U.D.C. 621.337.4

高速電車の起動及び制動特性に及ぼす制御段数の影響

平　田　憲　一*

The Effects of Number of Notches on the Starting and Braking Characteristics of Rapid Transit Electric Trains

By Ken'ichi Hirata
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Multi-notch control systems are widely adopted in modern rapid transit electric trains, but studies on the effect of the number of notches on the starting and braking characteristics have not been made public so far by any researchers.

The writer has derived the formulae determining the number of starting and braking notches and, based on those formulae, has made clear the effects of the number of notches on the mean current, maximum current, change of tractive and braking efforts and maximum acceleration and deceleration rates during starting and braking periods.

As a result, the writer has come to recommend 20～22 notches for local service and 15～17 notches for express service as the most economical. Substantiating what the writer has established thus, Hitachi's Type MMC Controllers have been provided with 21 and 16 notches according to the purpose for which they are intended.

〔I〕緒　　言

最近の高速電車に於ては，起動加速度，制動減速度の上昇，主電動機整流の改善及び衝動の軽減を目的として，多段式制御方式が採用される傾向にある。然るに制御段数の起動及び制動特性に及ぼす影響を理論的に研究した結果に就いては未だ発表されたものなく，制御段数選定に当つては単に従来の経験によつて決定する場合が多い現状である。

筆者は嘗て図式的に起動のみの場合に就いて考究した結果を発表[1][2]したことがあるが，本文に於ては数式的に起動及び制動の場合に就いて論述する。即ち先ず起動及び制動制御段数を与える公式を導き，これを基礎として制御段数の起動及び制動平均電流，最大電流，牽引力及び制動力変化，最大起動加速度及び制動減速度に及ぼす影響に就いて考察し，経済的起動加速度及び制動減速度に適応する制御段数を求め，高速電車制御段数選定の一基準を与えた。

* 日立製作所日立工場

〔II〕起動制御段数を求める公式

起動平均電流と制御段数との関係を研究するには，先ず起動ノッチ曲線を求める必要がある。今

V＝車輌走行速度 (km/hr)
E＝電車線電圧 (V)
I＝主電動機電流 (A)
R＝起動抵抗 (Ω)
r_m＝主電動機内部抵抗 (Ω)
ϕ＝主電動機磁束 (Maxwell)
M＝電車線電圧に対し直列に接続される主電動機箇数
k, a, b＝定数

とすれば

$$V=\frac{E/M-I(R+r_m)}{k\phi}\ (\mathrm{km/hr})\ldots\ldots\ldots(1)$$

然るに ϕ は近似的に $\phi=\dfrac{aI}{1+bI}$ の如く表わされるから

$$V=\frac{\{E/M-I(R+r_m)\}(1+bI)}{kaI}(\mathrm{km/hr})\ldots(2)$$

(2) 式の R に各ノッチの起動抵抗値を代入すれば，起動時の速度 V と電流 I との関係，即ちノッチ曲線を求めることが出来る。

今起動制御段数を n とし，第 1～第 $n-1$ ノッチの起動抵抗を $R_1 \sim R_{n-1}$，各ノッチに於て短絡される抵抗区分を $r_1 \sim r_{n-1}$ とし，あるノッチに於て抵抗区分が短絡されて次のノッチに移る間車輌走行速度 V は一定と仮定すれば，起動電流の最大値及び最小値をそれぞれ I_{max}, I_{min} として自動起動する場合には次式が成立する。

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= r_{n-1}\cdot Z^{n-2} \\ r_2 &= r_{n-1}\cdot Z^{n-3} \\ &\vdots \\ r_{n-2} &= r_{n-1}\cdot Z \\ r_{n-1} &= r_{n-1} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

こゝに

$$Z=\frac{1+bI_{max}}{1+bI_{min}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

又 $R_1=r_1+r_2+r_3+\ldots+r_{n-1}$ に (3) 式を代入すれば

$$R_1=r_{n-1}(1+Z+Z^2+\ldots+Z^{n-2}) \quad ..(5)$$

$$\therefore \quad \frac{R_1}{r_{n-1}}=\frac{1-Z^{n-1}}{1-Z}$$

$$\therefore \quad n=\frac{\log\{1-R_1/r_{n-1}(1-Z)\}}{\log Z}+1 \quad \ldots(6)$$

こゝに $R_1=\dfrac{E}{MI_{max}}-r_m$ ……(7)

又 V_{n-1}＝第 n ノッチの I_{max} に於ける速度

V_n ＝第 n ノッチの I_{min} に於ける速度

とすれば

$$r_{n-1}=\left(\frac{E}{MI_{min}}-r_m\right)\left(\frac{V_n-V_{n-1}}{V_n}\right) \quad \ldots(8)$$

故に主電動機特性曲線及び主電動機内部抵抗が与えられた場合，自動起動電流の最大値及び最少値をそれぞれ I_{max}, I_{min} とすれば，必要な制御段数 n は (6) 式で与えられる。

次に直並列制御を行う場合は（**第1図**参照）

n＝全制御段数

n_S＝直列制御段数

n_P＝並列制御段数

M_S＝直列時電車線電圧に対し直列に接続される主電動機箇数

M_P＝並列時電車線電圧に対し直列に接続される主電動機箇数

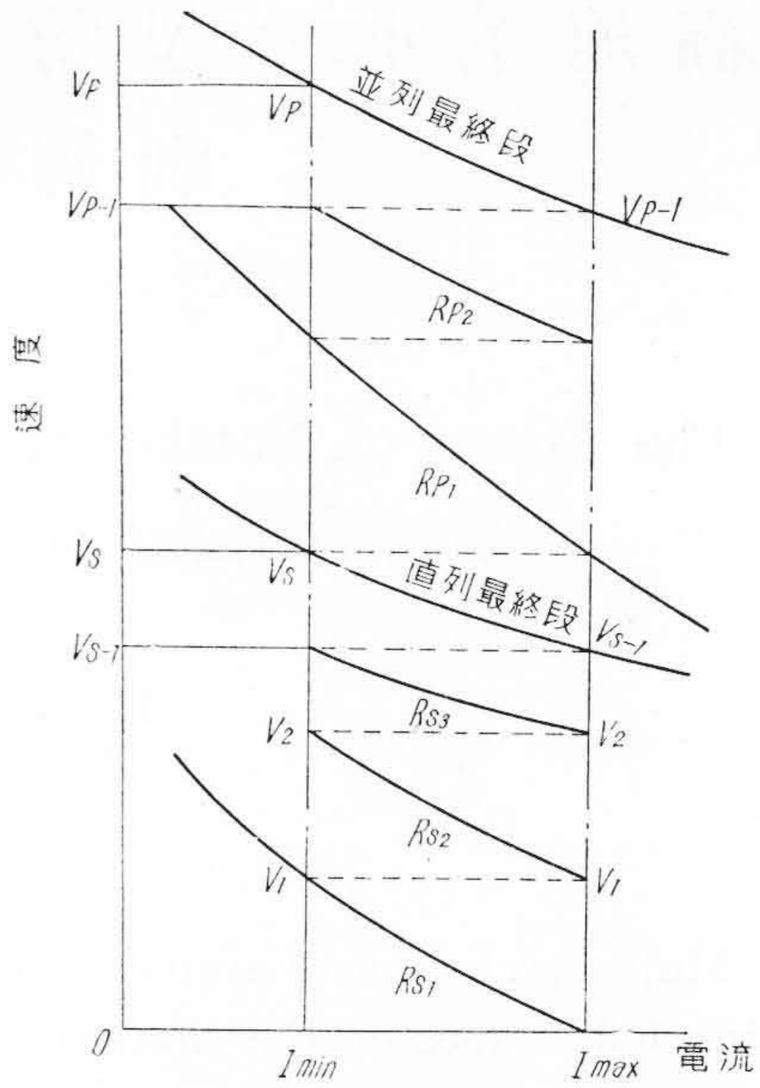
R_{S1}＝直列第1ノッチの外部抵抗

R_{P1}＝並列第1ノッチの外部抵抗

V_S＝直列時 I_{min} に於ける速度

V_{S-1}＝直列時 I_{max} に於ける速度

V_P＝並列時 I_{min} に於ける速度



第1図　起動時ノッチ曲線

Fig. 1. Notching Curves for Motoring

V_{P-1}＝並列時 I_{max} に於ける速度

$r_{S(n-1)}$＝直列第 $n-1$ ノッチにて短絡される抵抗区分

$r_{P(n-1)}$＝並列第 $n-1$ ノッチにて短絡される抵抗区分

とすれば

$$n_S=\frac{\log\{1-R_{S1}/r_{S(n-1)}(1-Z)\}}{\log Z}+1 \cdots\cdots (9)$$

$$R_{S1}=\frac{E}{M_S I_{max}}-r_m \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

$$r_{S(n-1)}=\left(\frac{E}{M_S I_{min}}-r_m\right)\left(\frac{V_S-V_{S-1}}{V_S}\right) \quad \cdots\cdots (11)$$

$$n_P=\frac{\log\{1-R_{P1}/r_{P(n-1)}(1-Z)\}}{\log Z}+1 \cdots\cdots (12)$$

$$R_{P1}=\frac{\dfrac{E}{M_P}-\left(\dfrac{E}{M_S}-I_{min}r_m\right)\dfrac{I_{max}}{I_{min}Z}}{I_{max}}-r_m \quad \ldots(13)$$

$$r_{P(n-1)}=\left\{\frac{\dfrac{E}{M_P}-\left(\dfrac{E}{M_P}-I_{min}r_m\right)\dfrac{I_{max}}{I_{min}Z}}{I_{min}}-r_m\right\} \times\left(\frac{V_P-V_{P-1}}{V_P-V_S}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

$$n=n_S+n_P \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

(9) 式の n_S, (12) 式の n_P は何れも有効制御段数であつて，実際の場合には一挙に最大電流 I_{max} にて起動すると衝動が大となるため，各々 30～50% 程度の遊びノッチを挿入して衝動を防止する必要がある。又後述の如く主抵抗器区分は起動時と制動時と共通に使用される部分があるので，その関係よりノッチ数は多少の調整を必要とする場合がある。

〔III〕 起動時の平均電流，最大電流，衝動及び最大起動加速度と制御段数との関係

(1) 起動平均電流

前章の(9)～(15)式によつて起動平均電流と制御段数との関係を求めることが出来る。一般に電気車輌用主電動機の1時間定格電流を I_1 とすれば，許容最大電流 $I_{max}=2I_1$ であるが，こゝでは起動抵抗器区分抵抗値及び主電動機特性の誤差並びに動輪タイヤ磨耗程度の相違を考慮して $I_{max}=1.8I_1$ とする。自動起動するものとして限流継電器調整値即ち直線加速時の最小電流 $I_{min}=(1\sim1.6)I_1$ とすると，起動平均電流 $I_0=(1.4\sim1.7)I_1$ となる。

一例として 110 kW-750 V-165 A-900 r.p.m. の主電動機をとり，$I_{min}=1.4I_1=231$ A，$I_{max}=1.8I_1=297$ A，$I_0=1.6I_1=264$ A として自動起動する場合を考える。

$E=1{,}500$,　$M_S=4$,　$M_P=2$,　$k=2.63\times10^{-6}$,

$a=0.0966\times10^6$,　$b=0.01205$,　$r_m=0.2026$ とする。

先ず直列制御段数 n_S を求める。(10) 式より $R_{S1}=1.0574$, (2) 式又は特性曲線より $V_S=21$, $V_{S-1}=19$ となる故 (11) 式より $r_{S(n-1)}=0.135$ となる。又 (4) 式より $Z=1.21$ となる。故に (9) 式より

$$n_S=\frac{\log\left\{1-\frac{1.0574}{0.135}(1-1.21)\right\}}{\log 1.21}+1=5.05+1\simeq6$$

遊びノッチを2ノッチ加えるものとすれば　$n_S=8$

次に並列制御段数 n_P を求める。(13) 式より $R_{P1}=1.1474$, (2)式又は特性曲線より $V_P=44.7$, $V_{P-1}=41.5$ なる故(14)式より $r_{P(n-1)}=0.207$ となる。$Z=1.21$ なる故(12)式より

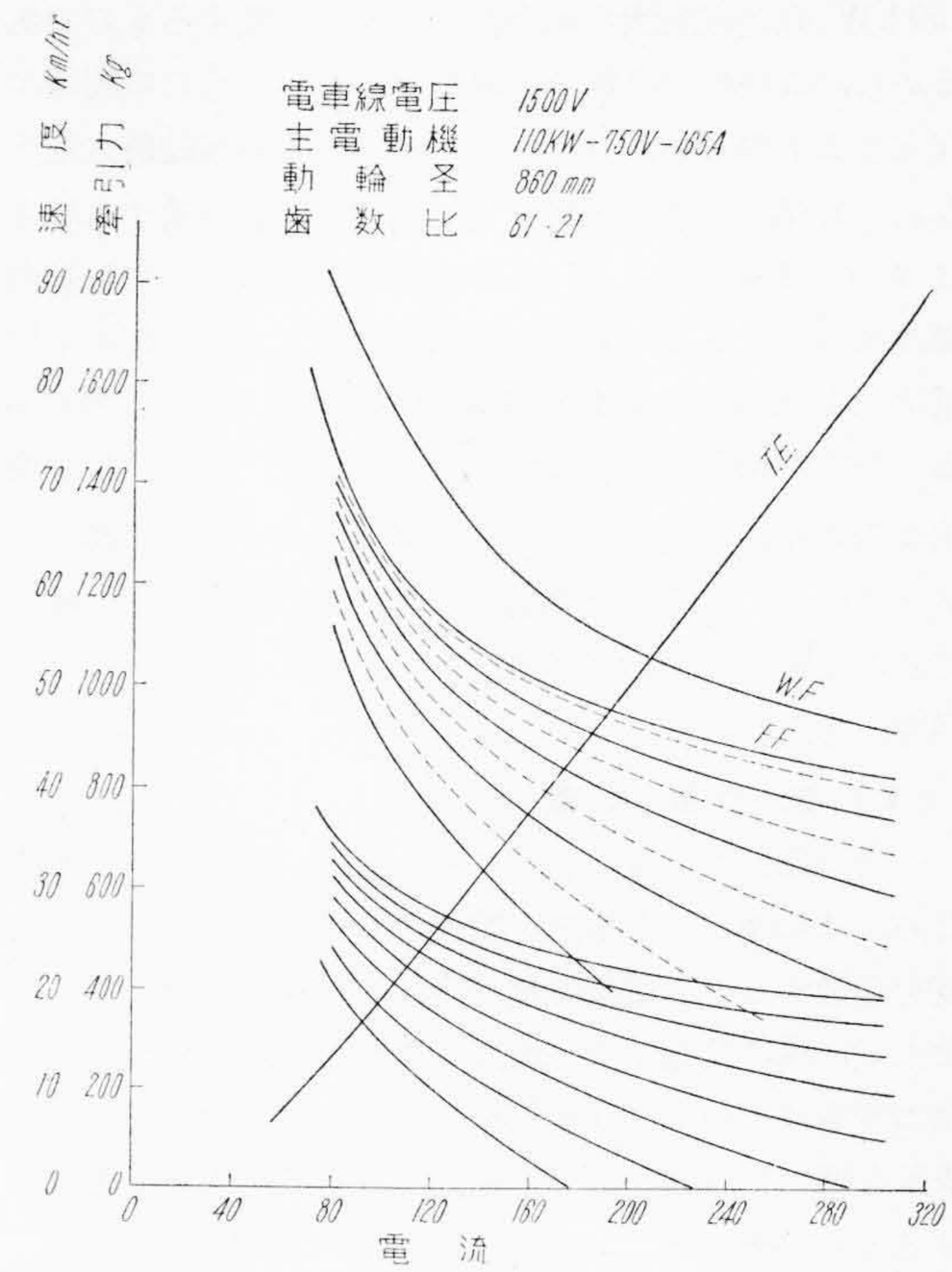
$$n_P=\frac{\log\left\{1-\frac{1.1474}{0.207}(1-1.21)\right\}}{\log 1.21}+1=3.94+1\simeq5$$

遊びノッチとして2ノッチ加えるものとすれば　$n_P=7$, 故に(15)式より　$n=n_S+n_P=8+7=15$　となる。然し一方向二回転式制御方式を採用すれば　$n_S=n_P$　なる故

第1表　起動制御特性と制御段数との関係

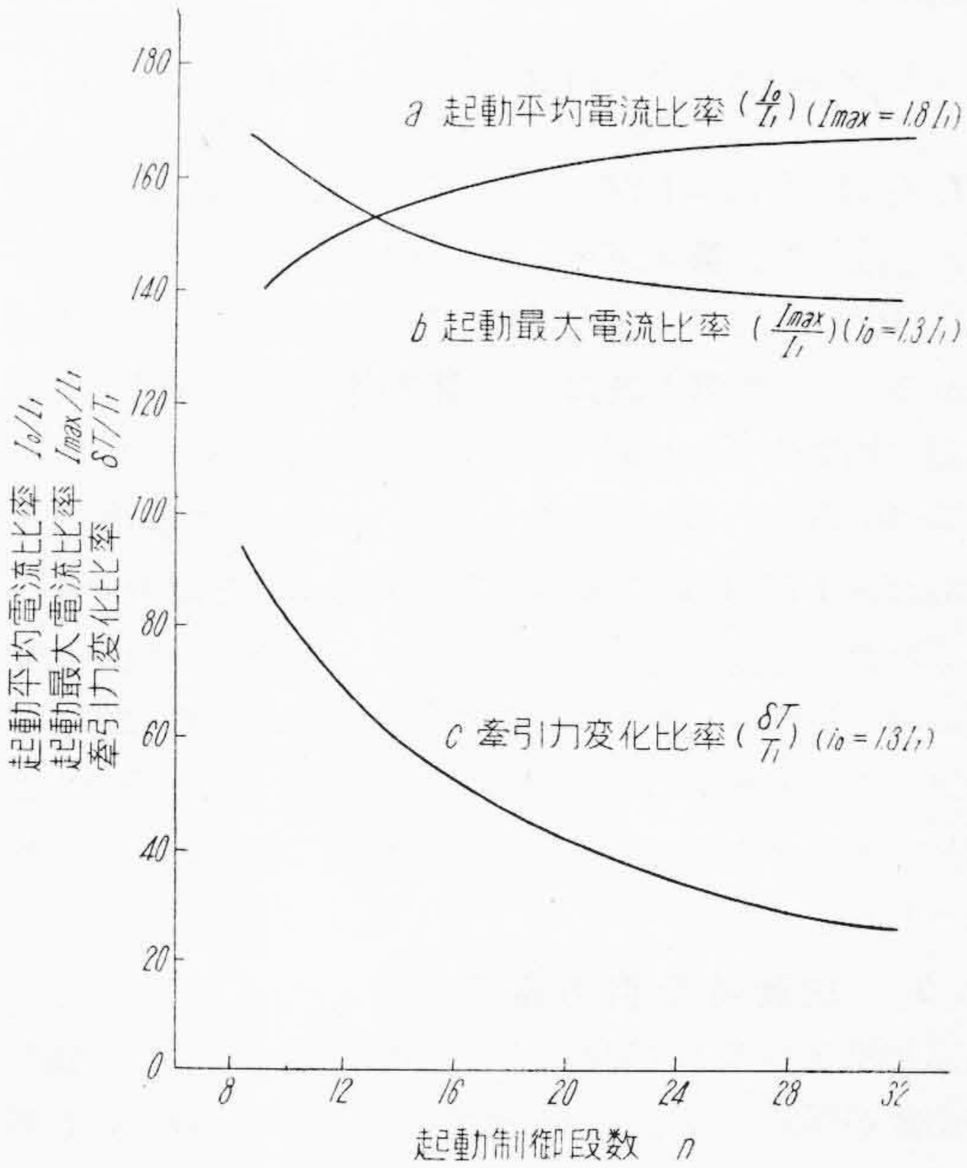
Table 1. Relation between Starting Characteristic and Number of Notches

制御段数 (n)	(1) 起動平均電流比率 $\left(\frac{I_0}{I_1}\right)$	(2) 起動最大電流比率 $\left(\frac{I_{max}}{I_1}\right)$	(3) 起動時衝動比率 $\left(\frac{\delta_T}{T_1}\right)$	(4) 動輪滑動に関する許容最高加速度 a (km/hr/s) MM	(4) MT	(5) 起動時衝動に関する許容最高加速度 a (km/hr/s) MM	(5) MT
9	1.40	1.67	0.852	3.88	2.16	—	—
13	1.53	1.53	0.636	4.325	2.42	1.5	1.5
16	1.58	1.48	0.506	4.50	2.55	2.0	2.0
21	1.63	1.44	0.395	4.73	2.65	3.5	—
25	1.66	1.41	0.315	4.81	2.69	4.5	—
32	1.68	1.39	0.253	4.87	2.73	—	—



第2図　電動ノッチ曲線

Fig. 2. Notching Curves for Motoring



第3図　I_0/I_1, I_{max}/I_1, δ_T/T_1—n 曲線

Fig. 3. I_0/I_1, I_{max}/I_1, δ_T/T_1—n Curves

$n=16$　となる。16 ノッチの場合のノッチ曲線の実例を**第2図**に示す。

以下同様にして起動平均電流と制御段数 n との関係を求めると**第1表**(1)及び**第3図** a 曲線の如くなる。75～

150 kW 直巻電動機の比率特性はほゞ一致するものであるから，この範囲の他の主電動機に対してもこの関係が成立するものと見做して差支えない。即ち起動最大電流 $I_{max}=1.8I_1$ とすれば9ノッチの制御器を使用する場合は $I_0/I_1=1.4$ となるが，多段式制御器を採用して起動制御段数 n を 9-13-16-21-25-32 と増大すれば起動平均電流比率 $I_0/I_1=1.4$-1.53-1.58-1.63-1.66-1.68 と増大する。かくの如く起動最大電流一定の場合，制御段数を増加するに伴い起動平均電流は次第に増大するが，20～22ノッチ以上になるとその増大率は次第に減少する。従つてこの見地よりすれば経済的制御段数は 20～22 ノッチ程度と考えられる。

（2） 起動最大電流

一方起動最大電流の点より考えると，高加速度にするためには車輛の起動電流を増大する必要があり，一定限度を超過すると主電動機整流容量の限度を超過して閃絡を生じ，或は変電所の高速度遮断器を飛ばす。従つて起動加速度はこの点より制約を受けることゝなるが，制御段数を増大すれば一定平均電流に対して最大電流を減少することが出来る。

或るノッチ数に於て最大電流 I_{max} は平均電流 i_0 に比例するものとすると，$i_0=1.3I_1$ 一定とした場合の最大電流比率は

$$\frac{I_{max}}{I_1}=1.8\times\frac{i_0}{I_0}=1.8\times\frac{1.3I_1}{I_0}=2.34\frac{I_1}{I_0}\quad\ldots(16)$$

I_0/I_1 は $I_{max}=1.8I_1$ としたときの起動平均電流比率で，前述の如く**第3図** a 曲線より求めることが出来るから，(16)式によつて最大電流と制御段数との関係が求められる。これを**第1表**(2)及び**第3図** b 曲線に示す。即ち起動平均電流 $i_0=1.3I_1$ とすれば，起動制御段数 n を 9-13-16-21-25-32 と増大すると，起動最大電流比率 $I_{max}/I_1=1.67$-1.53-1.48-1.435-1.41-1.39 と減少する。かくの如く起動平均電流一定の場合，制御段数を増加するに伴い起動最大電流は次第に減少するが，20～22ノッチ以上になるとその減少率は次第に減少する。従つてこの見地よりするも，経済的制御段数は 20～22 ノッチ程度であるといえる。

（3） 起動時牽引力変化

高加速度の場合は起動牽引力が増大する結果，起動時の衝動が問題となる。制御段数を増大するに伴い，起動平均電流は前述の如く増大すると同時にノッチ間の牽引力変化は次第に減少する。次にこの関係を求める。

先ず制御段数と最大電流 I_{max} 及び最小電流 I_{min} との関係は，前述の如く**第3図** b 曲線より求められる。今 T_{max}，T_{min} 及び T_1 をそれぞれ I_{max}，I_{min} 及び I_1 に於ける牽引力とすれば，T_{max} 及び T_{min} は主電動機特性曲線より求めることが出来るから，起動時牽引力変化比率 δ_T/T_1 は次式にて与えられる。

$$\frac{\delta_T}{T_1}=\frac{T_{max}-T_{min}}{T_1}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(17)$$

(17)式によつて $i_0=1.3I_1$ とした場合の制御段数と起動時牽引力変化比率との関係を求めると，**第1表**(3)及び**第3図** c 曲線の如くなる。即ち起動平均電流 $i_0=1.3I_1$ とすれば，制御段数 n を 9-13-16-21-25-32 と増大すると，起動時牽引力変化比率 $\delta_T/T_1=0.852$-0.636-0.506-0.395-0.315-0.253 と減少する。かくの如く起動平均電流一定の場合，制御段数を増大するに伴い牽引力変化比率は次第に減少するが，20～22ノッチ以上になるとその減少率は次第に減少する。故にこの見地よりするも，経済的制御段数は 20～22 ノッチ程度と考えられる。

（4） 最大起動加速度

前述の如く加速度を上昇するためには，必然的に起動牽引力を増大する必要があるが，これに関連して粘着重量及び動輪滑動の問題を生ずる。

今　μ_{max}＝最大牽引力 T_{max} に対する粘着係数
　　w＝動軸静荷重　(t)
　　f＝軸重移動係数（仮称）

とすれば

$$\mu_{max}=\frac{T_{max}}{1{,}000w(1-f)}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(18)$$

$I_{max}=1.8I_1$ とすれば，110 kW 主電動機特性曲線より $T_{max}=2.1T_1$ となる故 $\mu_{max}=20\%$，$f=15\%$ とすれば (18) 式より

$$0.2=\frac{2.1T_1}{1{,}000w(1-0.15)}$$

$$\therefore\quad T_1=\frac{1{,}000w\times0.85\times0.2}{2.1}=81w\ (\mathrm{kg})\quad\ldots(19)$$

然るに**第3図** a 曲線より，ある制御段数 n に対する起動平均電流比率 I_0/I_1 が求まる故，起動牽引力比率 T_0/T_1 は特性曲線より求められる。故に T_0 を w にて表わすことが出来る。

今　a_{max}＝最大起動加速度　(km/hr/s)
　　M＝主電動機箇数
　　R_m＝電動車走行抵抗　(kg/t)
　　R_t＝附随車走行抵抗　(kg/t)
　　W_m＝電動車重量　(t)
　　W_t＝附随車重量　(t)

とすれば最大加速度 a_{max} は次式で与えられる

$$a_{max}=\frac{MT_0-(R_mW_m+R_tW_t)}{31.2W_m+29.8W_t}(\mathrm{km/hr/s})\quad\ldots(20)$$

（1） MM 編成の場合

(20) 式に於て $M=4$，$R_m=5$，$W_t=0$ とすれば

$$a_{max}=\frac{4T_0-5W_m}{31.2W_m}\ (\mathrm{km/hr/s})\ldots\ldots\ldots\ldots(21)$$

例えば16ノッチとすれば**第3図** a 曲線より $I_0/I_1=1.58$ となる故，特性曲線より $T_0/T_1=1.79$, T_1 に(19)式を代入すれば

$$T_0=1.79T_1=1.79\times 81W=145w=145\left(\frac{W_m}{4}\right)$$

(21)式に代入して

$$a_{max}=\frac{145W_m-5W_m}{31.2W_m}=4.5\quad(\mathrm{km/hr/s})$$

（2） MT 編成の場合

(20)式に於て $M=4$, $(R_m+R_t)1/2=4.5$ とすれば

$$a_{max}\cong\frac{4T_0-4.5(W_m+W_t)}{30(W_m+W_t)}\quad(\mathrm{km/hr/s})\ldots(22)$$

例えば16ノッチとすれば MM の場合と同様にして $T_0=145w$ となるが，MT の場合は全重量の55%が粘着重量として利用出来るものとすれば

$$T_0=145w=\frac{145(W_m+W_t)\times 0.55}{4}$$

$$=79.8\left(\frac{W_m+W_t}{4}\right)$$

(22)式に代入して

$$a_{max}\cong\frac{79.8(W_m+W_t)-4.5(W_m+W_t)}{30(W_m+W_t)}=2.55\quad(\mathrm{km/hr/s})$$

同様にして(21)及び(22)式により MM 編成及び MT 編成の場合の最大起動加速度 a_{max} と制御段数 n との関係を求めると**第1表**(4)及び**第4図** a_{MM} 及び a_{MT} 曲線の如くなる。

かくの如く MM 編成の場合は4～4.5 km/hr/s 程度の高加速度を得ることが可能であるが，MT 編成の場合は粘着重量及び動輪滑動の制限を受け，加速度は2～2.5 km/hr/s 程度に過ぎない。何れの場合も制御段数の増大に伴い最大起動加速度は上昇するが，20～22ノッチ以上になるとその上昇率は次第に減少する。故にこの見地よりするも20～22ノッチ程度が経済的であると考えられる。

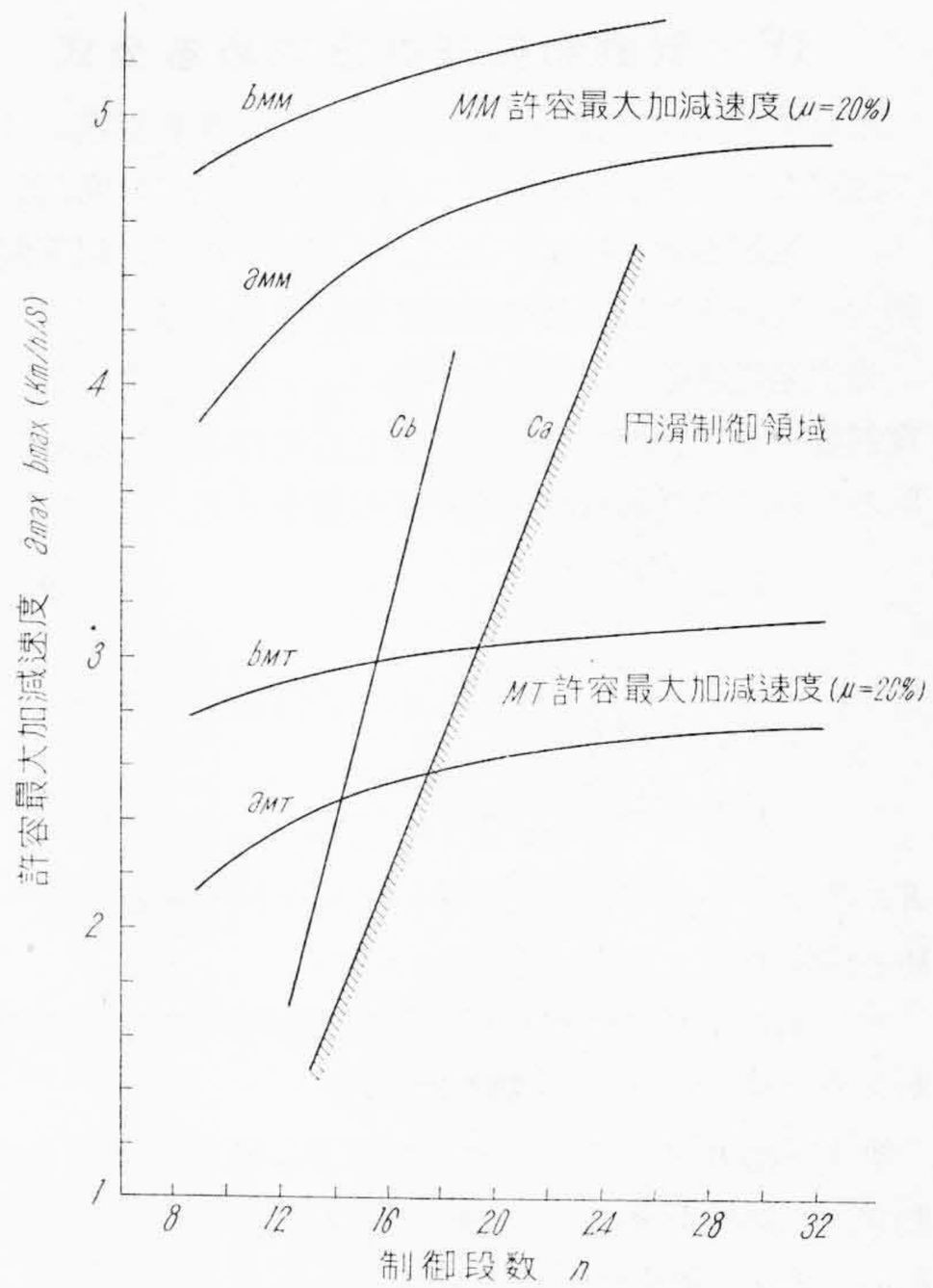
（5） 円滑起動に必要な制御段数

前述の如く牽引力を増大すれば起動加速度を増大し得るが，乗心地の点より見れば円滑起動の条件としてノッチ進みの際に於ける牽引力変化を一定値以下に制限する必要がある。経験によればこの制限は30 kg/t 程度である。然るときは円滑起動の条件として次式が成立する。

$$a=\frac{MT_0-(R_mW_m+R_tW_t)}{31.2W_m+29.8W_t}$$

$$=\frac{M\left(\frac{T_{max}+T_{min}}{2}\right)-(R_mW_m+R_tW_t)}{31.2W_m+29.8W_t}\quad(\mathrm{km/hr/s})\ldots\ldots(23)$$

$$\frac{M(T_{max}-T_{min})}{W_m+W_t}=30\quad(\mathrm{kg/t})\ldots\ldots(24)$$



第4図　A_{max}, b_{max}—n 曲　線

Fig. 4.　A_{max}, b_{max}—n Curves

(23)及び(24)両式より T_{max} 及び T_{min} の値を求め，これに対応する I_{max} 及び I_{min} を主電動機特性曲線より求めると，(9)及び(12)式によつて前述の如くして，所要起動加速度に対し円滑起動するに必要な制御段数が求められる。

今110 kW 主電動機4箇付電動車の場合を考えると，$M=4$, $W_m=47$, $R_m=5$, $W_t=0$ なるとき，$a=3$ とすれば(23)及び(24)式より，$T_{max}=1{,}336$ kg, $T_{min}=984$ kg, 主電動機特性曲線より $I_{max}=247$ A, $I_{min}=195$ A, $V_S=22.4$ km/hr, $V_{S-1}=20.3$ km/hr, (10)式より $R_{S1}=1.3174\,\Omega$, (11)式より $r_{S(n-1)}=0.161\,\Omega$, (4)式より $Z=1.19$ となる故(9)式より $n_S=5.3+1\cong 7$ 遊びノッチとして多少余裕を見込んで3ノッチを追加し $n_S=10$, 同様にして $n_P=9$

$$\therefore\quad n=n_S+n_P=10+9=19$$

同様にして各起動加速度に対する円滑起動に必要な制御段数を求めることが出来る。これを**第4図** c_a 曲線及び**第1表**(5)に示す。他の電動車及び附随車に就いてもほゞ同様の結果を得る。前述の如く経済的制御段数として20～22ノッチをとれば，円滑起動の見地よりすれば起動加速度の最大値は3.5～4 km/hr/s 程度と考えられる。

〔IV〕 制動制御段数を求める公式

前章に於ては起動特性に及ぼす制御段数の影響に就いて述べたのであるが，最近の高速電車に於ては常用制動として発電制動が採用されることが多いので，以下制動特性に及ぼす制御段数の影響に就いて述べる。

先ず発電制動時に於ける制動ノッチ曲線を求める。発電制動は主電動機を直巻発電機として作用させるものであるから，発電制動の場合次式が成立する。

$$V=\frac{I(R+r_m)}{k\phi}\cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

然るに　$\phi=\dfrac{aI}{1+bI}$　であるからこれを代入すれば

$$V=\frac{(R+r_m)(1+bI)}{ka}\cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$

Rに各ノッチの制動抵抗の値を代入すれば制動ノッチ曲線を求めることが出来る。

次に発電制動自動制御の場合の制動平均電流と制御段数との関係を求める。(**第5図**参照)

第1～第nノッチの制動抵抗を $R_1, R_2, \ldots R_n$，主電動機内部抵抗を r_m，ノッチ数を n とする。制動電流は I_{max}，I_{min} の間に変化させるものとし，あるノッチの I_{min} より次のノッチの I_{max} に移る迄，即ちノッチ進み期間中に於ける速度は不変と仮定する。然るときは(26)式により次の関係が成立する。

$$(R_1+r_m)=(R_n+r_m)Z^{n-1}\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

こゝに　$Z=\dfrac{1+bI_{max}}{1+bI_{min}}$

$$\therefore\quad n=\frac{\log\left(\dfrac{R_1+r_m}{R_n+r_m}\right)}{\log Z}+1\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

$$R_1+r_m=\frac{E_{max}}{I_{max}}\cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

$$R_n+r_m=\frac{V_{min}ka}{1+bI_{max}}\cdots\cdots\cdots\cdots(30)$$

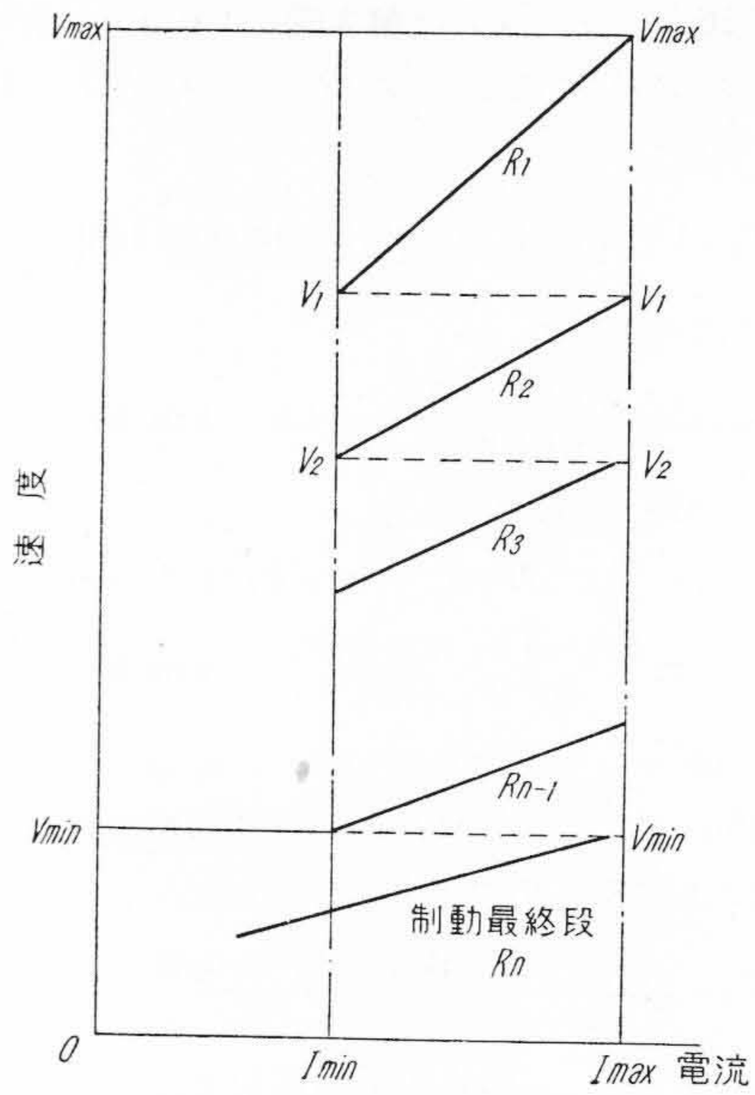
こゝに　E_{max}＝発電制動時最高誘起電圧　(V)

V_{min}＝発電制動最低速度　(km/hr)

(最終ノッチの I_{max} に於ける速度)

故に主電動機特性曲線及び主電動機内部抵抗が与えられた場合，制動電流の最大値及び最小値をそれぞれ I_{max} 及び I_{min} とすれば，必要な制御段数 n は(28)式にて与えられる。発電制動の際は，主抵抗器のみ直並列制御が行われ，主電動機は通常並列又は直並列に接続されたまゝで直並列制御されない。従つて(28)式はそのまゝ使用して良い。

(28)式の n は有効制御段数を示すもので，実際の場合には発電制動初期の過電圧防止及び制動時の衝動を軽減するために 30～50% 程度の遊びノッチを追加することが必要である。更に主抵抗器抵抗区分には起動時と制動時と共通に使用される部分があるので，その関係よりノッチ数は多少の調整を必要とする場合がある。



第5図　制動時ノッチ曲線

Fig. 5. Notching Curves for Braking

〔V〕 制動時の平均電流，最大電流，衝動及び最大制動減速度と制御段数との関係

(1) 制動平均電流

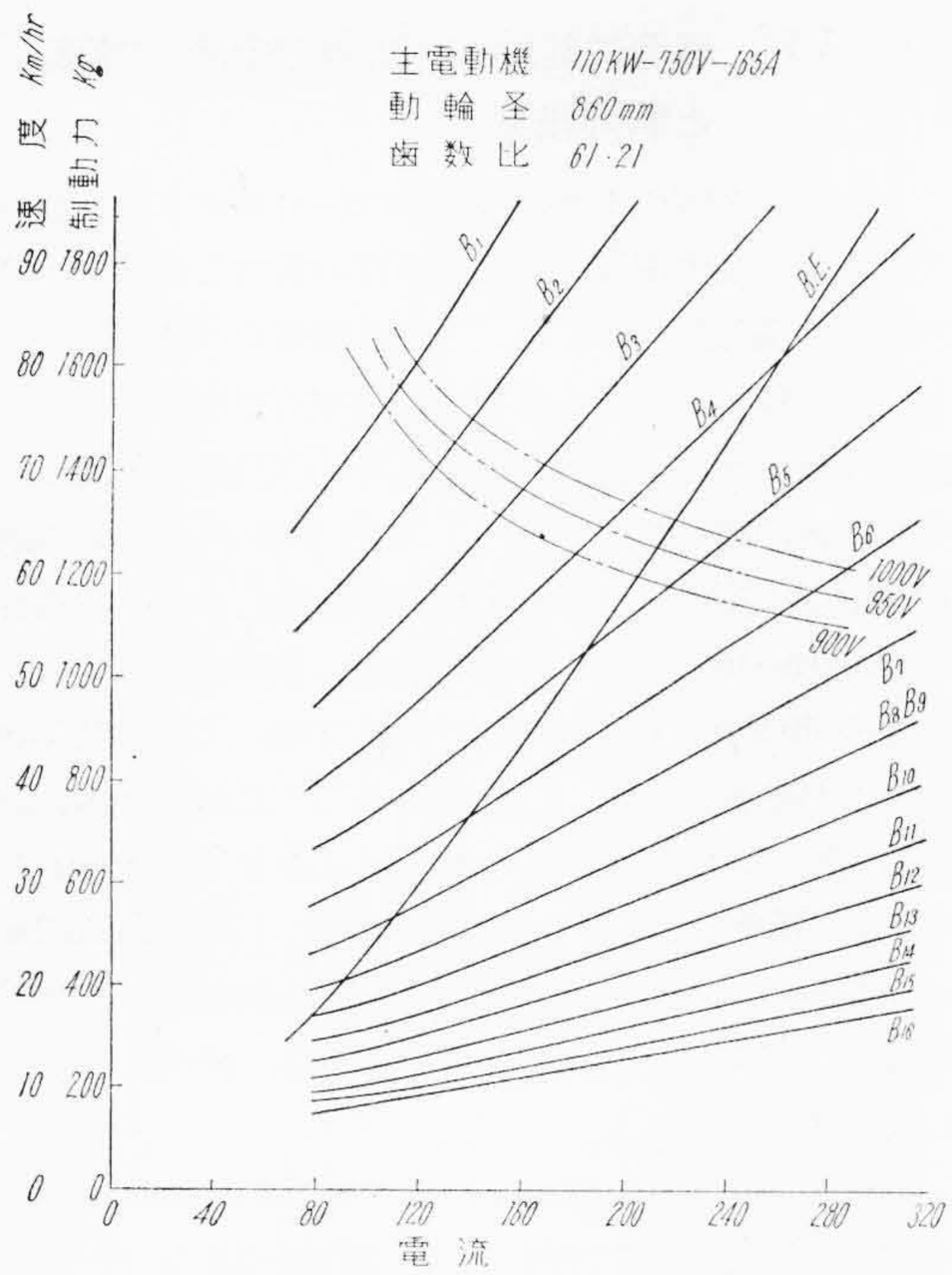
(28)式によつて発電制動平均電流と制御段数との関係を求める。起動の場合と同様最大電流 $I_{max}=1.8I_1$ とし，限流継電器調整値即ち自動発電制動時の最小電流を $I_{min}=(1\sim1.6)I_1$，従つて制動平均電流を $I_0=(1.4\sim1.7)I_1$ とする。

110 kW 主電動機の例をとり，$I_{min}=1.5I_1=248$ A，$I_{max}=1.8I_1=297$ A，$E_{max}=1{,}000$ V，$V_{min}=17$ km/hr とすれば，(29)式より，$R_1+r_m=3.37\Omega$，(30)式より，$R_n+r_m=0.942\Omega$，(4)式より，$Z=1.15$ となる故(28)式より

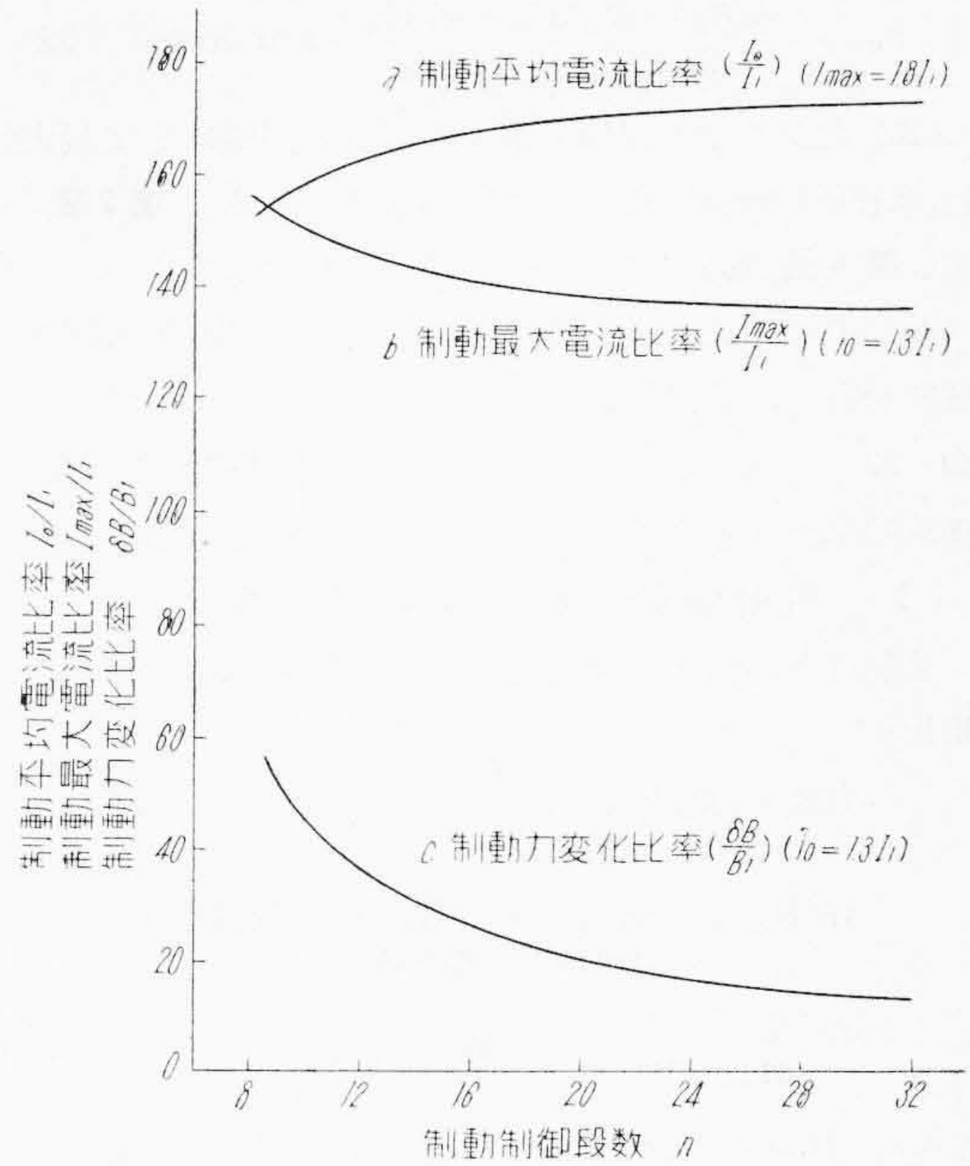
$$n=\frac{\log\dfrac{3.37}{0.942}}{\log 1.15}+1=9.01+1\simeq10$$

過電圧防止及び衝動軽減のために，遊びノッチを5ノッチ追加すれば $n=15$ となる。15ノッチの場合のノッチ曲線の実例を**第6図**に示す(見掛上は16ノッチなるも，抵抗区分の直並列切換の関係にて有効ノッチ数は15ノッチとなる)。

以下同様にして制動平均電流と制御段数 n との関係を求めると，**第2表**(1)及び**第7図** a 曲線の如くなる。即



第6図 制動ノッチ曲線
Fig. 6. Notching Curves for Braking



第7図 I_0/I_1, I_{max}/I_1, δ_B/B—n 曲線
Fig. 7. I_0/I_1, I_{max}/I_1, δ_B/B—n Curves

第2表 制動制御特性と制御段数との関係
Table 2. Relations between Braking Characteristics and Number of Notches

制御段数 (n)	(1) 制動平均電流比率 $\left(\frac{I_0}{I_1}\right)$	(2) 制動最大電流比率 $\left(\frac{I_{max}}{I_1}\right)$	(3) 制動時衝動比率 $\left(\frac{\delta_B}{B_1}\right)$	(4) 動輪滑動に関する許容最高減速度 b (km/hr/s)		(5) 制動時衝動に関する許容最高減速度 b (km/hr/s)	
				MM	MT	MM	MT
9	1.55	1.51	0.522	4.80	2.80	—	—
13	1.63	1.43	0.338	4.98	2.92	2.0	2.0
16	1.66	1.40	0.269	5.11	2.98	3.5	—
21	1.69	1.37	0.194	5.22	3.05	—	—
25	1.71	1.36	0.156	5.31	3.09	—	—
32	1.74	1.35	0.134	5.38	3.14	—	—

ち発電制動の場合も起動の場合と同様制御段数を増大すると平均制動電流は次第に増大するが，20～22 ノッチ以上になるとその増加率は次第に減少する。

(2) 制動最大電流

発電制動時に於ても起動時と同様制動平均電流を一定とすれば，制御段数を増加することにより，制動最大電流は減少し，主電動機整流状態は改善される。例えば $i_0=1.3I_1$ とすれば，最大電流と制御段数との関係は**第2表**(2)及び**第7図** b 曲線の如くなる。然し制御段数が 20～22 ノッチ以上になると最大電流減少率は次第に減少する。

(3) 制動時制動力変化

発電制動の際は電圧発生にある時間的遅れを伴うのでノッチ進め際に於ける衝動は起動時に比すれば可成り緩和されるが，高減速度を必要とする場合は矢張り制御段数を増加し，衝動を減少することが望ましい。例えば $i_0=1.3I_1$ とすれば，発電制動時制動力変化率と制御段数との関係は**第2表**(3)及び**第7図** c 曲線の如くなる。然し制御段数が 20～22 ノッチ以上になると，制動力変化比率は次第に減少する。

(4) 最大制動減速度

発電制動時に於ける最大制動減速度と制御段数との関係は起動時と同様にして求めることが出来る。

今 B_1＝定格制動力 (電流 I_1 に於ける制動力)
T_1＝定格牽引力 (電流 I_1 に於ける牽引力)
η_m＝歯車装置を含めた主電動機能率
r_m＝主電動機内部抵抗
E_m＝主電動機端子電圧

とすれば，75～150 kW 主電動機に対しては

$$B_1=\frac{T_1\left(1-\frac{2Ir_m}{E_m}\right)}{\eta_m{}^2}\cong 1.15T_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(31)$$

この関係は $I=(0.5\sim2)I_1$ に対してほゞ成立するものと見做し得る故，牽引力比率特性はそのまゝ制動力比率特性と見做して差支えない。故に $\mu_{max}=20\%$, $f=15\%$ とすれば最大起動加速度の場合と同様にして制動時平均制動力 B_0 が求められるから，最大制動減速度 b_{max} は

$$b_{max}=\frac{MB_0+(R_mW_m+R_tW_t)}{31.2W_m+29.8W_t}(\mathrm{km/hr/s})\quad(32)$$

(32)式より最大起動加速度の場合と同様にして最大制動減速度と制御段数との関係が求められる。**第2表**(4)及び**第4図** b_{MM} 及び b_{MT} 曲線にこれを示す。

かくの如く最大制動減速度も最大起動加速度と同様の傾向を有し，制御段数の増大に伴い次第に上昇するが，20～22 ノッチ以上になるとその上昇率は次第に減少し，経済的制御段数は 20～22 ノッチと考えられる。

(5) 円滑制動に必要な制御段数

起動時と同様ノッチ進みの際の制動力変化の制限を 30 kg/t とすれば，円滑制動の条件は次の如くなる。

$$b=\frac{MB_0+(R_mW_m+R_tW_t)}{31.2W_m+29.8W_t}$$

$$=\frac{M(B_{max}+B_{min})/2+(R_mW_m+R_tW_t)}{31.2W_m+29.8W_t}\quad..(33)$$

$$\frac{M(B_{max}-B_{min})}{W_m+W_t}=30\quad.....(34)$$

こゝに B_{max} 及び B_{min} はそれぞれ I_{max} 及び I_{min} に於ける制動力である。

(33) 及び (34) 式より B_{max} 及び B_{min} の値を求め，これに対応する I_{max} 及び I_{min} を主電動機特性曲線より求めると，(28)式によつて円滑制動に必要な制御段数を求めることが出来る。

110kW 主電動機4箇付電動車を例にとり，$M=4$, $W_m=47$, $R_m=5$, $W_t=0$ とすれば，$b=3$ なるときは，(33)及び(34)式より，$B_{max}=1{,}216$ kg, $B_{min}=864$ kg, 主電動機特性曲線より $I_{max}=207$ A, $I_{min}=158$ A となる。又 $V_{min}=13$ km/hr とする。(29)式より，$R_1+R_m=4.83\,\Omega$, (30)式より，$R_n+r_m=0.942\,\Omega$, (4) 式より，$Z=1.205$ となる。故に (28) 式より

$$n=\frac{\log\dfrac{4.83}{0.942}}{\log 1.205}+1=8.88+1\simeq 10$$

遊びノッチ5を追加して，$n=15$ となる。

同様にして各制動減速度に対する円滑制動に必要な制御段数を求めることが出来る。これを**第4図** c_b 曲線及び**第2表**(5)に示す。他の電動車及び附随車に就いてもほゞ同様の結果を得る。

この結果より見れば起動及び制動制御期間の最大電流及びノッチ進めの際に於ける衝動を一定とすれば，同一制御段数に対する許容最大制動減速度は許容最大起動加速度より可成り大となる。故に起動加速度と制動減速度が等しい場合は，衝動に関する制御段数の吟味は起動時に就いて行えば十分である。**第4図** c_a 曲線の右側は円滑制御領域で，一定起動加速度及び制動減速度に対し制御段数を，この領域内にあるように選定すれば，円滑に起動及び制動し得ることを示す。

〔VI〕 経済的起動加速度及び制動減速度と制御段数

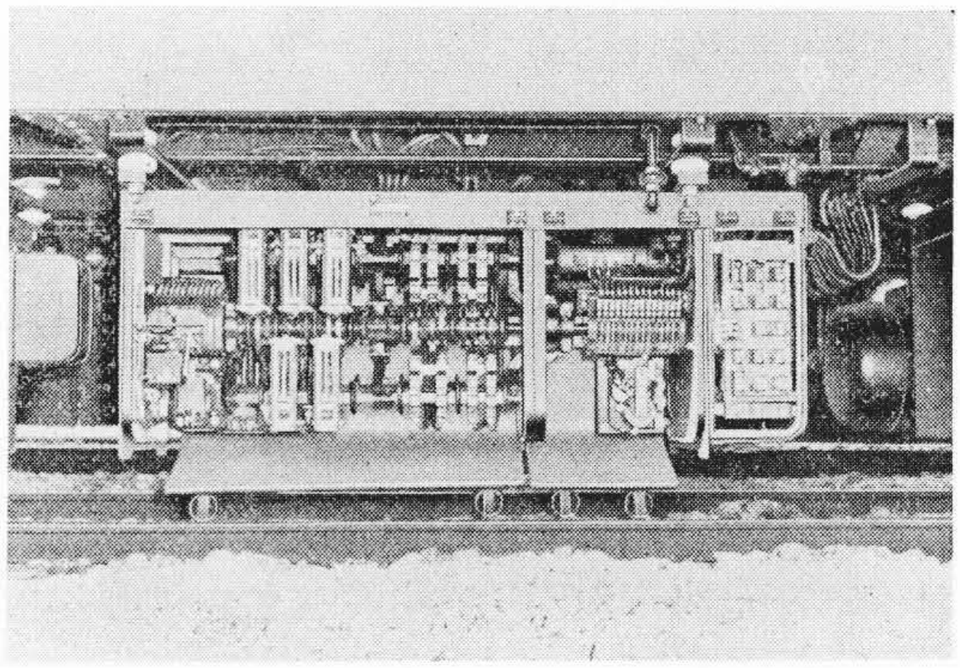
以上述べた所により，制御特性即ち起動及び制動時の平均電流，最大電流，衝動及び許容最大加減速度と制御段数との関係が判明した。一方高速電車の運転特性，即ち電力消費量，主電動機二乗平均平方根電流及び平均電流の見地より，経済的起動加速度及び制動減速度を求めると，既に述べた如く[2][3]，市内高速鉄道，駅間距離 1 km, 表定速度 30 km/hr, 列車編成 MM の場合は 3～3.5 km/hr/s; 市間鉄道(普通)，駅間距離 2 km, 表定速度 40 km/hr, 列車編成 MM の場合は 2～2.5 km/hr/s; 列車編成 MT の場合は 1.75～2 km/hr/s; 市間鉄道(急行)，駅間距離 5 km, 表定速度 50 km/hr, 列車編成 MM 及び MT の場合は共に 1.75～2 km/hr/s となるから，これと前述の制御特性と制御段数との関係に就いて研究した結果とを綜合すれば，経済的制御段数は**第3表**の如くなる。

日立製作所に於て開発した高速電車用 MMC 型制御器は上記研究結果を基礎として MMC 10 型 16 ノッチ (1,500/600 V, 110 kW×4 用) 及び MMC 20 型 16～

第3表　高速電車の経済的制御段数

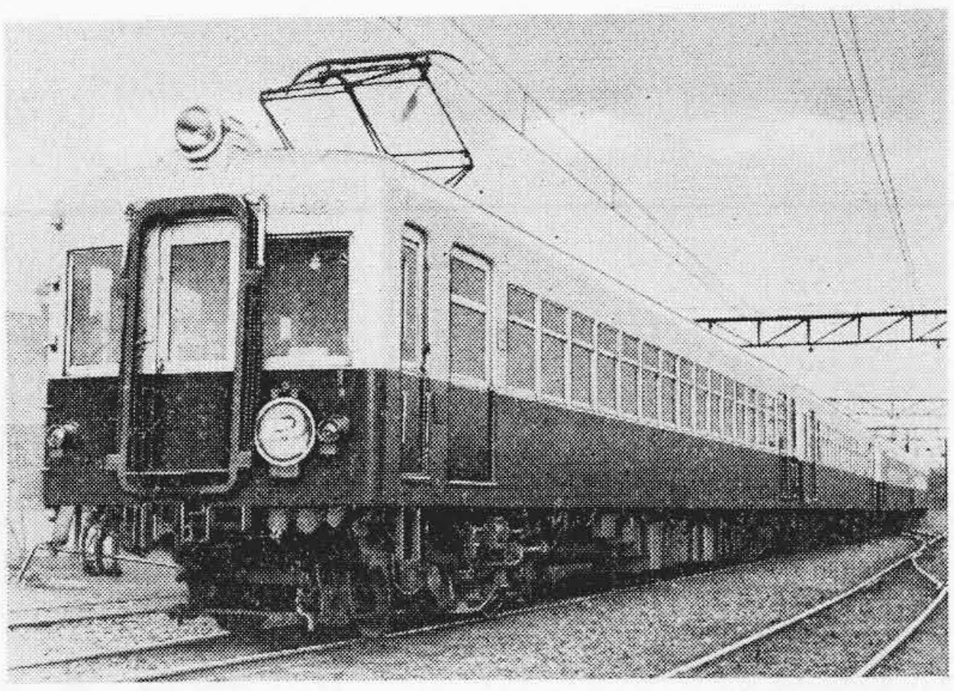
Table 3. Economical Number of Notches of Rapid Transit Trains

種別	駅間距離 (km)	列車編成	表定速度 (km/hr)	経済的定格速度 (km/hr)	経済的加速度減速度 (km/hr/s)	経済的制御段数
市内高速鉄道	1	MM	30	30～35	3.00～3.5	20～22
市間鉄道(普通)	2	MM	40	40～45	2.00～2.5	20～22
		MT	40	40～50	1.75～2.0	15～17
市間鉄道(急行)	5	MM	50	50～60	1.75～2.0	15～17
		MT	50	50～60	1.75～2.0	15～17



第8図　MMC 10型多段式制御器(東武鉄道電車用)

Fig. 8. Type MMC 10 Multi-Notch Controller (for Motor Cars of Tōbu Railway Co.)



第9図　MMC 20 型多段式制御器を取付けた近畿日本鉄道特急列車

Fig. 9. Special Express Train of Kinki-Nippon Railway Co., Provided with Type MMC 20 Multi-Notch Controllers

21 ノッチ（1,500/600V，150kW×4 用）の二型式を標準としている。

以上は界磁制御を行わず全界磁として取扱つたのであるが，駅間距離の比較的長い場合は 2～4 ノッチの弱界磁制御を併用するのが有利である。**第8図**に MMC 10 型多段式制御器，**第9図**に MMC 20 型多段式制御器を取付けた近畿日本鉄道特急列車を示す。

〔VII〕 結　　言

以上，高速電車用主制御器の制御段数が，起動及び制動特性に及ぼす影響に就いて述べた。その結果を要約すれば下記の如くなる。

（1） 起動及び制動最大電流を1時間定格電流の80%として制御段数を次第に増大すると，起動及び制動平均電流は次第に増大するが，制御段数が 20～22 ノッチ以上になると平均電流の増加率は次第に減少する。

（2） 起動及び制動平均電流を1時間定格電流の130%として制御段数を次第に増大すると，起動及び制動最大電流は次第に減少するが，制御段数が 20～22 ノッチ以上になると最大電流の減少率は次第に減少する。

（3） 起動及び制動平均電流を1時間定格電流の130%として制御段数を次第に増大すると，ノッチ進みに於けるノッチ間の牽引力及び制動力の変化は可成り急激に減少するが制御段数が 20～22 ノッチ以上になると牽引力及び制動力変化の減少率は次第に減少する。

（4） 上記制御段数増大の効果の見地よりすれば，経済的制御段数は 20～22 ノッチ程度であるといえる。

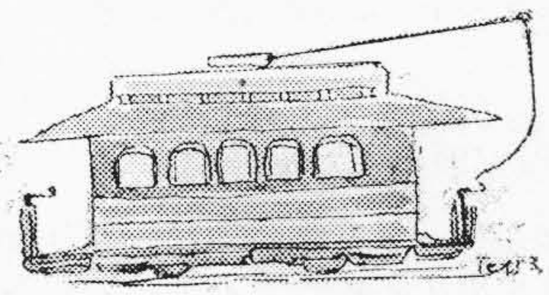
（5） 乗心地の点よりいえば，ノッチ進みの際の牽引力及び制動力変化は 30kg/t 程度以下に制限することが望ましい。今経済的制御段数として前述の如く 20～22 ノッチをとれば，乗心地の制限による最大起動加速度及び制動減速度は 3.5～4 km/hr/s 程度であるといえる。

（6） 以上の考察により，起動及び制動制御特性よりすれば，最大起動加速度及び制動減速度は *MT* 編成では 2～2.5km/hr/s，*MM* 編成では 3.5～4km/hr/s，又これに適応する経済的制御段数は，*MT* 編成に対しては 15～17 ノッチ，*MM* 編成に対しては 20～22 ノッチが適当であるといえる。

上記の外，重要にして且つ興味ありと思われる主電動機閃絡に及ぼす制御段数の影響に就いては未だ十分研究していない。唯近畿日本鉄道に於て，9 ノッチの普通型制御器を，16 ノッチの MMC 型多段式制御器に置換された結果，主電動機閃絡事故が急激に減少した事実があることを附記して擱筆する。

参　考　文　献

（1） 平田： 日立評論 **23** 135～139（昭 15-2）
（2） 平田： 日立評論 **34** 361～372（昭 27-2）
（3） 平田： 日立評論 **34** 1,291～1,296（昭 27-11）



日立製作所社員社外講演一覧表 (昭和29年1月受付分)　(その2)

(第29頁より続く)

講演月日	主催	演題	所属	講演者
4/1～5	日本化学会	塩化ビニル樹脂混和物の可塑剤の拡散速度	日立電線工場	吉川充雄 川和田七郎
5/上旬	電気三学会	高電圧水銀整流器に於ける中間陽極の分圧抵抗	日立研究所 日立工場	木村鐘治 桑島千秋 曾根田瑞夫
5/上旬	電気三学会	遮断時の電圧分布に対する並列抵抗の効果に就いて	日立工場	高砂常義 牧元
4/1～5	日本化学会	膠質粒子の粒度分布と吸着膜の厚さの測定	中央研究所	牟田明徳
5/上旬	電気三学会	6.9 kV 250 MVA 日立磁気遮断器に就いて	国分分工場 日立研究所	細包喜信 鴨志田実
4/上旬	日本機械学会	遠心清浄機の歳差運動と危険速度	日立研究所	小堀与一
4/1～5	日本化学会	ストロンチウム共存下に於けるバリウムの微量分析	中央研究所	二木久夫
1/9	光和会	アメリカに於ける医療器の現状(特に放射線関係)	茂原工場	橋本一二
1/23	日本伸銅協会	銅合金中の微量クロム定量法	中央研究所	北川公 相本吉人
2/1～3	日本学術振興会	鉄鋼中の銅迅速定量法の研究及び鋼種簡易鑑別法の研究 (第8報)	中央研究所	栗田常雄
1/30	工業技術協会	ベッド面の真直加工と測定法	多賀工場	安藤恒夫
1/30	工業技術協会	精密治具ボーラーとその作業	多賀工場	永井厚
4/上旬	日本金属学会	13 Cr 鋼の機械性に及ぼす熱処理の影響	日立研究所	小野健二 佐々木良一
4/上旬	日本金属学会	高Cr鋼の変態速度及びAr″変態点に及ぼす中間階段に於ける保持時間の影響に就いて(第1報)	日立研究所	小野健二 根本正
4/上旬	日本金属学会	各種金属材料のキャビテーション，エロージョン試験	日立研究所	小野健二 藤間孝義
4/上旬	日本金属学会	耐熱鋼 Timken's 16-25-6 の熔接部に於ける機械的性質	日立研究所	小野健二 小川浩三 小川卓三 佐々木良一
4/上旬	日本化学会	絶縁油安定度試験法に於ける BS 法と日立法の比較	日立研究所	高橋治男
4/上旬	日本化学会	メタクリル酸のグリコールエステルに就いて	日立研究所	津久井陸郎
4/上旬	日本化学会	フルフリルアルコールの縮合反応 (第3報)(有機溶剤による硬化反応の観察)	日立研究所	高橋憲三 岩波真一 鶴田四郎
4/上旬	日本化学会	粘土類の絶縁抵抗に就いて (第1報)(充塡剤用粘土に就いて)	日立研究所	中戸川武 人見男胤
4/上旬	日本化学会	高分子物質の高濃度溶液粘度(第2報) (環状ジメテルポリシロキサン溶液の粘度に就いて)	日立研究所	中牟田昌治
4/上旬	日本化学会	有機溶剤によるポリエステル化反応の観察	日立研究所	飯島貞善 鶴田四郎
4/上旬	日本化学会	直列型水電解槽の二次電流の遮蔽	日立研究所	川島夏樹

(第68頁へ続く)