

ソリッドステート速度制御洗濯機

Solid-state Variable Speed Washer

久保倉 邦 明* 森 俊 郎*
Kuniaki Kubokura Toshirô Mori

要 旨

弱繊維まで洗う目的で、わが国独特の自動反転渦巻式洗濯機のパルセータ回転数を無段階に変化させる方式について種々検討した。この種制御回路で必然的に問題となる自動制御系の安定性、サイリスタによる電波障害について重点的に検討し、半導体を使用した電圧位相制御回路によってモートル速度を無段階に変化させる方式を確立し、パルセータタイプの洗濯機としては世界最初のソリッドステート速度制御洗濯機を完成した。

1. 緒 言

現在使用されている洗濯機（ほとんど4極の単相誘導電動機を使用し、パルセータ回転数が400～500 rpm）で、ウールやナイロン、レーヨンなどの弱繊維を洗っているのは、調査によれば約50%以下である。なかでもセータやストッキングなどは、最近新しく市販されている極数変換モートル使用の洗濯機によってさえも数パーセントしか洗われていない。これは、弱繊維を強い水流で洗うことにより、形くずれ、布いたみ、布縮みなどが懸念されるためである。これら弱繊維を支障なく洗濯するには、パルセータ回転数を130～150 rpmの低速にする必要がある。そこで作業衣など着用度合も多く、よごれも多いもめん、麻などの強繊維は強い水流で洗い、ワイシャツなどは中程度の水流で、上記のような弱繊維は130～150 rpmの弱い水流で洗えるように、1台の洗濯機の水流れ、すなわちパルセータ回転数を無段階に変速することが、洗濯機として大きな商品価値をもつ。本報告は、ソリッドステートによる洗濯機パルセータの速度制御について述べ、無段階変速モートルの制御系の技術の確立が今後広く有益に応用され得ることを報告するものである。

2. 洗濯機パルセータの負荷特性および変速方法の考察

渦巻式の洗濯機において、パルセータ回転数に対する負荷トルクは図1のような関係にあり、布動きにつれてこの負荷トルクは大きく変動する。無段階変速できるパルセータ駆動装置は、次の条件を満たさねばならない。

- (1) 自動反転渦巻式でパルセータ回転数は約130 rpmから400 rpmまで広範囲に自由に変速できること。
- (2) 洗濯機特有の変動負荷に対して十分な起動トルクおよび停動トルクが得られ、しかも設定された回転数で変動しないこと。
- (3) 不自然な騒音を発したり、ほかの家庭電気品などに障害を及ぼさないこと。
- (4) 故障の要因が少なく、保守が容易で寿命が長いこと。

誘導電動機をソリッドステートにより速度制御する方式は、故障が少なく、保守も簡単になるうえ、速度発電機を用いて出力回転数をフィードバックし制御すれば、設定した一定速度で運転できる。しかも、可変抵抗器のツマミの操作ひとつで任意の水流れが選べるという操作上のメリットもある。以上より、洗濯機を対象とした電気的変速法を開発した。

3. モートルの無段階変速制御

誘導電動機は保守点検の必要が少なく長寿命である。そしてサイ

* 日立製作所多賀工場

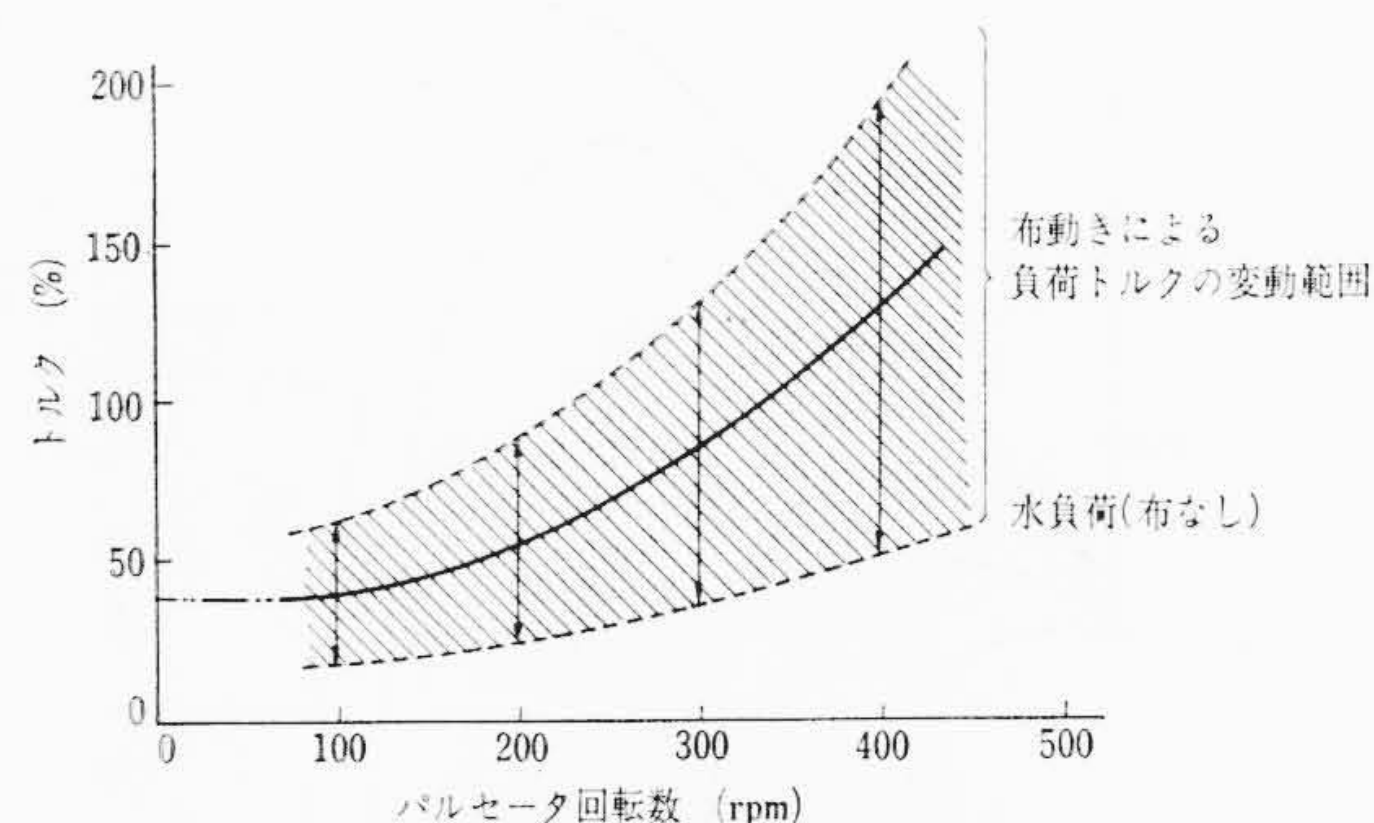


図1 洗濯機パルセータの負荷トルク

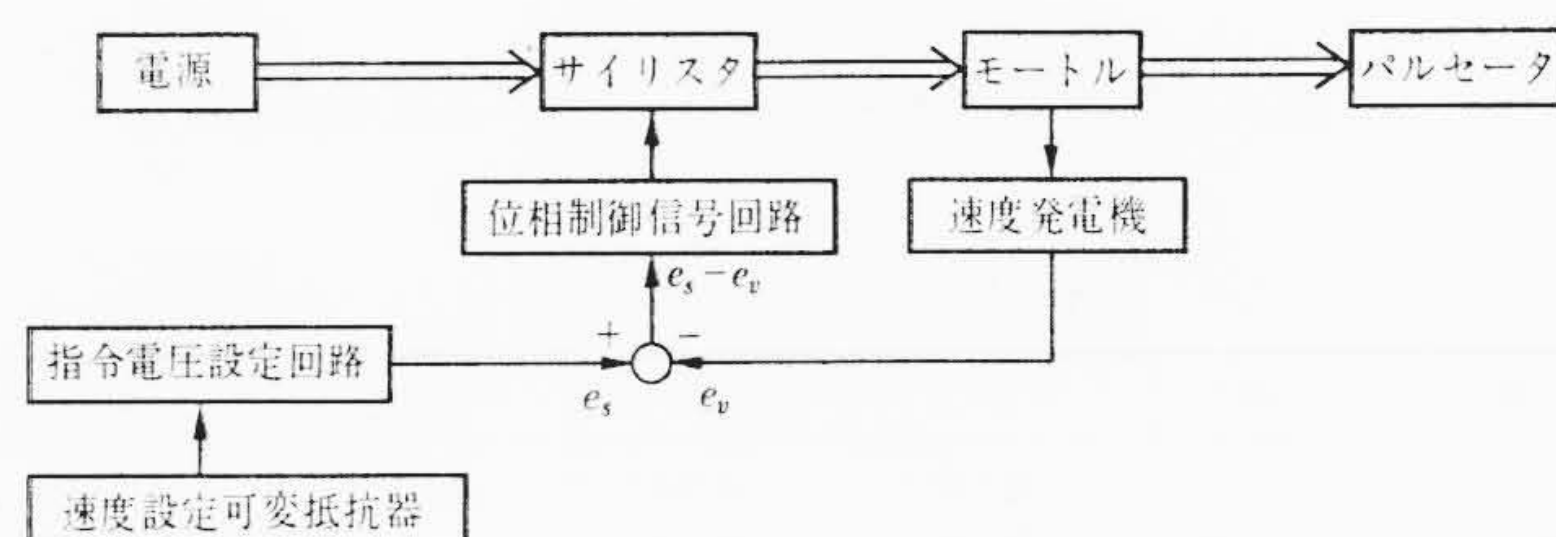


図2 動作原理図

リスタを用いて入力電圧を位相制御することにより、小形ですぐれた無段階変速モートルが得られる。図2にその制御系の動作原理図を示す。モートルの速度に対応して、速度電圧 e_v が速度発電機からとりだされ、指令電圧 e_s と比較される。その差 $e_s - e_v$ に応じて位相制御信号がサイリスタ (FLS) の交流半サイクル内での導通角 θ を制御する。たとえば、負荷変動により、モートル速度が上昇しようとするとき、速度電圧 e_v が大きくなり、 $e_s - e_v$ が小となって導通角 θ が減少し、モートルの入力電圧が低下するのでモートル速度は低下する。一方、モートル速度が低下しようとする場合は、逆の現象が起きて、モートル速度は上昇する。このように、負荷変動に対しても、常に安定した一定速度が得られる。速度設定可変抵抗器を操作して、指令電圧 e_s を変えれば任意の速度が得られる。図3に具体的な制御回路を示す。VR₀により定められた e_s と、速度発電機 (TG) からの速度電圧 e_v とが R_3 部で比較されて、その差 $e_s - e_v$ の電圧で UJT のエミッタを充電し、UJT のパルス発生位相を制御して、FLS の導通角を制御する。図4はこの制御回路で制御したモートル (100 W 4 極コンデンサモートル) のトルク-速度特性である。

4. 制御系の解析

制御系は図2に示したように、モートル、サイリスタ (FLS)、位相制御信号回路、速度発電機によって構成されており、これらの要

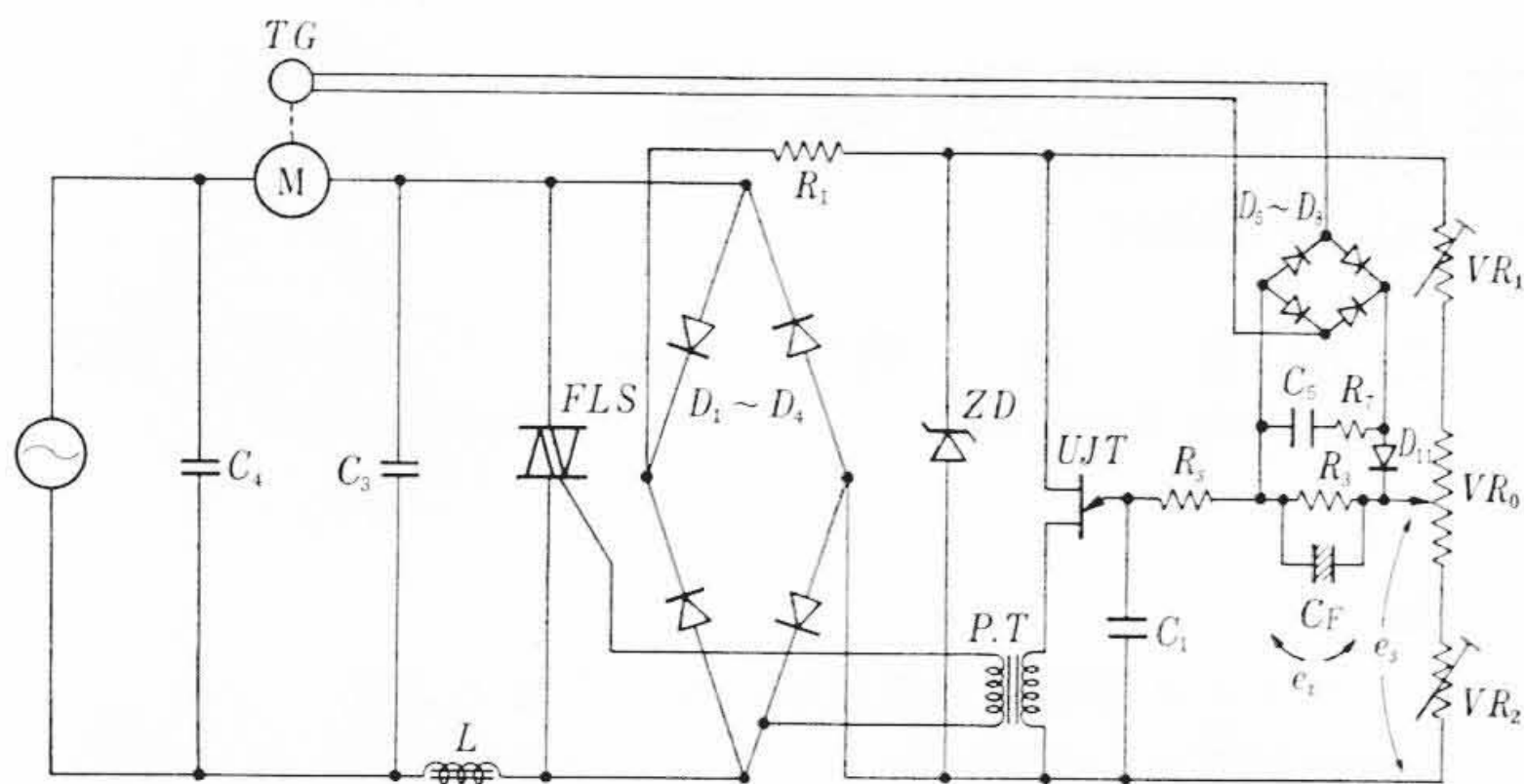


図3 制御回路図

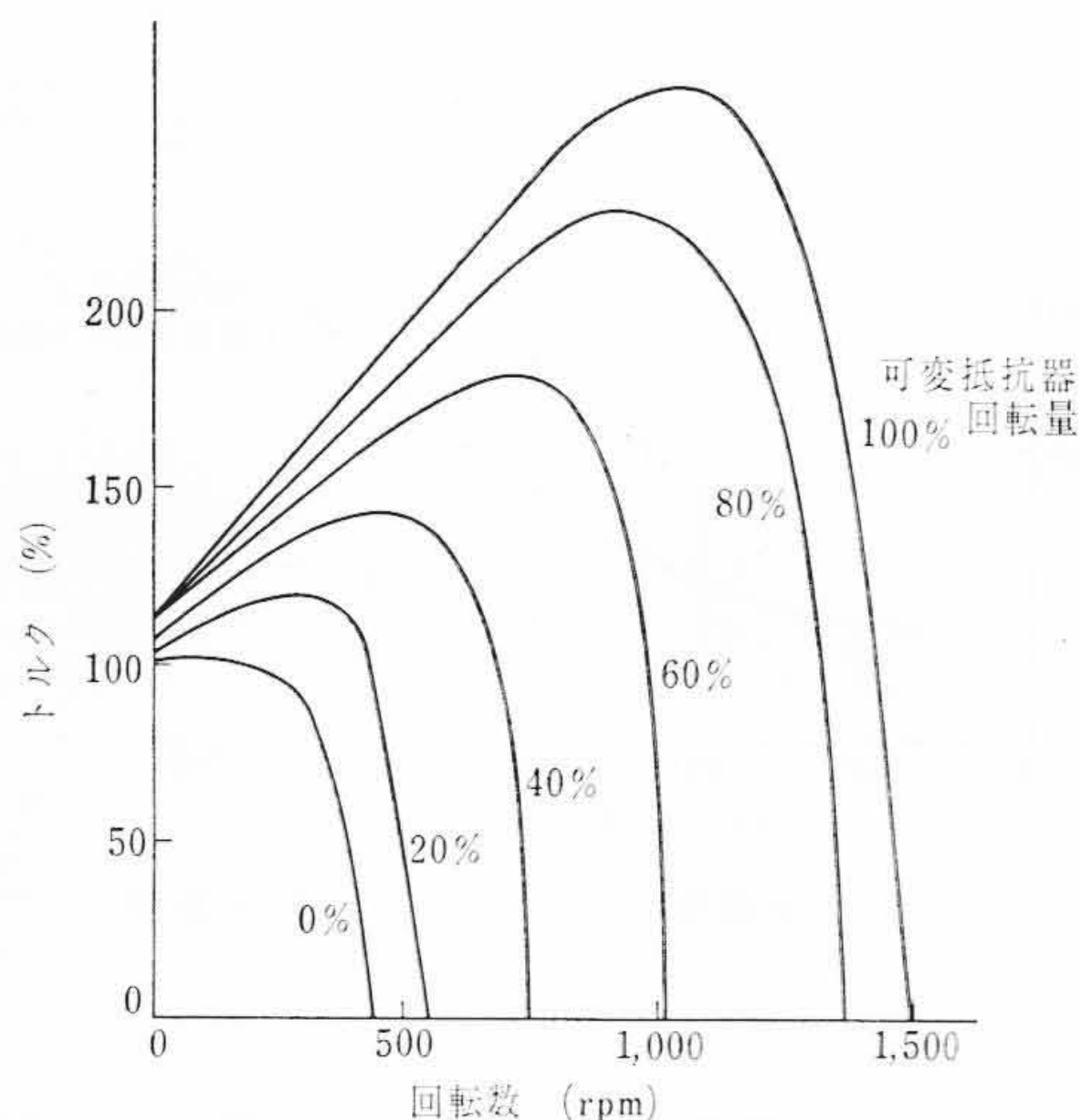


図4 無段変速モータのトルク-速度特性

表1 条件と過渡応答の関係

項番	I	II	III	IV
条件	$A > 0$ $B > 0$ $C \geq 0$	$A > 0$ $B > 0$ $C < 0$	$AB < 0$ $C \geq 0$	$B < 0$ $C < 0$
応答	減衰発散の別 振動性の有無 振動の周波数 Hz	減衰 有 $\frac{1}{2\pi} \sqrt{-C}$	発散 無 —	発散 有 $\frac{1}{2\pi} \sqrt{-C}$

ただし

$$A = \frac{1 + K_A \cdot K_M \cdot K_T}{\tau_M \cdot \tau_T} \quad B = \frac{\tau_M + \tau_T}{\tau_M \cdot \tau_T} \quad C = B^2 - 4A$$

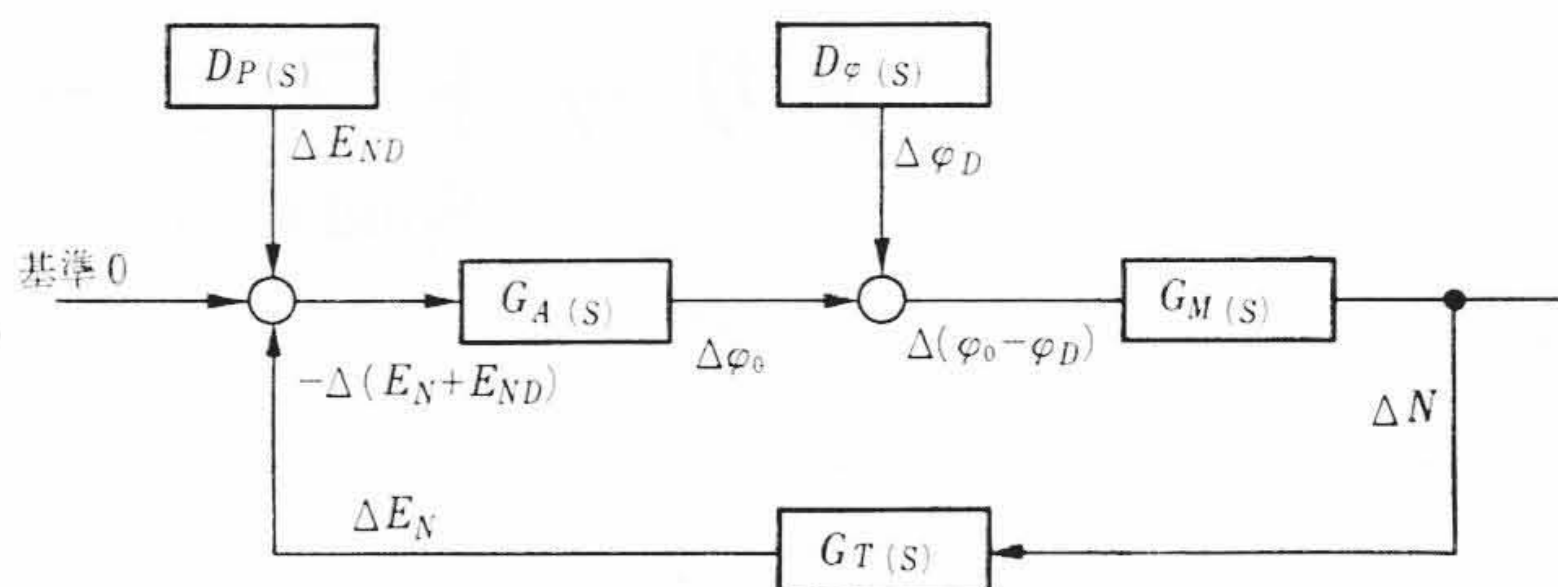
素は図5のように結合される(図5で φ はサイリスタの非導通角 $\pi - \theta$ を示す)。各要素はそれぞれ非線形性を有しているが、この場合は非線形性の程度が小さいので、変化分に対しては線形と考えてよい。系の安定性を考察するに、回転数の変化分 $N(s)$ は次のように表わされる。

$$N(s) = \frac{G_A(s) \cdot G_M(s)}{1 + G_A(s) \cdot G_M(s) \cdot G_T(s)} \cdot D_P(s) - \frac{G_M(s)}{1 + G_A(s) \cdot G_M(s) \cdot G_T(s)} \cdot D_\varphi(s) \quad (1)$$

(1)式で第1項は速度発電機のリップルに対するものであり、第2項は負荷の変動に対するものである。この系の過渡応答は、(1)式の分母=0、すなわち次式の根により考察される。

$$S^2 + \frac{\tau_M + \tau_T}{\tau_M \cdot \tau_T} \cdot S + \frac{1 + K_A \cdot K_M \cdot K_T}{\tau_M \cdot \tau_T} = 0 \quad (2)$$

(2)式が実根をもつか、虚根をもつか、また根の実数部が正であ



$$G_M(s) = \frac{K_M}{1 + \tau_M s} \quad \text{モータの伝達関数}$$

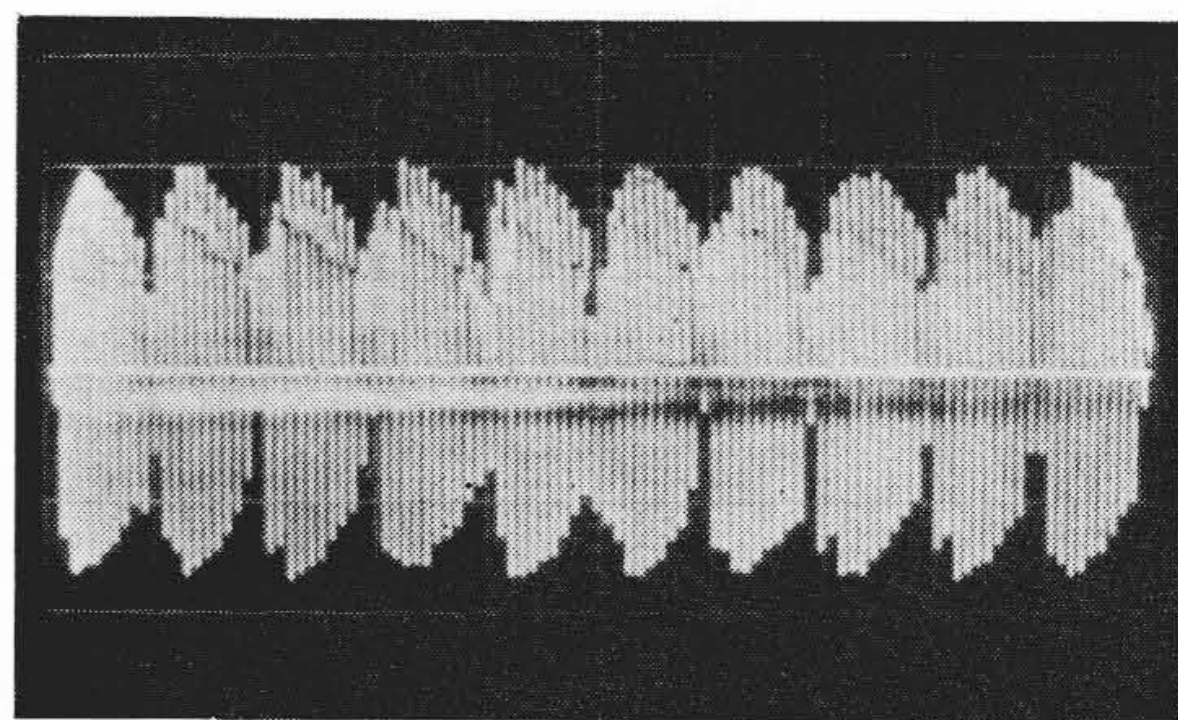
$$G_A(s) = K_A \quad \text{位相制御信号回路の伝達関数}$$

$$G_T(s) = \frac{K_T}{1 + \tau_T s} \quad \text{速度発電機および帰還部の伝達関数}$$

$$D_P(s) : \text{速度発電機のリップルによる外乱}$$

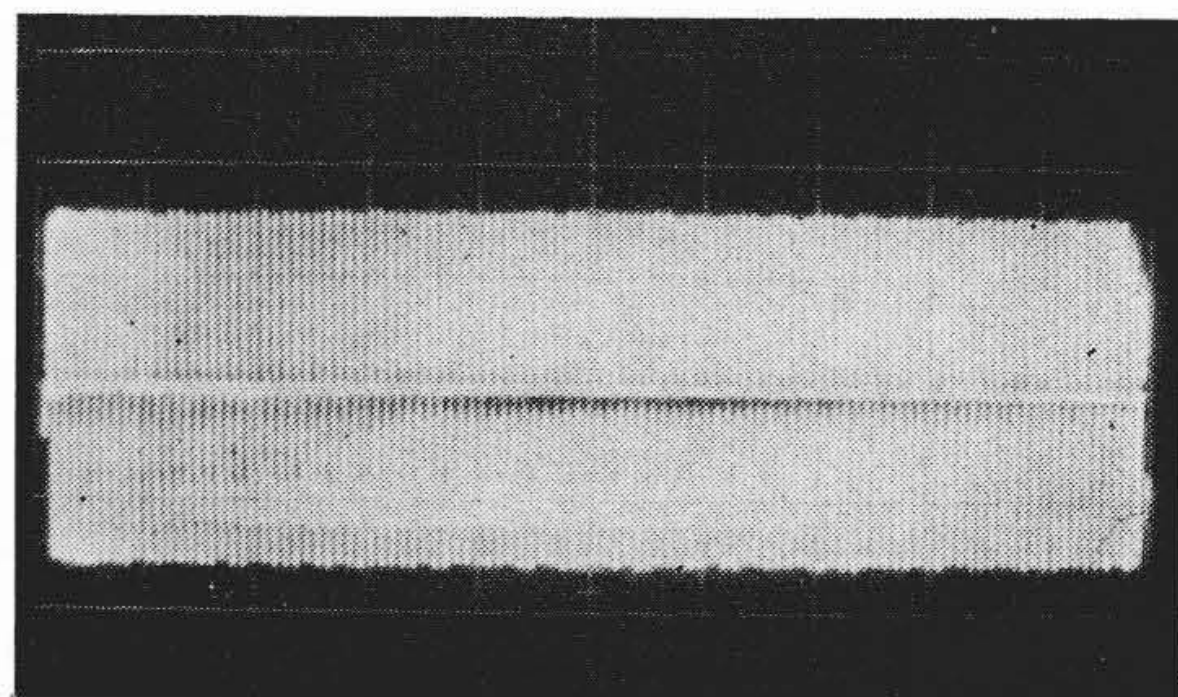
$$D_\varphi(s) : \text{負荷変動による外乱(制御位相に換算)}$$

図5 制御系の信号の変化分に対するブロック結線図



回転数 1,200 rpm
負荷 0.08 m·kg

図6 周期性減衰振動時の電流変動



回転数 1,200 rpm
負荷 0.08 m·kg

図7 無周期減衰振動時の電流変動

るか負であるかにより、表1のように、無周期減衰振動、無周期発散、周期性減衰振動、あるいは周期性発散となる。この種モータの制御系においては、一般に周期性減衰振動となりやすく、この場合モータ速度は振動的に変化し、いわゆるハンチング現象を起こし、異常な騒音を発しやすく、加えて負荷電流も振動的に変化する。図3の回路においても、 C_5 , R_7 のないときには約1,200 rpmおよび約400 rpmで $A > 0$, $B > 0$, $C < 0$ の条件となり、周期的減衰振動となる。図6はそのときの電流変動のようすを示したものであるが、このようにモータ負荷電流が周期的に変動すると、商用の電源電圧に悪影響を及ぼし、電灯に照明フリッカを発生しやすい⁽¹⁾。制御系として良好なものは、表1で項番Iの無周期減衰振動である。そのためには、 $B^2 \geq 4A$ ($C > 0$ とするため)、すなわち次式を満たすようにすればよい。

$\tau_M < 0$ のとき

$$1 + K_A \cdot K_M \cdot K_T \geq \frac{B^2 \cdot \tau_M \cdot \tau_T}{4} \quad (3)$$

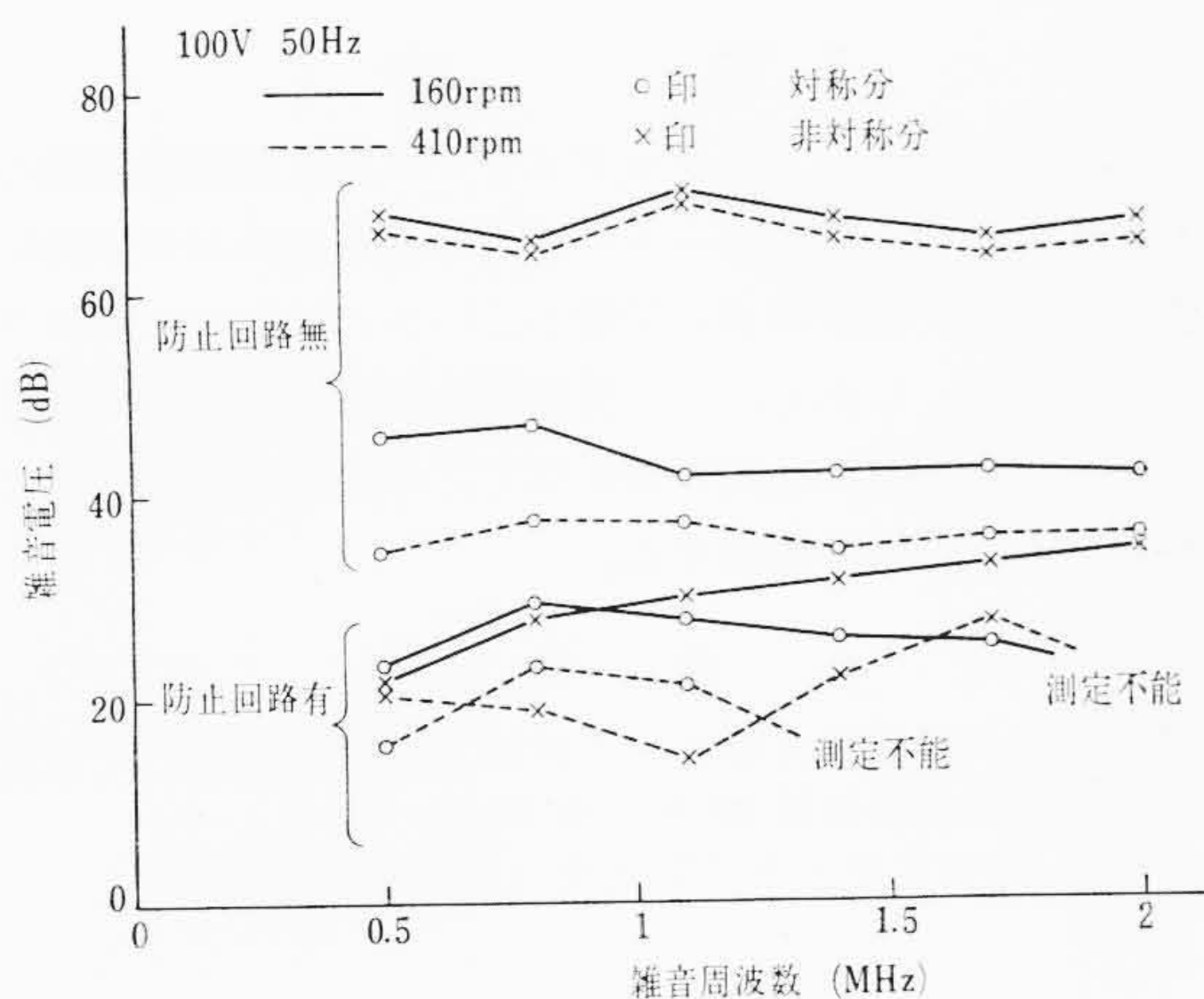
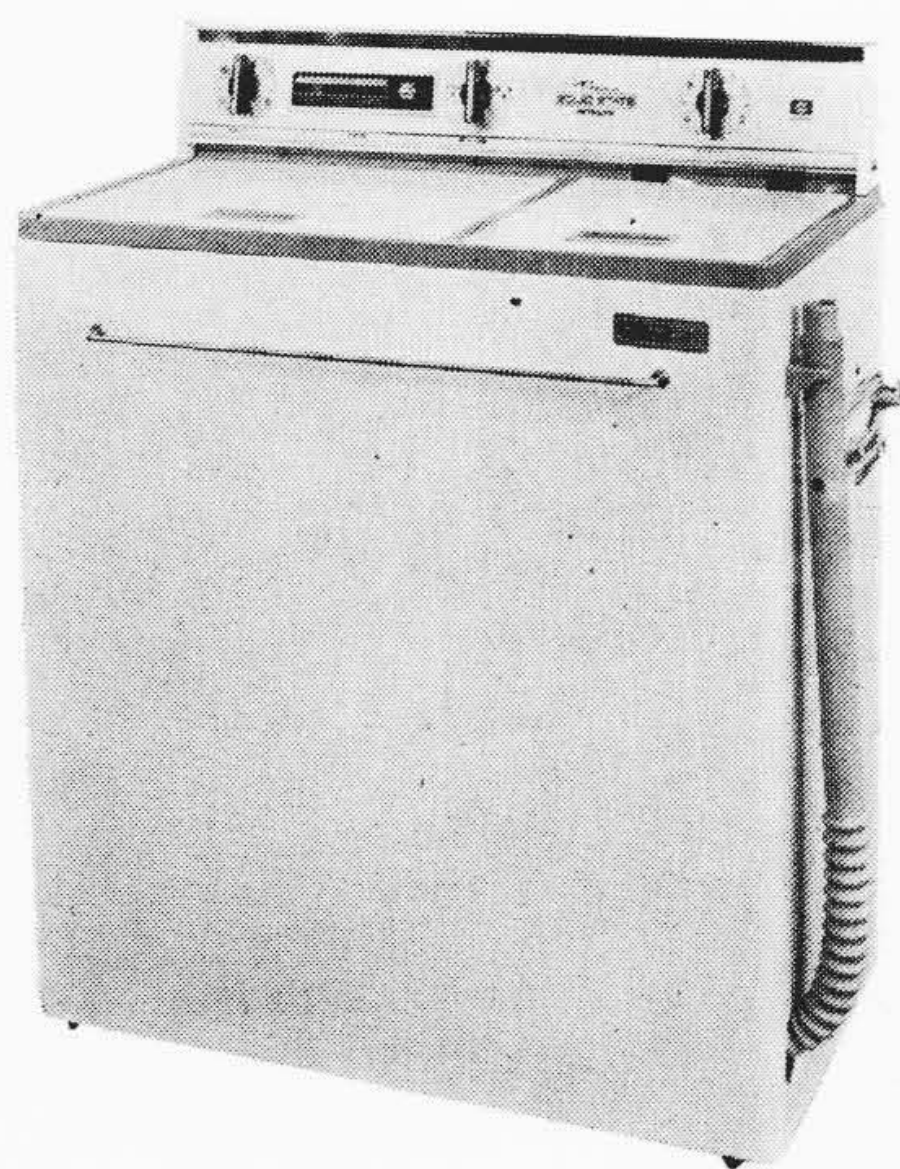


図8 雑音電圧の低減



(ベアソリッドステート PS-250 M 形)

図9 日立ソリッドステート速度制御洗濯機

表2 日立ソリッドステート速度制御洗濯機のおもな仕様
(ベアソリッドステート PS-250 M 形)

電 源	100 V 50 Hz 60 Hz
洗 濯 方 式	自 動 反 転 式
洗 濯 容 量	最 大 2.2 kg
洗 濯 水 量	最 大 35 l
パルセータ駆動モートル	100 W コンデンサモートル
パルセータ回転数	約 130 rpm～約 400 rpm
脱 水 方 式	遠 心 脱 水 式
脱水容量脱水用モートル	35 W コンデンサモートル

 $\tau_M > 0$ のとき

$$1 + K_A \cdot K_M \cdot K_T \leq \frac{B^2 \cdot \tau_M \cdot \tau_T}{4} \dots\dots\dots (4)$$

一方、洗濯機は槽内での布動きにより、負荷トルクが図1のように大きく変化するため、モートル出力特性としては負荷トルクに対する回転数変化、すなわち回転数変動率が低いほうがよい。この制御系の負荷変動のための外乱によるオフセット量を考察すると、 $D_{P(S)} = 0$ 、 $S = 0$ であるから、(1)式から次式が得られる。

$$N_{(0)} = -\frac{K_M}{1 + K_A \cdot K_M \cdot K_T} \cdot D_{\varphi(0)} \dots\dots\dots (5)$$

$D_{\varphi(0)}$ は外乱としてのトルクの変化分をこれに相当する位相の変化として表わしたものであるから、定常状態での回転数変動率は次式のように示される。

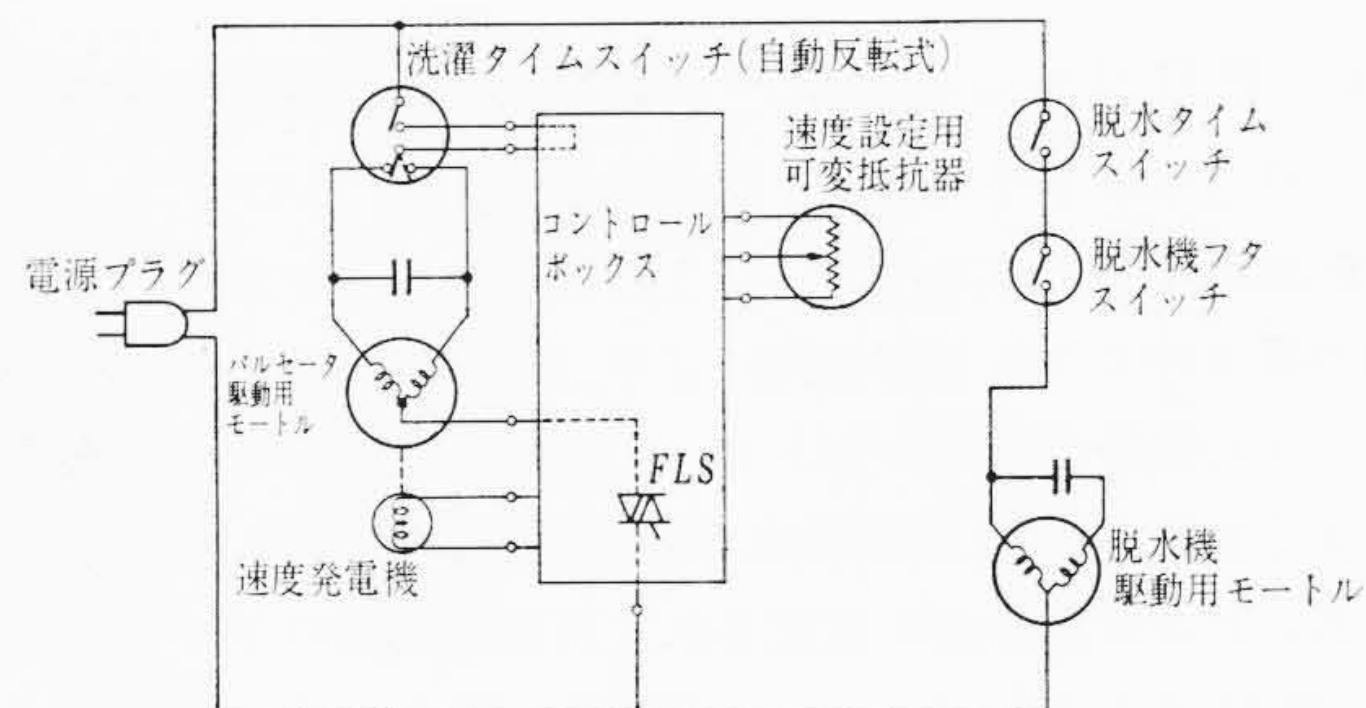


図10 日立ソリッドステート速度制御洗濯機の電気結線図

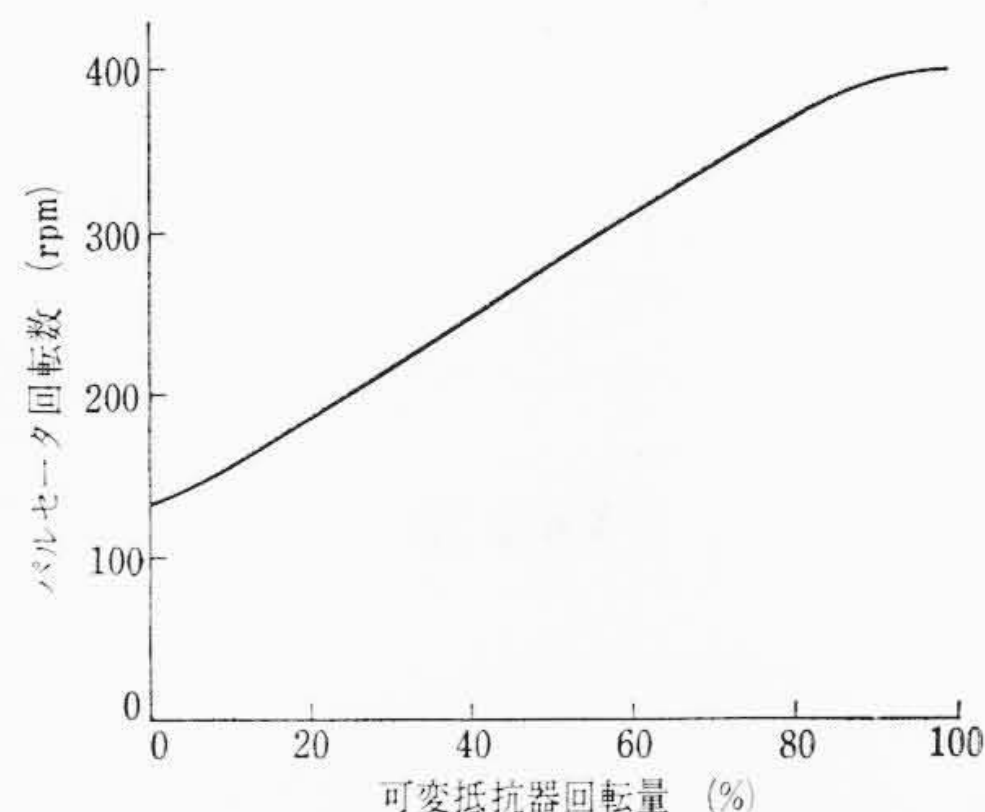


図11 パルセータ回転数の変化

$$\text{回転数変動率} = -\frac{60}{\frac{\partial T}{\partial \varphi}} \cdot \frac{K_M}{1 + K_A \cdot K_M \cdot K_T} \quad (\text{rpm/kg-m}) \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 T ：モートル出力トルク

(6)式を考察すると、 $\partial T / \partial \varphi$ は制御系のないときのモートルの出力特性で決まり、ほかは系のゲインのみによる。制限された回転数変動率をそこなうことなく、無周期減衰振動とするためには、(1)式の定常項はそのままにしておき、(3)、(4)式の τ_M あるいは τ_T で対策を講ずべきことがわかる。しかし τ_M はモートルの慣性、制御系のないときの出力トルク特性および負荷トルクに関係しているので、対策が一義的には決定されない。一方、 τ_T は、図5からわかるように速度発電機および帰還部にのみ関係するので、対策が容易である。この場合、微分補償と積分補償が考えられるが、速度発電機が交流であるため、整流後のリップルが存在し、微分補償は適切でない。以上の検討により、図3の回路に示したように、 C_5 、 R_7 の積分補償を行なって無周期減衰振動となるように制御系を改善した。その結果、図7に示すように、電流変動はほとんどなくなり、ハンチングによる異常音や、電流変動による照明フリッカの懸念をまったく除去することができた。

5. 電波障害防止

サイリスタを用いて位相制御すると、turn on 時に比較的立ち上りの急な電流が流れ、さらに負荷電流はひずんだ波形となる。このためかなり広範囲の周波数にわたって雑音電圧を発生し、特にラジオ中波放送に電波障害を及ぼしやすい。図3における C_3 、 C_4 、 L はその防止回路であり、さらに洗濯機フレームのアース線は、障害電圧がアースへ逃げないようにリアクタを通してある。図8は電源線を伝わって外部へ出る雑音電圧の測定結果である。防止回路により、一般にその許容限界とされている40 dB (対称分40 dB 非対称分50 dB)⁽²⁾以下におさえてある。

6. 日立ソリッドステート速度制御洗濯機の特性

図9に日立ソリッドステート速度制御洗濯機（ペアソリッドステート PS-250 M 形）の外観を、表2におもな仕様を示す。

前述の図3のような制御回路により、無段変速モートルを完成し、パルセータの無段変速を可能とし、あらゆる繊維に最適の水流が得られるようになった。洗濯機全体の電気結線図は図10に示すとおりである。パネル操作面に設置された可変抵抗器のツマミの操作ひとつで、図11のようなパルセータ回転数が得られる。図5にて考察したように、制御系は安定しており、静かな運転が得られ、しかも、サイリスタ回路によくみられる電波障害の問題も適切に解決された。

7. 結 言

サイリスタを用いた日立ソリッドステート速度制御洗濯機の原理と、それに用いた無段変速モートルのこの種制御系が必然的に有する安定性の問題や、電波障害の問題が、いかに技術的に解決されたかについて述べた。しかしひとり洗濯機に限らず、小形で簡単な無段変速モートルの技術は応用方面が広く、今後広い分野にわたって有効に利用されるものと確信する。

参 考 文 献

- (1) 電気学会：製鋼用大形アーク炉によって生ずるフリッカ問題
電気学会技術報告第69号（昭40-5）
- (2) 加藤：妨害電波とその防止法（電気書院 昭32-3）

Vol. 29

日立造船技報

No. 2

目 次

■論文

- ・高負荷燃焼器における燃焼用空気の供給装置
- ・41～60 kg/mm² 級耐候性鋼の溶接施工法
- ・水中過渡アーク放電による極性電極消耗について
- ・スラミングの実船計測について

- ・冷凍貨物船の冷風吹出しグレーティングについて
- ・すぐ歯平歯車の疲れ試験（その1）
一歯の曲げ強さについて—
- ・フィッシュン・エレクトリック・セル
一予備実験—

……本誌に関する照会は下記に願います……

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町60 郵便番号554

第30巻

日立

第9号

目 次

- 創刊30周年記念号 特集「日本の技術革新と国際競争力」
- ・座談会「技術革新と日立の未来」
 - ・技術消化・明治100年
 - ・技術革新と経済成長
 - ・技術革新のスター商品
 - ・統計・国民総生産の推移
 - ・シンポジウム「国際競争力をめぐる不安の正体」

- ・グラフ——'68 日立工場の夏——
- ・世界の日立へ
- ・自主技術の開発
- ・日立のスター商品
- ・日立の現況
- ・「日立」誌30年のあゆみ

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号100

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京71824番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号101
振替口座 東京20018番