

静止クレーマ方式の定速度制御 (第1報)*

— 定常特性 —

村田 年 昭**

武田 郁 夫**

(昭和53年9月30日受理)

The Constant Speed Control of a Static Krämer System (Part 1)

— Steady State Characteristics —

by Toshiaki MURATA and Ikuo TAKEDA

A static Krämer system has widely received practical application for the main motor of the water service of a pump, etc, because, it is able to be controlled efficiently and economically.

Already, we reported the circle diagram method of analyzing the characteristics of a static Krämer system.

In this paper, we derived the speed-torque characteristics of the static Krämer system from the secondary equivalent circuit.

Then, we derived the transfer function of the static Krämer system and analyzed the constant speed characteristics from the block diagram of automatic constant speed characteristics from the block diagram of automatic constant speed control system.

As a result of the analysis, we pointed out that the values obtained from the results using this block diagram gave fairly good agreement with the experimental results.

1. ま え が き

最近の高耐圧、大容量のシリコン整流器、サイリスタのめざましい開発進歩に伴ない、速度制御方式としての2次励磁方式が脚光を浴び、省力化の機運に伴ない、経済的な運転を欲する要求と相まって、ポンプ等の水道設備の主機としての実績が多くなっている。

静止二次励磁方式の一つである静止クレーマ方式の円線図による定常特性の解析についてはすでに報告した^{1)~3)}。

本報告は、静止クレーマ方式が分巻特性を有することより、比較的簡単に自動定速度制御

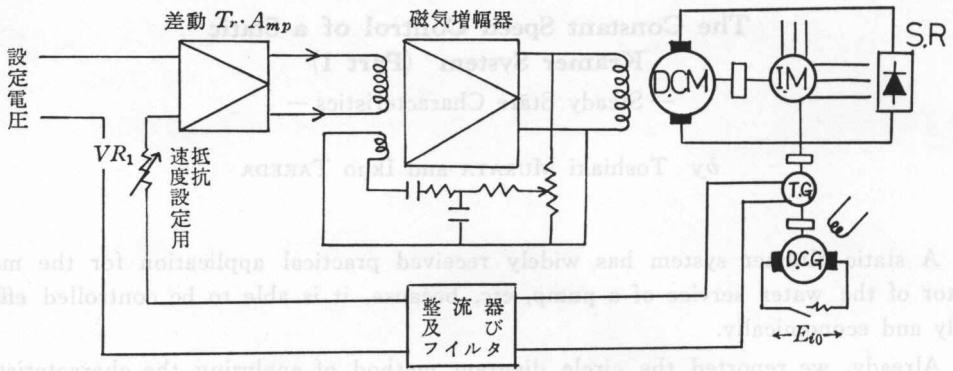
* 昭和51, 52年度電気四学会北海道支部連合大会(1976年10月, 1977年10月)にて一部講演

** 北見工業大学

が可能であることを指摘し、二次側等価回路より静止クレーマ方式の伝達関数を導出した。さらに得られた自動速度制御系のブロック線図より、自動定速度制御時の速度—トルク特性について解析し、実験結果と良く一致することを指摘した。

2. 静止クレーマ方式の速度—トルク特性

第1図に、静止クレーマ方式の自動速度制御系を示す。巻線形誘導電動機の2次回路を整流するシリコン整流器の接続は、3相グレッツ結線回路接続が用いられているので静止クレーマ運転時の交流側換算等価回路(一相分)は第2図で表わされる¹⁾。

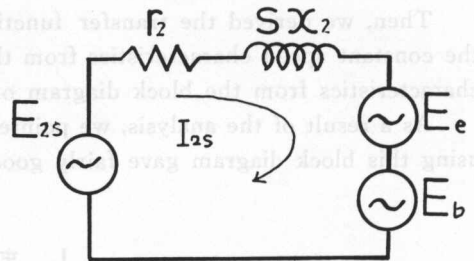


第1図 静止クレーマ方式の自動速度制御系

Fig. 1. Automatic speed control system of static Kramer system.

ここで本論文において用いられる主な記号を以下に示す。

- E_{2s} : 誘導電動機の二次誘起電圧
- E_e : 二次励磁相電圧
- E_b : 整流器立ち上り電圧とブラシ電圧降下の和
- I_{2s} : 二次電流
- I_a : 直流電動機電機子電流
- I_f : 直流電動機界磁電流
- s : すべり
- ω_0 : 誘導電動機同期角速度
- k_v : 直流電動機の逆起電力定数の i_f に対する傾き
- r_{22} : 誘導電動機二次巻線抵抗



第2図 二次側等価回路

Fig. 2. Secondary equivalent circuit.

- r_{aiff} : 整流器微分抵抗
- r_a : 直流電動機電機子抵抗
- r_2, x_2 : 誘導電動機2次回路の全抵抗、リアクタンス
- E_2 : 静止時2次誘起電圧

第2図において、次式がなりたつ

$$E_{2s} = sE_2 \quad (1)$$

$$E_e = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} k_v i_f \omega_0 (1-s) \quad (2)$$

$$r_2 = r_{22} + r_{diff} + \pi/6 \cdot r_a \quad (3)$$

$$I_{2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (4)$$

誘導電動機の2次入力 P_2 は、

$$P_2 = 3E_2 I_{2s} \cos \varphi_2 \quad (5)$$

ただし、

$$I_{2s} = \frac{E_{2s} - E_e - E_b}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (6)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (7)$$

となるから、二次銅損を P_{2c} 、整流器順方向損失とブラシ損の和を P_{eb} 、二次流出電力を P_{2out} とすると、誘導電動機の機械的出力 P_{ki} は、

$$\begin{aligned} P_{ki} &= P_2 - P_{2c} - P_{eb} - P_{2out} \\ &= 3E_2 \frac{sE_2 - E_e - E_b}{r_2^2 + s^2 x_2^2} \cdot r_2 - 3 \cdot \frac{(sE_2 - E_e - E_b)^2}{r_2^2 + s^2 x_2^2} \cdot r_2 \\ &\quad - 3E_b \frac{sE_2 - E_e - E_b}{r_2^2 + s^2 x_2^2} \cdot r_2 - 3E_e \frac{sE_2 - E_e - E_b}{r_2^2 + s^2 x_2^2} \cdot r_2 \\ &= 3E_2(1-s) \frac{sE_2 - E_e - E_b}{\sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2}} \cdot \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2}} \\ &= P_2(1-s) \end{aligned} \quad (8)$$

となるから、誘導電動機の発生トルク T_I は、 $r_2 \gg sx_2$ とすると

$$T_I = \frac{P_2(1-s)}{\omega} = \frac{3E_2}{\omega_0} I_{2s} = K_{r_i} I_{2s} \quad (9)$$

ただし、

$$K_{r_i} = 3E_2/\omega_0 \quad (10)$$

静止クレーマ方式の発生トルク T は、直流電動機の発生トルクを T_D とすれば、

$$T = T_I + T_D = K_{r_i} I_{2s} + K_{r_D} I_d \quad (11)$$

K_{r_D} : 直流電動機のトルク定数

従って、(1)~(11)式より

$$T = \frac{(K_{T_i} + K_4 K_{T_D})(sE_2 - \pi/3\sqrt{6} \cdot K_V \omega_0(1-s) - E_b)}{r_2} \tag{12}$$

ただし、

$$K_4 = \sqrt{3/2} \tag{13}$$

$$K_V = k_v i_f \tag{14}$$

3. 自動定速度制御

3.1 静止クレーマ方式のブロック線図

誘導電動機の二次電圧はすべりに比例し、界磁の強さ一定の直流電動機の逆起電力は速度に比例するから、無負荷速度は第3図において、両直線 A, B の交点 P である。一定励磁で負荷が増すと、 $i_{2s}(r_2 + jsx_2)$ 降下を速度低下による二次誘起電圧増と逆起電力減の差として得られる点で運転されるので、この $i_{2s}(r_2 + jsx_2)$ 降下を直流機の弱め界磁制御で逆起電力減として与えると始めの速度に回復する。この自動定速度制御を行なう回路構成は、第1図に示したとおりである。そこで、先ず静止クレーマ方式の伝達関数を求める。

(1), (2), (4), (6), (9), (11) 式より、各量の微小変化分に対して、

$$\Delta E_{2s} = -K_2 \Delta \Omega \tag{15}$$

$$\Delta E_e = k_5 \Delta I_f + k_6 \Delta I_d \tag{16}$$

$$\Delta I_{2s} = K_4 \Delta I_d \tag{17}$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= \Delta T_T + \Delta T_D \\ &= K_{T_i} \Delta I_{2s} + k_7 \Delta I_f + k_8 \Delta I_d \end{aligned} \tag{18}$$

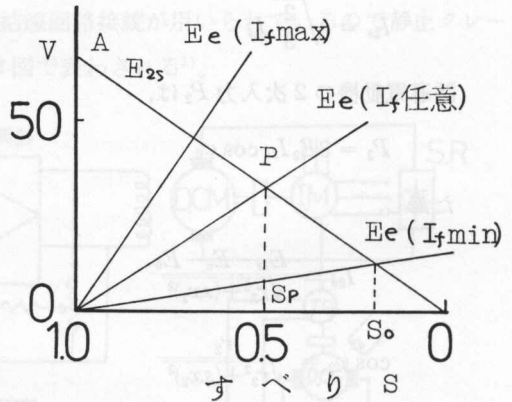
$$\Delta I_{2s} = \frac{1}{r_2} (\Delta E_{2s} - \Delta E_e) \tag{19}$$

ただし

$$K_2 = E_2 / \omega_0 \tag{20}$$

$$k_5 = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} k_v \Omega_0 \tag{21}$$

$$k_6 = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} k_v I_f \tag{22}$$



第3図 静特性 (計算値)

Fig. 3. Static characteristics curve (calculated values).

この自動定速度制御を行なう回路構成は、第1図に示したとおりである。そこで、先ず静止クレーマ方式の伝達関数を求める。

$$k_7 = \frac{\partial T_D}{\partial I_f} = k_v I_{a_0} \tag{23}$$

$$k_8 = \frac{\partial T_D}{\partial I_a} = k_v I_{f_0} \tag{24}$$

$\Omega_0, I_{f_0}, I_{a_0}$: Ω, I_f, I_a の初期値
 Ω : 角速度

機械系のトルク方程式は、負荷トルクを d とすると

$$T = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + d \tag{25}$$

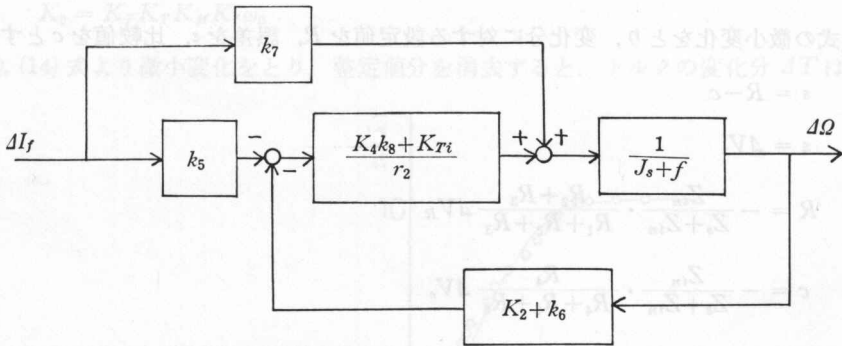
となるから、(15)~(25) 式をラプラス変換すると、静止クレーマ方式のブロック線図は、第4図となり、静止クレーマ方式の伝達関数 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta I_f(s)} = \frac{K}{1+Ts} \tag{26}$$

$$T = \frac{Jr_2}{(K_4 k_8 + K_{T_i})(K_2 + k_6)} \tag{27}$$

$$K = \left[k_7 - \frac{(K_4 k_8 + K_{T_i}) k_5}{r_2} \right] \frac{r_2}{(K_4 k_8 + K_{T_i})(K_2 + k_6)} \tag{28}$$

となる⁴⁾。



第4図 静止クレーマ方式のブロック線図

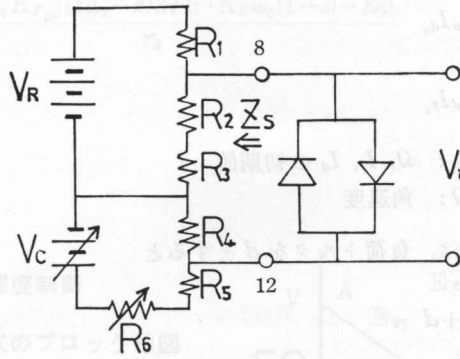
Fig. 4. Block diagram of static Krämer system.

3.2 検出部特性

第1図の速度制御回路は、 $T.G$ からの信号とツェナーダイオードの基準値を比較し、その差を増幅して、直流電動機の界磁を調整して電動機速度を制御する。

いま、検出部の設定電圧を V_R 、 $T.G$ の出力電圧を整流した電圧を V_c とすれば、検出部等価回路は第5図となるから、8~12間の開放電圧 V_{i_0} は

$$V_{i_0} = -\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_R + \frac{R_4}{R_4 + R_5 + R_6} V_c \tag{29}$$



第5図 検出部等価回路

Fig. 5. Equivalent circuit of primary means.

8~12間より電源側をみたインピーダンス Z_s は

$$Z_s = \frac{R_1(R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3} + \frac{R_4(R_5+R_6)}{R_4+R_5+R_6} \tag{30}$$

従って、誤差電圧 V_i は

$$V_i = \frac{Z_{in}}{Z_s+Z_{in}} \left\{ -\frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3} V_R + \frac{R_4}{R_4+R_5+R_6} V_c \right\} \tag{31}$$

Z_i : 8~12間よりトランジスタ増幅器側をみたインピーダンス

(13) 式の微小変化をとり、変化分に対する設定値を R 、誤差を ϵ 、比較値を c とすれば

$$\epsilon = R - c \tag{32}$$

$$\epsilon = \Delta V_i \tag{33}$$

$$R = -\frac{Z_{in}}{Z_s+Z_{in}} \cdot \frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3} \Delta V_R \tag{34}$$

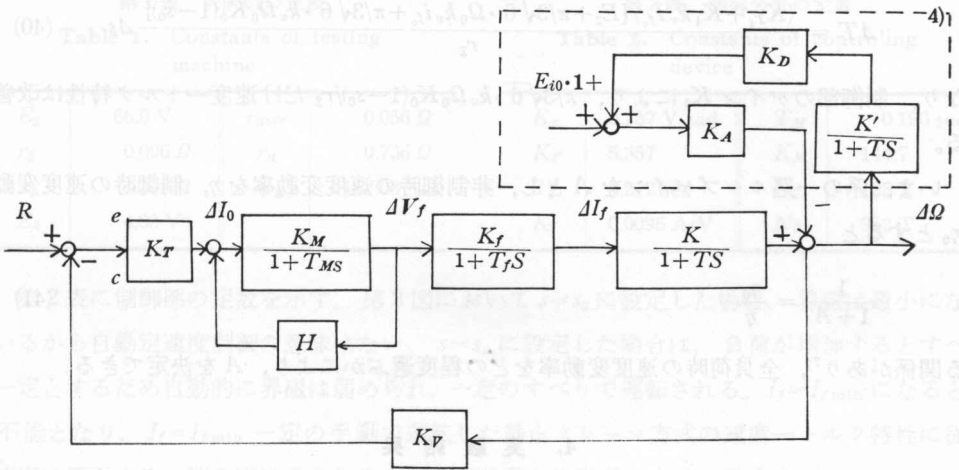
$$c = -\frac{Z_{in}}{Z_s+Z_{in}} \cdot \frac{R_4}{R_4+R_5+R_6} \Delta V_c \tag{35}$$

となり、誤差電圧 ϵ が差動トランジスタ増幅器の入、出力特性の線形範囲を満足しているとし、また、負荷として直流電気動力計を他励発電機として使用すれば、他励発電機回路のスイッチ投入が外乱として考えられるから⁴⁾、静止クレーマ方式の自動速度制御系のブロック線図は第6図となる。図において、 T_M 、 K_M は磁気増幅器の時定数、ゲインで次式で与えられる⁵⁾。

$$T_M = \frac{1}{2f} \cdot \frac{N_c}{N_L} K_M \tag{36}$$

$$K_M = \frac{\Delta V_f}{\Delta V_E} \text{ (電圧増幅度)} \tag{37}$$

N_c , N_L : 制御巻線数, 負荷巻線数
 f : 電源周波数



第6図 ブロック線図

Fig. 6. Block diagram of automatic control system.

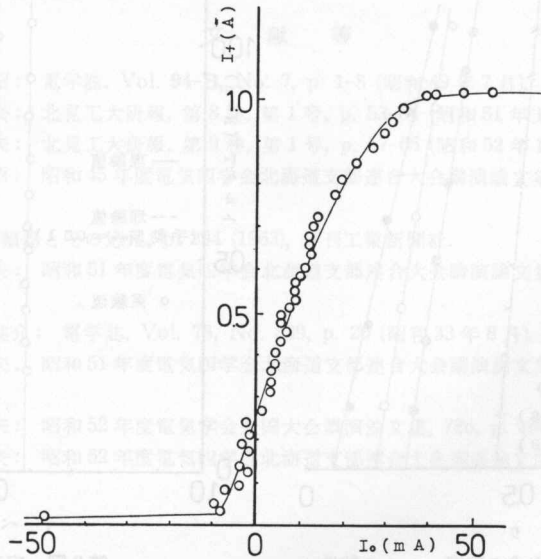
3.3 自動定速度制御

第7図に、磁気増幅器の入、出力特性を示す。第6図のブロック線図より、定常状態においては、

$$\Delta I_f = K_0 \Delta s \tag{38}$$

$$K_0 = K_V K_T K_M K_f \omega_0 \tag{39}$$

(12), (14) 式より微小変化をとり、整定値分を消去すると、トルクの変化分 ΔT は、



第7図 磁気増幅器の特性

Fig. 7. Characteristics of magnetic amplifier.

$$\Delta T = \frac{(K_{T_i} + K_4 k_v I_{f_0}) [E_2 + \pi/3\sqrt{6} \cdot \Omega_0 k_v i_{f_0} + \pi/3\sqrt{6} \cdot k_v \Omega_0 K_0 (1 - s_0)]}{r_2} \Delta s \quad (40)$$

となり、制御部のゲイン K_0 により、 $\pi/3\sqrt{6} \cdot k_v \Omega_0 K_0 (1 - s_0)/r_2$ だけ速度—トルク特性は改善される。

いま、系の一巡ループゲインを A とし、非制御時の速度変動率を η 、制御時の速度変動率を η_0 とすると

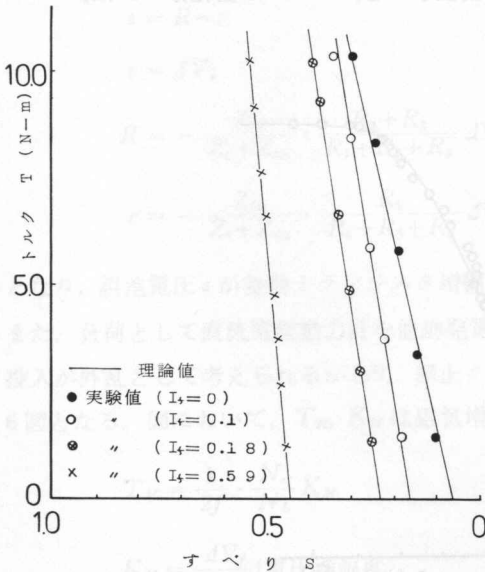
$$\frac{1}{1+A} = \frac{\eta_0}{\eta} \quad (41)$$

なる関係があり⁷⁾、全員荷時の速度変動率をどの程度選ぶかにより、 A を決定できる。

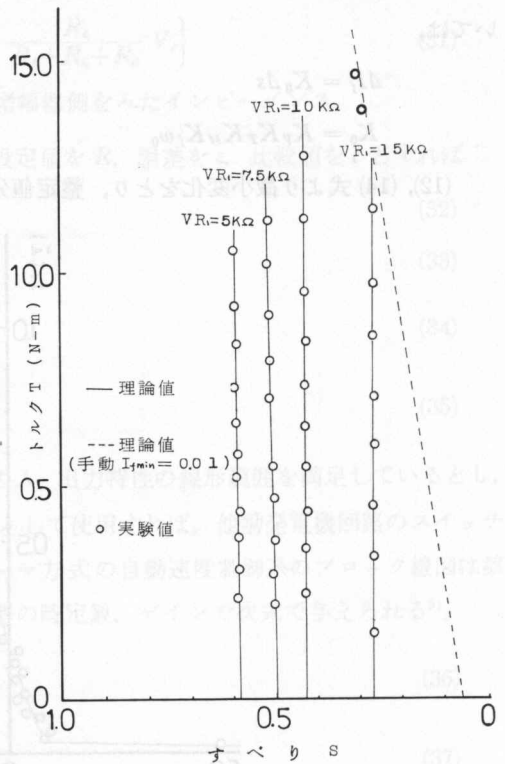
4. 実験結果

第8図に、静止クレーマ方式の速度—トルク特性を示す。負荷として、直流電気動力計を他励発電機として用いた。供試機の数値を第1表に示す。実験は、直流電動機の励磁を一定とし、発電機負荷を変えて行なった。図より明らかなように(12)式より計算した理論値と実験値は良く一致する。

第9図は、第1図の回路構成により、速度設定用抵抗 VR_1 をパラメーターとした自動定速度制御時の速度—トルク特性を示す。



第8図 静止クレーマ方式の速度—トルク特性
Fig. 8. Speed-torque characteristic curve of static Kramer system.



第9図 定速度特性
Fig. 9. Constant speed characteristics.

第1表 供試機の定数

Table 1. Constants of testing machine

E_2	66.0 V	r_{diff}	0.056 Ω
r_2	0.096 Ω	r_a	0.736 Ω
x_2	1.199 Ω	ω_0	157.08 rad
E_b	4.03 V		

第2表 制御装置の定数

Table 2. Constants of controlling device

K_v	0.257 V/rad	T_M	0.190 sec
K_T	5.357	K_M	144.7
T_f	0.212 sec	N_C	125 T
K_f	0.0095 A/V	N_L	952 T

第2表に制御部の定数を示す。第3図において $s=s_0$ に設定した場合、界磁は最小になっているから自動定速度制御の意味はない。 $s=s_n$ に設定した場合は、負荷が増加するとすべりを一定とするため自動的に界磁は弱められ、一定のすべりで運転される。 $I_f=I_{f\min}$ になると制御不能となり、 $I_f=I_{f\min}$ 一定の手動で運転した静止クレーマ方式の速度-トルク特性に従って速度は低下する。第9図に示されるように理論値と実験値は良く一致する。

5. む す び

本論文では、静止クレーマ方式の速度-トルク特性を二次側等価回路より導出し、静止クレーマ方式が分巻特性を有することより、比較的簡単に自動定速度制御が行なえることを指摘し、得られた特性が実験結果と良く一致することを示した。

静止クレーマ方式は、補助機が静止化できない欠点はあるが、効率が良く、最近の無整流子電動機の発展に伴ない、直流機を無整流子電動機におきかえたサイリスタクレーマも実用化され、今後ますます発展することが予想され、過渡特性も含めた解析を今後検討したい。

文 献 等

- 1) 武田郁夫・村田年昭：電学誌，Vol. 94-B，No. 7，p. 1-8 (昭和49年7月)。
- 2) 村田年昭・武田郁夫：北見工大研報，第8巻，第1号，p. 53-64 (昭和51年11月)。
- 3) 村田年昭・武田郁夫：北見工大研報，第9巻，第1号，p. 57-65 (昭和52年11月)。
- 4) 武田郁夫・村田年昭：昭和45年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集，49，50，p. 61-62 (昭和45年10月)。
- 5) 桜井良文：磁気増幅器とその応用，p. 294 (1963)，日刊工業新聞社。
- 6) 村田年昭・武田郁夫：昭和51年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集，184，p. 217 (昭和51年10月)。
- 7) 高井宏幸・長谷川健介：電学誌，Vol. 78，No. 839，p. 20 (昭和33年8月)。
- 8) 村田年昭・武田郁夫：昭和51年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集，185，p. 218 (昭和51年10月)。
- 9) 村田年昭・武田郁夫：昭和52年度電気学会全国大会講演論文集，786，p. 1003 (昭和52年7月)。
- 10) 村田年昭・武田郁夫：昭和52年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集，193，p. 229 (昭和52年10月)。