

A Design Methodology of an Optimal Torque Minimizing the Total Loss of an Induction Motor by Means of LMI

Kaoru INOUE^{*}, Masatoshi MINAMIYAMA[†], and Toshiji KATO[‡]

(Received May 9, 2009)

When the motor speed is reduced by a regenerative brake, the mechanical energy of rotation can be converted into the regenerative electric energy. In order to improve the efficiency of the motor drive systems, the optimal regenerative and acceleration torques of the motor should be studied to maximize the regenerative electric energy and to minimize the required energy for acceleration. This paper proposes a design methodology of the optimal torques for a three phase squirrel-cage induction motor, which minimize its total loss by means of LMI (Linear Matrix Inequality). The derived optimal torque meets the given constrained conditions of the torque amplitude, the operation time period, and the rotating speed range; the regenerative electric energy becomes maximum, and the required electric energy for acceleration becomes minimum. The effectiveness of the proposed method will be illustrated by means of both simulations and experiments.

Key words : Induction Motor, Optimal Torque, LMI(Linear Matrix Inequality), Optimization Problem.

キーワード : 誘導電動機, 最適トルク, LMI(線形行列不等式), 最適化問題.

誘導電動機の損失を最小とする最適トルクの線形行列不等式を用いた設計法

井上 馨 ・ 南山 正俊 ・ 加藤 利次

1. はじめに

電動機を用いた搬送車や電動車両などは、減速時に電氣的に制動力を発生させる回生ブレーキを用いて機械的エネルギーを電力に変換し、これを加速時に再利用することで効率よく運用できる¹⁻⁶⁾。このような電動機の使用においては、急峻な速度応答性はあまり要求されないが、回生する期間や回生後の回転速度などには制約がある場合が多い。このような条件下における電動機の損失は、鉄損を除くと回生中のトルクのかけ方によって変化する⁷⁻⁹⁾。このため、より有効にエネルギーを利用するためには、これらの条件下において、損失が最小すなわち回生電力量が最大となる最適な回生トルクのかけ方を検討する必要がある。そこ

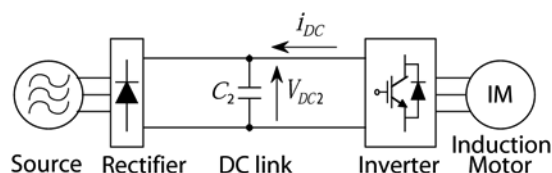


Fig. 1. The objective induction motor drive system.

で著者らは、3相誘導電動機を対象にして、変分法を用いてこのような制約条件下における最適な回生トルクを解析的に導出した^{10,11)}。しかし、この方法では回生トルクの大きさに関する制約条件を加味していないため、求めた最適トルクの大きさが機器の定格値を越えてしまう場合もありえる。このため、回生終了時刻において所望の回転速度が得られない可能性があった。

そこで本論文では、Fig. 1に示す間接型ベクトル制御を用いた三相誘導電動機駆動システムを対象とし、従来の条件「時刻 t_0 から t_1 において回転角速度を ω_{rm0} から ω_{rm1} まで減速」に加え、新たな制約条件「回生トルク T_e の大きさを制限値以下に抑制」、の双方を

^{*} Department of Electrical Engineering,
Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6296, Fax: +81-774-65-6296,
E-mail: kaoinoue@mail.doshisha.ac.jp

[†] Telephone: +81-774-65-6318, Fax: +81-774-65-6801

[‡] Telephone: +81-774-65-6322, Fax: +81-774-65-6812,
E-mail: tkato@mail.doshisha.ac.jp

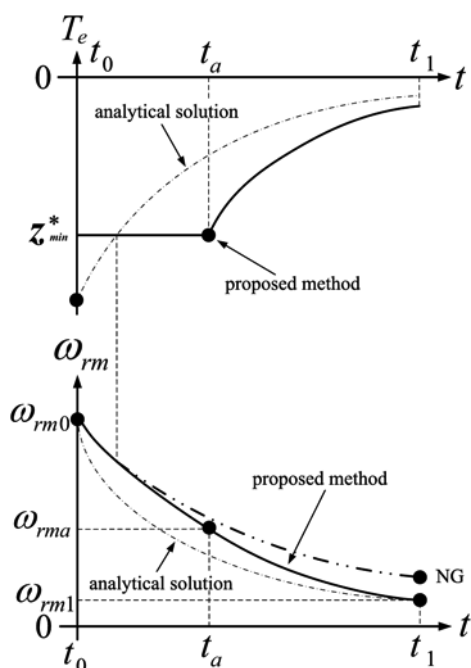


Fig. 2. Schematic diagram of an optimal regenerative torque under the constraint condition of torque amplitude $T_e \geq z_{min}^*$.

満足しつつ回生電力量を最大化する最適回生トルクの設計方法を提案する．具体的には，LMI(線形行列不等式)を用いて数値的に解く方法を提案し，従来の変分法による方法を制約条件付きで解析的に解く改良法の結果¹²⁾と比較・検討を行い，提案手法の有効性を確認する．また加速時においても同様の手法が適用でき，制約条件「時刻 t_2 から t_3 において回転角速度を ω_{rm2} から ω_{rm3} まで加速」および「力行トルク T_e の大きさを制限値以下に抑制」を満足しつつ，加速に必要な電力量を最小化する最適力行トルクを導出する．

以下，2. ではトルク制約を考慮する必要性を述べ，3. では対象システムの定式化を行う．4. ではLMIを用いた最適トルク設計法について述べ，最後に5. において，提案手法の有効性についてシミュレーションと実験の両方により検証する．

2. トルクの大きさに関する制約の必要性

従来の変分法を用いた最適回生トルクは回生開始直後は比較的大きく，回転角速度が小さくなるにつれて小さくなる^{10,11)}．これは回転角速度が大きいときには回転減衰によるエネルギー消費が大きいため，大きなトルクをかけて回転角速度を低下させつつ，発電電力を大きくして回生していることを示している．しかし，トルクの大きさが機器の定格値を超えてしまう可能性がある．

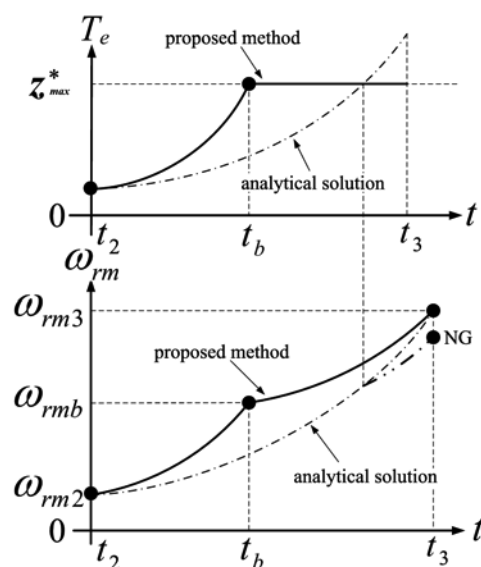


Fig. 3. Schematic diagram of an optimal acceleration torque under the constraint condition of torque amplitude $T_e \leq z_{max}^*$.

そこで本論文では，従来の条件「時刻 t_0 から t_1 において回転角速度を ω_{rm0} から ω_{rm1} まで減速」に加え，新たな制約条件「回生トルク T_e の大きさを制限値以下に抑制」を加えた場合について考える．考え方の原理図を Fig. 2 に示す．1 点鎖線の analytical solution は，従来のトルク制約を考慮しない最適回生トルクを表している．この場合， T_e は時刻 t_0 付近においてその制限値の下限 z_{min}^* を下回っており，理論通りのトルクを発生できない．そこで，しばらく制約値一定トルクを加えて減速させる．しかし，1 点鎖線と制限値の交点からすぐさま従来法に従って回生を行うと，2 点鎖線で示すように十分に回転角速度が減少しきらず，時刻 t_1 において所望の ω_{rm1} へ到達しない．

一方，力行時の変分法を用いた最適トルクは，力行開始直後は小さいが回転角速度が大きくなるにつれて次第に大きくなる．このため，回生時とは逆に，力行の途中でトルク制約値の上限 z_{max}^* に達してしまう可能性がある．考え方の原理図を Fig. 3 に示す．この場合，力行終了時において所望の回転角速度 ω_{rm3} までの十分な加速が得られない．

以上のことから，トルクの大きさに制約がある場合においても，所望の時刻において所望の回転角速度に到達でき，損失を最小とする最適トルクを導出する必要がある．

3. 対象システムの定式化

誘導電動機の磁束とトルクは間接型ベクトル制御¹³⁾によって制御される．なお，ベクトル制御で用いる各

制御ゲインは、極配置法を用いて決定する¹⁴⁾。

3.1 状態方程式

誘導電動機の回転子の運動方程式は、慣性モーメントを J 、減衰係数を ξ 、回転角速度を ω_{rm} 、トルクを T_e とすると、

$$J\dot{\omega}_{rm}(t) + \xi\omega_{rm}(t) = T_e(t) \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 T_e は力行時を正、回生時を負とする。 ω_{rm} は正の場合のみとし、回生時に逆回転することはないとする。

ここで、(1) 式をサンプリング周期 ΔT_s で離散化すると、離散時間系の状態方程式

$$\begin{cases} \omega_{rm}[i+1] = A\omega_{rm}[i] + BT_e[i] \\ y[i] = c\omega_{rm}[i] + dT_e[i] \end{cases} \quad (2)$$

を得る。ただし、 $i = 0, 1, 2, \dots$ であり、

$$A = e^{-\xi\Delta T_s}, \quad b = \frac{1}{J} \int_0^{\Delta T_s} e^{-\xi\tau} d\tau, \quad c = 1, \quad d = 0 \quad (3)$$

である。

3.2 全損失

誘導電動機の機械的損失は回転の減衰によるものであるので、

$$P_{lm} = \xi\omega_{rm}^2 \quad (4)$$

で与えられる。一方、ベクトル制御された誘導電動機では、鉄損を微小として無視する場合が多いので、このとき電氣的損失 P_{le} は一次 (固定子) 銅損と二次 (回転子) 銅損の和

$$P_{le} = a + bT_e^2 \quad (5)$$

で与えられる⁹⁾。ここで、 $a = \frac{R_s}{M^2}\phi_{\gamma r}^2$ 、 $b = (\frac{R_s L_r^2}{M^2} + R_r)\frac{1}{p^2\phi_{\gamma r}^2}$ である。また、 M 、 L_r 、 R_s 、 R_r 、 p 、 $\phi_{\gamma r}$ はそれぞれ、相互インダクタンス、二次巻線インダクタンス、一次抵抗、二次抵抗、極対数、二次磁束の γ 軸成分を表す。本研究では、瞬時トルクの制御に間接型ベクトル制御を用いるため $\phi_{\gamma r}$ は一定値に制御されるので、 a 、 b は共に定数である。

時刻 t_0 から t_1 まで回生するときの全損失は、

$$I_{loss} = \int_{t_0}^{t_1} (P_{lm} + P_{le})dt \quad (6)$$

となる。定数 a の定積分は、 ω_{rm} 、 T_e がどのような値であっても一定値であるので、これを除いたものを全損失

$$\hat{I}_{loss} = \int_{t_0}^{t_1} (\xi\omega_{rm}^2 + bT_e^2)dt \quad (7)$$

とおくこととする。なお、時刻 t_2 から t_3 まで力行する場合は、そのように積分区間を変更すればよい。

3.3 拡大系と評価関数

トルクの大きさに関する制約条件を記述するための変数 $z[i]$ を導入し、求める最適な回生トルクを $T_e[i]^*$ と表すと、制約条件を加味した拡大系は以下で表される^{15,16)}。

$$\begin{cases} \omega_{rm}[i+1] = A\omega_{rm}[i] + BT_e[i]^* \\ y[i] = c\omega_{rm}[i] + dT_e[i]^* \\ z[i] = c_z\omega_{rm}[i] + d_zT_e[i]^* \end{cases} \quad (8)$$

ここで、制約条件は以下で記述されるとする。

$$z_{min}^*[i] \leq z[i] \leq z_{max}^*[i] \quad (9)$$

本研究での制約条件は「回生トルク T_e の大きさをある値以下に抑制する」ことであるので、 $c_z = 0$ 、 $d_z = 1$ とすると $z[i] = T_e[i]^*$ となる。

次に、従来の条件「時刻 $t = t_0(i = 0)$ から $t_1(i = n)$ において回転角速度を $\omega_{rm0} = \omega_{rm}[0]$ から $\omega_{rm1} = \omega_{rm}[n]$ まで減速させる」ため、 n ステップからなる回生トルクの目標値信号列ベクトル

$$T_e^* = [T_e[0]^* \quad T_e[1]^* \quad \dots \quad T_e[n-1]^*]^T \quad (10)$$

と回転角速度の目標値信号列ベクトル

$$y^* = [\omega_{rm}[1]^* \quad \omega_{rm}[2]^* \quad \dots \quad \omega_{rm}[n]^*]^T \quad (11)$$

を定義する。なお、力行の場合も同様に、「時刻 $t = t_2(i = 0)$ から $t_3(i = n)$ において回転角速度を $\omega_{rm2} = \omega_{rm}[0]$ から $\omega_{rm3} = \omega_{rm}[n]$ まで加速させる」と読み替えばよい。

これらを用いて、以下の評価関数 J を定義する。

$$\begin{cases} J = J_1 + J_2 + J_3 \\ J_1 = |\omega_{rm}[n]^* - \omega_{rm}[n]|^2 \\ J_2 = \sum_{i=0}^{n-1} w_1 |T_e[i]^*|^2 \\ J_3 = \sum_{i=1}^n w_2 |\omega_{rm}[i]^*|^2 \end{cases} \quad (12)$$

この評価関数は小さければ小さい程よい。 J_2 、 J_3 はそれぞれ (7) 式における機械的損失、電氣的損失に対応している。 J_1 は $t = t_1(i = n)$ で目標値に到達するという拘束条件を記述しており、 J_2 、 J_3 の重み w_1 、 $w_2(>0)$ を小さくすることによって目標値とのずれを小さくすることができる。また w_1 、 w_2 は、 J_2 と J_3 の

エネルギーの次元を合わせるために、定数 ω を用いて以下のように決定する.

$$\begin{cases} w_1 = w \cdot b \\ w_2 = w \cdot \xi \end{cases} \quad (13)$$

4. 最適トルクの導出

4.1 LMI 最適化問題

評価関数 J は小さければ小さいほど、全損失が小さく、回生の場合は時刻 $t = t_1$ (力行の場合は t_3)において目標値 $\omega_{rm}[n]^*$ へ実際の回転角速度 $\omega_{rm}[n]$ が近づく. そこで、LMIを用いて J の最小化問題を考える. まず、以下に示す α と β を定義する.

$$\alpha = [A \quad A^2 \quad \cdots \quad A^n]^T \quad (14)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} B & 0 & \cdots & 0 \\ AB & B & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ A^{n-1}B & A^{n-2}B & \cdots & B \end{bmatrix} \quad (15)$$

α, β を用いると、 y^* は次式のように書き直せる.

$$y^* = \alpha \omega_{rm}[0] + \beta T_e^* \quad (16)$$

さらに I_n を n 次単位行列として $W_1 = w_1 I_n$, $W_2 = w_2 I_n$ とし、 y_0 と M_y を

$$y_0 = \omega_{rm}[n]^* - A^n \omega_{rm}[0] \quad (17)$$

$$M_y = [A^{n-1}B \quad A^{n-2}B \quad \cdots \quad B] \quad (18)$$

とすると、評価関数 J は以下となる.

$$\begin{aligned} J &= (\omega_{rm}[n]^* - \omega_{rm}[n])^T (\omega_{rm}[n]^* - \omega_{rm}[n]) \\ &\quad + T_e^{*T} W_1 T_e^* + y^{*T} W_2 y^* \\ &= (y_0^T y_0 + \omega_{rm}[0]^T \alpha^T W_2 \alpha \omega_{rm}[0]) \\ &\quad - (y_0^T M_y - \omega_{rm}[0]^T \alpha^T W_2 \beta) T_e^* \\ &\quad - T_e^{*T} (M_y^T y_0 - \beta^T W_2 \alpha \omega_{rm}[0]) \\ &\quad + T_e^{*T} (M_y^T M_y + W_1 + \beta^T W_2 \beta) T_e^* \end{aligned} \quad (19)$$

Table 1. Parameters setup.

R_s (Ω)	2.63	R_r (Ω)	2.42
L_s (H)	0.177	L_r (H)	0.173
M (H)	0.167	p	2
w	10^{-4}	$\phi_{\gamma r}$ (Wb)	0.5
J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.0073	ξ (N · s)	0.0036
z_{min}^* (Nm)	-3	z_{max}^* (Nm)	3

ここで、評価関数 J の上界の一つを λ とすると、

$$\begin{aligned} &\lambda - (y_0^T y_0 + \omega_{rm}[0]^T \alpha^T W_2 \alpha \omega_{rm}[0]) \\ &\quad + (y_0^T M_y - \omega_{rm}[0]^T \alpha^T W_2 \beta) T_e^* \\ &\quad + T_e^{*T} (M_y^T y_0 - \beta^T W_2 \alpha \omega_{rm}[0]) \\ &\quad - T_e^{*T} (M_y^T M_y + W_1 + \beta^T W_2 \beta) T_e^* > 0 \end{aligned} \quad (20)$$

となる. さらに、 $M_y^T M_y + W_1 + \beta^T W_2 \beta > 0$ より、Schur Complement¹⁷⁾を用いると、以下を得る.

$$\mathcal{A} < \lambda \mathcal{B} \quad (21)$$

但し、

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} \\ \Theta_{12}^T & \Theta_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathcal{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \Theta_{11} = -(M_y^T M_y + W_1 + \beta^T W_2 \beta)^{-1} \\ \Theta_{12} = -T_e^* \\ \Theta_{22} = (y_0^T y_0 + \omega_{rm}[0]^T \alpha^T W_2 \alpha \omega_{rm}[0]) \\ \quad - (y_0^T M_y - \omega_{rm}[0]^T \alpha^T W_2 \beta) T_e^* \\ \quad - T_e^{*T} (M_y^T y_0 - \beta^T W_2 \alpha \omega_{rm}[0]) \end{cases} \quad (23)$$

である.

さらに、(9)式を書き直すと、

$$\begin{cases} z_{min}^* \leq T_e^* \\ T_e^* \leq z_{max}^* \end{cases} \quad (24)$$

となる.

(21)式と(24)式はそれぞれLMIになっており、これらを満たしつつ λ を最小化する回生トルク T_e^* を求めるというLMI最適化問題に帰着される.

4.2 LMI 最適化問題の解法

このLMI最適化問題を解くために、Mathworks社MatlabのRobust Control Toolbox内にあるGEVP(Generalized eigenvalue minimization under LMI constraints)アルゴリズムを用いる. ただし、このツールは正定値問題を対象にしており、 \mathcal{B} が半正定であるため直接的には解けない. そのため新たな変数 $\theta_0 < \lambda$ を用い、(21)式を以下に変形することにより、同ツールを用いて解くことができる.

$$\mathcal{A} < \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \theta_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

5. 有効性の検証

5.1 導出した最適トルク

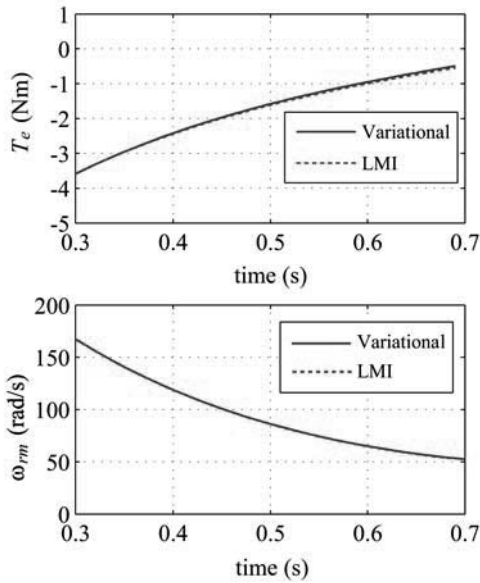


Fig. 4. Regenerative torques derived by LMI and variational method without the constraint condition of torque amplitude.

Table 1 に示す条件の下で、提案する手法を用いて回生時の最適トルクの導出とこれを用いたシミュレーションを行った。時間と回転角速度に関する条件は、 $t_0 = 0.3$ (s), $t_1 = 0.7$ (s), $\omega_{rm0} = 167.5$ (rad/s), $\omega_{rm1} = 52.3$ (rad/s) とした。またトルクの大きさに関する条件は、まず、 z_{min}^* を十分に小さく、 z_{max}^* を十分に大きく設定することで、制約条件を考慮しない従来の変分法^{10,11)} と同一の結果となるかを調べた。回生電力量が最大となるような回生トルクを変分法で求めた結果と、本報告で提案した LMI を用いて導出した回生トルクを比較図を Fig. 4 に示す。 T_e は力行時を正とした誘導電動機のトルク、 ω_{rm} は誘導電動機の回転角速度を表している。これによると、LMI と変分法で求めた回生トルクの軌道は一致していることが見て取れる。このことから、本研究で提案した LMI を用いて導出した回生トルクは、損失を最小化しその結果、回生電力量を最大化できることが確認できる。

次に、トルクの大きさに制限を加えた場合の結果を Fig. 5, Fig. 6 に示す。力行時の Fig. 6 では、0.4 (s) の間に $\omega_{rm2} = 52.3$ (rad/s) から $\omega_{rm3} = 167.5$ (rad/s) まで加速させることとした。また、回生・力行の両方の場合において、トルクの大きさの制限値を 3 (Nm) とした。ここでは、変分法を用いてトルクの大きさに関する制約条件を考慮できる改良法¹²⁾ と LMI を用いた本手法が同一の結果となるかを調べた。両図より、文献¹²⁾ で提案されている解析的手法の改良法と良好に一致していることが確認できる。また、回転角速度は回生の場合においても力行の場合においても、所望

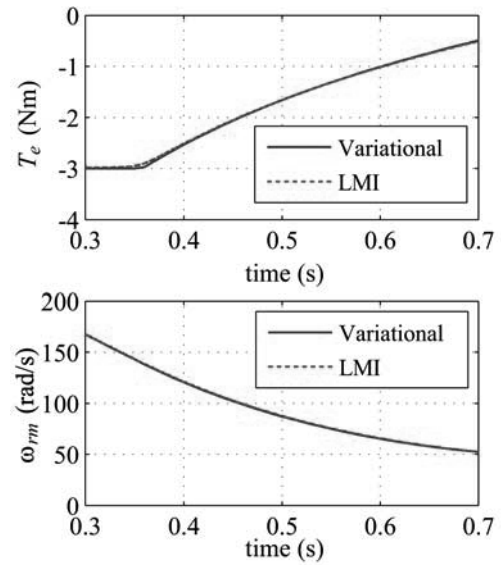


Fig. 5. Regenerative torques derived by LMI and variational method under the constraint condition of torque amplitude $|T_e| \leq 3$ (Nm).

の回転角速度に到達できていることが確認できる。

5.2 実験による有効性の確認

Fig. 7 に提案手法を用いて回生・力行を連続して行った実験結果を示す。制御装置として、マイウエイ技研製の PE-Expert II システムを用いた。図中の V_{DC2} は、Fig. 1 における DC リンク電圧を表している。回生終了時・力行終了時ともに所望の回転角速度が得られていることが確認できる。また、回生時には電力が DC リンクのキャパシタ C_2 に蓄えられ V_{DC2} が上昇し力行時には減少していることから、回生し蓄えられた電力が力行に使用されたことが確認できる。以上のことから、提案した手法は実験においても制約条件を満足するように回生・力行できることが明らかとなった。

6. おわりに

本論文では、誘導電動機の電氣的損失と機械的損失に着目し、それらの全損失を最小化するような最適トルク LMI を用いて数値的に導出する方法を提案した。トルクの大きさに関する制約条件を緩やかにした場合、変分法から導出した回生トルクと一致した。また、トルクの大きさに関する制約条件を厳しくした場合でも、変分法を用いてトルクの大きさに関する制約条件を考慮できる改良法で得た結果と一致した。また、実験においてもその有効性を確認した。本手法を用いることで、回生開始時と終了時の回転角速度と回生時間、回生トルクの大きさの制約値を指定するだけで、その間での全損失が最小となる最適トルクが導出できる。

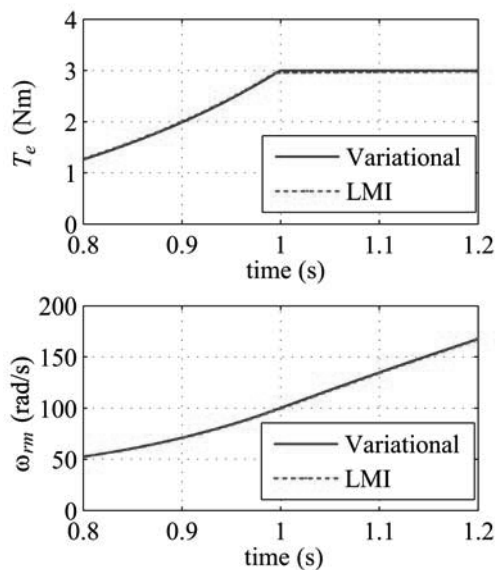


Fig. 6. Acceleration torques derived by LMI and variational method under the constraint condition of torque amplitude $|T_e| \leq 3$ (Nm).

LMI を用いた本手法の特徴は、(8) 式、(9) 式がきわめて一般的な形で記述されており、本論文で示した制約条件以外の様々な条件に対しても柔軟に対応が可能な点がある。今後は、様々な用途それぞれに対して適した制約条件下における最適トルクの導出を行い、その有効性を検証して行く予定をしている。

参 考 文 献

- 1) Yee-Pien Yang and Tsung-Hsien Hu, "A New Energy Management System of Directly-Driven Electric Vehicle with Electronic Gearshift and Regenerative Braking", American Control Conference 2007 (ACC '07), pp.4419-4424 (2007).
- 2) 原純夫, 藤井邦夫, 辻輝生, 神原誠, "誘導電動機のエネルギー回生システム", 平成 12 年電気学会全国大会, 4-113 (2000).
- 3) 川口清, "鉄道におけるエネルギー関連技術 ハイブリッド車両用フライホイール式蓄電装置", RRR, **61** [9], 8-11 (2004).
- 4) S. R. Cikanek and K. E. Bailey, "Regenerative Braking System For A Hybrid Electric Vehicle", American Control Conference 2002 (ACC '02), 3129-3134 (2002).
- 5) 野村弘, 森木宏至, "制御電流源を用いた回生ブレーキシステムの基礎研究", 平成 14 年電気学会全国大会, 4-217 (2002).
- 6) 横谷和展, 富樫仁夫, 数原寿宏, "電動ハイブリッド自転車 CY-SJ", SANYO TECHNICAL REVIEW, **35** [1], 106-114 (2003).
- 7) 井上馨, 小方健司, 加藤利次, "誘導電動機の電力回生システムの検討", 平成 17 年電気学会産業応用部門大会, 1-50, I-229-I-232 (2005).

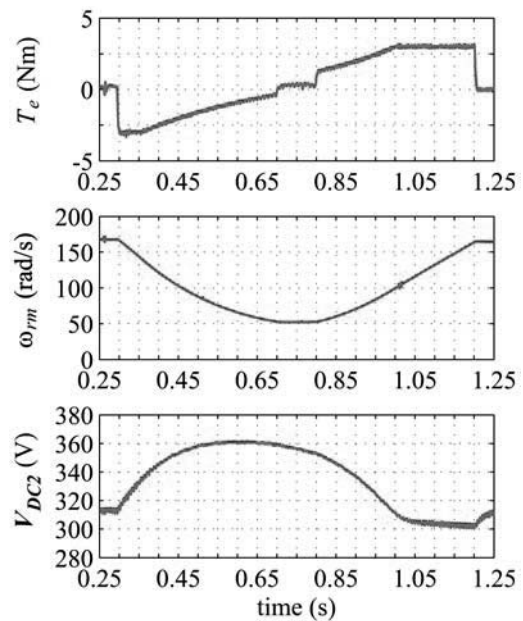


Fig. 7. Experimental results under the constraint condition of torque amplitude $|T_e| \leq 3$ (Nm).

- 8) 井上馨, 小方健司, 加藤利次, "誘導電動機の電力回生時における回生トルクの検討", 平成 18 年電気学会産業応用部門大会, 1-30, I-267-I-270 (2006).
- 9) K. Matsuse, T. Yoshizumi, S. Katsuta, and S. Taniguchi, "High-Response Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor with High Efficiency Taking Core Loss into Account", IEEE Transactions on Industry Applications, **35** [1], 62-69 (1999).
- 10) K. Inoue, K. Ogata, and T. Kato, "A Study on an Optimal Torque for Power Regeneration of an Induction Motor", Proceedings of the 38th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2108-2112 (2007).
- 11) 井上馨, 小方健司, 加藤利次, "変分法による最適トルクを用いた誘導電動機の高効率電力回生・駆動法", 電気学会論文誌 D, **128** [9], 1098-1105 (2008).
- 12) 南山正俊, 井上馨, 加藤利次, "誘導電動機における様々な制約条件を考慮した最適トルクの導出", 電気学会研究会資料 半導体電力変換研究会, SPC-09-31, 61-66 (2009).
- 13) 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三, "AC サーボシステムの理論と設計の実際", 総合電子出版社, 東京 (1990).
- 14) 井上馨, 松本和剛, 小方健司, 加藤利次, "回生電力貯蔵装置を用いた誘導電動機の省エネルギー駆動法", 同志社大学理工学研究報告, **48** [1], 42-49 (2007).
- 15) 杉江俊治, 山本浩之, "状態および入力制約を考慮した閉ループ系の目標値生成", 計測自動制御学会論文集, **37** [9], 849-855 (2001).
- 16) 杉江俊治, 鈴木宙見, "制約を有するシステムに対する周期目標値の作成", システム制御情報学会論文誌, **17** [8], 313-320 (2004).
- 17) 岩崎徹也, "LMI と制御", 昭晃堂, 東京 (1997).