

学術論文

巻線機に用いる張力調整装置における張力の制御

Tension Control of Tension Device for Coil Winding

安藤 嘉則^{*1} (正員), 斉藤 豊人^{*1}, 木暮 進^{*2}, 椿 貴弘^{*2}, 村上 岩範^{*1} (正員), 山田 功^{*1} (正員)

Yoshinori ANDO (Mem.), Toyohito Saito, Susumu KOGURE, Takahiro TSUBAKI,
Iwanori MURAKAMI (Mem.), Kou YAMADA (Mem.)

To improve efficiency of a coil winding machine, the speed of winding the wire is increased. Then the some problems occur with increasing the wire speed. For example, the wire is broken or stretched too much. This paper has a discussion a control of wire tension to avoid these situations. At first, we set a tension device at initial position. If the tension arm moves from the original position, we control an angle of arm to keep an original position by moving the drive motor. As a result, the angle of arm and the tension of wire are kept at specified value with small error. By the simulation, we confirm effectiveness of the proposed controller.

Keywords: coil winding machine, tension device, tension control, motor control.

1 はじめに

モータや電磁石などのコイルやフィラメントなどワイヤを巻いて製作する電気部品は多く、その効率よく生産が期待されている。それらの生産現場では、製品の品質・性能や生産性を維持するために巻き取る際のワイヤに適切な張力を与えるために制御方法が検討されている。そのための張力の制御に関する研究報告[1,2]も行われている。しかし、モータやコイル製造時の張力制御についての報告はあまり見られない。

本研究で扱う巻取機とはワイヤを巻取り、コイルやモータなどをつくる機械である。張力調整装置(テンショナ)は巻き取る際に張力を安定させながらワイヤを送り出す機械である。張力の調節やテンショナの形式には各種の方式があるが、ここでは Fig.1 に示すいくつかのプーリやバネ、モータ、アームから構成される方式を取り上げる。ワイヤはボビンからモータに取り付けられたプーリを通過してアーム先端に取り付けたプーリを経由して送り出される。モータに取り付けられたプーリの駆動を調節して、ワイヤの送り出しを制御している。

巻取機とテンショナは別々の機械としてその動作について情報のやりとりをしておらず同期していないためにワイヤがゆるんだり張ったりという現象がおき、ワイヤにかかる張力が変動し、ワイヤが伸びてしまっ

たり断線したりといった問題が生じている。さらに、生産性を向上させるために巻取機側を高速回転にすればするほどこれらの問題は起きやすくなる。また、巻線が伸びなどで太さが変化すれば、コイル等の一部太くなる巻太りなどの状態も現れる。そのため、コイルの伸びや断線を回避するために高速回転での巻き取り作業が不可能となり、作業時間の短縮において限界を生じさせている。

今回、ワイヤ送しモータを適切に制御することにより巻線の張力の変動を抑えることを試みた。張力の調整において主要な役割を担っているテンションアームに作用する三つの力(先端のプーリを介して作用する巻線による二つの張力とテンション用バネの引張り力)が釣り合い、テンションアームが静止している状態を定常状態と定める。この定常状態における、三つの力やテンションアームの傾きなどを定常値とし、定常値からの変動を検討する。定常状態からの変動が小さければ、巻線にかかる張力の変動は抑えられ、巻太りや断線を防ぐことが可能になり、結果として巻取り速度をあげることが可能となる。

本論文では、対象となる実験装置の数式モデルを作成し、シミュレーションを行い、制御による性能向上について検討する。PID 制御を適用した際のシステムの挙動をシミュレーションで明らかにすることにより張力変動や角度変動を抑えることの可能性を検討した。

2 モデル

Fig.1 にテンショナのモデル、Fig.2 に今回使用して

連絡先: 安藤 嘉則, 〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1,
群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻,
e-mail: ando@me.gunma-u.ac.jp

^{*1} 群馬大学 ^{*2} (株) ミツバ

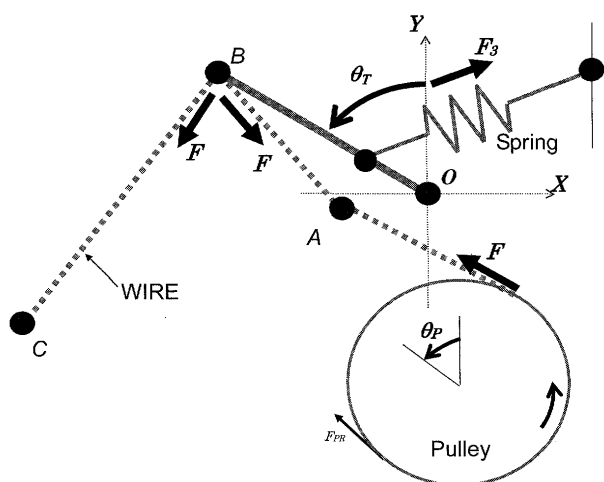


Fig. 1 Tension Device.

いる制御系のブロック線図を表す。Fig.1においてA, Cは中間プーリを, Bはアーム先端プーリを示す。ワイヤはモータに取り付けられたプーリ(図中ではPulleyと示す)から中間プーリA, アーム先端プーリBを経由して, 中間プーリCの先から巻線機へ供給される。以下では, 混乱を招かない限りモータに取り付けられたものを単にプーリと呼ぶ。Oはテンションアームの回転中心である。 θ_T はテンションアームの鉛直方向からの角度, θ_P はモータに取り付けられたプーリの角度を示す。また, F はワイヤの張力, F_3 はテンションを与えるためのバネの引張力である。

本張力調節系では基本的にはワイヤの張力が変化してもテンションアーム(OB)の角度を一定に静止させることを目標としている。そのため, センシングを行うのはテンションアームの回転角度 θ_T であり, その検出値に基づきコントローラで計算されたプーリの角加速度指令が出力され, ワイヤの送り出し量の制御をする。図中に存在するワイヤの量によりテンションアームの角度が決定されるので, その時の静的および動的な力によりワイヤの張力が定まる。

実際にはプーリとコントローラの間に駆動のためにモータとモータドライバが存在する。プーリへの入力にはモータ・モータドライバから出力される角加速度である。しかし, 今回の装置においては, モータドライバは位置指令を受け付けるため, モータ・モータドライバの逆伝達関数を用い, コントローラから出力された角加速度指令を角度指令へと変換させモータ・モータドライバへの入力する構成(Fig.2)としている。このような逆伝達関数を用いる設計手法は文献[3]などに見られる。

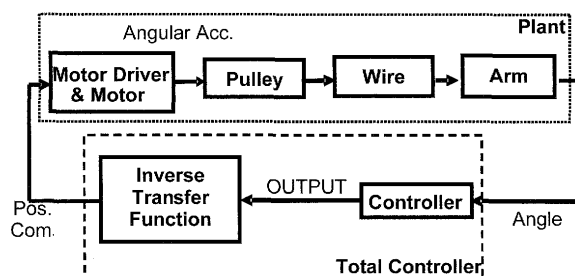


Fig. 2 Control System.

巻線に関して次の条件を仮定する。

- (i) 巻線は伸びない
- (ii) 巻線質量は無視
- (iii) モータ以外の摩擦は無視し, モータ(プーリ)とは滑りが生じない
- (iv) 線のたるみは考慮しない

今回は, アームの角度が $1.05[\text{rad}]$ の状態を定常状態とした。

張力 F は巻取り条件で変化するワイヤの張力であり, ワイヤのどこでも一定とする。また, $r_1(\theta_T)$, $r_2(\theta_T)$ は図中の点Bにおけるふたつの巻線張力 F のモーメントを考えるとときのモーメントの腕の長さであり, テンションアームの角度などの幾何学的な関係から定まり, アーム角度 θ_T の関数として表すことができる。 T_3 はバネの張力 F_3 によるモーメントでアームの傾き θ_T によって決まる変数である。

テンションアームの回転運動の運動方程式は以下のように表される。

$$I_T \ddot{\theta}_T = F r_1(\theta_T) + F r_2(\theta_T) + T_3(\theta_T) \quad (1)$$

ここで, I_T はアームの慣性モーメントである。

テンションアームが静止している定常状態の時には

$$0 = F_0 r_1(\theta_{T0}) + F_0 r_2(\theta_{T0}) + T_3(\theta_{T0}) \quad (2)$$

が成り立つ。添字₀は定常状態の値であることを示す。 θ_0 により式(2)を満たすように定常張力 F_0 を設定することになる。

定常状態から微小に変動した時のアームの傾き $\Delta\theta_T$ ならびに張力の変動分 Δf_p を以下のように定義する。

$$\theta_T = \theta_{T0} + \Delta\theta_T, \quad F = F_0 + \Delta f_p \quad (3)$$

運動方程式(1)において, 定常状態から微小変動した時, 各係数を $\Delta\theta_T$ で展開したのち, 一次近似を行い, 定常状態(2)を考慮すれば以下を得る。

$$I_T \ddot{\theta}_T = P_1 \Delta\theta_T + P_2 \Delta f_p \quad (4)$$

ここで, P_1, P_2 は以下のように定義される。また, x' は変数 x の θ_T による微分を示す。

$$P_1 = F_0 r_1'(\theta_{T0}) + F_0 r_2'(\theta_{T0}) + T_3'(\theta_{T0}),$$

$$P_2 = r_1(\theta_{T0}) + r_2(\theta_{T0})$$

式(4)を Δf_p について整理すると以下のように表すことができる。

$$\Delta f_p = \frac{I_T}{P_2} \ddot{\theta}_T - \frac{P_1}{P_2} \Delta \theta_T = \frac{I_T}{P_2} \Delta \ddot{\theta}_T - \frac{P_1}{P_2} \Delta \theta_T \quad (5)$$

これより張力変動はアームの傾きの変動とアームの運動の角加速度により表せることがわかる。

(5)式のままでは、ワイヤの送りと張力の関係が明白でないのでモータ制御における制御則を決定することができない。そこで、アーム角度とワイヤの長さが幾何学的な関係で表わされることに基いて、ワイヤの送りと張力の関係を導く。

ワイヤ長 L はモータで駆動されるプーリが送りだすワイヤ長と巻線機が巻取る線長により決定される。この L についても定常値とそこからのずれについて考える。定常長さ L_0 と L_0 からの変動分 ΔL および、これらの時間による微分について以下の式が成り立つ。

$$L = L(\theta_T) = L_0 + \Delta L = L_0 + \int (\dot{\theta}_p r_p - v) dt \quad (6)$$

$$\dot{L} = \frac{\partial L}{\partial \theta_T} \dot{\theta}_T = \Delta \dot{L} = \dot{\theta}_p r_p - v \quad (7)$$

$$\Delta \ddot{L} = \ddot{\theta}_p r_p - \dot{v} \quad (8)$$

式(6)は送出しと巻取り量の差で長さが決まることを示している。 $\ddot{\theta}_T$ について整理し、2次項などを無視することにより以下の関係が得られる。

$$\ddot{\theta}_T = (\ddot{\theta}_p r_p - \dot{v}) \left(\frac{\partial L}{\partial \theta_T} \right)^{-1} \quad (9)$$

また、巻線の長さが定常状態における巻線の長

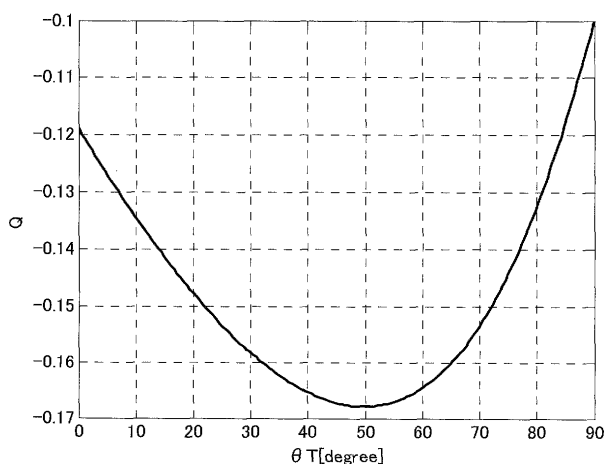


Fig. 3 Calculation Result of Parameter Q.

さ L_0 から変動すれば、アームの角度が変動するで、巻線の長さの変動 ΔL とテンションアームの角度の変動 $\Delta \theta_T$ の関係は以下のように示すことができる。

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial \theta_T} \Delta \theta_T = Q \Delta \theta_T, \quad Q = \frac{\partial L}{\partial \theta_T} \quad (10)$$

したがって、この Q を用いて以下のように示せる。

$$\ddot{\theta}_T = \Delta \ddot{\theta}_T = (\ddot{\theta}_p r_p - \dot{v}) Q^{-1} \quad (11)$$

Q について、テンションアームの各角度に対して数値的に求めたところ、Fig.3 に示すように 0 ではない値を取ることが判る。以上より式(5)に式(10), (11)を代入すると、張力の変動に関して次式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta f_p &= \frac{I_T}{P_2} \Delta \ddot{\theta}_T - \frac{P_1}{P_2} \Delta \theta_T \\ &= \frac{I_T}{P_2} (\ddot{\theta}_p r_p - \dot{v}) Q^{-1} - \frac{P_1}{P_2} Q^{-1} \Delta L \\ &= -\frac{P_1}{P_2 Q} \Delta L + \frac{I_T}{P_2 Q} r_p \ddot{\theta}_p - \frac{I_T}{P_2 Q} \dot{v} \end{aligned} \quad (12)$$

これより、張力変動が巻線長さの変動とプーリの角加速度、巻取り機側の巻取り加速度によって発生することが判る。この変動をなくするためには、モータによるプーリの駆動で、式(12)の右边を 0 にできれば良いことになる。

モータ・モータドライバについては機械的運動方程式とトルクと電流の関係を示す式が成り立つ。

$$I_p \ddot{\theta}_p = T - \mu_p \dot{\theta}_p \quad (13)$$

$$T = K_T i \quad (14)$$

また、今回用いたモータドライバでは、速度制御、位置制御は比例制御 (P 制御) となっている。添字 c はそれぞれ指令値を意味する。

$$\text{速度制御} \quad i = K_{vp} (\dot{\theta}_{pc} - \dot{\theta}_p)$$

$$\text{位置制御} \quad \dot{\theta}_p = K_{pp} (\theta_{pc} - \theta_p)$$

実際には電流にトルク定数をかけ求められるトルクに加えて、巻線による張力がプーリに与えるトルクを考慮しなければならない。

3 制御系設計

モータ・モータドライバ(伝達関数を G_m とする)から角加速度 $\ddot{\theta}_p$ が出力される。その $\ddot{\theta}_p$ は巻線の送り出し量に関係するので、巻線長さ L に影響を与える。ここで、式(15)~(16)から L や定常状態における L からのずれである ΔL はモータ (プーリ) の加速度 $\ddot{\theta}_p$ と巻取り機の巻取り速度 v によって決まる。

$$L = L_0 + \Delta L = \int (\dot{\theta}_p r_p - v) dt \quad (15)$$

$$\dot{L} = \Delta \dot{L} = \dot{\theta}_p r_p - v \quad (16)$$

$$\ddot{L} = \Delta \ddot{L} = \ddot{\theta}_p r_p - \dot{v} \quad (17)$$

$\ddot{\theta}_p$ と $\dot{v}$ によって求められる ΔL は、アームにかかる張力の定常状態からの変動 Δf_p を決定する要素の一つである。また、 Δf_p を決定するその他の要素は $\ddot{\theta}_p$ 、 $\dot{v}$ である。

ΔL を Q で除することによりアームの定常状態からの角度の変動である $\Delta \theta_T$ を求めることができる。 $\Delta \theta_T$ がコントローラへと入力されると $\Delta \theta_T$ を抑制しようと角加速度指令 $\ddot{\theta}_{PC}$ を出力する。モータ・モータドライバの逆伝達関数 (G_m^{-1}) を用いて各加速度指令 $\ddot{\theta}_{PC}$ を角度指令 θ_{PC} へと変換し、モータ・モータドライバへの入力とする。

厳密に考えれば、巻線の張力により発生するトルク T_p が送り出しプーリに働く。

$$\ddot{\theta}_p = G_m G_m^{-1} \ddot{\theta}_{PC} + G_f T_p = \ddot{\theta}_{PC} + G_f T_p \quad (18)$$

ここで G_m は位置指令 θ_{PC} がモータ・モータドライバに入力され角加速度を出力させる伝達関数、 G_f は T_p がモータ・モータドライバに入力され角加速度として出力させる伝達関数を表す。

式(18)から判るように、このままだと $\ddot{\theta}_{PC}$ と $\ddot{\theta}_p$ は $G_f T_p$ だけ差を生じる。そこで、 T_p を出来る限り打ち消すために T_p を以下のように求める。

$$\begin{aligned} T_p &= r_p F = r_p (F_0 + \Delta f_p) \\ &= r_p \{ F_0 + (K_1 \Delta L + K_2 \ddot{\theta}_p + K_3 \dot{v}) \} \end{aligned} \quad (19)$$

トルク T_p を打ち消すためには F_0 , ΔL , $\ddot{\theta}_p$, $\dot{v}$ という変数の影響を打ち消すことが必要である。 $\dot{v}$ は巻取り機の巻取り加速度より知ることはできないので、 $\dot{v}$ 以外の三変数、 ΔL , $\ddot{\theta}_p$, F_0 の成分を打ち消す指令を G_m^{-1} に入力する手段を考える。

ここで式(19)における ΔL , $\ddot{\theta}_p$, $\dot{v}$ の係数 K_1 , K_2 , K_3 は $K_1 = -P_2/P_1 Q$, $K_2 = I_T r_p / P_2 Q$, $K_3 = -I_T / P_2 Q$ である。

K_1 , K_2 , K_3 の値は定常状態の時の P_1 , P_2 , Q を用いると、 $K_1 = -6.2$, $K_2 = -2.7 \times 10^{-4}$, $K_3 = 4.4 \times 10^{-3}$ と求められる。

3.1 外乱について

本研究では巻取り機側の情報は直接的には利用できないため外乱として取り扱う。しかし、実際の装置では巻取り機が巻き始めることによりテンションアームの角度が変化し、それに対してモータの角加速度を変化させ張力変動を抑えるといった制御をしている。

一定速度で巻き取れば外乱はないことになるが、巻き取り機側としては、一定でない巻き取りが通常となっているようである。

今回は、巻取り機を 3000[rpm] で駆動したときのデータにローパスフィルタをかけたのち、さらに微分することにより得られた信号を外乱入力である巻取り加速度 $\dot{v}[\text{m/s}^2]$ としている。(Fig.4, Fig.5 参照)

3.2 モータ・モータドライバについて

モータ・モータドライバへの入力が角度指令 θ_{PC} の他に、 T_p の影響を打ち消すための信号の二つになっている。ここで T_p とは、プーリに働く巻線の張力によって発生するトルクである。実際の装置において T_p がモータ・モータドライバに与える影響が考慮されている。

一方、モータ・モータドライバからの出力は $\ddot{\theta}_p$ である。 $\ddot{\theta}_p$ は以下のように示される。

$$\ddot{\theta}_p = G_m \ddot{\theta}_{PC} + G_f T_p \quad (20)$$

ここで、 G_m は θ_{PC} から $\ddot{\theta}_p$ までの伝達関数を、 G_f は T_p から $\ddot{\theta}_p$ までの伝達関数をそれぞれ示す。以下に G_m , G_f を示す。

$$G_m = \frac{K_{vp} K_T K_{pp} s^2}{I_p s^2 + (\mu_p + K_{vp} K_T) s + K_{vp} K_T K_{pp}} \quad (21)$$

$$G_f = \frac{s^2}{I_p s^2 + (\mu_p + K_{vp} K_T) s + K_{vp} K_T K_{pp}} \quad (22)$$

モータドライバへの入力は角度指令を伝達関数 G_m の逆伝達関数を用いて位置指令 θ_{PC} へ変換することが必要であるが、 G_m は分子、分母ともに次数が2であるのでその逆伝達関数 G_m^{-1} は無理なく使用可能である。

3.3 コントローラについて

今回制御系設計に於いてはPIDコントローラを採用した。Fig.2 において逆伝達関数でモータ・モータドライバの特性を打ち消した簡単なシステムにおいて、外乱を無視したPIDコントローラを用いた際の伝達関数は以下のように表すことができる。

$$G(s) = \frac{r_p Q s}{Q s^3 - r_p K_d s^2 - r_p K_p s - r_p K_i} \quad (23)$$

先の式に基づき計算すると $Q = -0.165$ であり、プーリの半径 r_p は $0.061[\text{m}]$ である。他の値に加えて K_p , K_d , K_i それぞれの値を設定し、閉ループ伝達関数の極を求め評価した。

また、シミュレーションにおいては電流の上限を安全のため $40[\text{A}]$ としているが多少のオーバーは許容し

ている。

以上にに基づき極配置を考え試行錯誤の結果として、PID ゲインの値は $K_p=10000$, $K_d=5000$, $K_i=5000$ と決定した。このときのシステムの極は -1850 , $-1.00 \pm i$ となっている。

3.4 制御則の修正

T_p は式(19)より F_0 , ΔL , $\ddot{\theta}_p$, $\dot{v}$ で決まる。これらのうち予測できるのは巻取り加速度以外の一つの定数 F_0 と二つの変数 ΔL , $\ddot{\theta}_p$ である。そこで、これらによって発生するトルクを予測し、コントローラから出力された角加速度指令から引くことによりモータ・モータドライバから出力される角加速度とコントローラから出力される角加速度指令は巻取り加速度の影響を除いて、実際の角速度により近づく。

プーリに影響を及ぼすワイヤの張力によって発生するトルク T_p を打ち消そうと作りだしたトルク指令を T_{PC} とする。この T_{PC} は先で述べた通り T_p の原因となる四つの要因のうち、三つの要因を含んでいる。これは、式(23)のように示せる。

$$T_{PC} = r_p(F_0 + \Delta f_{PC}) = r_p(F_0 + K_1 \Delta L + K_2 \ddot{\theta}_{PC1}) \quad (24)$$

なお、 Δf_{PC} とは ΔL , $\ddot{\theta}_{PC1}$ より予測された F_0 からの張力の変動である。

式(23)から導かれる T_{PC} によって角加速度指令をもとめ、コントローラからの出力と合算する。こうして求められる逆伝達関数 G_m^{-1} への入力 $\ddot{\theta}_{PC2}$ は式(24)のように示される。

$$\ddot{\theta}_{PC2} = \ddot{\theta}_{PC1} - G_f T_{PC} \quad (25)$$

式(24)より、モータ・モータドライバへの入力 θ_{PC} がつぎのように導ける。

$$\theta_{PC} = G_m^{-1} \ddot{\theta}_{PC2} = G_m^{-1} (\ddot{\theta}_{PC1} - G_f T_{PC}) \quad (26)$$

モータ・モータドライバから出力される $\ddot{\theta}_p$ は式(20)に式(25)を代入することにより以下のように示せる。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_p &= G_m \theta_{PC} + G_f T_p \\ &= G_m [G_m^{-1} \{\ddot{\theta}_{PC1} - G_f T_{PC}\}] + G_f T_p \\ &= \ddot{\theta}_{PC1} + G_f (T_p - T_{PC}) \\ &= \ddot{\theta}_{PC1} + G_f r_p (\Delta f_p - \Delta f_{PC}) \end{aligned} \quad (27)$$

これより、 $\ddot{\theta}_p$ はコントローラからの出力である $\ddot{\theta}_{PC1}$ と $G_f r_p (\Delta f_p - \Delta f_{PC})$ の差であることが判る。 Δf_p は ΔL , $\ddot{\theta}_p$, $\dot{v}$ の三変数と F_0 から成り立っている。それに対して Δf_{PC} は ΔL , $\ddot{\theta}_p$ の二変数と F_0 から成り立っている。よって $\Delta f_p - \Delta f_{PC}$ は式(27)のように示せる。

$$\begin{aligned} \Delta f_p - \Delta f_{PC} &= (F_0 + K_1 \Delta L + K_2 \ddot{\theta}_p + K_3 \dot{v}) - (F_0 + K_1 \Delta L + K_2 \ddot{\theta}_p) \\ &= K_3 \dot{v} \end{aligned} \quad (28)$$

$\Delta f_p - \Delta f_{PC}$ において $K_3 \dot{v}$ 以外はシミュレーション上では打ち消せることが判る。

4 シミュレーション結果

シミュレーションは、MATLAB/Simulink[4]を用いて行った。

(1) 制御出力について

巻取り機の巻取り速度 v , 外乱として入力されている巻取り加速度 $\dot{v}$ はそれぞれ Fig.4, Fig.5 で表されたものを用いた。また、巻取り加速度は速度信号をローパスフィルタ

$$G_{\text{lowpass}}(s) = \frac{200\pi}{s + 200\pi} \quad (29)$$

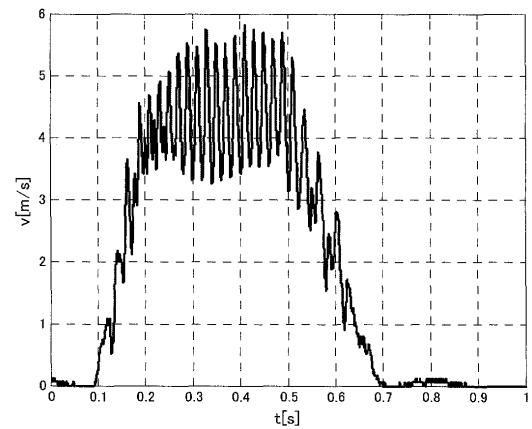


Fig. 4 Winding Speed.

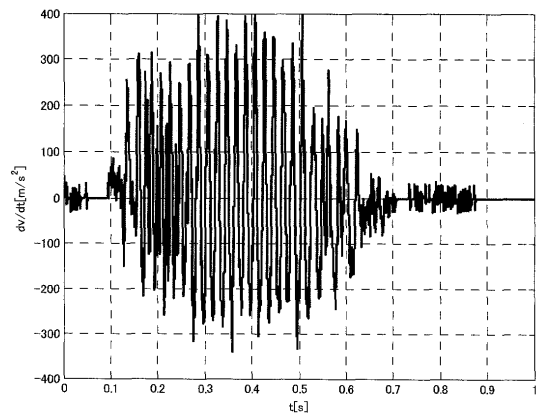


Fig. 5 Winding Acceleration.

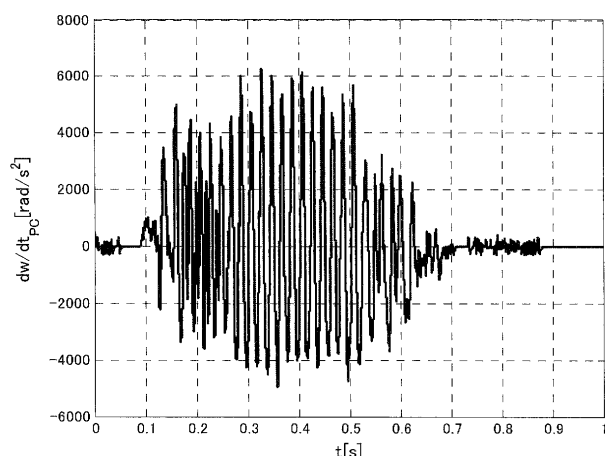
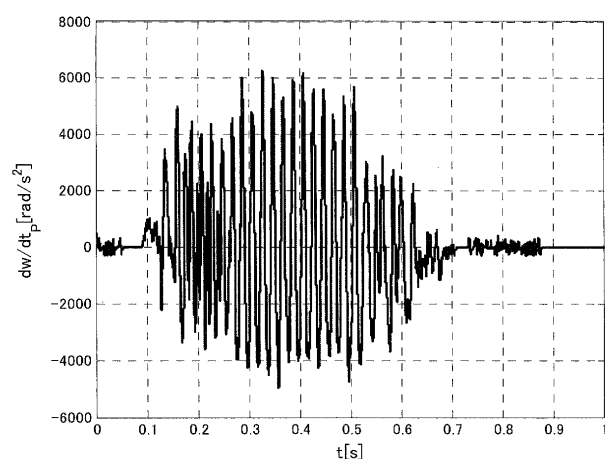
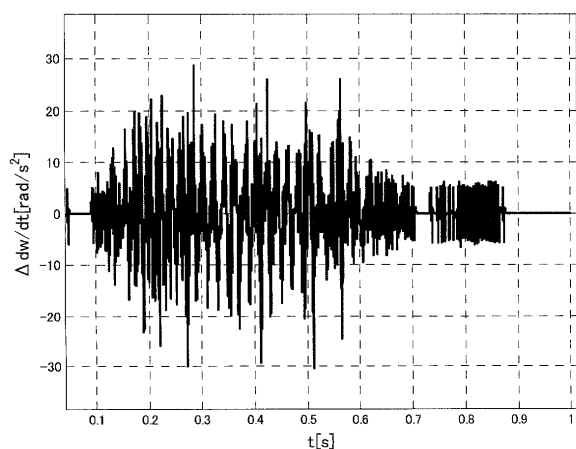
Fig. 6 Output of Controller $\ddot{\theta}_{PC}$.Fig. 7 Output of Motor $\ddot{\theta}_p$.

Fig. 8 Difference between Motor Acceleration and Acceleration Command.

を通したのち数値的に微分して得られた値である。

今回採用した逆伝達関数が正しく働いているかを確認するためにコントローラからの指令値 $\ddot{\theta}_{PC}$ と実際の各加速度 $\ddot{\theta}_p$ をそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示す。コントローラから出力される角加速度指令 $\ddot{\theta}_{PC}$ とモータ・モータドライバから出力される角加速度 $\ddot{\theta}_p$ は、外乱である巻取り加速度 $\dot{v}$ の影響以外は、シミュレーション上においてもほぼ一致している。さらに詳しく調べるために両者の差 $\ddot{\theta}_{PC} - \ddot{\theta}_p$ を Fig.8 に表す。

Fig.6, Fig.7 から判るように $\ddot{\theta}_{PC}$, $\ddot{\theta}_p$ は最大で 6000[rad/s²]の値を出力している。それに対して, Fig.8 で表す $\ddot{\theta}_{PC} - \ddot{\theta}_p$ は大きくても 30[rad/s²]であり, 非常に小さな値と言える。また, $\ddot{\theta}_{PC} - \ddot{\theta}_p$ が小さいことから, 本論文で扱っているようにプリー角加速度を制御系の入力とし, そのためモータ・モータドライバの逆伝達関数 G_m^{-1} を用いる制御系の設計方法の妥当性が示されている。

(2) $\Delta \theta_f$ について

Fig.9 に $\Delta \theta$ について得られた結果を示す。示されているように $\Delta \theta_f$ は 0.015[rad]以下になっている。定常状態でのアームの傾き 1.05[rad]に対して 1.33%となるこれは非常に小さい値であり, アームの傾きはほぼ定常状態から変動しない。当初の目的の一つであるテンションアームの傾きを一定に保つことが達成できている。

また, $\Delta \theta_f$ が小さいということは幾何学的に巻線長さ L が一定に維持されており, その変動分である ΔL はほぼ 0 と判る。さらに, ΔL を小さくできたということは ΔL が原因となって発生する張力変動を抑えられているということである。したがって, 今回の制御により張力変動 Δf_p も小さくできている。

(3) Δf_p について

Fig.10 に Δf_p の時間的な変化を示す。Fig.11 にこれまでの装置で制御した場合の張力変動の実測値と Fig.10 のデータを重ね合わせて示す。従来の機械の変動が最高 17[N]程度あることを考えると, 提案方法では張力変動 0.6[N]程度以下と非常に小さく抑えられており, 動的な特性を加えた提案制御方法の有効性が見られる。

張力変動を抑える目的は, ワイヤの伸びや断線, 巻太りを防ぐためである。本来, ワイヤに伸びや断線等の問題が生じ始めるのは約 12[N]程度の力が働く場合からである。しかし, 働いている張力自体が小さくてもそこから大きな張力変動をしてしまえば, 巻線に悪影響を及ぼす可能性がある。これを防ぐことが張力変動を抑える目的である。

提案する制御を用いたシミュレーションでは Δf_p の絶対値の最大は $\Delta f_p = 0.564[\text{N}]$ である。この張力変動は定常状態 $5.46[\text{N}]$ の 10.3% である。従来の機械における張力の変動と比べて今回のシミュレーション結果 $0.564[\text{N}]$ は小さくなっており、シミュレーションと実機の差を勘案しても、今回の制御は既存のものに加えてよりよい効果が見て取れる。既存の装置が大きな張力になるのは、張力の静的な値の制御を主眼としてテンションアームの位置制御のみを行っており、アームの運動の張力への影響について考慮していないためではないかと推測される。

今までは高速の巻取り速度でワイヤの巻取りを行うとワイヤの伸びや断線が起きたり、巻取り時に巻太りが生じてしまったりしている。しかし、張力変動が制御により抑えられることによりこれらの問題が解決され、ワイヤの巻取り速度のアップ、すなわち作業時間の短縮につなげられる。

また、張力変動自体が小さくなることにより、巻線に作用する定常状態での張力を大きくすることができる。本シミュレーション結果では巻線に作用する最大張力 ($F_0 + \Delta f_p$) は $6.02[\text{N}]$ である。しかし、先に述べた通り巻線に作用する張力は約 $12[\text{N}]$ までならば大きな問題はない。従来は時折 $12[\text{N}]$ を超す張力となっており、これが製造に悪影響を及ぼしていた。提案方法により、安全のために余裕を見積もる必要はあるが、少なくともこれまでよりは定常状態での張力を大きく作用させることが可能である。これより、大きな定常張力をかけられ、巻線の巻太りが軽減させられると考えられる。また、このことは今以上に巻取りの定常速度を大きくすることにも寄与すると考えられる。

張力変動 Δf_p は出来る限り振動せず収束していくことが望ましい。しかし、Fig.10 に見られるように Δf_p は振動的である。この原因は外乱である巻取り加速度 $\ddot{v}$ が Fig.5 のように振動的なためである。現状では、巻取り機側の情報は使用できないとしているため、この振動は現段階では打ち消すことは非常に難しく、可能なことは提案方法のように影響を軽減することである。巻取り機側の速度信号など $\ddot{v}$ に影響する情報が得られれば、その情報に基づいて $\ddot{v}$ のために発生する張力変動が予測できる。これを前述したように $\ddot{v}$ による影響を除いた巻線による張力 Δf_{pc} に加えることにより、 $\ddot{v}$ に起因する振動を今以上に打ち消すことが可能と考えられる。

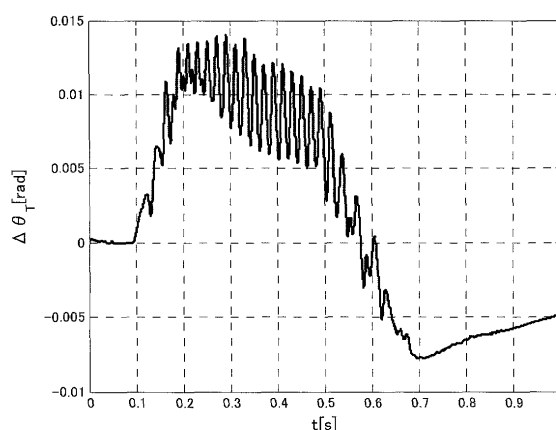


Fig. 9 Arm Angle.

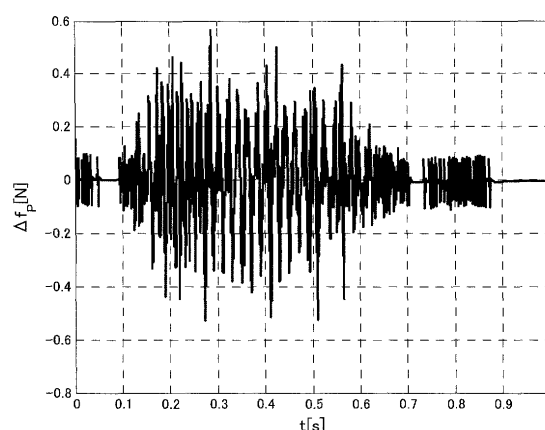


Fig. 10 Wire Tension.

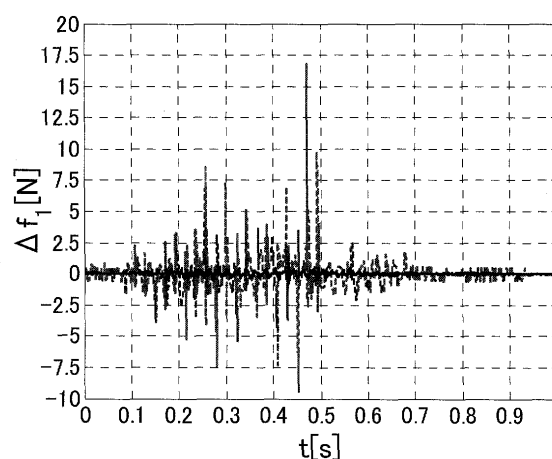


Fig11. Comparison of Tension Between Simulation Result and Current Machine.

5 まとめ

巻線機へワイヤを供給する張力調整装置（テンショナ）における張力制御のシミュレーションを行うために、テンショナにおける力の釣り合いから数式モデル

を求めた。このモデルでは、制御に用いる入力は巻線を送り出すプーリの角加速度である。しかし実際には、プーリを駆動するモータのドライバへ与える位置指令が入力となるために、逆伝達関数を用いることにより、コントローラの出力である角加速度指令をモータ・モータドライバへの位置指令入力に変換する。これにより、プーリの角加速度を制御入力とした制御系設計が可能となった。

シミュレーションより、定常状態からのアームの傾きの変動や張力の変動の様子が得られ、制御を行った結果、アームの傾きの定常状態から変動は非常に小さくなった。さらに、巻線の伸びはほとんど無く、張力変動も抑えられた。この値は断線等への影響を小さくできると思われる大きさである。これより、今回の目的であった定常状態からの傾きの変動や張力の変動を抑えることは達成できた。

張力変動は主に定常状態からの巻線長さの変動、プーリの角加速度、巻取り機の巻取り加速度が要因である。ここで、巻線長さの定常状態からの変動はテンションアームの傾きの変動が小さいことから幾何学的な関係により小さいことが判る。したがって、張力の変動が起きる三つの要因のうち、巻線長さの変動が原因となる張力の変動はほぼ抑えられることが判る。

今回はシミュレーションによる確認となっているので、今後実験を通して効果を確認する必要がある。実際に制御を適用する際、実際の機械・装置を正確にモデル化できないために生じるモデル化誤差や動作条件の変化に伴うパラメータの変動や外乱の存在が無視できない場合がある。そのため、制御系を実機に適用するためにロバスト性が必要となってくる。システムがロバスト性を持つように制御系が実現できれば実際の実験や生産において、希望する応答からの劣化が少なくできると考えられる。

さらに今回は単なる未知外乱として取り扱った巻取り加速度の情報を得ることができれば、制御系が利用できる情報が増加し、単なる外乱とは異なる対応が可能となり、張力変動のさらなる減少へとつながる可能性が考えられる。その結果巻取り機におけるさらなる性能の向上が期待される。

(2008年10月23日受付, 2008年1月13日再受付)

参考文献

[1] 今村 孝, 黒岩哲也, 光井伸行, 寺嶋一彦, 竹本秀

博, フィラメントワインディングにおけるフープ巻き張力制御系の構築, 日本機械学会論文集C編, 69巻680号, pp.906-913, 2003

[2] 今村 孝, 赤峰宏平, 小笠原慎一, 寺嶋一彦, 竹本秀博, ヘリカル巻きフィラメントワインディングプロセスにおけるモデリングと巻取り角度・張力制御系の構築, 計測自動制御学会産業論文誌, 第2巻, 第2号, pp.9-18, 2003

[3] 安藤他, 位置制御ドライバを用いた倒立振子の振り上げ制御, 日本 AEM 学会誌, Vol.15-2, pp.177-182, 2007

[4] Mathworks: MATLAB/Simulink, 取扱説明書