

オープン巻線 IPMSM の定トルク領域を 拡大する制御法

◎七澤 風画 芳賀 仁

長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻

f_nanasawa@stn.nagaokaut.ac.jp | hagah@vos.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

電気自動車やハイブリッド式電気自動車を対象とするモータドライブシステムでは、始動時の高トルク要求、広い速度範囲の要求を満たし、且つ高効率であることが求められる。近年では、トルク密度の高さから永久磁石同期電動機(PMSM)が普及しており、PMSMを対象に速度範囲拡大に関する研究が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。

速度範囲を拡大するにはモータの回転速度に比例する誘起電圧を抑圧する必要がある。誘起電圧を抑圧する手法として用いられる弱め磁束制御は、磁石磁束を固定子による磁束で打ち消し誘起電圧を抑制する。この制御には文献(1)に示される電圧制限楕円の概念が広く用いられる。

速度範囲を拡大するその他の手法として、デュアルインバータ駆動オープン巻線モータの電圧制限楕円に着目した制御法が提案されている⁽²⁾。文献(2)では、2台のインバータの一方(INV.2)のDCリンク部にコンデンサを接続し、INV.2の無効電力の調整によって電圧制限楕円の中心を電流制限円の端に移動させている。これにより制御できる電流ベクトルの範囲が常に確保され、速度範囲が大きく拡大する。しかし、この手法では定トルク領域が縮小する課題がある。そこで本稿では、INV.2の利用により定トルク領域を拡大する手法を提案する。提案法では、電圧制限楕円を表す方程式にINV.2に由来する仮想パラメータを導入し、パラメータの操作により弱め磁束制御に必要な電流を最小化する。提案法の有効性はシミュレーションで確認したため報告する。

2. 電圧制限楕円とその移動

図1に本稿で扱うデュアルインバータ駆動モータドライブシステムを示す。モータの巻線は結線部分を開放し、開放端にINV.2を接続している。図1のシステムの誘起電圧のみに着目した電圧方程式は式(1)で表される。

$$\begin{bmatrix} v_{d01} \\ v_{q01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d2} \\ v_{q2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

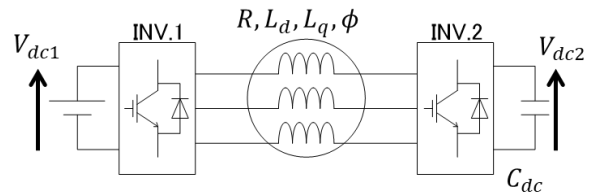


図1 デュアルインバータ駆動モータドライブシステム

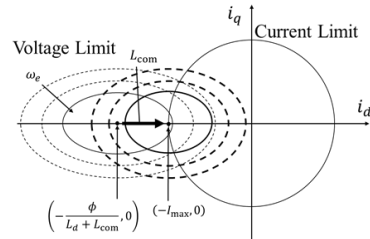


図2 電流制限円, 電圧制限楕円

ただし、 $[v_{d01} \ v_{q01}]^t$: INV.1のdq軸誘起電圧項、 $[v_{d2} \ v_{q2}]^t$: INV.2のdq軸電圧、 L_d, L_q : dq軸インダクタンス、 ω_e :回転子の電気角速度である。ここで、巻線電流及びINV.1の出力電圧振幅がシステムの仕様により次のように制限されるものとする。

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max} \quad (2)$$

$$\sqrt{v_{d01}^2 + v_{q01}^2} \leq V_{o1\max} = V_{1\max} - RI_{\max} \quad (3)$$

ただし、 I_{\max} :巻線電流振幅最大値、 R :巻線抵抗、 $V_{1\max}$:INV.1出力電圧振幅最大値、 $V_{o1\max}$:INV.1が補償できる誘起電圧最大値である。INV.2は無効電力のみ出力するため、INV.2のdq軸電圧ベクトルはdq軸電流ベクトルと直交するように与える。本稿では、INV.2の出力電圧ベクトルを、インダクタンス次元の仮想パラメータ L_{com} を用いて式(2)のように与える。

$$\begin{bmatrix} v_{d2} \\ v_{q2} \end{bmatrix} = \omega_e L_{com} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(1),(3),(4)より、誘起電圧が最大値に達している状態では式(5)の関係が成り立つ。

$$\frac{\{(L_d + L_{com})i_d + \phi\}^2 + (L_q + L_{com})^2 i_q^2}{\omega_e^2} = \frac{V_{o1max}^2}{\omega_e^2} \quad (5)$$

式(5)は誘起電圧制限下で出力可能な電流ベクトルの範囲を表す dq 軸上の楕円(電圧制限楕円)の方程式であり, 半径 I_{max} の円(電流制限円)と重なる範囲が電流ベクトルの出力可能範囲である。

式(5)より, 楕円の形状は ω_e 及び L_{com} に依存する。ここで式(5)を ω_e について解き, $\partial\omega_e/\partial L_{com} = 0$ となる L_{com} を求めると式(6)が得られる。

$$L_{com} = -\frac{(L_d - L_q)i_d^2 + \phi i_d}{I_{max}^2} - L_q \quad (6)$$

式(6)のように L_{com} を与えることで, 任意の電流ベクトルを出力できる速度が最大となる。定トルク領域においては, MTPA 曲線と電流制限円が交差する点における i_d の値より L_{com} を求める。弱め磁束領域においては, 式(6)を式(5)に代入すると得られる, 式(7)より i_d を求める。求めた i_d は電圧制限楕円と電流制限円が交差する点における i_d であり, この点でトルクが最大となる。

$$\{\phi + (L_d - L_q)i_d\} \sqrt{I_r^2 - i_d^2} = \frac{V_{o1max} I_{max}}{\omega_e} \quad (7)$$

3. シミュレーションによる検証

表 1 にシミュレーションパラメータを示す。提案法の有効性を確認するため, シミュレーションより速度-トルク特性を求めると比較対象として, 通常シングルインバータ+PMSM の構成及び文献(1)の手法においても同様の特性を求め, 定トルク領域の最大速度を比較する。

図 3 にシミュレーション結果を示す。図 3(a)より, シングルインバータ駆動の場合に比べデュアルインバータ駆動では速度範囲が拡大している。さらに図 3(b)より, 従来法の定トルク領域の最大速度は 1180rpm となっており, シングルインバータ駆動の 1520rpm より低い値となっている。これに対し提案法の定トルク領域の最大速度は 1640rpm であり, シングルインバータ駆動に比べ拡大していることがわかる。

従来法では電圧制限楕円の中心を常に電流制限円の端に固定させており, これにより低速時の力率が悪化することで低トルク領域が縮小してしまう。提案法では, 動作速度によって電圧制限楕円を目的に合わせて移動させている。式(7)の左辺はトルク次元の式となっており, INV.1 の電圧最大値と電流最大値の積により制限される形となっていることから, 提案法によって INV.1 の力率を改善する形で定トルク領域が拡大してい

表 1 シミュレーションパラメータ

巻線抵抗	R	0.866Ω
d 軸インダクタンス	L_d	9.1mH
q 軸インダクタンス	L_q	21.4mH
磁石鎖交磁束	ϕ	0.12Wb
極対数	p	2
電流振幅最大値	I_{max}	10A
直流電圧	V_{dc1}	100V
INV.1 電圧振幅最大値	V_{1max}	50V
キャパシタ電圧指令値	V_{dc2}	100V
キャパシタ静電容量	C_{dc}	40μF
キャリア周波数	f_c	10kHz

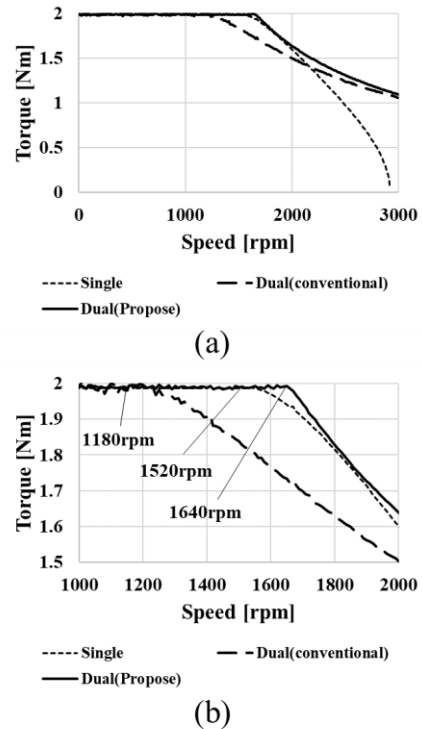


図 3 速度-トルク特性の比較(a)0~3000rpm, (b)1000~2000rpm

るといえる。

4. まとめ

本稿では, デュアルインバータ駆動モータの電圧制限楕円に着目し, 仮想パラメータ L_{com} の導入により定トルク領域を拡大する手法を提案し, 有効性をシミュレーションにより検証した。シングルインバータ駆動に比べ, 従来法では定トルク領域の最大速度が 340rpm 減少したが, 提案法では 120rpm 拡大した。

文 献

- (1) 森本, 畠中, 童, 武田, 平紗: 電学論 D, Vol.112, No.3, pp.292-298
- (2) Pan, Liang, Wang, Lipo: *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.50, No.1, pp.539-548