651　一次抵抗と二次抵抗の変動にロバストな誘導機の高速トルク制御法

野口　季彦　　　　　　高橋　勲
（岐阜工業高等専門学校）　（長岡技術科学大学）

１．はじめに

本論文では従来のベクトル制御とはまったく異なる誘導機の高速トルク制御法を提案する。これは誘導機の回転子電流モデルに基づいて一次磁束鎖交数とトルクを演算フィードバックし、それらの値からインバータの最適スイッチング状態を直接決定するものである。このとき電動機パラメータとして二次抵抗を用いるが、これは一次抵抗や二次抵抗に依存しない瞬時無効電力を規範モデルとするパラメータ同定機構によって完全に補償される。ここではその制御理論を展開するとともにシミュレーションによる制御特性の検証も行う。その結果、一次抵抗だけでなく二次抵抗の変動に対しても極めてロバストで応答性の高いトルク制御を実現できることが確認されたので報告する。

２．磁束およびトルクの制御法

回転子と同期して回転する$\alpha\beta$座標において誘導機の電圧電流方程式とトルクは次のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_{1\alpha\beta} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1+(p+j\omega_m)L_{11} & (p+j\omega_m)M \\ pM & R_2+pL_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha\beta} \\ i_{2\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T=M\,i_{2\alpha\beta}\cdot(-j\,i_{1\alpha\beta}) \quad \text{（ただし・は内積を表す。）} \quad (2)$$

ここで一次磁束鎖交数$\psi_{1\alpha\beta}$は

$$\psi_{1\alpha\beta}=L_{11}\,i_{1\alpha\beta}+M\,i_{2\alpha\beta} \quad (3)$$

であるから、上式と（１）式第２行および（２）式から$i_{2\alpha\beta}$を消去すれば一次電流だけから一次磁束鎖交数とトルクを求めることができる[1]。

$$\psi_{1\alpha\beta}=\frac{L_{11}L_{22}-M^2}{L_{22}}\,i_{1\alpha\beta}+\frac{M^2}{L_{22}}\frac{1}{1+p(L_{22}/R_2)}\,i_{1\alpha\beta} \quad (4)$$

$$T=\psi_{1\alpha\beta}\cdot(-j\,i_{1\alpha\beta}) \quad (5)$$

このようにして求めた一次磁束鎖交数とトルクの値を用いて既に文献で発表している手法によりインバータの最適スイッチング状態を決定し、直接的にそれらのリミットサイクル制御を行う[2]。ただし（４）式と（５）式は$\alpha\beta$座標上の演算であるため一次磁束鎖交数の位相を判断するために回転角θ_mが必要となる点が異なる。図１は以上の原理に基づいて構成された制御システムであり、速度制御のループゲインを除いて完全な無調整化が図られている。また磁束演算に完全積分や一次抵抗を用いていないため零速度を含めた全速度範囲で安定な動作を期待することができる。しかし二次抵抗の変動があり得るためその補償を考えなければならない。

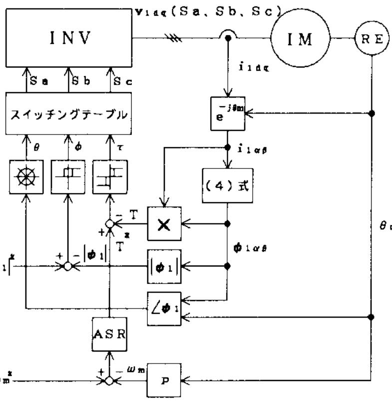

図１　制御システムの構成

３．二次抵抗の変動補償法

（１）式を固定子座標であるdq座標へ変換すると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} v_{1dq} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1+pL_{11} & pM \\ (p-j\omega_m)M & R_2+(p-j\omega_m)L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1dq} \\ i_{2dq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで瞬時無効電力として次のスカラ量Qを定義する。

$$Q=v_{1dq}\cdot(-j\,i_{1dq}) \quad (7)$$

これは一次電圧と一次電流から静的に求められる変数であり、電動機パラメータを用いていないため常に真値となる。一方（３）式をdq座標へ変換したψ_{1dq}と（６）式の第１行によってQを表現すると一次抵抗に関する項が消去されて次式のようになる。

$$Q=p\,\psi_{1dq}\cdot(-j\,i_{1dq}) \quad (8)$$

この式に$\psi_{1dq}=\psi_{1\alpha\beta}e^{j\theta m}$なる関係式を代入すると

$$Q=p\,\psi_{1\alpha\beta}\cdot(-j\,i_{1\alpha\beta})-\omega_m\psi_{1\alpha\beta}\cdot i_{1\alpha\beta} \quad (9)$$

となるため図１のシステム変数だけからQを求めることもできる。この場合も完全積分や一次抵抗を用いていないため全速度範囲で有効な演算が可能である。しかし先に指摘したように磁束演算で二次抵抗値を必要とするためその変動によって誤差を生ずる。そこでこの誤差を収束させるように二次抵抗の設定値を動的に調整すればよい。すなわち（７）式で求めたQを規範モデルとし、（９）式の値を数学モデルの推定値$\widehat{Q}$とすれば並列形モデル規範適応システムに基づく二次抵抗同定機構を図２のように構成することができる。

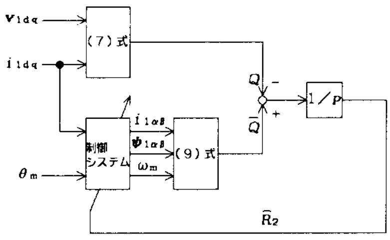

図２　二次抵抗同定機構

４．制御特性とまとめ

図３は以上の制御システムについてシミュレーションを行った結果である。これより実際の二次抵抗が設定値の２００［％］であっても制御装置側の推定値は漸近安定的に真値へ収束するとともに、収束が完了した時点で磁束とトルクも真値となって良好な制御に復帰していることがわかる。以下に本制御法について主要な結論を述べる。

（１）本制御法は従来のベクトル制御と異なり電流制御を必要としないうえ、スイッチングの最適化により有限なインバータ直流リンク電圧の有効利用を図ることができるため実質的なトルク応答はベクトル制御のそれを凌駕すると考えられる。
（２）定常状態においては磁束とトルクのリップルを任意に小さくすることができる。
（３）ベクトル制御のように一次側の磁気飽和を懸念する必要がまったくない。
（４）磁束演算に一次抵抗や完全積分を必要としないためベクトル制御と同様に零速度を含む全速度範囲で安定な制御を期待できる。
（５）システム全体にわたり一次抵抗値を使用していないためその変動に対し本質的にロバストである。また一次抵抗にも二次抵抗にも依存しない瞬時無効電力を使うことによって二次抵抗の変動は完全に補償される。
（６）速度制御ループを除いて制御パラメータの無調整化を容易に図ることができる。

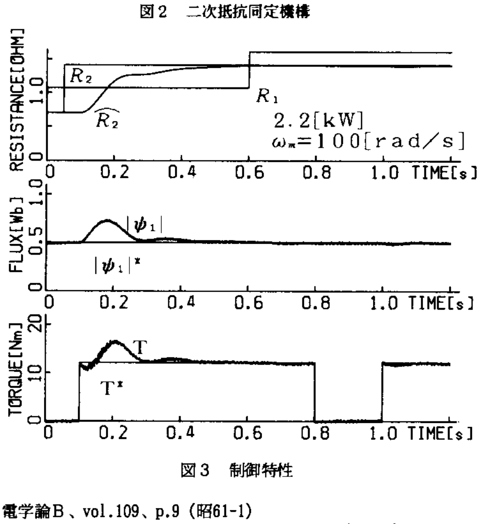

図３　制御特性

５．参考文献

（１）野口、高橋「誘導電動機の磁束ベクトル推定法」電学全大、p.840（昭61-4）
（２）高橋、野口「瞬時すべり周波数制御に基づく誘導電動機の新高速トルク制御法」電学論Ｂ、vol.109、p.9（昭61-1）
（３）岩崎、山田、木下、松井「ＤＳＰを用いた二次磁束制御に基づく誘導電動機の高精度トルク制御法」電学論Ｄ、vol.110、p.99（平2-2）
（４）久保田、松瀬「誘導電動機のパラメータ適応二次磁束オブザーバの提案とその安定性」電学論Ｄ、vol.111、p.177（平3-3）
（５）島津、Kanokvate、彭、深尾「１次と２次時定数にロバストな誘導電動機のベクトル制御」電学全大、p.6-40（平5-3）