

静止レオナード式自動速度制御について

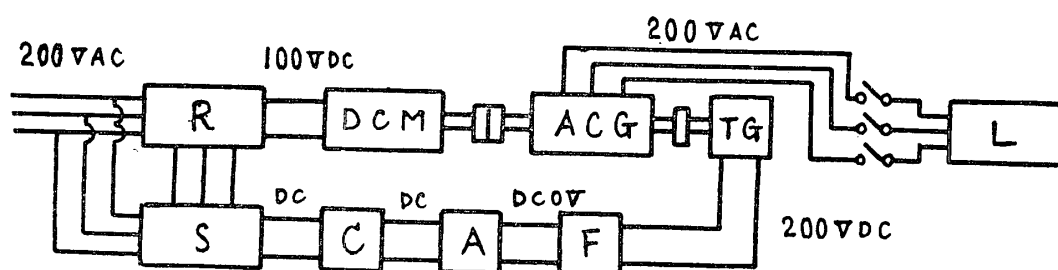
白 井 源 慧

1. 緒 言

静止レオナード式自動速度制御は応答が速い特長をもって賞用されている。しかし筆者の体験によると、それは概念的にいえることで、その特長を生かすために形式通りの設計を行ったのでは不安定な応答に悩まされることが多い。例えば廻転体の結合部のガタ、偏心、バランスの不均衡などの機械的な問題や、検出部の速度発電機の良否などが制御系におよぼす影響も考慮する必要が起る。普通検出部に用いられる直流速度発電機の発生電圧は各種の周波数成分をもつ脈動電圧を含んでいるが、このうち機械的電気的構造の不均衡などによる低い周波数成分(1500r. p. m. で 25C/S) が特に有害である。* 以上の諸点に留意して実験を行い、特に脈動電圧の対策に関しての二、三の設計例並びに実験結果と新たに直接相似型電子計算機による解析を加えて簡単に報告する。

2. 実 験 装 置

装置の構成を第1図に示す。図中 R は格子制御型水銀整流器 (110V, 40A), DCM は直流分捲電動機 (110V, 43A, 1500r. p. m., 5HP), ACG は三相交流発電機 (220V, 50C/S, 1500r. p. m., 3KW), TG は直流速度発電機 (200V/1500r. p. m., 1500r. p. m. で約 25C/S 6Vp-p の ripple 電圧を含む), L はランプ負荷抵抗器 ($\sqrt{3} \times 4A \times 110V$), F は脈動電圧濾波器, C は過渡特性補償器, A は電子管式増巾器, S は電子管式移相器である。なお電動機と発電機はカップリングによって固く結合され、又速度発電機は大型ベローズによって同軸に結合されている。



第 1 図 静止レオナード速度制御系装置構成図

3. 伝 達 関 数

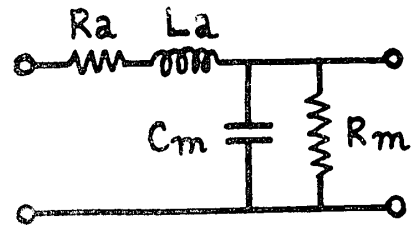
(1) 電動発電機関係の伝達関数 ($F_{mg(p)}$)

電動機を応答速度の速い定励磁運転としたためその伝達関数は等価回路(第2図)より次式のようになる。

$$F_{mg(p)} = \frac{1}{C_m L_a p^2 + \left(R_a C_m + \frac{L_a}{R_m} \right) p + \left(\frac{R_a}{R_m} + 1 \right)} \quad (1)$$

* 昭和33年5月電気四学会連合大会に口演発表

- C_m , 慣性能率に等価な電気容量 $\approx 0.578 F$
- L_a , 電機子インダクタンス+水銀整流器インダクタンス $\approx 56 mH$
- R_a , 電機子抵抗+水銀整流器等価内部抵抗 $\approx 1.08 \Omega$
- R_m , 廻転レスポンスチフネスに等価な抵抗 $\approx 25 \Omega$



第2図 直流分捲電動機の電気的等価回路

(1) 式に数値代入して(2)式をうる。

$$F_{mg(p)} = \frac{1}{0.0323p^2 + 0.752p + 1.052} \approx \frac{0.948}{(1 + 0.667p)(1 + 0.0458p)} \quad (2)$$

(2) 移相器と水銀整流器の伝達関数 ($F_{rs(p)}$)
これは簡単に実験的に求まり(3)式に示す。

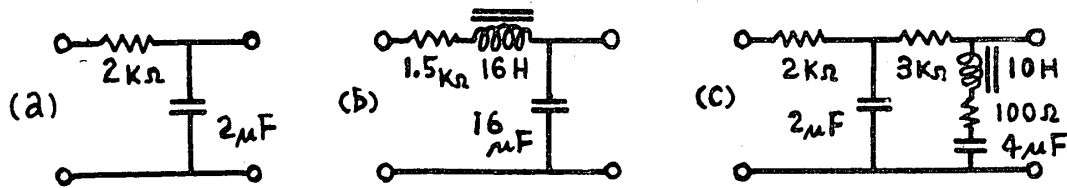
$$F_{rs(p)} \approx 4.5 \quad (3)$$

(3) 速度発電機の伝達関数 ($F_{t(p)}$)

$$F_{t(p)} = \frac{1500 \text{ r.p.m. (TG) } 200V}{1500 \text{ r.p.m. (M) } 100V} = 2 \quad (4)$$

(4) 濾波器の伝達関数 ($F_f(p)$)

第3図に示す三種類の濾波器について実験を行うためそれぞれ伝達関数を求める。



第3図 濾波器

(a) C-R 型……広く用いられる簡単な Low-Path 濾波器。

$$F_{fa(p)} = 1/(1 + 0.004p) \quad (5)$$

(b) R-L-C 型……時間ずれ, 利得低下の悪影響はあるが, 濾波作用が大きく 25C/S の周波数に対して約 -40DB の減衰量をうる。

$$F_{fb(p)} = 1/(1 + 2.4 \times 10^{-2}p + 2.56 \times 10^{-4}p^2) \quad (6)$$

(c) R-C-LC 型……共振周波数が 25C/S (TG の発生するリップル周波数) になる LC 直列回路を含んだもので Band-Path 濾波器になる。

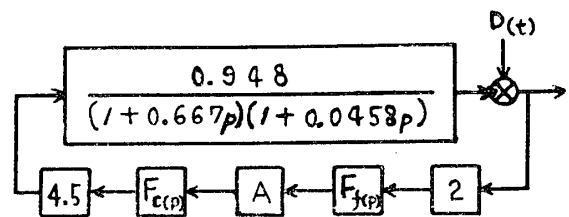
$$F_{fc(p)} = (1 + 4 \times 10^{-4}p + 40 \times 10^{-6}p^2) / (1 + 24.4 \times 10^{-3}p + 89.6 \times 10^{-6}p^2 + 1.6 \times 10^{-7}p^3) \quad (7)$$

4. 補償器 ($F_c(p)$) の設計

第4図のブロックダイヤグラムより「代表根指定法」¹⁾によって設計をする。

(1) 濾波器に(5)式のものを採用する場合。²⁾

(2), (3), (4), (5)式より補償回路なしの一巡伝達関数 ($F_L(p)$) を求めると



第4図 4-1)制御系のブロックダイヤグラム

$$F_{L(p)} = F_{mg(p)} \cdot F_{rs(p)} \cdot F_{t(p)} \cdot F_{fa(p)} \cdot F_a = \frac{477}{(1+0.667p)(1+0.0458p)(1+0.004p)} \quad (8)$$

上式では第4図中のAを55.7(F_a)にしているが、これは代表根指定法によるこの種の設計実例が少ないため、その適用に関して予め予備実験を行った場合の値を流用している。(8)式により定常偏差(δ)を求めると

$$\delta = \frac{1}{1+477} \approx 0.0021 \quad (9)$$

ここで指定減衰度(γ⁰)を0.35に選ぶと代表指定根(p₀)は次のようになる。

$$p_0 = j\omega(1+j\gamma_0) = -0.35\omega_0 + j\omega_0 \quad (10)$$

次に(8)式より補償ベクトル(g_c, φ_c)を求める。

$$g_c \angle \varphi_c = -\frac{1}{F_{L(p_0)}} = -\frac{(1+0.667p_0)(1+0.0458p_0)(1+0.004p_0)}{477}$$

上式に(10)式を代入してω₀の各値の場合について計算すれば第4-1表になる。この値によって補償ベクトル軌跡を画いてみるとω₀=20附近までは遅れ回路、それ以上は進み遅れ回路で補償が可能になる。

しかし補償限界範囲は(8)式より求めたF_{L(p₀)}の留数の逆数値(A₀∠φ₀)を各ω₀について計算して得た値(第4-2表)が次式を満足するものとして求まり、その中からω₀の大きいものを採れば遅れ補償ではω₀=20, 進み遅れ補償ではω₀=40となる。

$$0.4 < \frac{\cos \varphi_0}{A_0} < 0.6 \quad 0.4 < \frac{1}{A_0 \sqrt{1+\gamma_0^2}} < 0.7$$

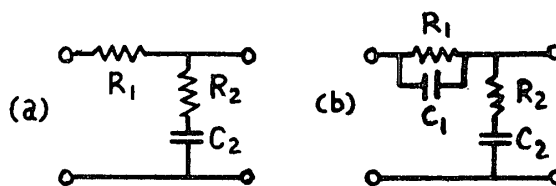
第4-1表 補償ベクトル

ω ₀	g _c (db)	φ _c (°)
5	-43.62	-72.16
10	-36.80	-46.80
20	-30.12	-16.01
30	-24.14	+3.71
40	-19.16	+16.50
50	-15.92	+27.50

第4-2表 留数の逆数値ベクトル

ω ₀	A ₀	φ ₀ (°)
5	1.86	-0.9
10	1.47	+0.8
20	1.74	+19.5
30	2.04	-12
40	1.64	-5.8
60	1.44	+2.2

以上の結果よりω₀=20とω₀=40を採用して補償回路の自由度(ω_s, n)及び伝達関数(F_{ca(p)})を求めると、前者についてω_s=6.2, n=0.0322, F_{ca(p)}=(1+p/6.2)/(1+p/0.2), 後者についてω_{s1}=15.2, ω_{s2}=64, n=40, F_{ca(p)}=(1+p/15.2)(1+p/64)/(1+p/608)(1+p/1.6)となる。又補償回路(第5図に示す)の定数を求めると、ω₀=20の場合図中(a)の遅れ補償回路でC₂≒8μF, R₁=(1-n)/nω_sC₂=0.61MΩ, R₂=1/ω_sC₂=0.021MΩとなりω₀=40の場合(b)の進み遅れ回路でC₂=4μF, C₁=C₂/[(n-1)/n]{nω_{s1}/(ω_{s2}-1)}=0.484μF, R₁=1/C₁ω_{s1}=0.136MΩ, R₂=1/C₂ω_{s2}=0.0039MΩとなる。



第5図 補償回路

(2) 濾波器に(6)式のものを採用する場合
設計の計算は前と同じ方法による。

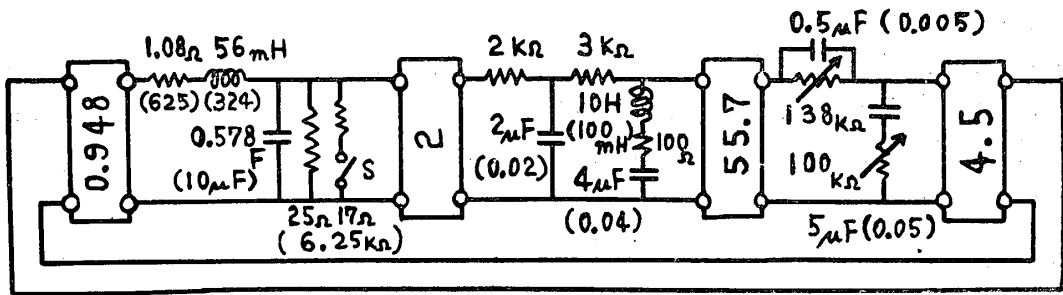
$$F_{L(p)} = \frac{238}{(1+0.667p)(1+0.0458p)(1+2.4 \times 10^{-2}p+2.56 \times 10^{-4}p^2)}$$

(A=27.8)
δ=0.00418

この場合の補償回路は ω₀=20 と 40 とともに進み遅れ回路となってその回路定数を求めると前者は C₂=8μF, C₁=0.539μF, R₁=290KΩ, R₂=3.12KΩ, F_{cb(p)}=(1+0.156p)(1+0.025p)/(1+0.00156p)(1+2.5p) となる。後者は C₂=8μF, C₁=0.577μF, R₁=687KΩ, R₂=7.44KΩ, F_{cb(p)}=(1+0.397p)(1+0.0595p)/(1+0.00397p)(1+5.95p) となる。

(3) 濾波器に(7)式のものを採用する場合

この設計は計算が非常に複雑になるため、たまたま線型回路の完成した直接相似型電子計算器によって行った。補償回路は進み遅れ回路を接用して制御系の全実系を等価回路で示せば第6図ようになる。補償回路は定数の撰定のため一部可変にする。図中Sの部分には発電機負荷



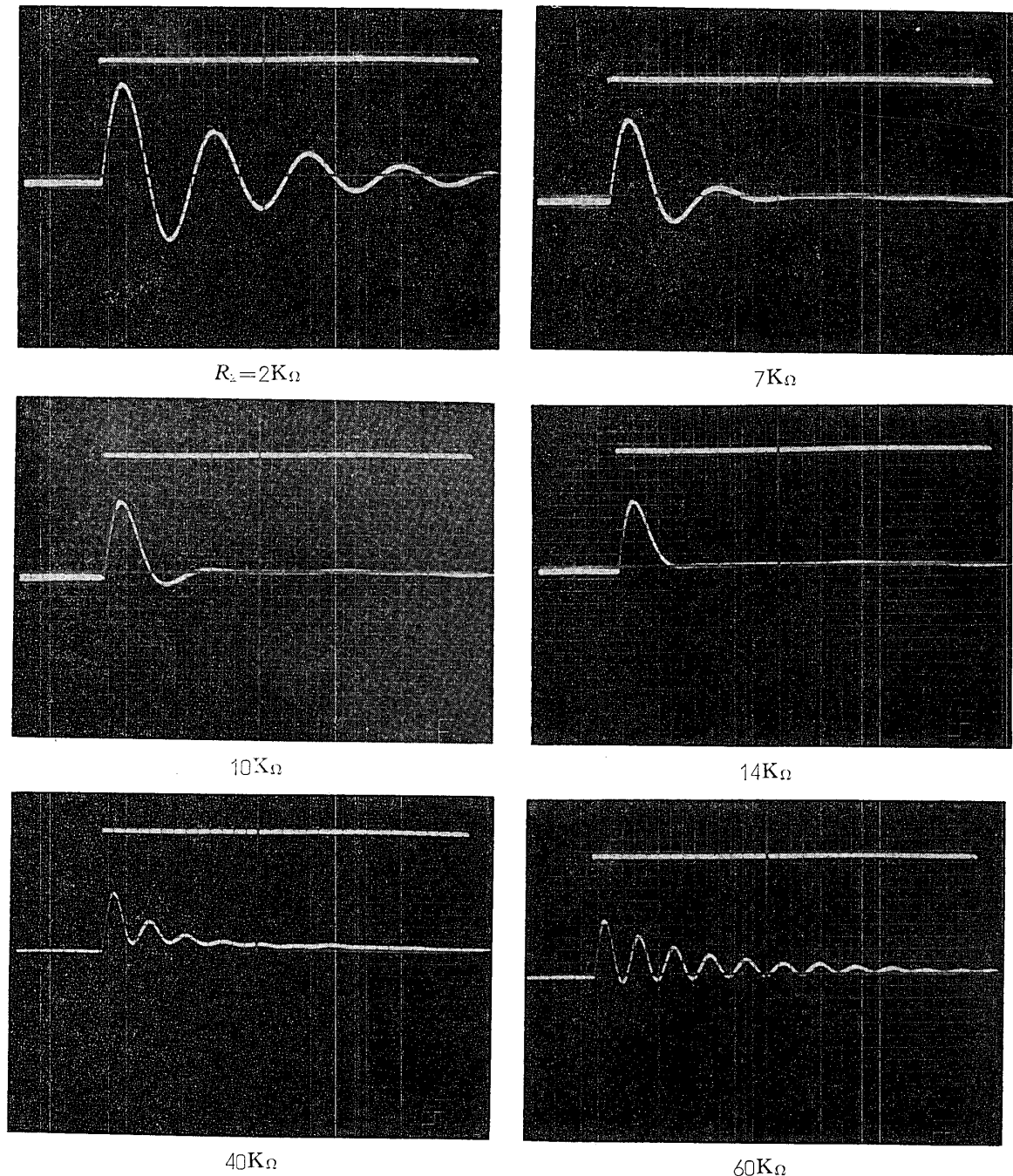
第 6 図 4-3制御系の電氣的等価回路

抵抗の変化すなわち外乱に相当する等価回路で等価な負荷抵抗 (17Ω) に階段状電圧変化を外部よりあたえる。この実系を計算機にかけるため Time Scale 変換を行って演算時間を 1/100 として換算した数値を図中の () 内で示す。R₁=138KΩ のときの R₂=2, 7, 10, 14, 40, 60, KΩ の各応答波形の写真記録を第7図に示す。R₂=7KΩ が γ₀=0.35, ω=17 で 40KΩ が γ₀=0.3, ω=45 になっている。これらの場合の制御系全体の一巡伝達関数を求めてみると、次式のように非常に複雑になる。式中の T₂ の値は R₂ によって定まりその値を第4-3表に示す。

$$F_{Lc(p)} = \frac{477(1+0.069p)(1+T_2p)}{(1+0.667p)(1+0.0458p)\{1+(0.759+T_2)p+0.069T_2p^2\}} \cdot \frac{(1+4 \times 10^{-4}p+40 \times 10^{-6}p^2)}{(1+24.4 \times 10^{-3}p+89.6 \times 10^{-6}p^2+1.6 \times 10^{-7}p^3)}$$

第4-3表 補償回路(b) T₂=R₂C₂

R ₂ (KΩ)	2	7	10	14	40	60
T ₂	0.01	0.035	0.05	0.07	0.2	0.3



第 7 図 直接相似型電子計算機による 4—(3)制御系の応答波形
(2 div=1/1000sec, 外乱 step=1/10)

5. 実験結果

(1) 4—(1) の場合

遅れ補償回路 ($\omega_0=20$) を使用した結果は、 $25C/S$ のリップルを含んだ応答波形を示して判読に困難な状態ではあったが、一応 $\omega=20$, 変動率 $\approx 0.2\%$ 近くで判御できた。大体 (9) 式の計算値に合っている。進み遅れ ($\omega_0=40$) の場合は非常に不安定で、僅かの外乱によって発振を起し測定できなかつた。これは補償回路を含めた系全体のボード線図を見ると、遅れ補償回

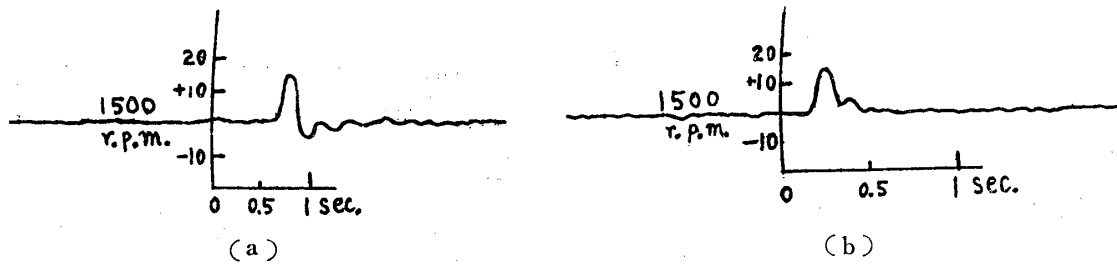
路では $\omega_0=20$ を ODB にとった場合の $\omega=157(25C/S)$ の減衰量が $-35DB$ あるけれど、進み遅れ回路では $\omega_0=40$ を基準にして $-15DB$ になっている。このためあきらかに $25C/S$ のリップルによって系が励振されたものと思われる。

(2) 4—(2) の場合

$\omega_0=20$, $\omega=40$ のいずれも不安定ではなかったが応答波形にリップルを含んでその判読に困難を来し、無理に求めれば $\omega=20$, 変動率=0.4%のように見られる。

(3) 4—(3) の場合

$R_2=7K\Omega$ の応答波形の記録を第8図の(a)に又 $40K\Omega$ のものを(b)に示す。第7図の計算機による応答波形と大体一致する。



第8図 実験による4—(3)の応答波形

6. 結 言

静止レオナード式のみならず速度発電機を検出部に使用する自動速度制御系において、速度発電機の発生する不必要なリップル電圧の系に及ぼす影響の大なることがわかり、それを極力発生しないものの研究が必要であることはいうまでもないが、本研究によってあるリップル電圧が不可避であれば、R-C-LC 濾波器などの Band-Path 濾波器の使用によって、かなりよい過渡応答をもって速度制御のできることもわかった。代表根指定法による設計は簡単な計算で実験結果とよく一致するが、一巡伝達関数が複雑(高次のものを含む場合)になると補償限界範囲の計算が面倒になるため、その場合の簡易化の研究が必要である。次に本研究に使用した直接相似型電子計算機なるものが複雑な自動制御系の解析に対して、現在広く用いられている関数相似型電子計算機よりも非常に便利で且その真価を発揮できたことも付記しておく。終りにあたって終始御指導を戴いた高井広幸*先生並びに援助をあたえられた長谷川健介*氏に感謝の意を表す。

引 用 文 献

- 1) 高井, 長谷川: 電学誌, 77, 821, (昭32)
- 2) 柳瀬(静岡工高電気)氏によって数値計算されたものを含む。
- 3) 乗松, 茂木: 自動制御, Vol. 3, No. 1, 1956.

* 東京工大電気