

高速電気動力計に応用するワードレオナード方式と自動制御

帝国工業電機KK* 岩 岸 巖**

Ward Leonard System and Automation applied to the High Speed Daynamometer
By J. Iwagishi, Member.

1. はしがき

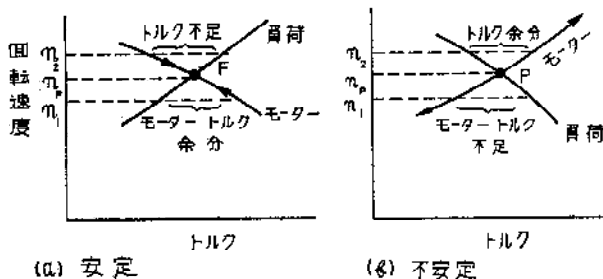
本式はワードレオナード方式(Ward Leonard System)の特徴を実験的に解説し、特に 6,000~800 rpm の広域速度制御を電気動力計に応用し自動制御へ定電圧制御を考察した。この動力計は直流他励分巻型とし、発電機となり、また電動機ともなつて 6,000~4,000 rpm は定出力、4,000~800 rpm は定トルクを出す如く、筆者の設計したもので、最近要望せられる自動車エンジン、農産、航空機補機、ガソリンエンジンの実験研究に最適のものとして利用されている。

筆者は己に交流によりこの種電気動力計の 12,000~500 rpm のものを設計したが、今回述べる直流式のものと同じ目的を簡単に達せられた。然し基礎的のアイディアは、やはりワードレオナード方式の実験的研究から来ている。将来ワードレオナード方式を自動制御に応用せられる各位のため、この関係 Data の一部を公開して、実験的に見た本式の基礎を参考せられるならば、何か将来の御研究上に役立つものとする。

2. 基礎的考察

(2.1) 電動機の安定運転の条件

電動機の出力—負荷の関係は、この双方のトルクが等しくなるような回転の点で平衡する。しかし、トルクが平衡しても、運転の安定なるや否やは、下記の条件による。即ち第1図¹⁾³⁾⁴⁾は電動機と負荷の速度をその傾



第1図 電動機運転の安定と不安定

斜によって比較したもので前者が後者に比較して小さいことが、安定運転好条件である。(b)図は電動機の速度が交点 P の速度 n_p より上昇すると、その速度は益々上昇せんとする。一方 n_p より少しでも下降すると、益々下降するから不安定である。これに対し a 図はこれと反対に安全条件を示している。故に電動機運転の安定性は

$$\text{電動機の速度の傾斜} < \text{負荷の速度の傾斜}$$

によって決せられる。

電動機は元来その設計の巧劣によっても速度の不安定をおさえることが出来る。直流機では磁束密度を低くとり、補償巻線、和動直巻線の採用などがそれである。

(2.2) 速度制御

直流電動機の角速度¹⁾⁴⁾は

$$\omega = \frac{V}{K\phi} - \frac{R_a}{(K\phi)^2} (T)$$

で与えられる。

あるトルク (T) を出す回転速度は、V、 ϕ 、 R_a の何れかの一つまたは二つ以上を変えることによって制御出来る。即ち、

- ① 電圧制御 → V の変化
- ② 界磁制御 → ϕ の変化
- ③ 抵抗制御 → R_a の変化

(a) 直列抵抗制御

電機子回路に直列抵抗を入れて行うもので第2図¹⁾はこの結線、特性を示す。

分巻、複巻電動機では ϕ を一定に保つため分巻巻線は直列抵抗 R の外側に接続する。

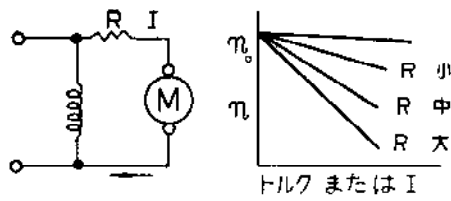
R を多くするほど速度が低くなるが、無負荷速度はほとんど変わらないために速度変動率が悪くなる。

直列抵抗制御は簡単に低速度が得られるが次の欠点がある。

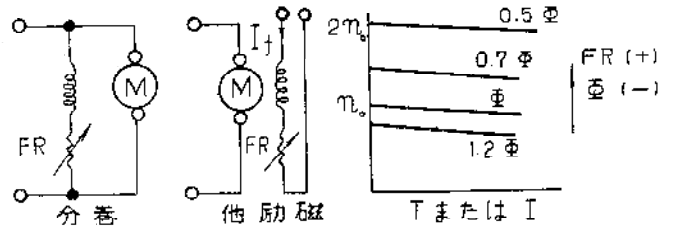
- ① 直列抵抗中の損失の大なるため効率が悪い。
- ② 速度変動率が大きくなり分巻特性が失われる。
- ③ 軽負荷の速度制御が難しい。

(b) 界磁制御

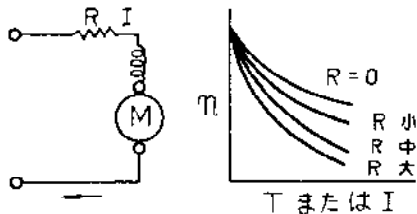
* 大阪市西淀川区御幣島西2の26
** 社長、技術士



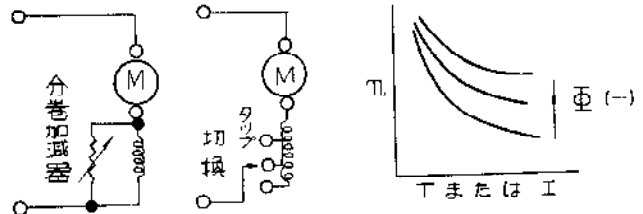
(a) 分巻電動機



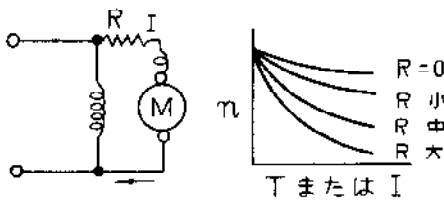
(d) 分巻または他励電動機



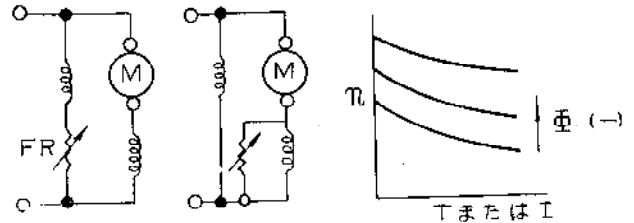
(e) 直巻電動機



(f) 直巻電動機



(c) 複巻電動機



(g) 複巻電動機

第2図 直列抵抗制御特性

第3図 界磁制御の特性

第3図¹⁾⁴⁾は界磁制御の結線と特性を示した。この制御方法は経済的ではあるが、低い速度をうることが困難である。

直流電動機の速度は、ほぼ ϕ に逆比例する。

故に励磁電流を減少すると速度は昇る。

界磁調整器は、全部短絡すると定格速度よりやや低い速度がえられるが、通常抵抗を増加してその速度を増すように製られている。

然し界磁制御は低速度が得られない欠点もあるが、次の長所をもっている。

- ① 装置の簡単、広範囲の速度制御が容易。
- ② 速度変動率がよく、他励または分巻型では定速度特性が失われない。
- ③ 損失少く、効率がよい。
- ④ 電流の少いため界磁調整器が安価に出来る。

元来、他励または、分巻電動機は速度制御は、1 : 2程度であるが、補極、補償巻線をつけたもので1 : 5くらいが限度である。

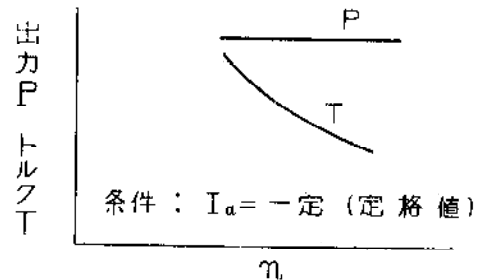
界磁調整によつて、速度制御をした出力とトルクの関係は第4図に示す如くである。

電動機の過熱しないため電機子電流 I_a を定格値に一定に保つとせば、出力¹⁾は

$$wT = EI_a = (V - R_a I_a) I_a = \text{const.}$$

となる。

また、トルクは、 $P = 2\pi nT$ の関係になる。



第4図 界磁制御の許容出力と許容トルク

(c) 電圧制御

端子電圧 V を変化する速度制御であつて、これは主として他励分巻電動機で行われる。

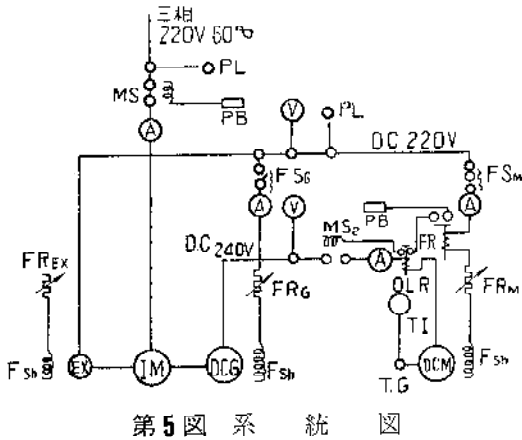
分巻および複巻では、 V を下げると、分巻励磁電流が減少し、且つ ϕ も減少するから、速度は電圧によつてあまり変わらない。故に電圧制御は行われない。専ら他励型に用いて有効である。この制御は、きわめて重要で界磁制御と併用して、次に示すワードレオナード方式で応用せられる。

(d) Ward Leonard 方式

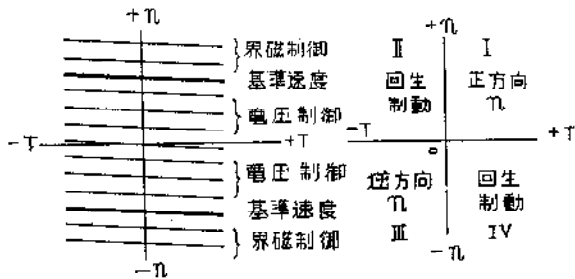
上記の界磁制御と電圧制御の双方の特徴を合せて、定出力および定トルクにおいて広域なる速度制御の目的を

達せんとする方法である。

第5図はこの結果、第6図はその特性を示したものである。



第5図 系統図

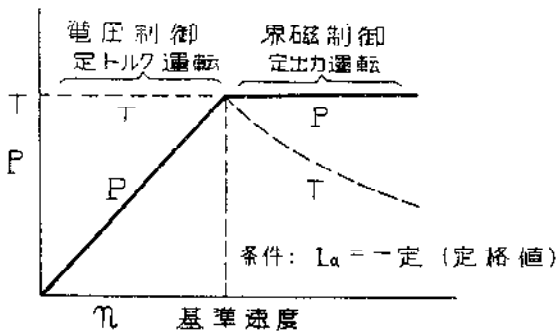


(a) トルク速度特性 (b) 各象限での動作

第6図 ワードレオナルド方式の特性

電圧制御、界磁制御共に定速度特性である。電圧制御の範囲では ϕ は一定である。即ち、電機子電流 I_a は、低速時の冷却効果の減少を無視すると、つねに定格電流まで流しうるからトルクは $T = K\phi I_a$ が一定となり、定トルク運転となる。

一方界磁制御の範囲では、後述の如く、定出力運転となる。これを示すと第7図の如くなる。



第7図 ワードレオナルド方式の許容トルクと許容出力

3. 電気動力計に応用した Ward Leonard 方式

(3.1) 使用の目的

本動力計は Ward Leonard 方式により、4,000~6,000

rpm は 15 HP (11 kW) まで定出力を出し、4,000~800 rpm は定トルクを出すことによつて、自動車エンジンの出力試験に使用する。

(3.2) 設計仕様

出力 (HP)	3 15	15~15
刻 負 荷	定トルク	定出力
回 転 (rpm)	800~4,000	4,000~6,000
電 圧 (V)	48~ 240	240~ 240
制 御	電圧制御	界磁制御
定 格	速 続	本補置のMG
型 式	閉鎖逆風	3 ph, 220V, 60 c/s 25 HPIM
励磁方式	他励分巻 補極付	DC, 240V, 15kW G
トルク測定	kg 計	DC, 220V, 3kW EX
回転数測定	電気回転計	

(3.3) 動 作

第5図において先ず左方上に示す PB の押鈕を押すと三相誘導電動機 IM が運転して、これに直結されている直流発電機 DCG が動力計の電機子 DCM に直流を送り、この電圧は界磁調整器 FRG によつて、30~300V の間で調整される。DCG と IM の軸に直結されている励磁機 EX の電圧は界磁調整器 FRex によつて 34~310V の間で調整し、電気動力計の界磁の調整は FRM によつて行われる。

今電気動力計 DCM を外力で回転して発電機とした場合には DCG は電動機として作用し、IM は電源に電力を返還する。右方中央の PB は発電子回路投入用の押鈕であつて DCM が過負荷となると OLR がはたらき MS2 に作用し電機子回路を開放し、また励磁電流が 0.35A 以下になると、界磁低電流リレー FR がはたらき MS2 に作用してその回路を開放し、動力計の過速度になることを防止する。

本操作に使用した操作盤の器具は下記のものによる。

操 作 盤

鋼板製テーブル型とし、正面に指示計器を取付け、マグネットスイッチ類は函内に納め、押鈕等は操作に容易なる場所に取付け、界磁調整器は側方に置き記録台を具備す、盤面、函内取付器具は下記の通りとす。

器 具 名	容 量	数 量	用 途
交流電流計		1	誘導電動機
直流電流計		1	動力計
“		2	発電機} 界磁 動力計}
直流電圧計		1	発電機
“		1	励磁機
回転指示計		1	動力計

マグネットスイッチ	1	誘導電動機
“	1	動力計
界磁スイッチ (単投)	1	発電機
“ (双投)	1	動力計
過負荷保護装置 (サーマルリレー)	1	“
動力計界磁低電流保護装置	1	“
界磁調整器	3	発電機, 励磁機
押釦スイッチ	2	動力計, 誘導電動機, 動力計
表示灯	2	交流側及励磁機

(3・4) 試験

第1表は動力計の無負荷試験成績であつて、Gの0~8間は界磁電流を一定として、電機子電圧制御による速度制御の結果を示し、Gの8以下は電機子電圧を一定として、界磁電流を変えて速度制御を行つた実験の結果である。

第1表 動力計無負荷試験

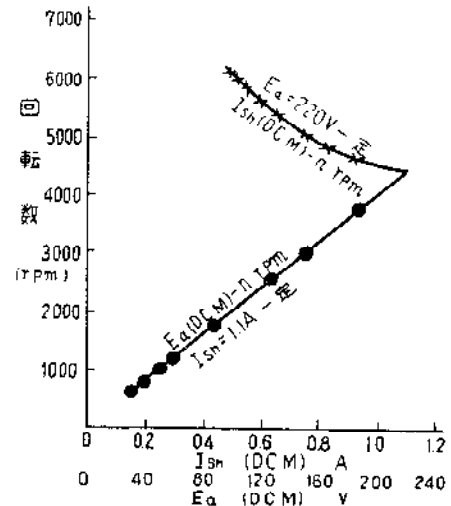
ノッチ No.		動力計		
DCG	DCM	電機子電圧 V (V)	界磁電流 I_{sh} (A)	回転数 (rpm)
0	0	30	1.1	620
1	0	40	“	750
2	0	50	“	950
3	0	60	“	1,250
4	0	90	“	1,780
5	0	125	“	2,460
6	0	150	“	2,980
7	0	185	“	3,700
8	0	220	“	4,370
“	1	“	0.9	4,650
“	2	“	0.8	4,850
“	3	“	0.75	5,000
“	4	“	0.65	5,350
“	5	“	0.6	5,650
“	6	“	0.55	5,800
“	7	“	0.52	6,000
“	8	“	0.5	6,150

第8図は上述の2つの方法による速度制御の状況を曲線で示したものである。

動力計の負荷試験は、主発電機の電圧を各々、90, 125, 160, 190, 220Vの5種類に対し、被試験動力計を発電機とし、または電動機として運転して行つた。

一例として電圧90Vと220Vの場合を第2, 3表に示す。

第4表は、動力計を電動機として運転してこれにプロニーブレーキをかけ、その出力を対比した結果である。



第8図 動力計無負荷の速度制御曲線

第2表 動力計負荷試験

試験条件	主発電機			動力計			
	V (V)	I_{sh} (A)	電機子電流 (A)	I_{sh} (A)	回転数 (rpm)	kg指示器 (kg)	出力 (HP)
発電機として使用	90	0.6	-6	0.9	1,840	0.075	0.0675
	90	“	+1	“	1,940	1.000	0.97
	90	“	+9	“	1,960	2.000	1.96
	90	“	+16	“	1,960	3.000	2.94
	90	“	+23	“	1,940	4.000	3.88
	86	“	+32	“	1,930	5.000	4.825
	84	“	+40	“	1,950	6.000	5.85

第3表 動力計負荷試験

試験条件	IM	DCG			DCM			
	I (A)	V (V)	I_{sh} (A)	電機子電流 (A)	I_{sh} (A)	回転数 (rpm)	kg指示器 (kg)	出力 (HP)
発電機として	22	220	1.6	-13	0.75	4,950	0.3	0.7425
	20	“	“	-5	“	5,000	1	2.5
	18	“	“	+3	“	5,150	1.95	5.02125
電動機として	22	220	1.6	-13	0.75	4,920	0.15	0.369
	25	“	“	-20	“	4,830	1	2.415
	30	“	“	-28	“	4,850	2	4.85
	34	“	1.55	-35	“	4,810	3	7.215
	48	“	“	-45	“	4,800	4	9.6
	50	“	“	-55	“	4,750	6	14.25

4. Ward Leonard 方式と定電圧自動制御

第9図はこの接続図を示した。

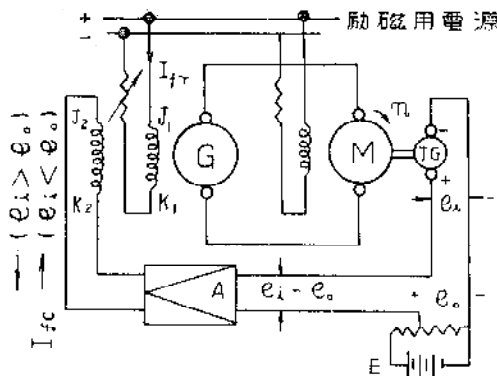
Mは定速度に制御する直流電動機であつて、Gは交流電動機によつて駆動せられる直流発電機とし、 J_1K_1

第4表

DCM				プロニー ブレーキ		$\frac{IP_P - IP_D}{IP_P} \times 100$	回転 方向
rpm	kg	補正 損失	出力 HP _D	kg	出力 HP _P		
500	7.5	0	1.88	3.75	1.88	0	CCW
1,000	"	0	3.75	"	3.75	0	"
1,500	"	0	5.63	"	5.93	0	"
2,000	"	-0.05	7.45	"	7.5	0.67	"
2,500	7.56	-0.07	9.35	"	9.36	0.11	"
3,000	7.60	-0.1	11.25	"	11.25	0	"
3,500	7.63	-0.15	13.10	"	13.10	0	"
4,000	7.70	-0.22	14.95	"	15.00	0.33	"
4,500	6.95	-0.30	14.90	3.33	15.00	0.67	"
5,000	6.42	-0.45	14.90	3.00	15.00	0.67	"
5,500	5.85	-0.45	14.85	2.73	15.00	1.0	"
6,000	5.47	-0.5	14.9	2.50	15.00	0.67	"

(例) : $\begin{cases} \text{動力計} & IP = \frac{Wn}{2,000} \quad \text{㊦} = 2,000 \\ \text{プロニー} & IP = \frac{Wn}{1,000} \quad \text{㊦} = 1,000 \\ \text{ブレーキ} & \end{cases}$

W : kg 計の示す値 (kg)
n : 回転数 (rpm)
㊦ : 動力計定数 : 2,000
プロニー定数 : 1,000



第9図 ワードレオナード方式による定速度自動制御

によつて他励せられ、別に J_2K_2 の他励回路から自動制御せられる。

M には速度発電機 TG を機械的に直結して、TG の回転速度は起電力 e_i に変換して検出し電池の電圧 E を抵抗器で分圧して、 e_o を作り e_i と e_o を比較する。

e_i と e_o は直列に電圧が打ち消されるように接続し、その差の電圧を増幅器 A の入力側に加える。A の出力は G の J_2K_2 制御巻線に供給する。 J_1K_1 は基準界磁巻線で、M をほぼ n_o 回転するに足る励磁電流 I_{fc} を流しておく。

M の回転数を n とし、その目標値を n_o とせば、

- ① $n = n_o \rightarrow e_i = e_o \rightarrow I_{fc} = 0 \rightarrow$ 増幅入力 0
- ② $n < n_o \rightarrow e_i < e_o \rightarrow (e_i - e_o) \rightarrow (-V)$

I_{fc} が先の方向に流れ、 I_{fr} と和動として作用し G の電圧を高め M の速度は $\oplus n$ となる。

- ③ $n > n_o \rightarrow e_i > e_o \rightarrow (e_i - e_o) \rightarrow$ 増幅入力 (+V)
 I_{fc} は②の場合と反対方向に流れ、 I_{fr} と差動にはたらき G の電圧を下げ、M の速度は $\ominus n$ となる。

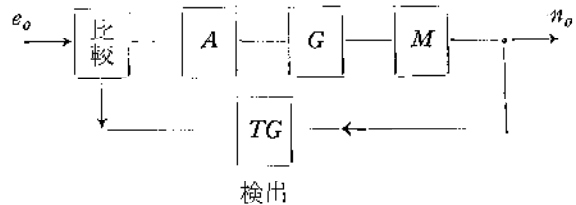
M は、負荷の変動、 I_{Ex} の変動、G の速度の変動があつても常に一定速度 n_o に設定して回転せしめることを目的とした自動制御の応用例である。

この場合に、増幅器は入力電圧の極性によつて、出力電流の極性も変わるものを使用する必要がある。

負荷その他の変動ある場合、正確に n_o になるやを考へるに、もし $n = n_o$ であれば $I_{fc} = 0$ であつて装置は働いていない状態にある。

実際には、 n が n_o より $\pm \Delta n$ の状態で、速度変化を打ち消すに充分なる I_{fc} が流れて平衡する。その差は増幅器の増幅度が大きいほど小さくなる。

それをブロック線図で示すと第10図の如くなる。



第10図 定電圧自動制御ブロック線図

ワードレオナード方式は、上記の如く各種速度をうる外、一度選定した速度で変動率を無くして定速度で使用する等の特徴を利用することが出来る。

5. 考 察

電気動力計に対する Ward Leonard 方式の応用は、かく高速度より低速度に広き範囲で、定トルク及び定出力の制御に適するが、この効果を充分発揮するには勿論制御技術の巧拙にもよるが、機器の設計の巧拙によることが多い。

元来、直流機は整流子を具備するために、その周辺速度(限度≒40 m/s)、リアクタンス電圧(限度≒8 V)、整流子片間電圧(限度≒20 V)の制限を受け、ために電機子の積厚 l 並びに整流子の設計に特別の考慮を要する。

Ward Leonad 方式の制御は、一般工業に広く自動制御と併せて利用せられる。

例へば、定張力で、可変する糸をもつ、Recoiler に巻きとらしむる作業は、自動制御によつて増幅器の入力電圧を基準電圧に設立して、 $I_a \approx V_f / R = \text{const}$ にする制御法によつて行わる。

また、電動機の界磁は一定として、電動機電流が一定 (以下53頁へ続く)

(42頁より続く)

になる如く，発電機電圧を制御すれば， $T=K\phi I_a$ によつて定トルク制御に適するものをうる。

その他，電動機電流がある値を起過すると，その電源電圧が急激に低下するような自動電流制限，2台以上の電動機を同一速度または，一定速度比で回転させる自動せん（揃）速制御，2台以上の電動機の負荷を均等に分担せしめる自動負荷平衡制御なども可能であるが，これ等は後日の機会に譲る。

昨年2回自動制御速会講演で Ward Leonard 方式と自動制御の工業的応用の研究も公表せられているが，参考として末尾に要点だけを附記した。

6. 結 言

以上は，主として Ward Leonard 方式の応用方面における実験的基礎に重点をおき，電気動力計に應用したものを解説した。

電気動力計は，この應用によつて発電機となつて出力の測定が出来るのみならず，電動機として使用するとモーターリングが出来る。この双方の特性は大體実験的の Data が示している。

この種の高速度の電気動力計は，已にヤンマーディーゼル，川崎航空機，新明和工業鈴木自動車工業，井関農機より特別各設計仕様を受け，筆者は設計製作の指定を

受けて実用化している。今後動力計によつて充分基礎的研究の上，各種の工業に自動制御と併用して一層その応用の完璧を期し度く，各位の御指導に預り度くここにその一部を報告する。

記号説明

DCM : 直流電動機 (DM)	I_a : 電機子電流 (A)
DCG : 直流発電機 (DG)	R_a : 電機子抵抗 (Ω)
E : 誘起電圧 (V)	D : 電機子直径 (m)
e_0 : 基準電圧 (V)	l : 有効積厚 (m)
e_i : TGの発生電圧 (V)	A : 磁気増幅器
K : $pZ/2\pi\alpha$	T : トルク (Nm/rad)
\otimes : ブレーキ定数	V : 端子電圧 (V)
n : γps	w : 角速度 (rad/S)
P : 出力 (W)	Φ : 毎極磁束 W_b

参考文献

- (1) 広瀬敬一, 猪狩武尚: 直流機の理論と実際, 108~121, 昭 36-2.
- (2) 岩岸 巖: Ohm 雑誌, 33-11月号, 96~98, 昭 33-11.
- (3) 岩岸 巖: 日本計測学会, Vol. 7, 173~179, 昭 32-4.
- (4) Werner Nürnberg: Die Prüfung der Elektrischer Maschinen, 47, 1940.