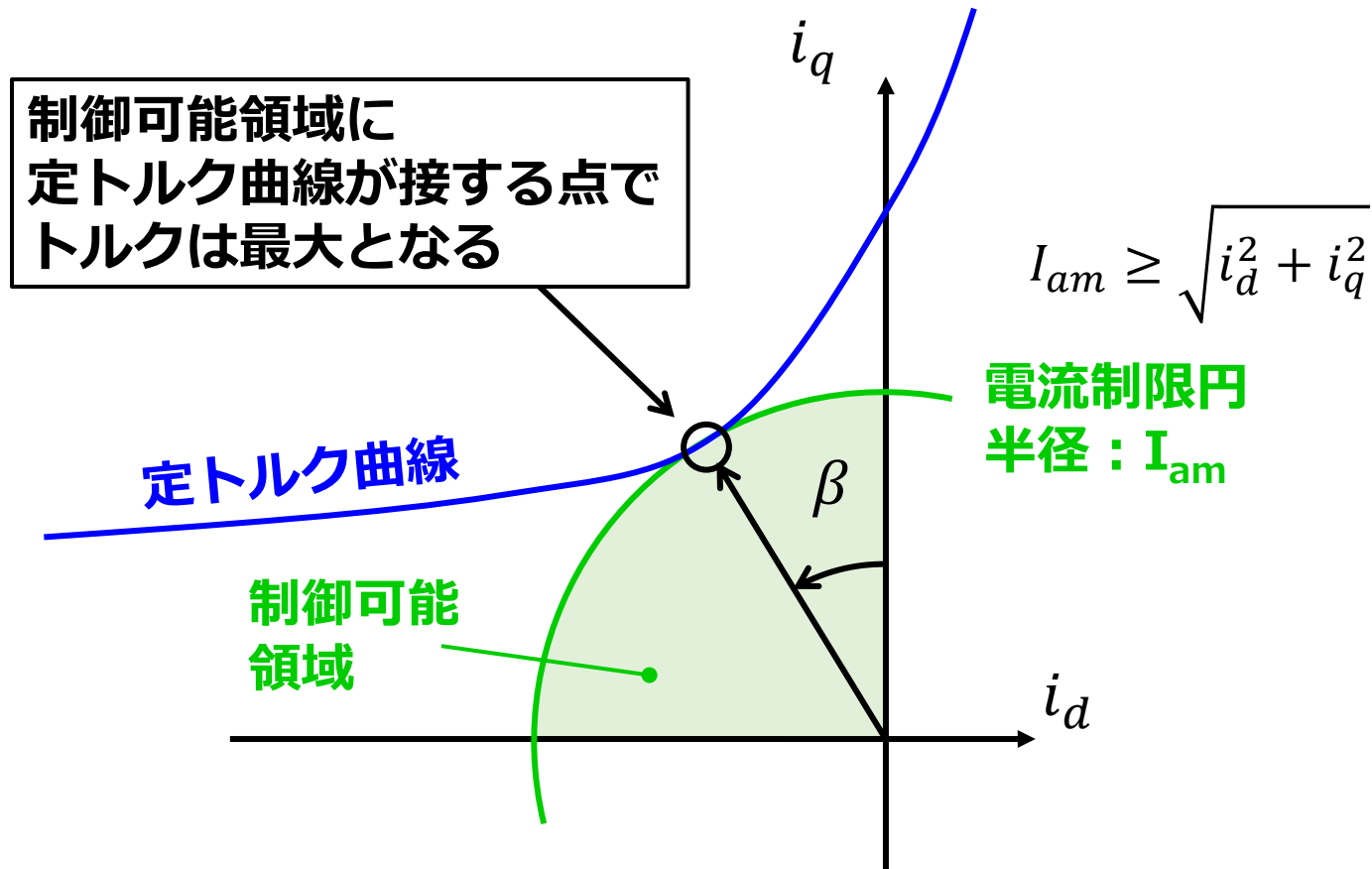
V_{am} : 電機子電圧制限値

v_d, v_q : d,q軸電圧



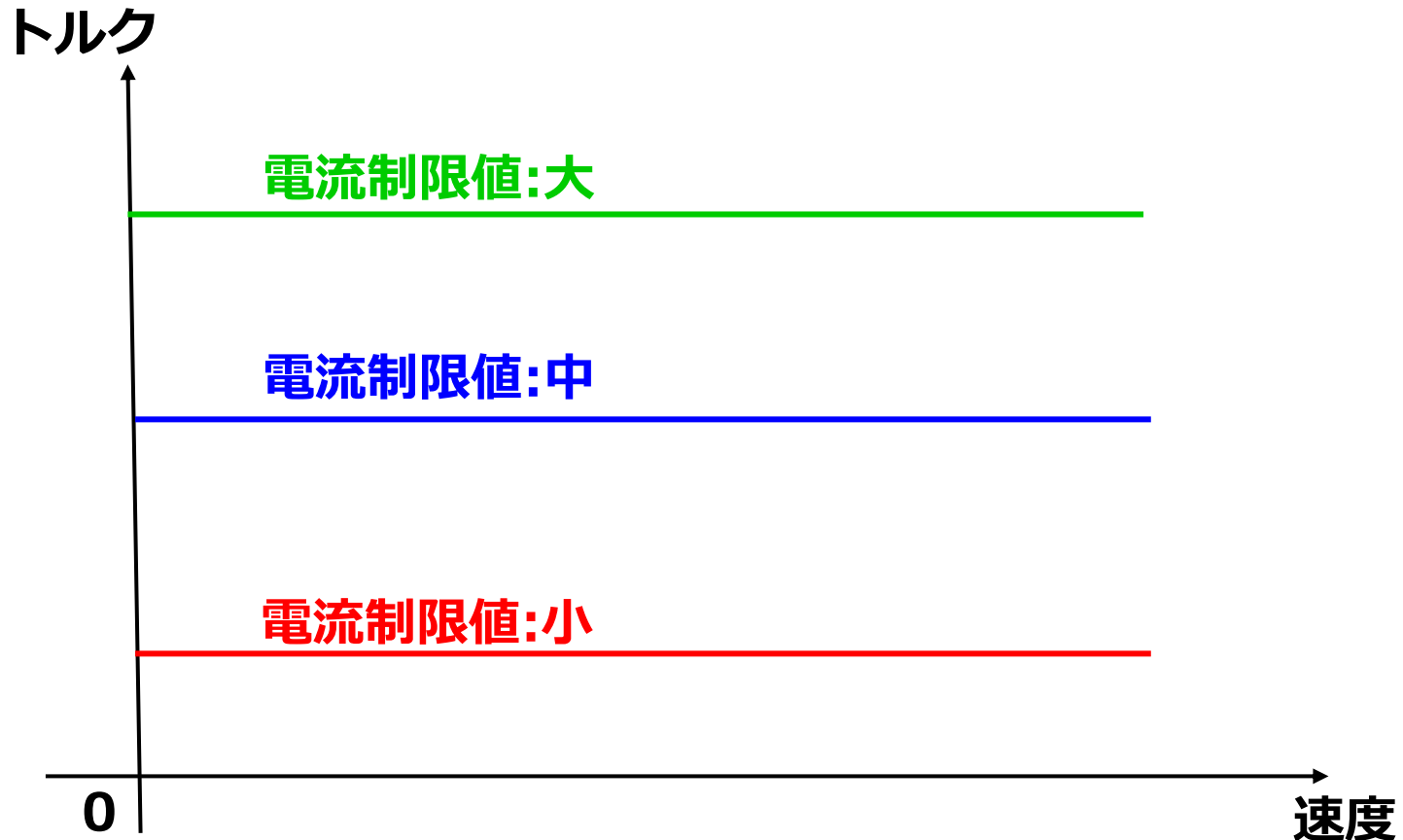
電流制限下でのid-iq平面上の制御可能領域

- ✓ id-iq平面上において電流制限のみを考えると
半径が電流制限値 I_{am} の円の内部が制御可能な領域となる
- ✓ この領域でトルクが最大となる電流ベクトル条件は
電機子電流を制限値に設定した場合のMTPA制御ポイント



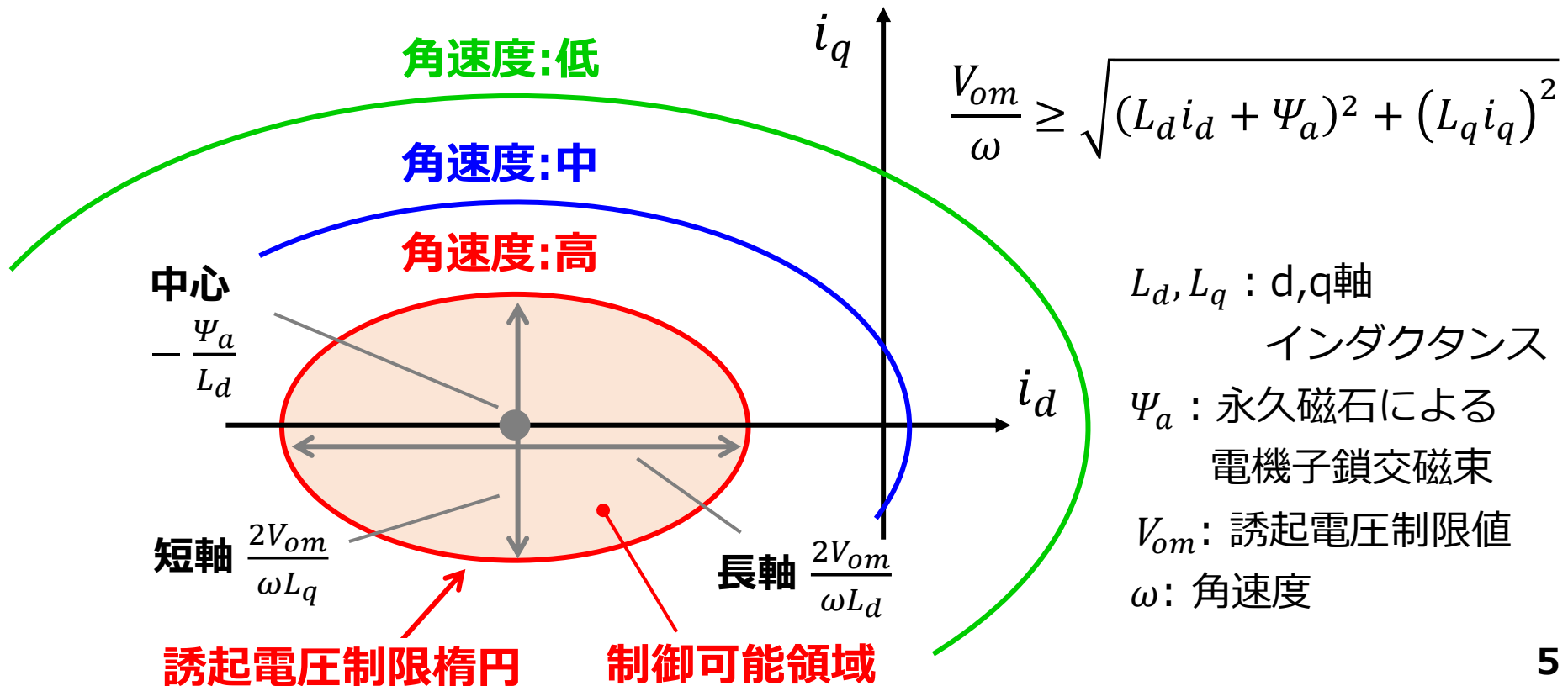
電流制限下でのMTPA制御時の速度ートルク特性

- ✓ 前スライドの図は回転速度に依存しないため
電流制限のみを考慮した場合の速度ートルク特性は下図
- ✓ ただし、鉄損の影響は考慮していない



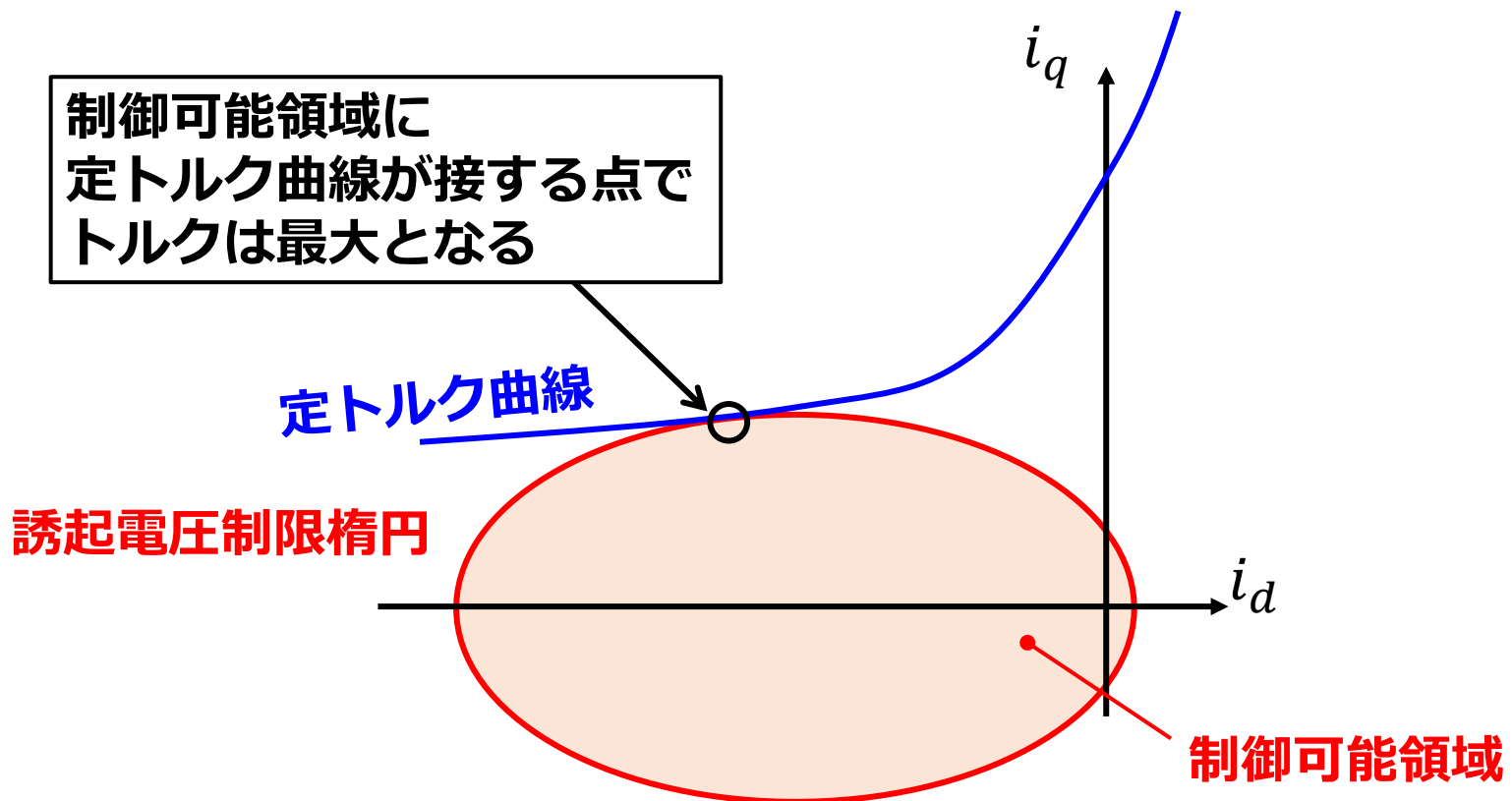
電圧制限下でのid-iq平面上の制御可能領域

- ✓ id-iq平面上において電圧制限のみを考えると
誘起電圧制限楕円の内部が制御可能な領域となる
- ✓ **電機子電圧制限ではなく誘起電圧制限**であることに注意
- ✓ 誘起電圧制限楕円は**高速になればなるほど小さくなる**



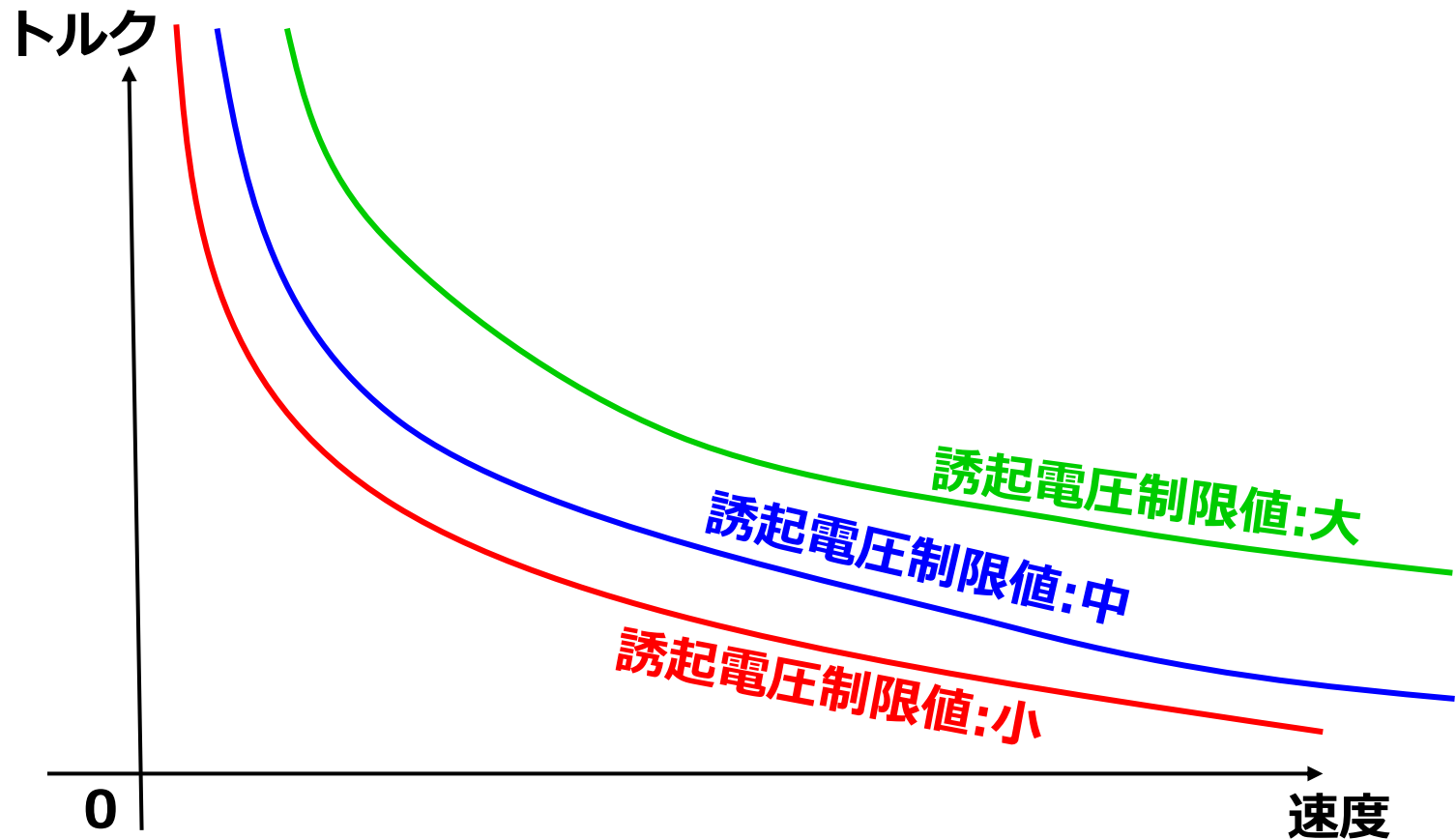
電圧制限下での最大トルク点

- ✓ 電圧制限下での制御可能領域でトルクが最大となる電流ベクトル条件は、誘起電圧を制限値に設定した場合（制限楕円上）のMTPF制御ポイント



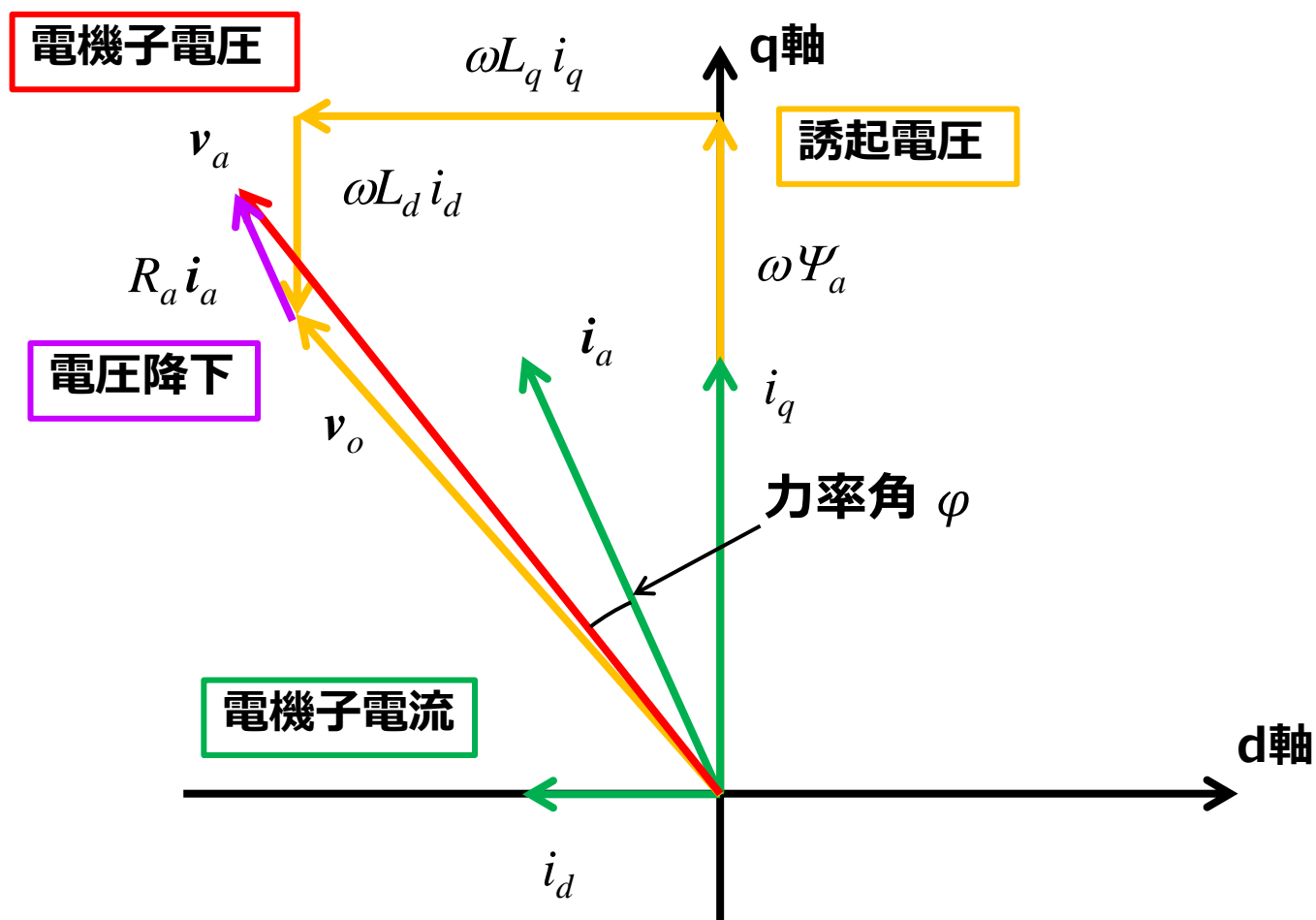
電圧制限下でのMTPF制御時の速度ートルク特性

- ✓ 誘起電圧制限楕円は速度が高速になるにつれ縮小するため高速になればなるほどトルクも小さくなる



電機子電圧と誘起電圧の制限(1/2)

- ✓ 電機子電圧ベクトルと誘起電圧ベクトルの関係は下図のように表される



電機子電圧と誘起電圧の制限(2/2)

- ✓ 誘起電圧制限値はベクトル図から求められる
- ✓ 簡単のため、力率角が 0° （力率1）を仮定することが多い

右図より、余弦定理を用いて

$$\begin{aligned} V_o^2 &= (R_a I_a)^2 + V_a^2 - 2R_a I_a V_a \cos\varphi \\ &= \underline{V_a^2 - 2R_a I_a V_a \cos\varphi} + \underline{(R_a I_a \cos\varphi)^2} \\ &\quad - \underline{(R_a I_a \cos\varphi)^2} + \underline{(R_a I_a)^2} \\ &= \underline{(V_a - R_a I_a \cos\varphi)^2} + \underline{(R_a I_a \sin\varphi)^2} \end{aligned}$$

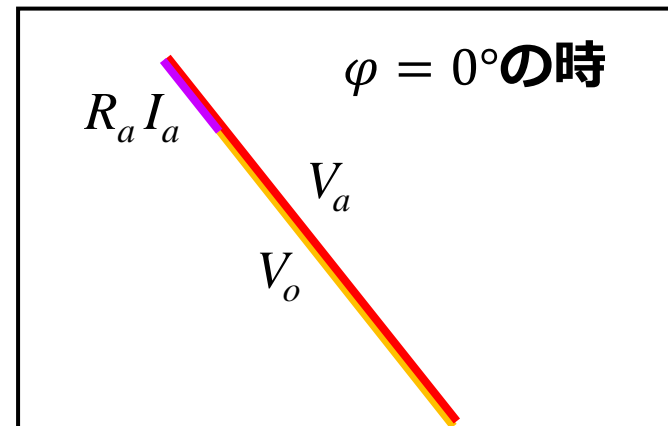
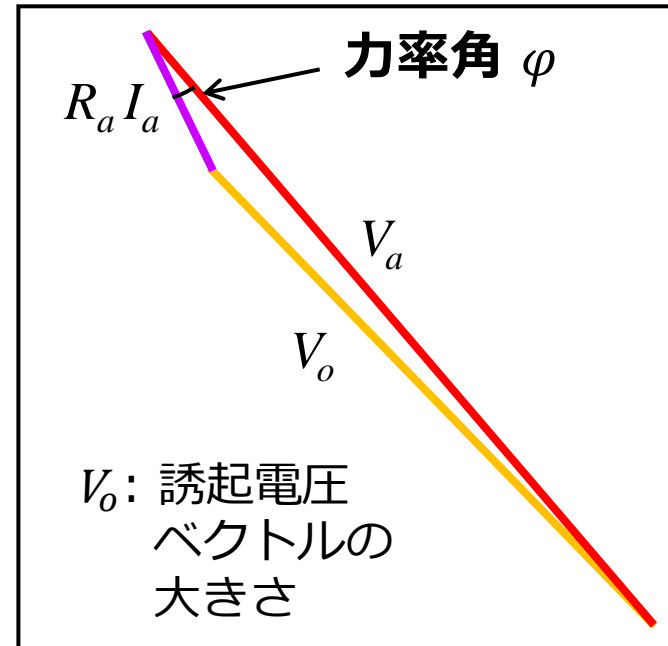
電機子電圧制限値 $V_{am} \geq V_a$ を考えると

$$\begin{aligned} V_o &= \sqrt{(V_a - R_a I_a \cos\varphi)^2 + (R_a I_a \sin\varphi)^2} \\ &\leq \sqrt{(V_{am} - R_a I_a \cos\varphi)^2 + (R_a I_a \sin\varphi)^2} = V_{om} \end{aligned}$$

電機子電圧制限値が一定のとき、誘起電圧制限値は力率角が 0° の時に最小値となる

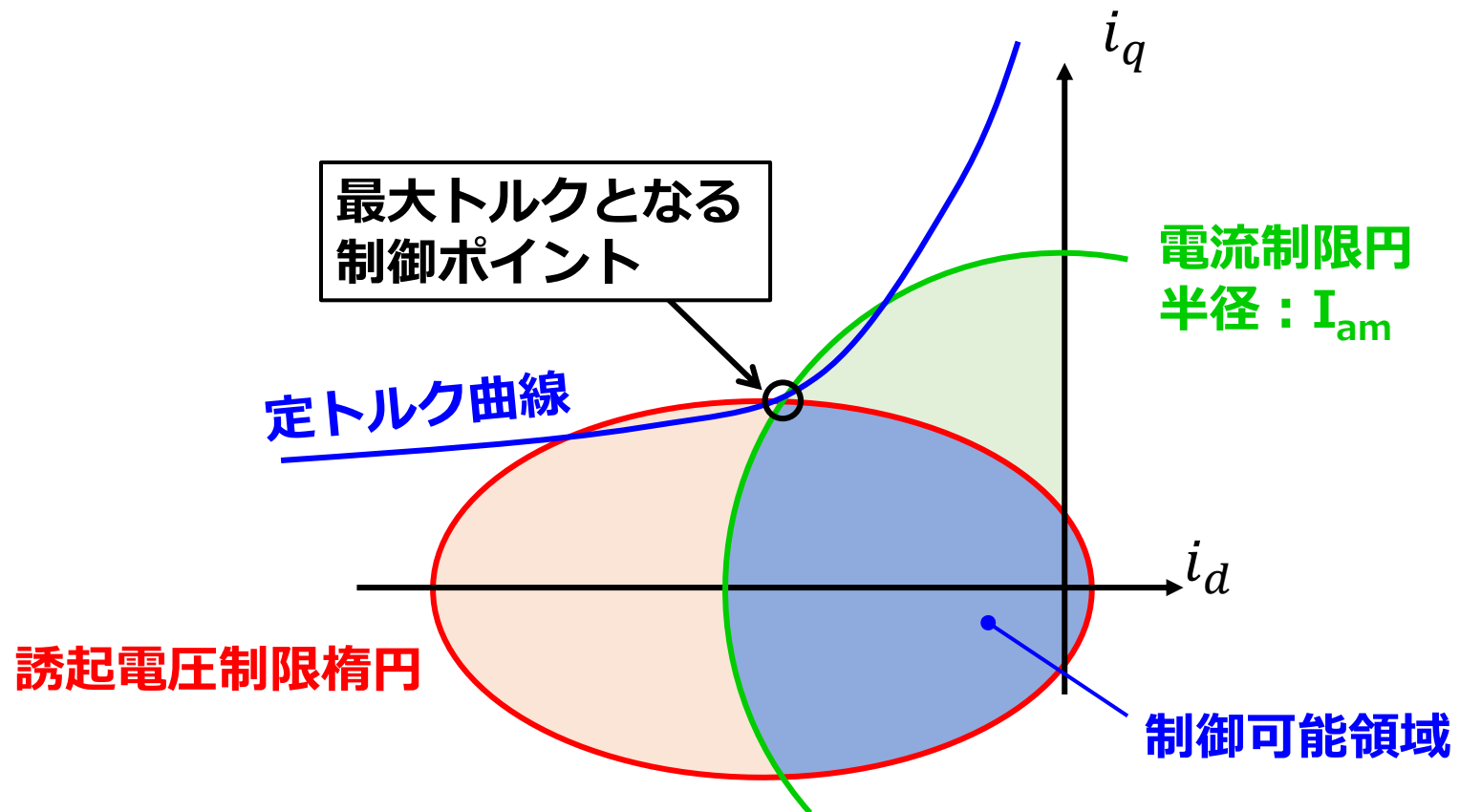
$$V_o = V_a - R_a I_a \leq V_{am} - R_a I_a = V_{om}$$

簡単のためこの値を用いることが多いが
本来の制限値に比べると余裕がある



電流・電圧制限下での制御可能領域

- ✓ i_d - i_q 平面上において電流・電圧制限の両方を考えると
電流制限円と誘起電圧制限楕円の重なる領域で制御可能



電流・電圧制限下での制御パターン

✓ 電流・電圧制限下では速度によって制御法を切り替える

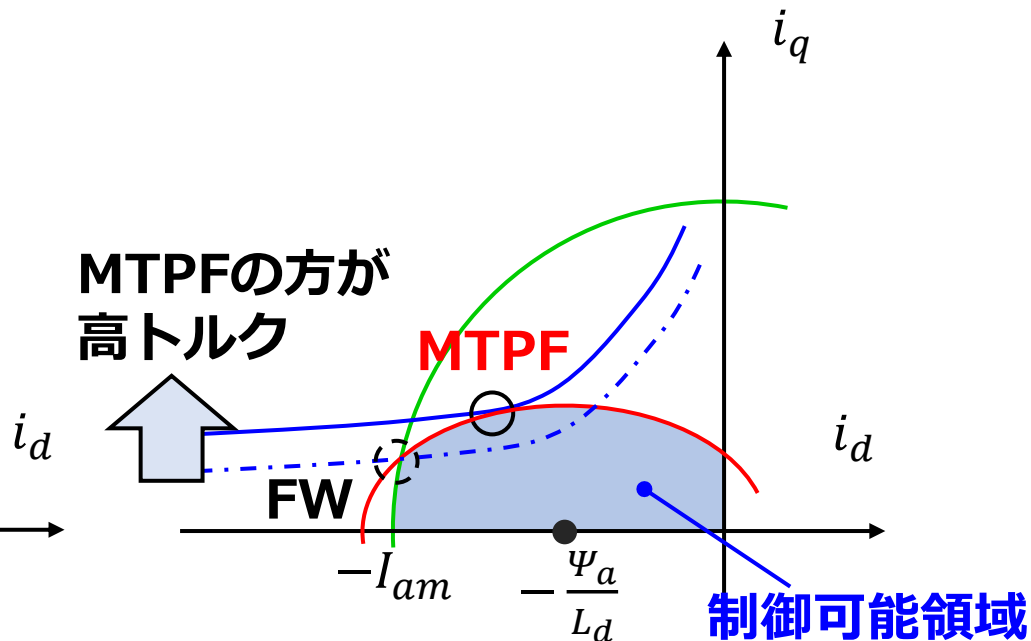
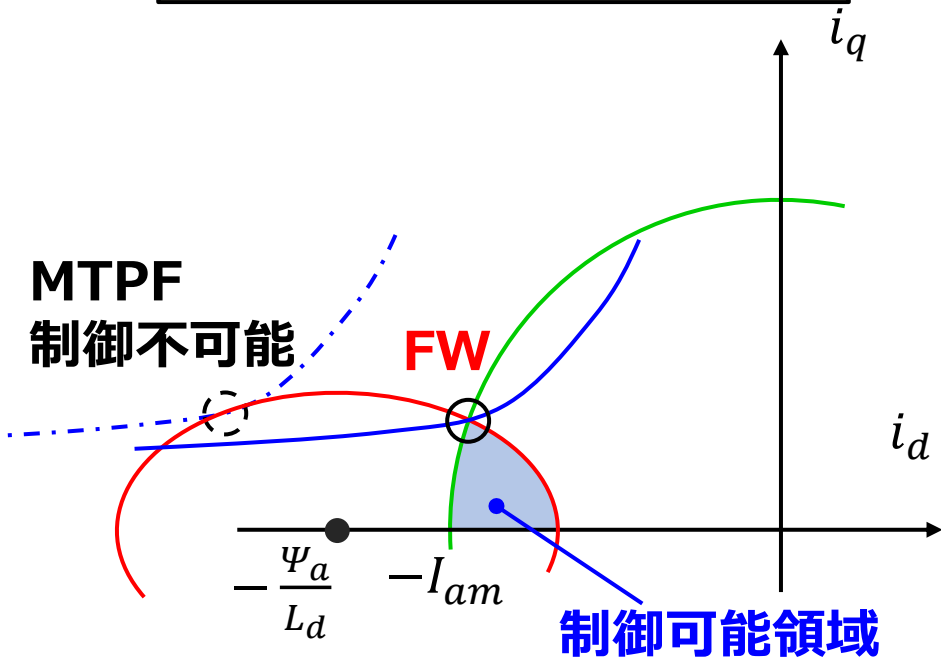
	id-iq平面	速度-トルク特性	備考
<p>① 低速時</p> <p>$I_a = I_{am}$</p> <p>$V_a < V_{am}$</p>	<p>電圧制限</p> <p>定トルク</p> <p>電流制限</p> <p>制御可能領域</p>	<p>トルク</p> <p>速度</p> <p>MTPA</p> <p>MTPF</p> <p>基底速度</p>	<p>電圧制限を無視 できる低速時には 電流制限のみを考慮し MTPA制御を行う</p>
<p>② 高速時</p> <p>$I_a = I_{am}$</p> <p>$V_a = V_{am}$</p>		<p>トルク</p> <p>速度</p> <p>MTPA</p> <p>MTPF</p> <p>FW</p> <p>限界速度</p>	<p>電圧制限が無視できない 高速時は電流制限円と電圧 制限楕円の交点で制御</p> <p>狭義の弱め磁束(FW; Flux Weakening)制御</p>
<p>③ 高速時 (特別な場合)</p> <p>$I_a > I_{am}$</p> <p>$V_a = V_{am}$</p>		<p>トルク</p> <p>速度</p> <p>MTPA</p> <p>MTPF</p>	<p>電圧制限楕円の中心点が 電流制限円の内部にある 場合, 途中でMTPF制御に 切り替えることで理論上 速度∞まで駆動可能に</p>

MTPF制御に切り替えられるかどうかの判断

- ✓ MTPF制御へ切り替えられるかどうかは
電圧制限楕円の中心点の位置で判断

電圧制限楕円の中心点が
電流制限円の**外側**
⇒MTPF制御に切替**不可能**
(速度に限界が存在)

電圧制限楕円の中心点が
電流制限円の**内側**
⇒MTPF制御に切替**可能**
(理論上は速度限界がない)

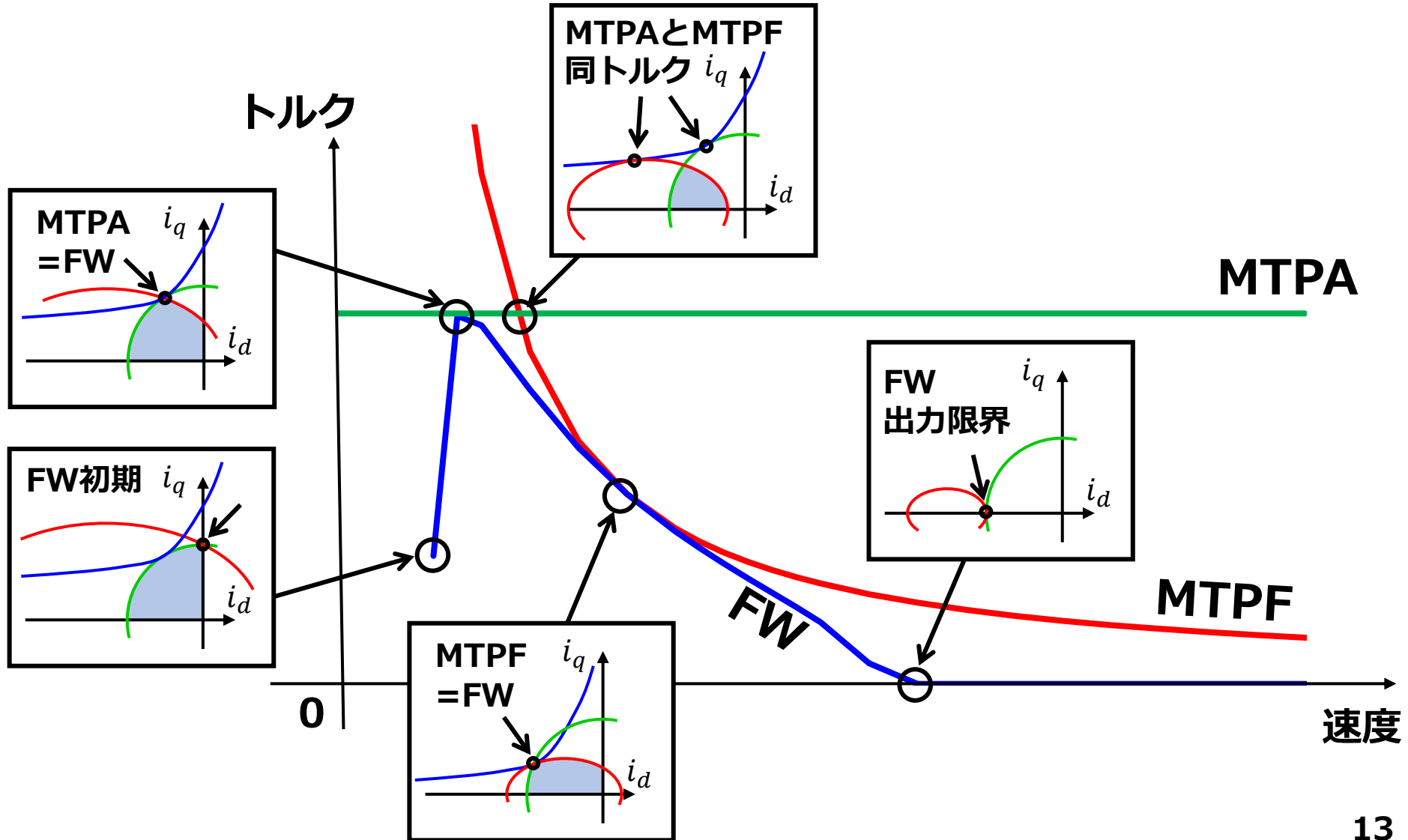


$$-\frac{\Psi_a}{L_d} < -I_{am} \Leftrightarrow 0 < \Psi_a - L_d I_{am}$$

$$-\frac{\Psi_a}{L_d} \leq -I_{am} \Leftrightarrow 0 \geq \Psi_a - L_d I_{am} \quad 12$$

(参考)各制御時のid-iq平面上の関係

- ✓ 各制御時のid-iq平面上の関係を示す



(参考)弱め磁束制御について

- ✓ 本資料では電流制限円と電圧制限楕円の交点で制御することを**弱め磁束(FW)制御**と紹介
- ✓ **永久磁石による電機子鎖交磁束を弱める方向(d軸負方向)に電流を流す**ため弱め磁束制御と呼ばれる
- ✓ そのため、MTPF制御も弱め磁束制御に含めることもある
- ✓ さらに、SPMSMではMTPA制御時にd軸電流を流さないのので、d軸電流を流すこと自体を弱め磁束と呼ぶ事も
- ✓ 厳密には定義されていないので学会や論文等では注意が必要

