

高速電車の経済的起動加速度及び制御段数 選定に関する一考察

平 田 憲 一*

Considerations on the Selection of Economical Acceleration-rate and Number of Starting Notches for High Speed Transit Electric Trains

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

Abstract

Higher acceleration-rates should be adopted in modern electric rolling stocks in order to increase schedule speed and at the same time to save power consumption, especially when the station distances are relatively short. In the adoption of the higher rates of acceleration, however, such problems as heating and commutating capacity of main motors, comfort of passengers, power peak-load on substations and size of controllers must be taken into consideration.

From the above point of view, the writer has wrought out the economical values for the acceleration-rates and the number of starting notches for high speed transit electric trains for local and express service.

The calculations are based on the following conditions.

| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Train composition | MM and MT |
| Train weight (loaded) | 94 t |
| Line voltage | 540 V and 1,350 V |
| Station distance | 1~5 km |
| Schedule speed | 25~70 km/h |
| Stopping time | 20 sec |
| Acceleration and deceleration rates | 1.5~3.5 km/h/s |
| coasting retardation rate | 0.35 km/h/s |

The description is also given about Type MMC Multi-notch Controllers, developed by Hitachi Ltd., and their actual test results.

[I] 緒 言

起動加速度は電気車輛の運転特性上、重要な役割を務める因子である。即ち一般に高加速度を採用することに

* 日立製作所日立工場

より、表定速度を上昇し、同時に電力消費量を減少し得るので、経営合理化上大なる利益がある。殊に駅間距離の短い場合及び線路状況により、最高速度が制限せられている場合に、表定速度を上昇するためには特に高加速度とすることが必要である。この見地より最近路面電車

のみならず、高速電車に於ても次第に高加速度が採用せられる傾向となり、ニューヨーク地下鉄新車⁽¹⁾の如きは起動加速度は 4 km/h/s に達すると発表せられている。高加速度の採用によつて前記の如き利益があるが、一方主電動機の熱容量及び整流容量、起動時の衝動及び乗心地、変電所尖頭負荷、制御器の大きさ及び重量等の制限もあるので、最も経済的な起動加速度及び制御段数が自ら存在する筈である。筆者はこれ等の諸点に就いて理論的及び一部実験的に考究したので、ここにその結果に就いて略述し読者の御批判を仰ぎ度い。

先ず高速電車の運転特性の概略を知るために代表例として下記の場合に就いてペンダー計算を行つた。

列車編成 MM 及び MT 列車重量(荷重含む) 94 t

電車線電圧 540 V 及び 1,350 V

駅間距離 1~5 km

表定速度 25~70 km/hr 停車時分 20 sec

加速度減速度 1.5~3.5 km/h/s

惰行減速度 0.35 km/h/s

先ず駅間距離 1—2—5 km に対し、表定速度を夫々 30—40—50 km/hr とした場合、加速度減速度を 1.5—2.0—2.5—3.5 km/h/s とすれば比電力消費量、主電動機二乗平均平方根電流、平均起動電流が如何に変化するか、次に各駅間距離に対し表定速度を変化した場合、上記各加速度に対してこれ等諸量が如何に変化するかを検討し、更に比電力消費量、二乗平均平方根電流、平均起動電流と起動加速度との関係を比較検討して、経済的加速度を与えた。又これに関連して経済的定格速度に就いても論及した。次にこれ等高加速度を与えるために必要な多段式制御方式の効果を平均起動電流、起動時衝動、変電所尖頭電流及び主電動機整流容量、粘着係数及び動輪滑動等の見地より論じ、経済的制御段数を与えた。最後に現在本邦に於て行われている多段式制御方式に就いて概説し、日立製作所に於て開発した MMC 制御方式数例の実車起動試験結果を紹介した。

[II] ペンダー計算結果の検討

ペンダー計算に就いては前回路面電車の場合⁽²⁾に就き述べたのでここには省略する。

高速電車の運転方式としては附随車を牽引するもの、即ち MT 編成を単位とするもの、全電動車より成るもの即ち MM 編成を単位とするもの及びこれ等を混用するもの等が行われているが、特に高加速度が要求される場合に於ては全電動車全軸駆動とすべきことは勿論である。本計算に於ては MM 編成及び MT 編成を考え重量は共に荷重を含み 94 t と仮定した。又駅間距離としては各駅停車及び急行の代表的の場合として夫々 1—2

km 及び 5 km を採つた。長距離ノンストップの特急に於ては加速度は通常問題となる場合は少いので論じないこととした。又惰行減速度は等価勾配抵抗を考慮して 0.35 km/h/s としてある。

使用記号は下記の通りである。

a = 起動加速度 (km/h/s)

b = 制動減速度 (")

I_e = 主電動機二乗平均平方根電流 (A)

I_0 = " 起動直線加速時起動平均電流 (A)

I_1 = " 一時間定格電流 (A)

I_{max} = " 起動最大電流

L = 駅間距離 (km)

U = 比電力消費量 (WH/t-km)

V_0 = 起動直線加速時最大速度 (km/hr)

V_{max} = 力行時最大速度 (km/hr)

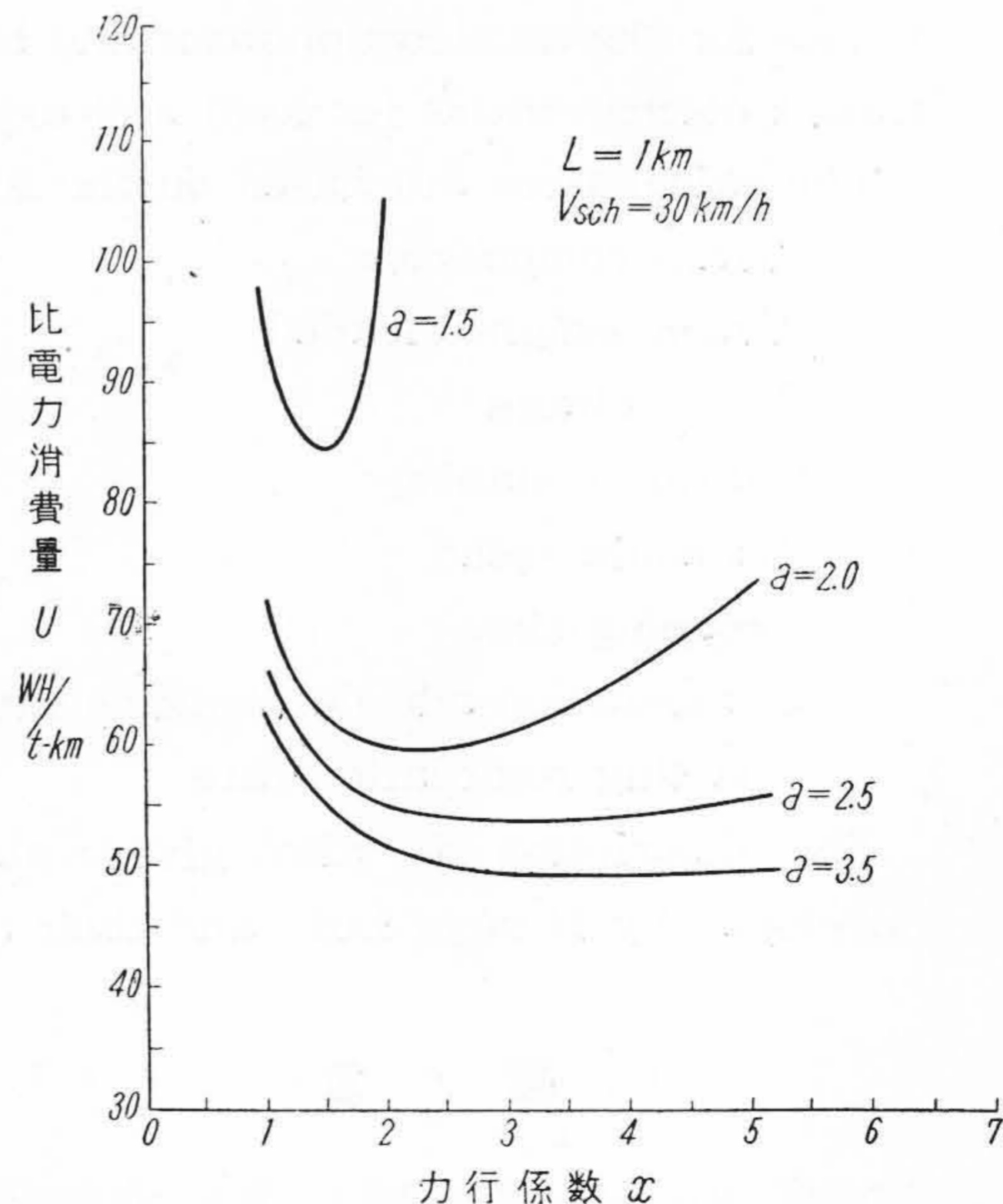
V_1 = 一時間定格速度 (km/hr)

V_{sch} = 表定速度 (km/hr)

x = 力行係数

尙本計算結果を示す図面中 I_e 及び I_0 に関するものは、簡単のため MT 編成、電車線電圧 1350 V の場合を示しておく。MM 編成、電車線電圧 540 V の場合はこれ等より容易に換算し得る。動輪滑動は別に考える。

(1) 表定速度 (V_{sch})一定の場合 第 1~3 図は $L = 1$ km, $V_{sch} = 30$ km/hr の場合、 $a = b = 1.5—2.0—2.5—3.5$ km/h/s とした場合の比電力消費量 (U), 二乗平



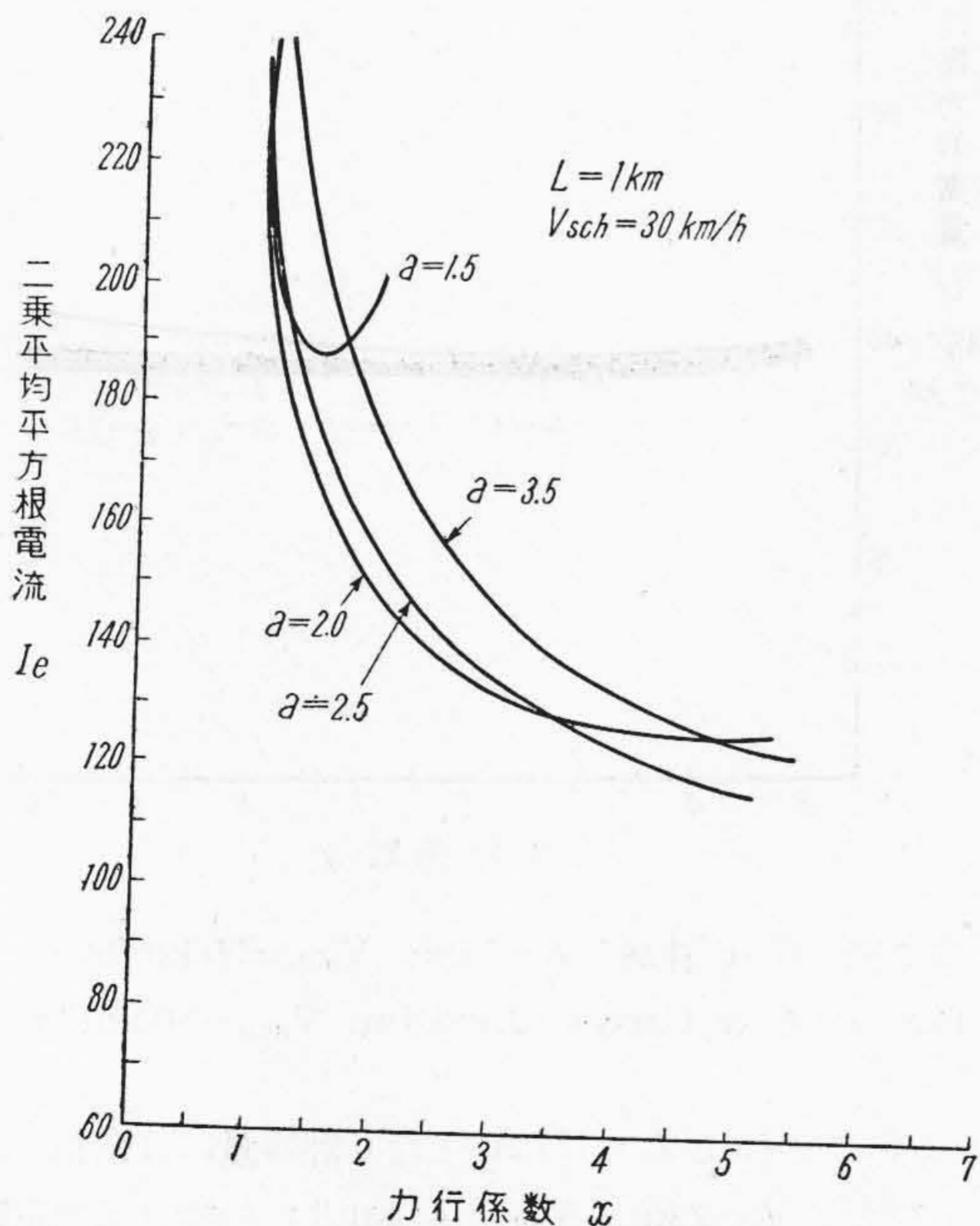
第 1 図 U - x 曲線 ($L=1$ km, $V_{sch}=30$ km/h)

Fig. 1. U - x Curves ($L=1$ km, $V_{sch}=30$ km/h)

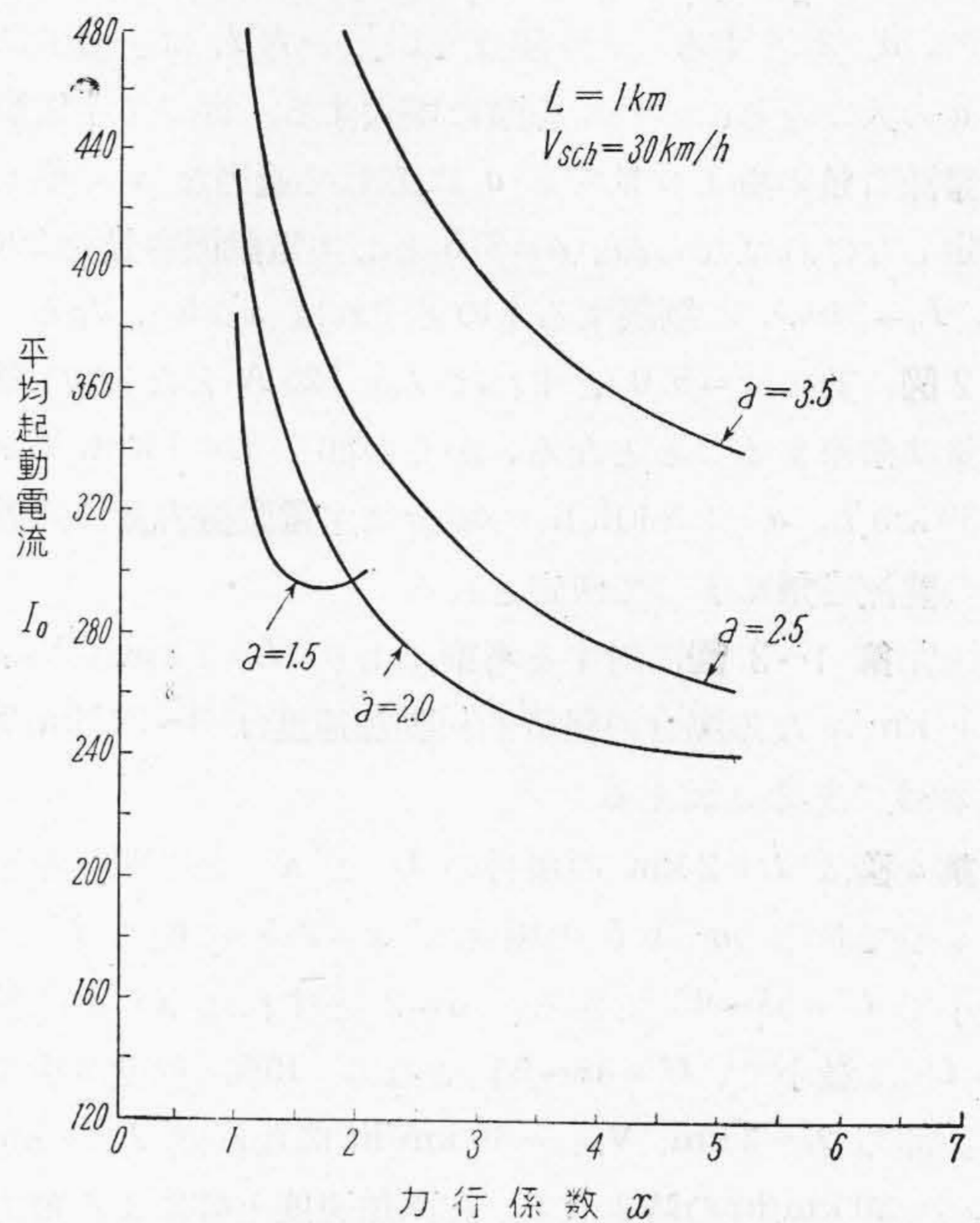
均平方根電流 (I_e) 及び起動平均電流 (I_o) と力行係数 (x) との関係を示すものである。以下同様にして第 4~6 図は $L=2\text{ km}$, $V_{sch}=40\text{ km/hr}$, 第 7~9 図は $L=5\text{ km}$, $V_{sch}=50\text{ km/h}$ の場合を示す。

先ず第 1 図に就て見るに $a=1.5\text{ km/h/s}$ の場合は $x=1.5$ に U 最少の点があり、 $U=85\sim 110\text{ WH/t-km}$ で可成大きい。 $a=2$ とすれば $x=2\sim 2.5$ に U 最少の点があり、 $U=60\sim 70$ となり、20~30% 減少する。我国の高速電車は $a<2$ のものが多いようであるが、 $a=2$ とすることにより電力消費量は可成節減し得ることを示している。然もこの場合主電動機容量は余り増大する必要のないこと後述の通りである。更に $a=2.5\sim 3.5$ とすれば $U=50\sim 60$ に減少し、25~35% 節減し得るが、高加速度になる程電力節減の割合は次第に少くなる。

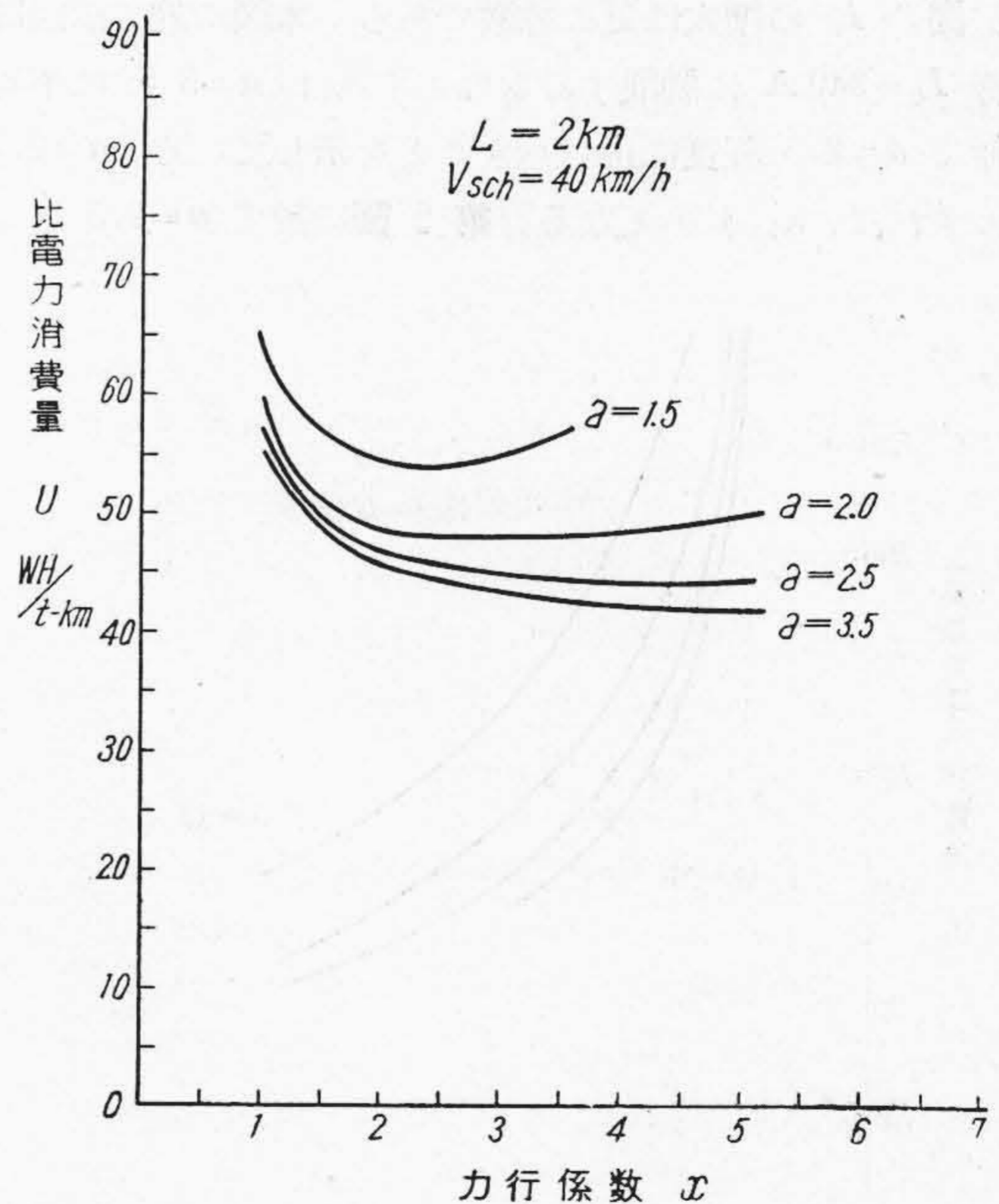
次に第 2 図に於て $a=1.5$ の場合 $x=1.5$, $a=2$ のときは $x=4.5$ に I_e 最少の点があり、 $a>2$ に対しては、 x の大なる程 I_e は減少する。 $a<2$ に対しては a の小なるにもかかわらず、 I_e は却て大となる場合あり、 U も亦大となつて不経済である。少くとも $a>2$ とすることが望ましい。然し一般的には a の大なる程 I_e は増大する。従つて経済的起動加速度を選定する場合、主電動機熱容量の点より、 a の値に応じ適当な x の値を選定しなければならぬ。たとえば $a=3.5$ とする場合、主電動機容量を 200IP と仮定し $I_e=150\text{ A}$ に制限するもの



第 2 図 I_e-x 曲線 ($L=1\text{ km}$, $V_{sch}=30\text{ km/hr}$)
Fig. 2. I_e-x Curves
($L=1\text{ km}$, $V_{sch}=30\text{ km/hr}$)



第 3 図 I_o-x 曲線 ($L=1\text{ km}$, $V_{sch}=30\text{ km/h}$)
Fig. 3. I_o-x Curves ($L=1\text{ km}$, $V_{sch}=30\text{ km/h}$)



第 4 図 $U-x$ 曲線 ($L=2\text{ km}$, $V_{sch}=40\text{ km/h}$)
Fig. 4. $U-x$ Curves ($L=2\text{ km}$, $V_{sch}=40\text{ km/h}$)

とすれば $x>3$ とする必要があることが分る。

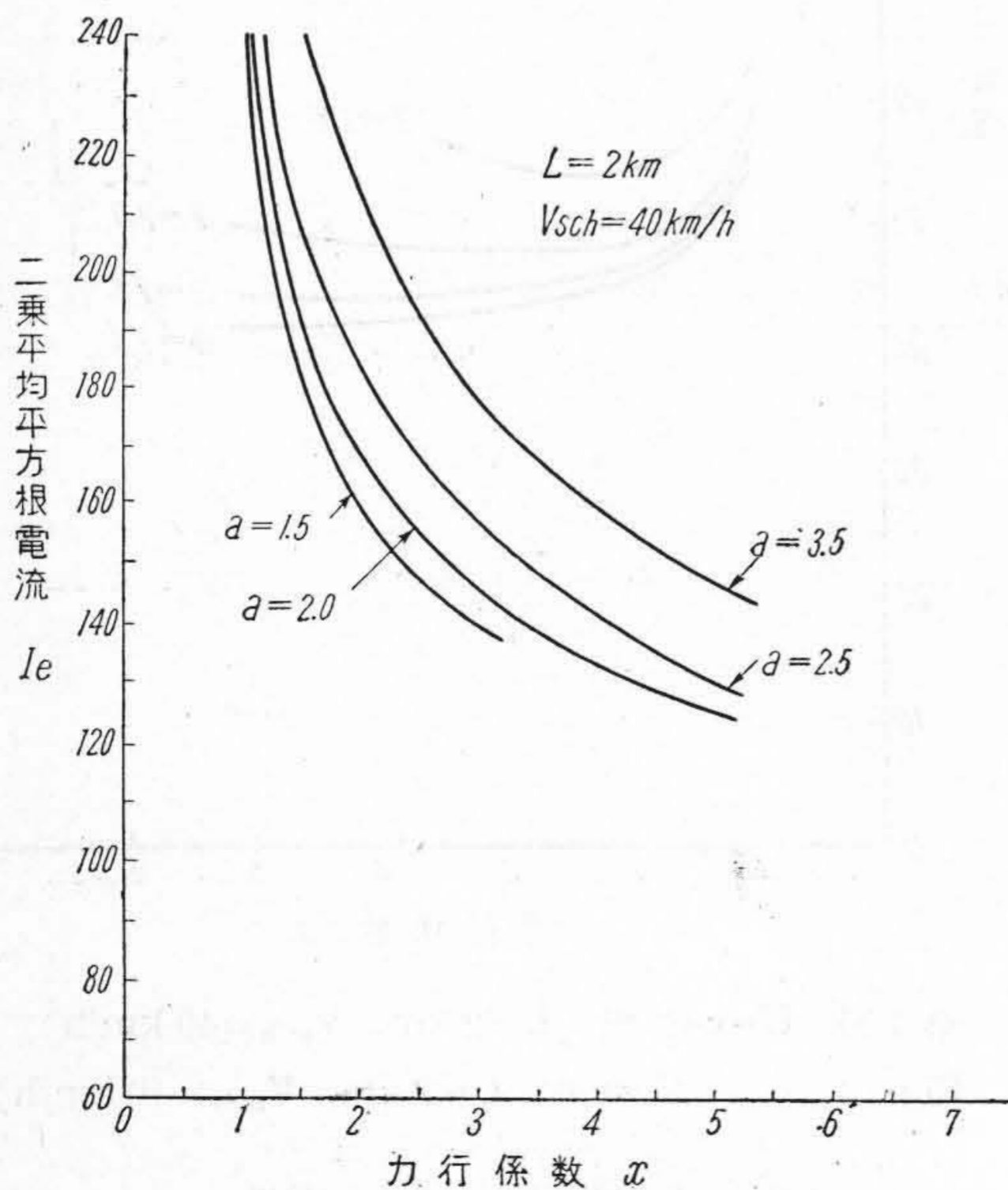
又第 3 図に於ては I_o も $a<2$ に対して最小点が存在し、 $a>2$ に対しては x の大なる程減少する。 $a<2$ に

対しては $a=2$ のときより大となることあり、不利であつて、 $a>2$ とすることが望ましい。一方 I_0 は一般的には a の大となるにつれて急激に増大する。従つて主電動機整流容量の点より見ても a に応じて適当な x の値を選定しなければならぬ。 $a=3.5$ とし主電動機容量を 200 印、 $I_0=340$ A に制限するものとすれば $x>5$ となる。**第 2 図** に於て $x=5.0$ とすれば $I_e=125$ A となる故、熱容量は余裕あることとなる。かくの如く $L=1$ km, $V_{sch}=30$ km/h, $a=3.5$ km/h の場合は主電動機容量は起動時の整流容量によつて決定される。

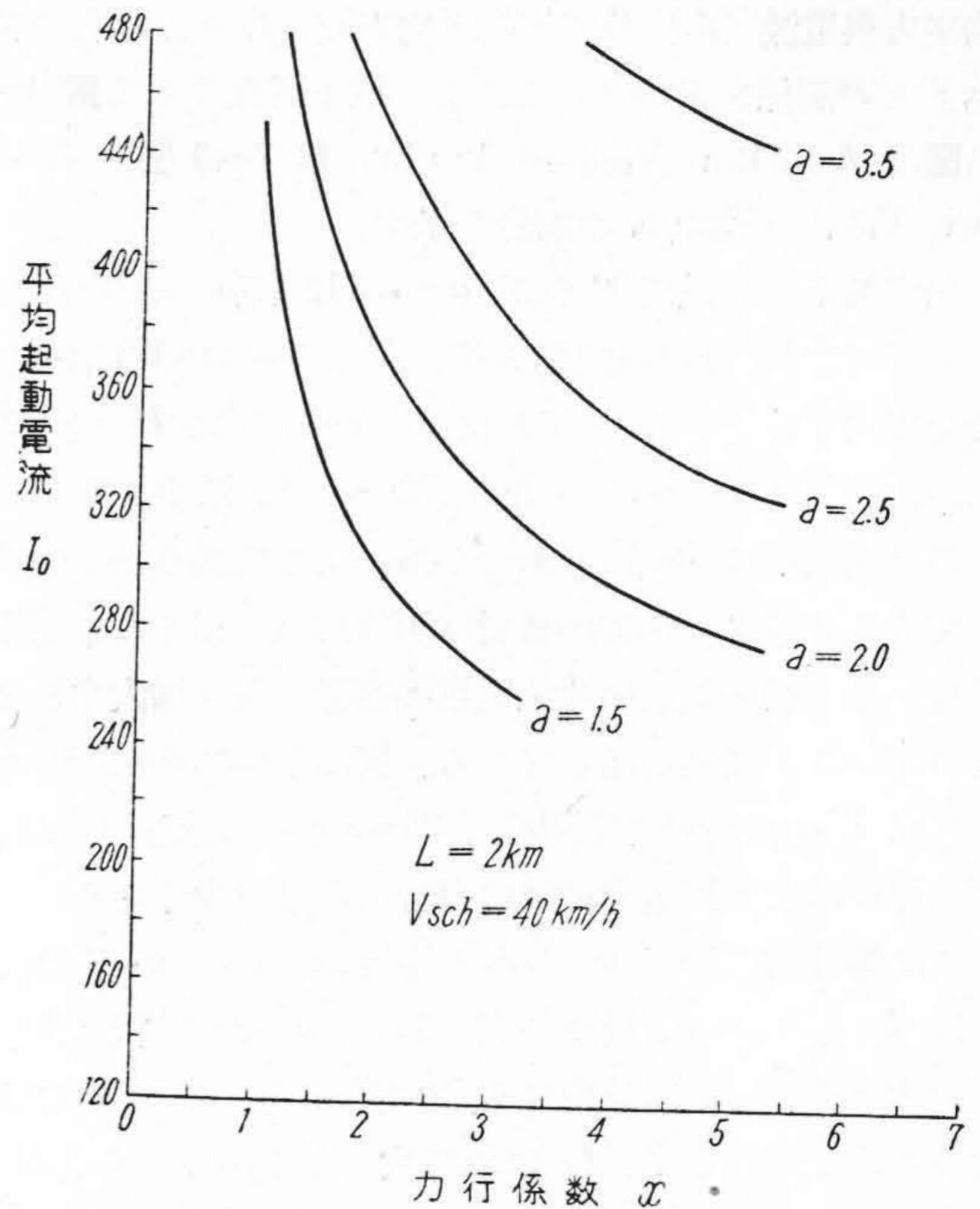
上記**第 1~3 図** に対する考察により $L=1$ km, $V_{sch}=30$ km/h なる場合の経済的起動加速度は $3\sim 3.5$ km/h/s 程度であると云える。

第 4 図 は $L=2$ km の場合の U と x との関係を示すものである。 $a=1.5$ の場合は $x=2.5$ に於て U は最小で $U=55\sim 60$ である。 $a=2$ とすれば $x=3$ に於て U は最小で、 $U=48\sim 55$ となり 15% 程度減少する。即ち $L=2$ km, $V_{sch}=40$ km/hr になれば $L=1$ km $V_{sch}=30$ km/hr の時よりも、起動加速度上昇による電力消費量節約は少い。この関係は**第 7 図** の $L=5$ km, $V_{sch}=50$ km/hr の場合を見れば更に明かである。

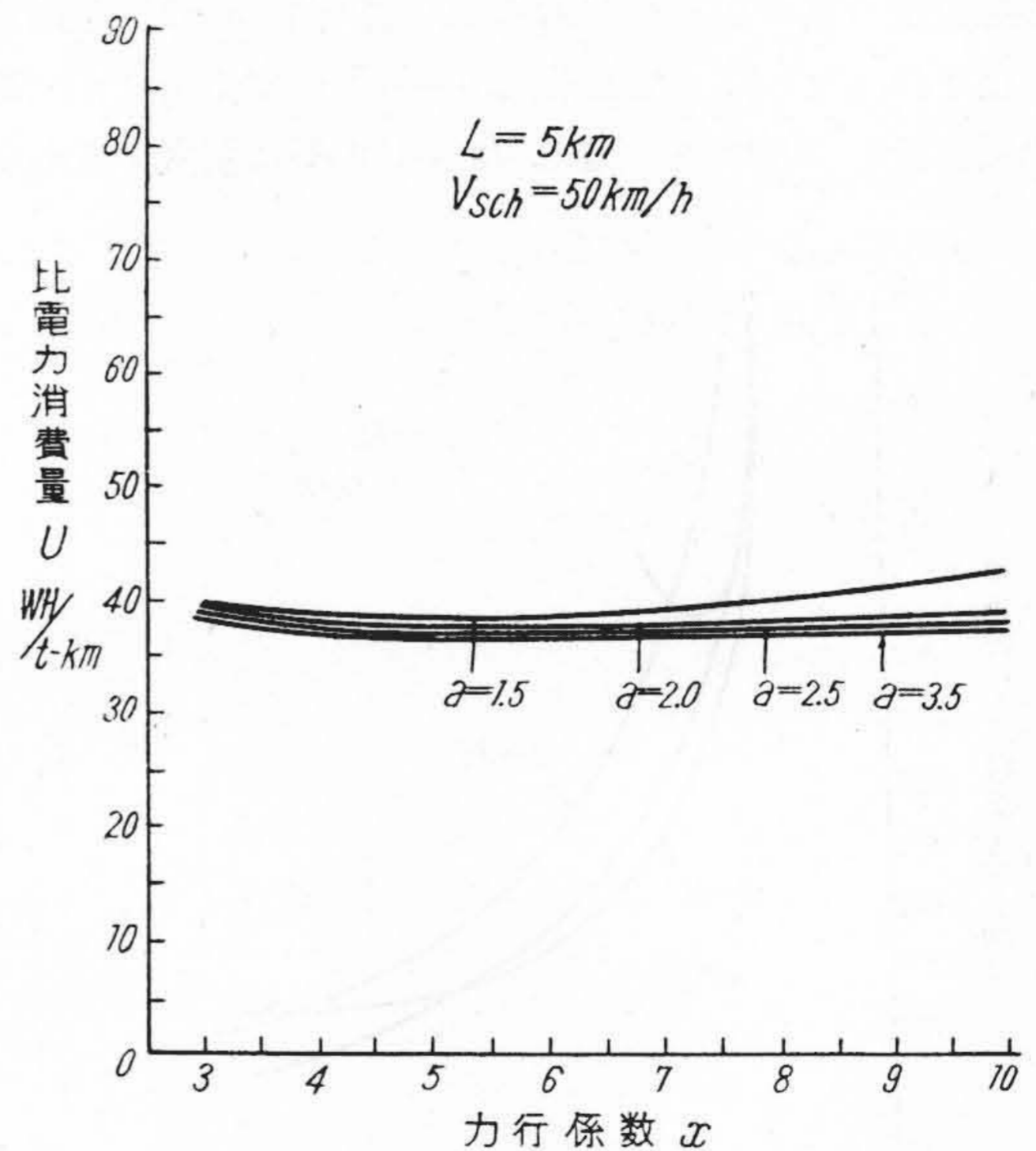
第 5 図 を見るに a を増大する程 I_e は大となるが、**第 6 図** の I_0 の増大は更に急激である。本図に於て前回同様 $I_0=340$ A に制限するものとすれば $a=3.5$ は不可能で $a=2.5$ 程度に止むべきことを示している。 $a=2.5$ とすれば、 $x>4.5$ となる。**第 5 図** に於て $a=2.5$ とし



第 5 図 I_e-x 曲線 ($L=2$ km, $V_{sch}=40$ km/hr)
Fig. 5. I_e-x Curves ($L=2$ km, $V_{sch}=40$ km/hr)



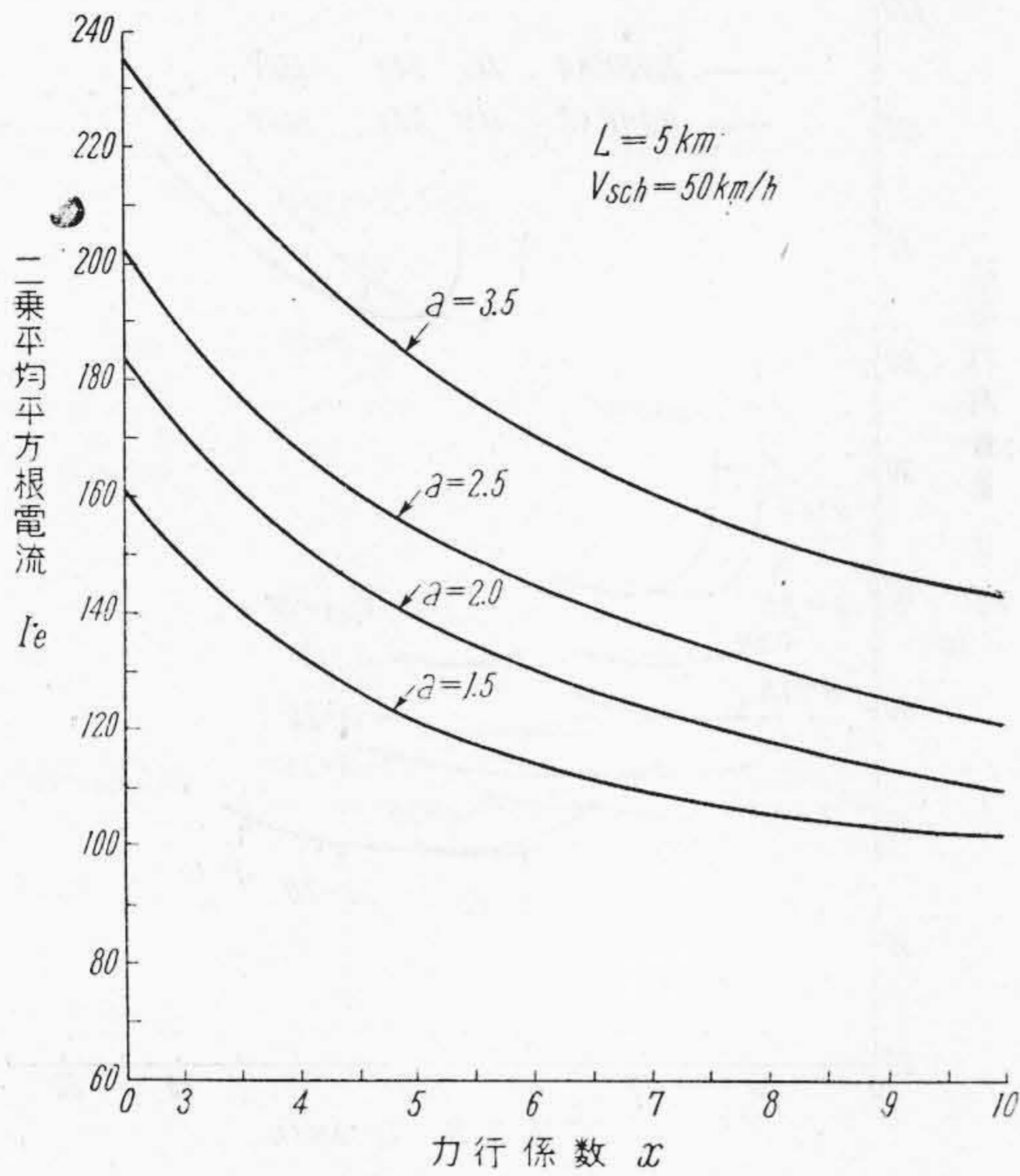
第 6 図 I_0-x 曲線 ($L=2$ km, $V_{sch}=40$ km/h)
Fig. 6. I_0-x Curves ($L=2$ km, $V_{sch}=40$ km/h)



第 7 図 $U-x$ 曲線 ($L=5$ km, $V_{sch}=50$ km/hr)
Fig. 7. $U-x$ Curves ($L=5$ km, $V_{sch}=50$ km/hr)

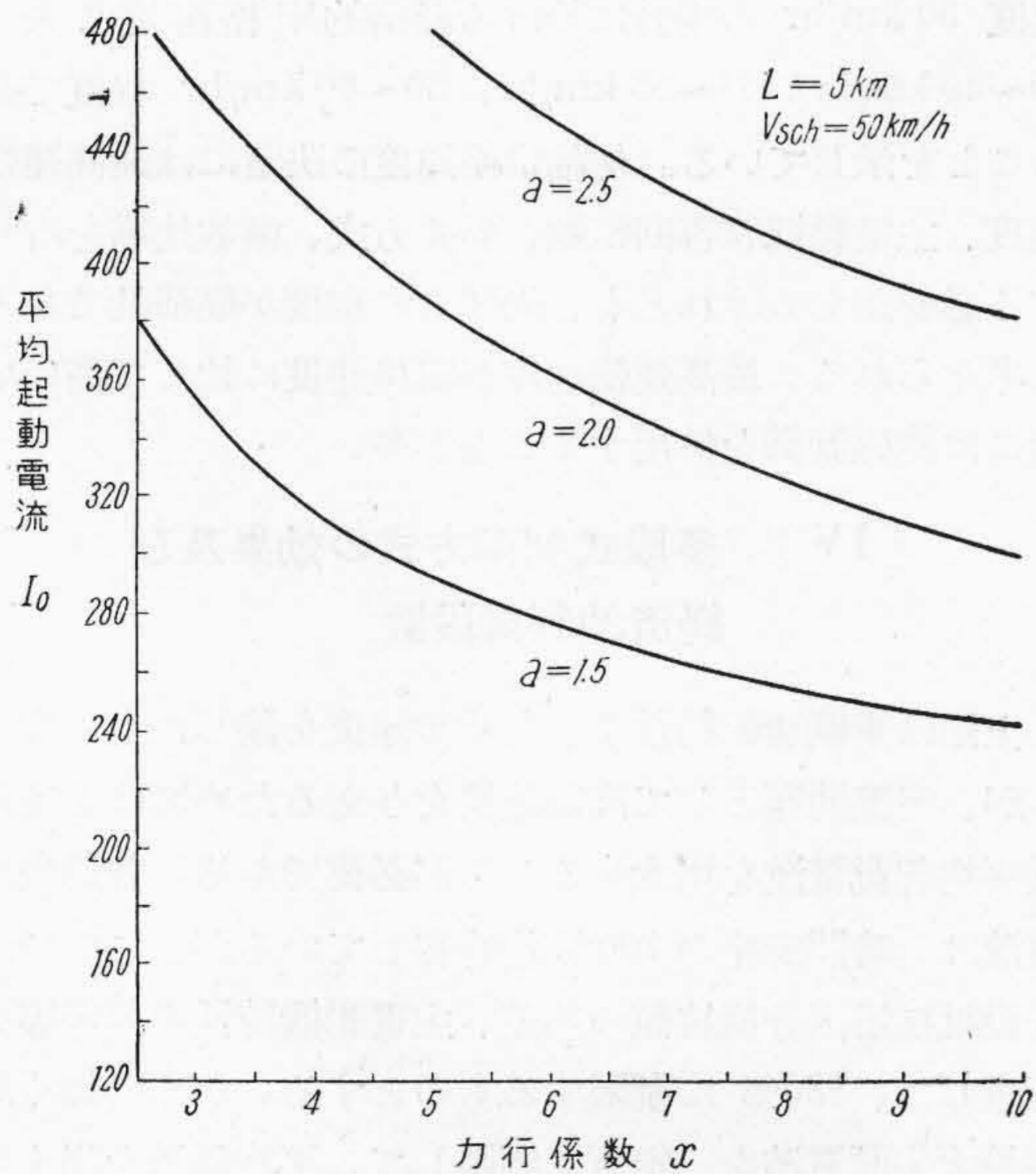
$x=4.5$ にとれば $I_e=137$ A となり熱容量には余裕がある。従つて $L=2$ km, $V_{sch}=40$ km/hr の場合も主電動機容量は整流容量によつて決定せられ、経済的起動加速度は $a=2\sim 2.5$ km/h/s 程度であると云える。

第 9 図 の $L=5$ km の場合も同様にして $I_0=340$ A と

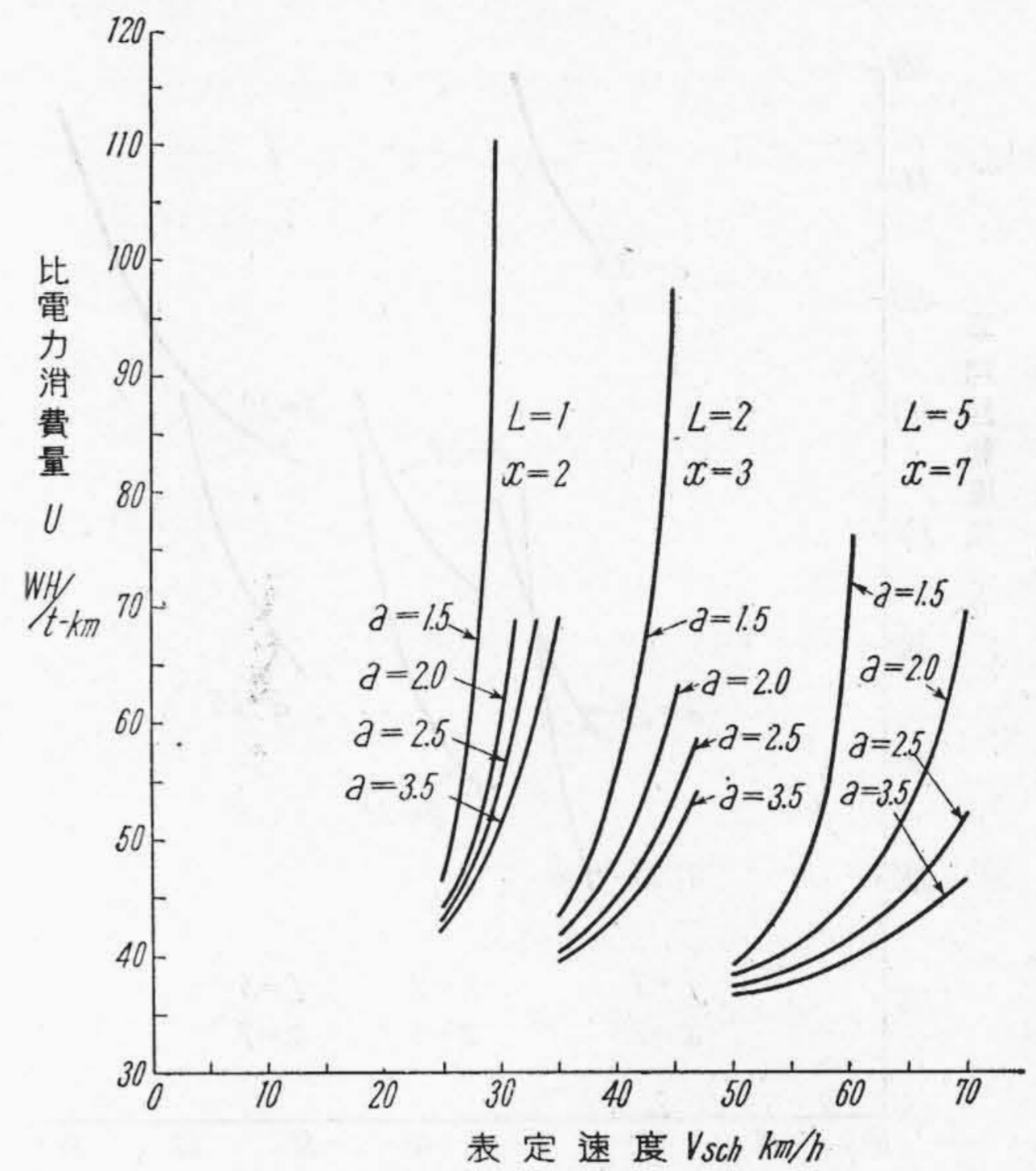


第8図 I_e-x 曲線 ($L=5\text{ km}$, $V_{sch}=50\text{ km/hr}$)
Fig. 8. I_e-x Curves ($L=5\text{ km}$, $V_{sch}=50\text{ km/hr}$)

すれば、 $a > 2$ とすることは不可能で、 $a = 2$ 程度に止むべきことが分る。この場合 $x > 7$ とする必要があるが第8図に於て $a = 2$, $x = 7$ とすれば $I_e = 124\text{ A}$ となり熱容量には相当の余裕がある。従つて $L = 5\text{ km}$, $V_{sch} = 50\text{ km/h}$ の場合も主電動機容量は整流容量によつて決定せられ、経済的起動加速度は $1.5 \sim 2\text{ km/h/s}$ 程度であると云える。

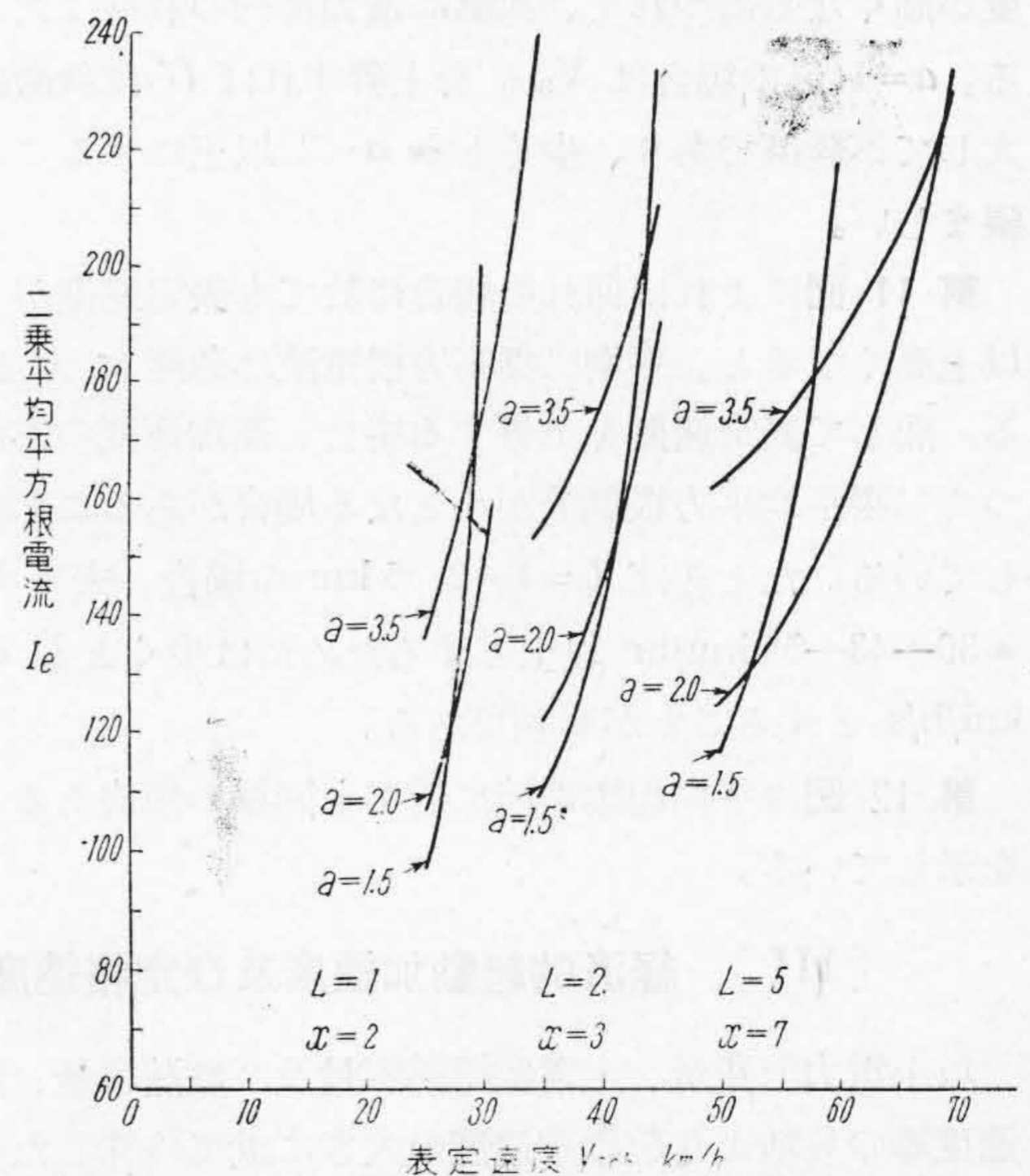


第9図 I_o-x 曲線 ($L=5\text{ km}$, $V_{sch}=50\text{ km/hr}$)
Fig. 9. I_o-x Curves ($L=5\text{ km}$, $V_{sch}=50\text{ km/hr}$)



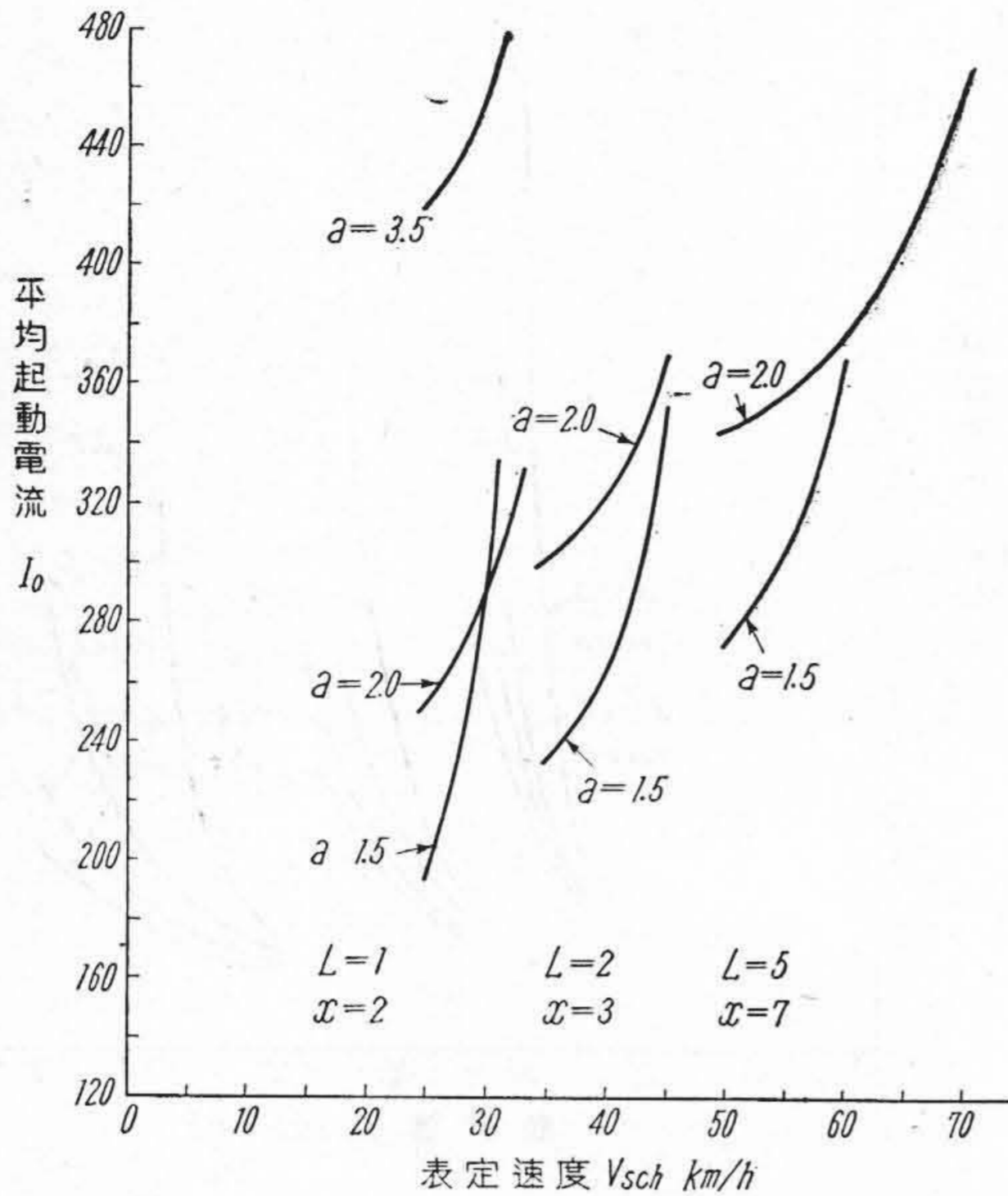
第10図 比電力消費量 (U)-表定速度 (V_{sch}) 曲線
Fig. 10. Specific Power Consumption (U)-Schedule Speed (V_{sch}) Curves

(2) 力行係数 (x) 一定で表定速度 (V_{sch}) を変化する場 第10~12図は $L = 1\text{ km}$ ($x = 2$), $L = 2\text{ km}$ ($x = 3$), $L = 5\text{ km}$ ($x = 7$) に対し、 $a = b = 1.5 - 2.0 - 2.5 - 3.5\text{ km/h/s}$ とした場合、 V_{sch} を変化したときの U ,



第11図 二乗平均平方根電流 (I_e)-表定速度 (V_{sch}) 曲線

Fig. 11. Root Mean Square Current (I_e)-Schedule Speed (V_{sch}) Curves



第12図 平均起動電流 (I_0)—表定速度 (V_{sch}) 曲線

Fig. 12. Mean Starting Current (I_0)—Schedule Speed (V_{sch}) Curves

I_e 及び I_0 を示すものである。

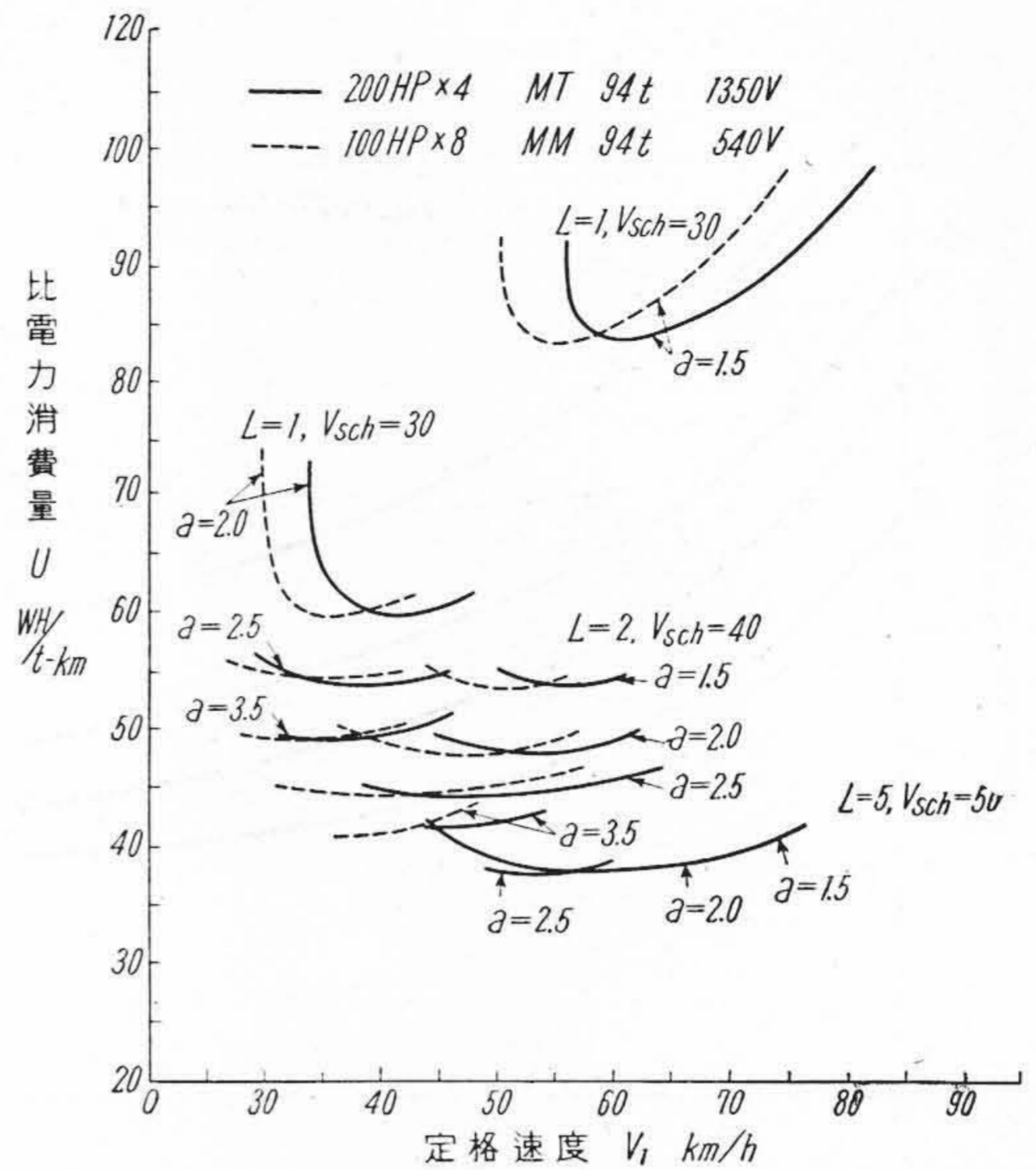
第10図に就て見るに、各駅間距離共表定速度が低い場合は加速度上昇による電力節約は少いけれども、表定速度が高くなるにつれて、次第に電力節約の利益は大となる。 $a=1.5$ の場合は V_{sch} を上昇すれば U は急激に増大して不経済であり、少なくとも $a=2$ 以上にすることが望ましい。

第11図によれば何れの場合に於ても表定速度が一定以上高くなると、平均二乗平方根電流は急激に大となる。而して表定速度を上昇する場合、高加速度の方が却つて二乗平均平方根電流が小となる場合があることを示している。たとえば $L=1-2-5$ km の場合、夫々 $V_{sch}=30-43-55$ km/hr 以上とするためには少なくとも $a=2$ km/h/s とすることが有利である。

第12図は平均起動電流に於ても同様の傾向あることを示している。

[III] 経済的起動加速度及び定格速度

以上電力消費量、主電動機熱容量及び整流容量、表定速度等の見地より起動加速度の大きさに就て吟味したのであるが、これ等の諸点より総合的に考えれば、経済的起動加速度は、駅間距離 1~2 km に対しては 2.5~3.5 km/h/s, 駅間距離 5 km に対しては 1.5~2 km/h/s 程度であるといえる。



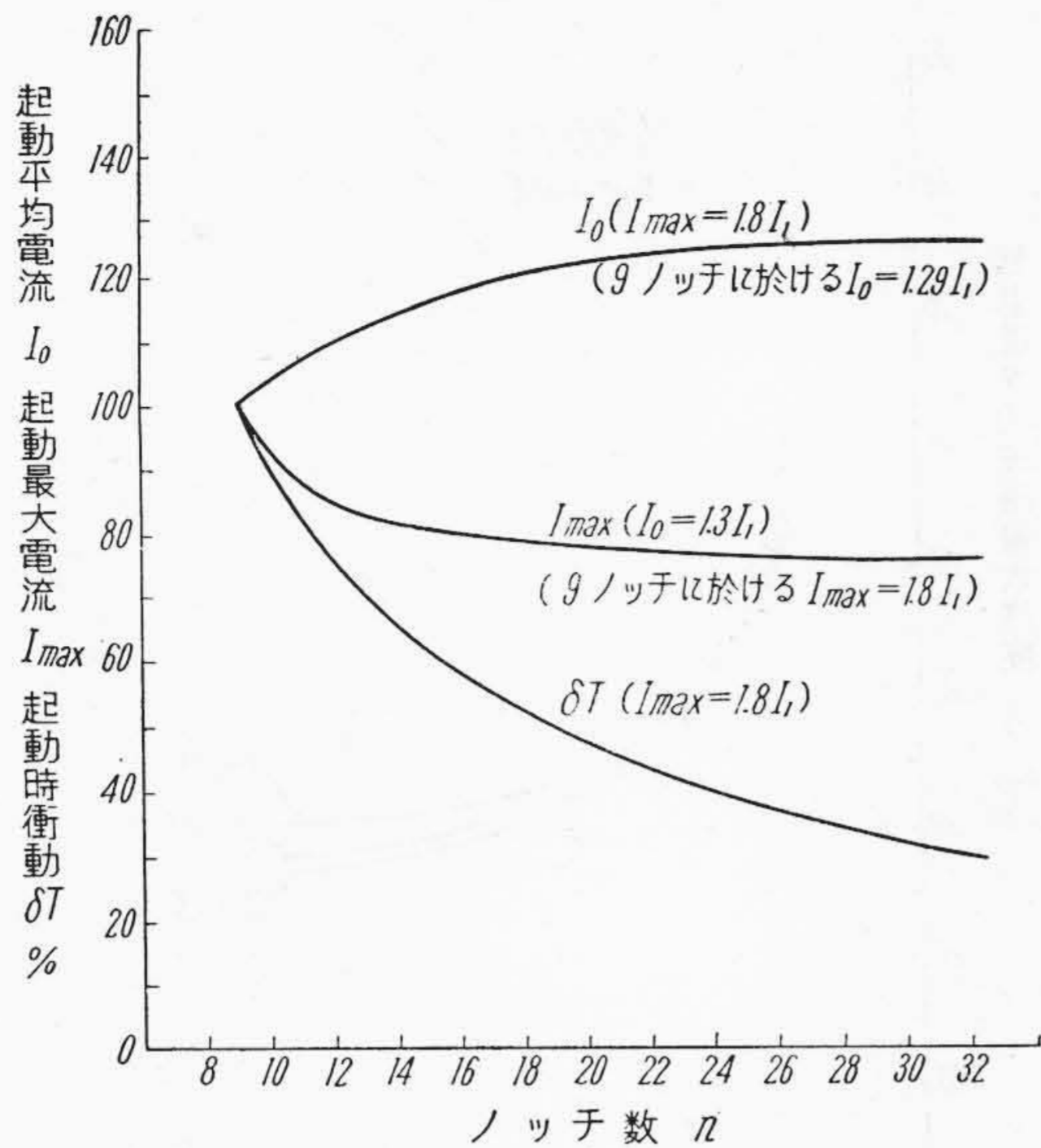
第13図 比電力消費量 (U)—定格速度 (V_1) 曲線

Fig. 13. Specific Power Consumption (U)—Rated Speed (V_1) Curves

上記検討中に於て実際問題として x の値、換言すれば定格速度或は函数比の選定が問題となる。第13図は x 従つて定格速度を変化した場合、種々の加速度に対して比電力消費量が如何に変化するかを示す例で、 $a=2-3.5$ とすれば、駅間距離 1 km—表定速度 30 km/hr, 駅間距離 2 km—表定速度 40 km/hr, 駅間距離 5 km—表定速度 50 km/hr の場合に於ける経済的定格速度は夫々 30~40 km/hr, 45~55 km/hr, 50~60 km/hr 程度であることを示している。勿論定格速度の決定には最高運転速度、主電動機許容回転数、駆動方式、函数比等を吟味する必要があるけれども、先ずこの程度が経済的であると考えられる。最高運転速度が定格速度に比して高い場合には界磁制御を併用することが多い。

[IV] 多段式制御方式の効果及び経済的制御段数

上記は車輛運転特性より起動加速度を論じたものであるが、実際問題として高加速度を与えるためには主電動機平均起動電流を増大することが必要である。普通尖頭電流は一時間定格の 200% 迄許容しているが、ここでは起動抵抗器区分抵抗値の誤差、主電動機特性の誤差等を考慮して、180% に制限するものとする。かくの如く許容最大尖頭電流を一定値に制限して、平均電流を出来るだけ増大するためには多段式制御方式採用の必要を生ずる。以下本問題に就いて述べる。



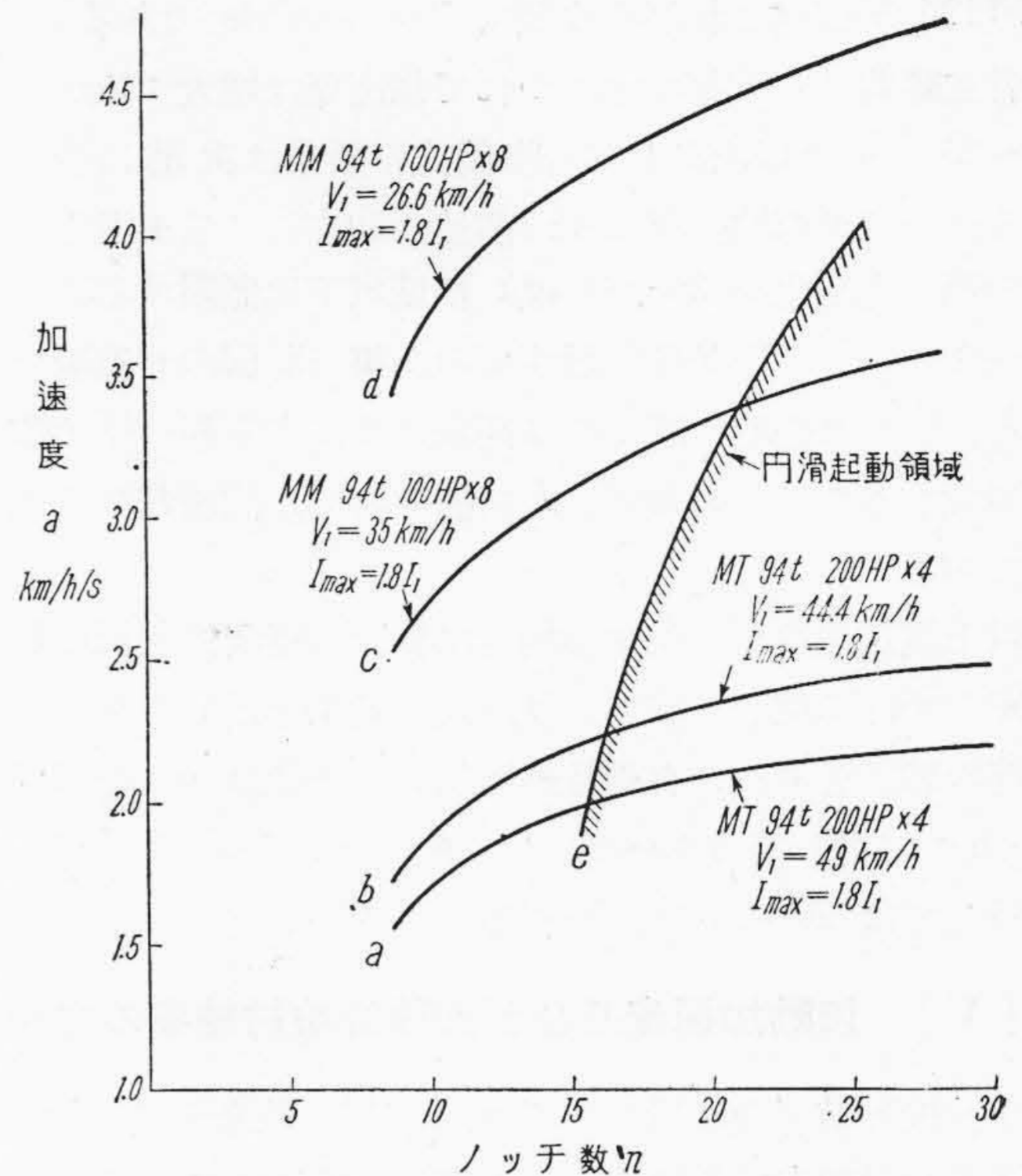
第14図 I_0 , I_{max} , δT - n 曲線
Fig. 14. I_0 , I_{max} , δT - n Curves

(1) 平均起動電流 (I_0) 今 $I_{max} = 1.8 I_1$ とすれば、従来標準とされて来た9ノッチの制御器では $I_0 = 1.29 I_1$ となるが、多段式制御方式を採用して起動ノッチ数を、13-21-25-32 と増大すれば $I_0 = 1.45 I_1 - 1.58 I_1 - 1.61 I_1 - 1.62 I_1$ と増大する。然しノッチ数を20~25以上に増大してもその効果は第14図 I_0 曲線の如く次第に小となり、徒らに制御器を複雑化するのみで不経済である。従つて経済的ノッチ数は20~25程度と考えられる。

(2) 変電所尖頭電流及び主電動機整流容量 (I_{max}) 一方変電所の尖頭負荷の点より考えると高加速にして車輛の起動電流が増大する結果、変電所の高速度遮断器を飛ばすことがある。従つて起動加速度もこの点より制約を受けることとなるが、多段式制御方式を採用すれば一定起動電流に対して尖頭電流を減少することが出来る。たとえば $I_0 = 1.3 I_1$ とし、ノッチ数を9-13-21-25-32 とすれば、第14図 I_{max} 曲線の如く $I_{max} = 100 - 83 - 78 - 76 - 75\%$ となり、最大尖頭電流は25%程度減少する。即ち高加速度とする場合は変電所尖頭電流を制限する点より考えても多段式制御方式を採用することが望ましい。

主電動機整流に関しても全く同様であつて、同一起動加速度に対し、ノッチ数増大により最大電流は減少して整流状態は改善される結果閃絡事故は減少する。

(3) 起動時衝動 (δT) 又高加速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が、ノッチ数を増大すればノッチ間の牽引力の変化は却つて小



第15図 加速度 (a)—ノッチ数 (n) 曲線
Fig. 15. Acceleration-rate (a)-Number of Notch (n) Curves

となし得る。たとえばノッチ数を9-13-21-25-32とした場合の牽引力変化は第14図 δT 曲線の如く100-70-45-38-30%と減少し、ノッチ数を増大すればノッチ進めの際に於ける衝動は可成急激に減少し円滑に起動し得る。

経験によれば円滑起動のためにはノッチ進めの際に於けるノッチ間の牽引力変化を30~35 kg/t程度以下に制限することが望ましい。後述の第15図の曲線eは本制限に必要な制御段数と起動加速度との関係を示す。

(4) 粘着重量及び動輪滑動

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。第15図は起動加速度と制御段数との関係を示すものである。

先ずMT編成の場合、 $I_{\mu max} = 20\%$ とし、粘着重量は全重量の55%、軸重移動を15%と仮定すれば、起動加速度はa及びb曲線の如くなり、最大値は動輪滑動より2.5 km/h/s程度に制限される。但し主電動機は200 HP×4、定格速度は44.4~49 km/h、 $I_{max} = 1.8 I_1$ とし、制御段数は9~30とする。

又MM編成の場合はMTの場合と同様の仮定の下に、主電動機は100 HP×8、定格速度は26.6~35 km/h、 $I_{max} = 1.8 I_1$ とすれば、起動加速度はc及びd曲線の如くなり、最大4.5 km/h/s程度の高加速度を出すことが出来る。

MTM 編成はこれ等の中間で 2~3 km/h/s である。

各曲線共ノッチ数増大につれて加速度は増大するが、20~25 ノッチ以上にしても多段式の効果は次第に少くなる。一方乗心地の点よりは前述の如く、ノッチ進みの際の牽引力変化を 30~35 kg/t 程度以下に制限することが望ましい。この条件を示すものが第 15 図の e 曲線である。即ち乗心地の点よりは高加速度にする程ノッチ数を増大することが必要で、e 曲線の右側が円滑起動の領域である。

以上高加速度を採用する場合に於ける経済的制御段数決定の条件に就いて述べ、多段式の効果を示したが、これ等の諸点を考え、有効且経済的ノッチ数は a=2~2.5 km/h/s に対しては 15~20 ノッチ、a=2.5~3.5 km/h/s に対しては 20~25 ノッチ程度であるといえる。

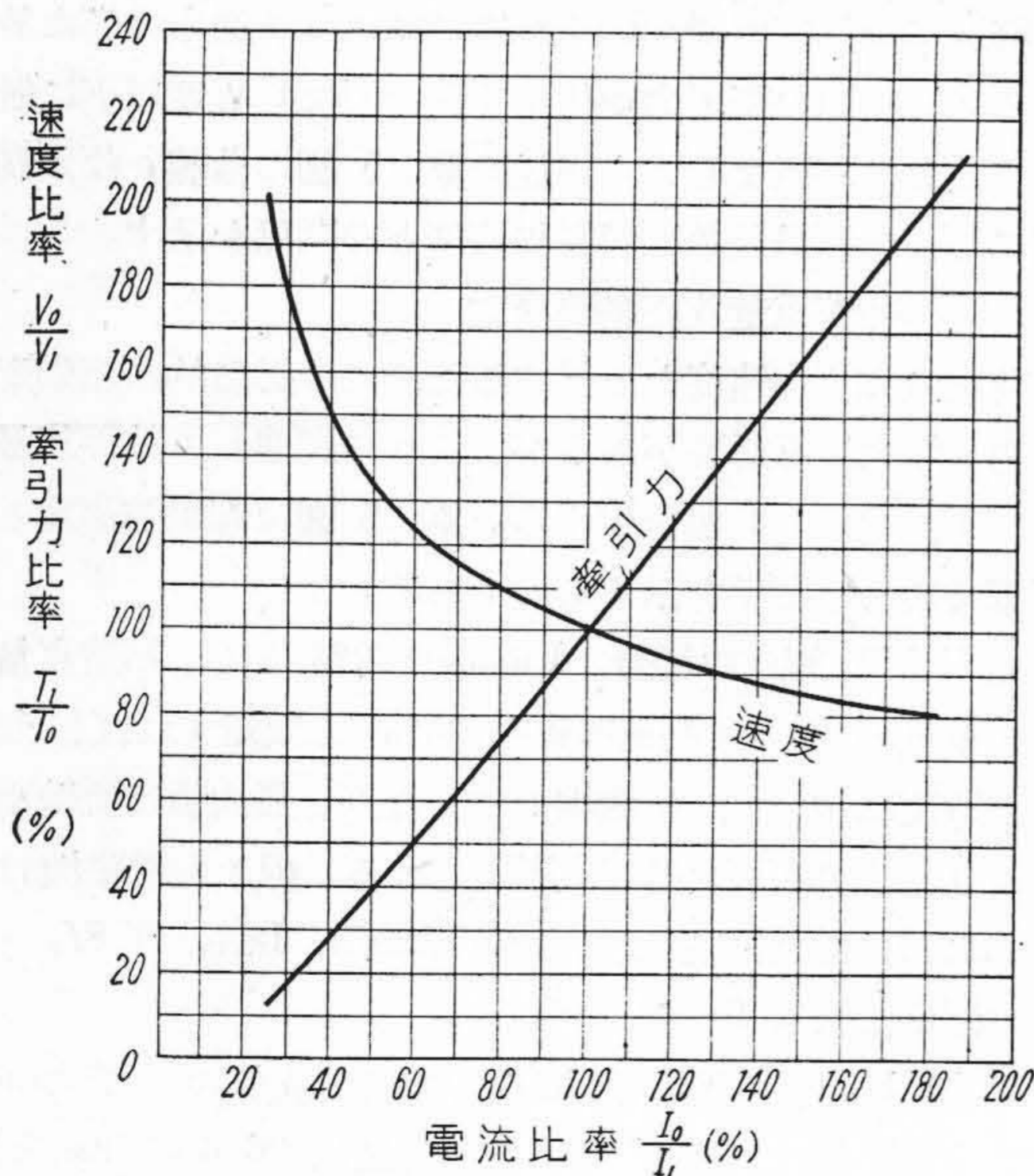
[V] 起動加速度及び制御段数検討結果の応用

上記検討結果の応用として下記、市内高速鉄道、市間鉄道及び急行市間鉄道の三つの場合を吟味して見る。

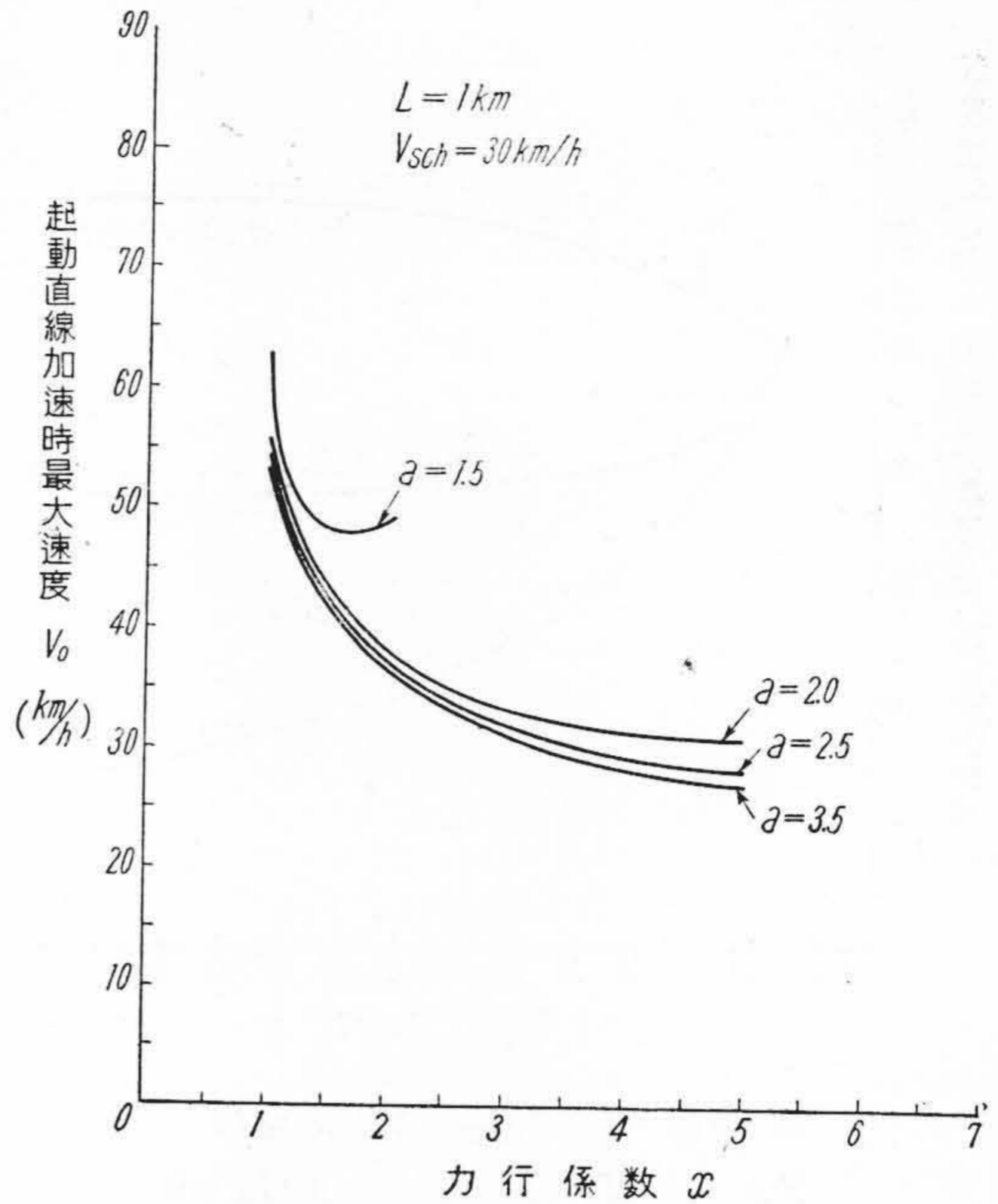
(1) 市内高速鉄道 (各駅停車)

| | | | |
|------|----------|-------|--------|
| 列車重量 | 94 t | 列車編成 | MM |
| 駅間距離 | 1 km | 停車時分 | 20 sec |
| 表定速度 | 30 km/hr | 電車線電圧 | 540 V |

駅間距離 1 km, 表定速度 30 km/h の場合は特に高加速度とすることが有利である。即ち第 1 図に於て x=4, a=3.5 km/h/s とすれば U=49.5 WH/t-km となり x=2, a=2 の場合の U=60 に比し 17% 節約される。



第 16 図 主電動機比率特性曲線
Fig. 16. Percentage Characteristic Curves of Main Motors



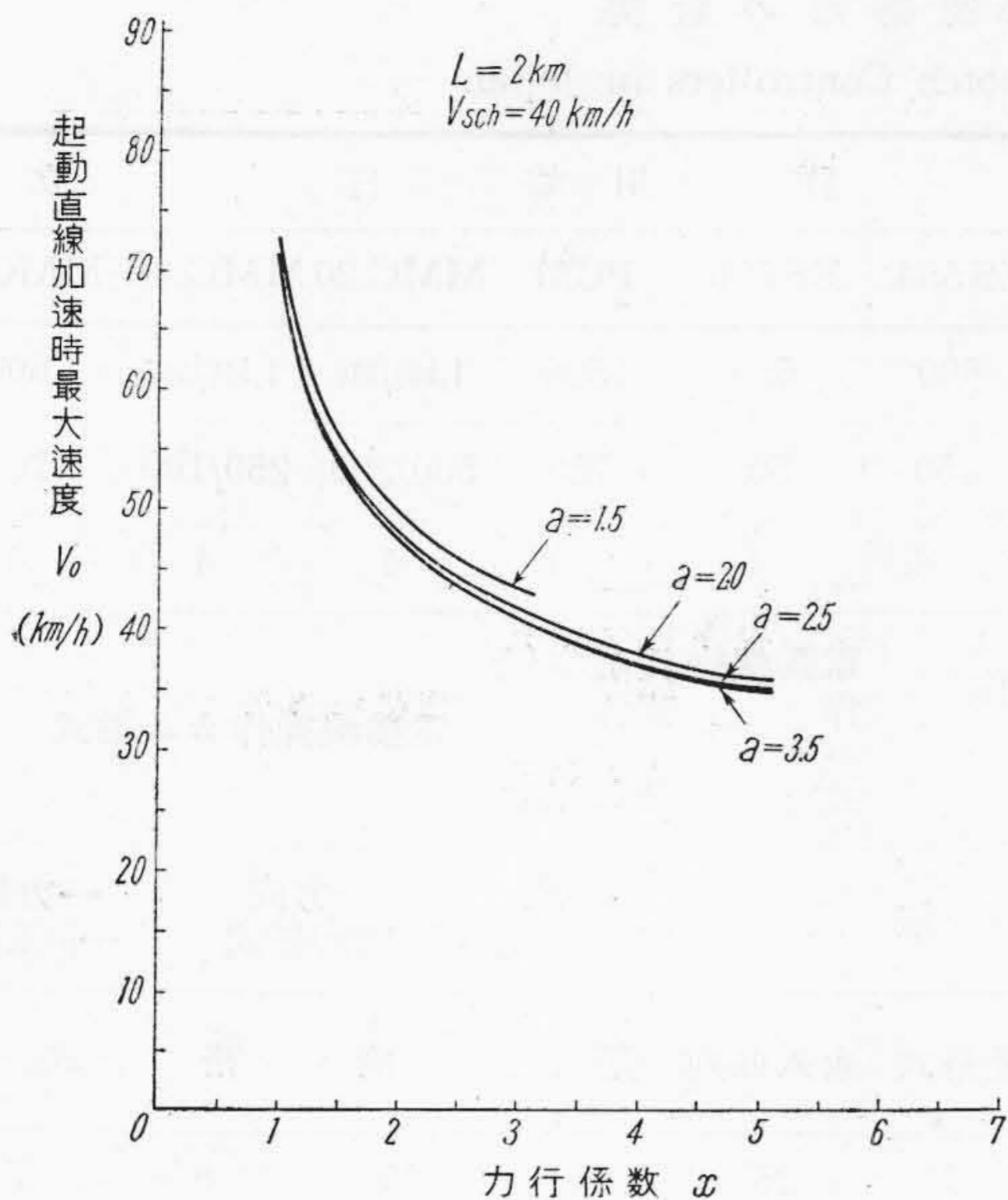
第 17 図 Vo-x 曲線 (L=1 km, Vsch=30 km/hr)
Fig. 17. Vo-x Curves (L=1 km, Vsch=30 km/hr)

第 3 図に於て x=4, a=3.5 とし、電車線電圧 540 V, 主電動機端子電圧 300 V として換算すれば I₀=455 A, 同様にして第 2 図より I_e=166 A となる。高加速度に対しては当然全電動車、全軸駆動とすべきである。故に 21 ノッチの多段式制御器を使用すれば主電動機は 100 IP×8 で満足される。即ち I_{max}=1.8 I₁ として第 14 図より I₀=1.58 I₁=448 A, 又 I_e=0.7 I₁=199 A となる故整流容量は少々、超過するが許し得べき値であり、熱容量は充分である。又 I₀= $\frac{455}{284} I_1=1.6 I_1$ に対する速度 V₀ は第 16 図の主電動機比率特性曲線より V₀=0.83 V₁, 然るにペンダー計算により x=4, a=3.5 の場合の V₀ は第 17 図より V₀=28.8 km/h なる故 V₁= $\frac{28.8}{0.83}=34.7$ km/h となる。主電動機回転数 720 r/m (540 V), 動輪径 860, 歯数比 3.44 とすれば V₁=34 km/h となり、略々上記条件を満足する。これは又略々第 13 図の経済的定格速度と一致している。又起動時の衝動も第 15 図より見て a=3.5, 21 ノッチは円滑起動の領域にあり、ノッチ数も亦適當である。

(2) 市間鉄道 (各駅停車)

| | | | |
|------|---------|-------|--------|
| 列車重量 | 94 t | 列車編成 | MT |
| 駅間距離 | 2 km | 停車時分 | 20 秒 |
| 表定速度 | 40 km/h | 電車線電圧 | 1350 V |

第 4 図より見て駅間距離が 2 km 以上になると加速度



第18図 V_0-x 曲線 ($L=2\text{ km}$, $V_{sch}=40\text{ km/h}$)
 Fig. 18. V_0-x Curves ($L=2\text{ km}$, $V_{sch}=40\text{ km/h}$)

上昇による電力節約は1 kmの時より可成減少する。従つて主電動機容量を小にする点を考慮して $x=3$, $a=2\text{ km/h/s}$ とすれば $U=48\text{ WH/t-km}$ となり、 $x=2.5$, $a=1.5$ の場合の $U=54$ に比して11%節約される。第5図より $x=3$, $a=2$ とすれば $I_e=147\text{ A}$, 又第6図より $I_0=325\text{ A}$ となる故、21ノッチの多段式制御器を使用すれば200 HP×4で充分である。即ち $I_0=1.58 I_1=355\text{ A}$, $I_e=0.7 I_1=157\text{ A}$ となつて差支えない。又

$$I_0 = \frac{325}{225} I_1 = 1.44 I_1 \text{ に対する速度は前節同様にして}$$

$V_0=0.86V_1$, 然るにペンダー計算により $x=3$, $a=2$ の場合の V_0 は第18図より、 $V_0=42\text{ km/h}$ なる故、

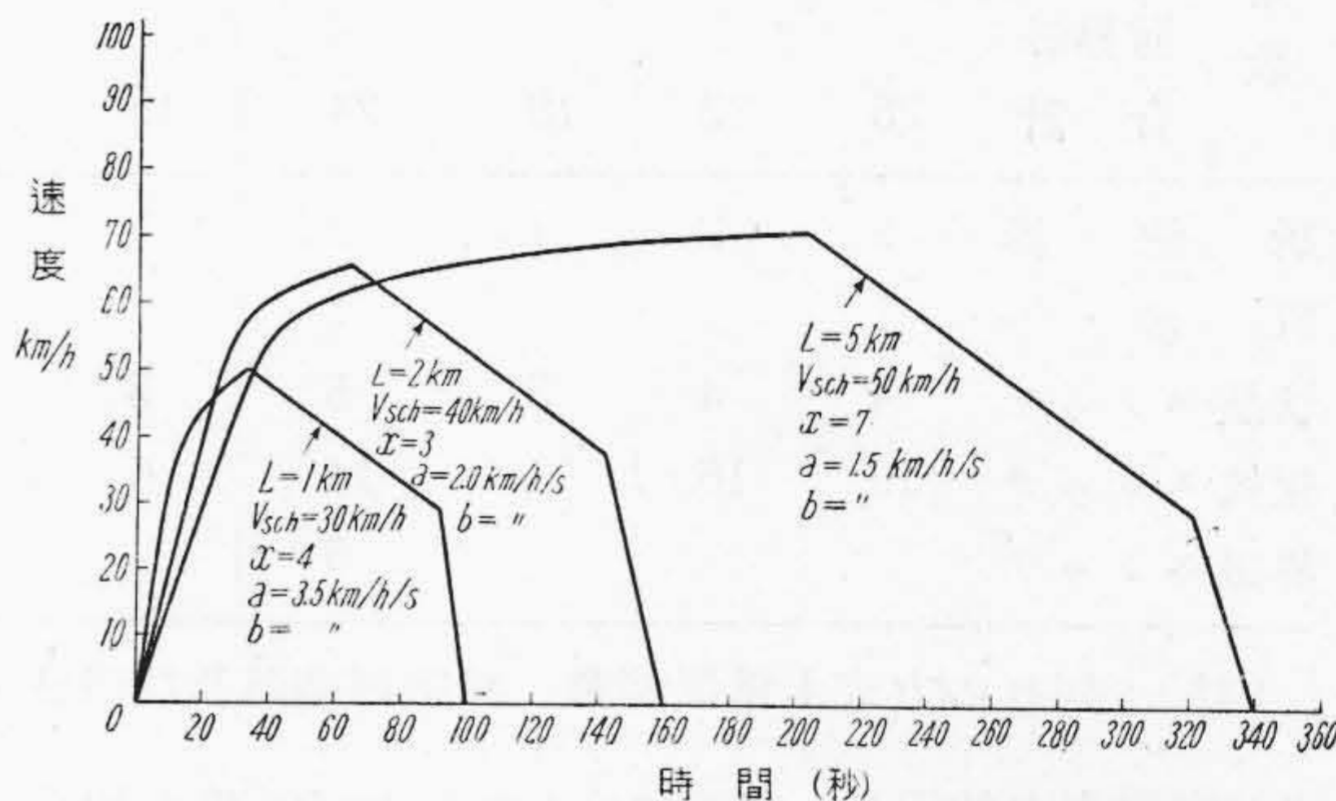
$$V_1 = \frac{42}{0.86} = 49\text{ km/h} \text{ となる。主電動機回転数 } 780\text{ r.p.m.}$$

(675 V), 動輪径 910, 歯数比 2.56 とすれば $V_1=52.2\text{ km/h}$ となつて上記条件を略々満足し、第13図の経済的定格速度に略々一致する。21ノッチとすれば第15図より $a=2$ の場合は余裕を以て円滑起動の領域にある。

(3) 市間鉄道(急行)

列車重量 94 t 列車編成 MT
 駅間距離 5 km 停車時分 20 秒
 表定速度 50 km/h 電車線電圧 1350 V

駅間距離が5 km程度になると高加速度による電力節約の割合は益々小となる。即ち第7図に於て $x=6$, $a=3.5\text{ km/h/s}$ とすれば $U=37\text{ WH/t-km}$ で、 $x=5$, $a=1.5$ のときの $U=38.5$ に対し4%節約されるに過ぎない。故に低加速度として I_e, I_0 を小にする方が有利と思われるが、一方車輛運用の面より見れば各駅停車と



第19図 ペンダー計算による運転特性
 Fig. 19. Performance Curves by Pender's Method

第1表 経済的起動加速度及び制御段数の計算例

Table 1. Calculated Examples of Economical Starting Acceleration-rate and Number of Notches

| 番号 | 用途 | 駅間距離 (km) | 列車編成 | 自重 (t) | 電車線電圧 (V) | 表定速度 (km/hr) | 起動加速度 (km/h/s) | 主電動機 | | | | 定格速度 (km/hr) | 制御方式 | ノッチ数 | 二乗平均電流 (A) | 平方平均電流 (A) | 平均電流 (A) | 消費電力量 (WH/t-km) | 制限条件吟味 |
|----|----------|-----------|------|--------|-----------|--------------|----------------|---------|---------|--------|----|--------------|--------|------|------------|------------|----------|--|--------|
| | | | | | | | | 出力 (HP) | 電圧 (HP) | 電流 (A) | 個数 | | | | | | | | |
| 1 | 市内高速鉄道 | 1 | MM | 94 | 540 | 30 | 3.5 | 100 | 300 | 284 | 8 | 35 | MMC 20 | 21 | 166 | 455 | 49.5 | $I_e=166\text{ A}=0.585 I_1 < 0.7 I_1$ $I_0=455\text{ A}=1.6 I_1 > 1.58 I_1$ | |
| 2 | 市間鉄道(普通) | 2 | MT | 94 | 1,350 | 40 | 2 | 200 | 750 | 225 | 4 | 49 | MMC 20 | 21 | 147 | 325 | 48 | $I_e=147\text{ A}=0.655 I_1 < 0.7 I_1$ $I_0=325\text{ A}=1.44 I_1 < 1.58 I_1$ | |
| 3 | 市間鉄道(急行) | 5 | MT | 94 | 1,350 | 50 | 1.5 | 200 | 750 | 225 | 4 | 49 | MMC 20 | 21 | 115 | 276 | 38.5 | $I_e=115\text{ A}=0.512 I_1 < 0.7 I_1$ $I_0=276\text{ A}=1.23 I_1 < 1.58 I_1$ | |

第 2 表 本邦に於ける多段式制御器の数例

Table 2. Some Examples of Multi-notch Controllers in Japan

| 製作所 | 東 芝 | | 三 菱 | | 東 洋 | | | 川 崎 | 日 立 | | | | |
|-------------------|------------------|---------------|----------------------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------|----|
| 型 式 | PB5 | PB2 | PM | ABFM | ALM | ES 552 | ES 554 | ES 700 | PCM | MMC 20 | MMC 10 | MMC 5 | |
| 電 圧 (V) | 1,500 | 1,500 | 600 | 1,500 | 600 | 1500 | 600 | 600 | 1500 | 1,500/600 | 1,500/600 | 600 | |
| 主電動機 最大容量 (HP) | 250 × 4 | 180 × 4 | 70 × 4 | 200 × 4 | 40 × 4 | 230 × 4 | 150 × 4 | 50 × 4 | 150 × 4 | 500/200 × 4 | 250/100 × 4 | 70 × 4 | |
| 制 御 方 式 | 電磁空気油圧操作 カム軸式 | | 電動機操 作 単 位 ス イ ッ チ 式 | 電磁ス イ ッ チ 式 | 電動機操 作 カム軸式 | 電動機操 作 バーニ ヤ 式 | 電磁空気 操 作 カム軸式 | 電動機操作カム軸式 | | | | | |
| 抵抗短絡方式 | 逆 転 式 | | 一方向 一回転式 | バーニ ヤ 式 | 一 回 転 式 | | | 一方向 二回転式 | 一方向 二回転式 | | 一方向 一回転式 | | |
| 直並列切換渡 り方式 | 橋 絡 式 | | 橋絡式 | 短絡式 | 短絡式 | 橋絡式 | 永久並列 | 橋絡式 | 橋 絡 式 | | 橋 絡 式 | | |
| ノ ツ チ 数 | 直 列 | 13 | 13 | 9 | 12 | 10 | 7 | 7 | 25 | 10 | 11 | 8 | 7 |
| | 並 列 | 12 | 12 | 9 | 10 | 8 | 6 | 6 | 9 | 9 | 10 | 8 | 6 |
| | 弱界磁 合 計 | 25 | 25 | 18 | 24 | 18 | 13 | 13 | 25 | 19 | 21 | 16 | 13 |
| 断 流 器 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 限 流 器 | 1 | | | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 切 換 ス イ ッ チ | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 4 |
| 抵 抗 ス イ ッ チ | 16 | 16 | 11 | 14 | 6 | 7 | 6 | 6 | 13 | 8 | 10 | 8 | 6 |
| 界磁ス イ ッ チ | | | | 6 | | | | | | | | | |

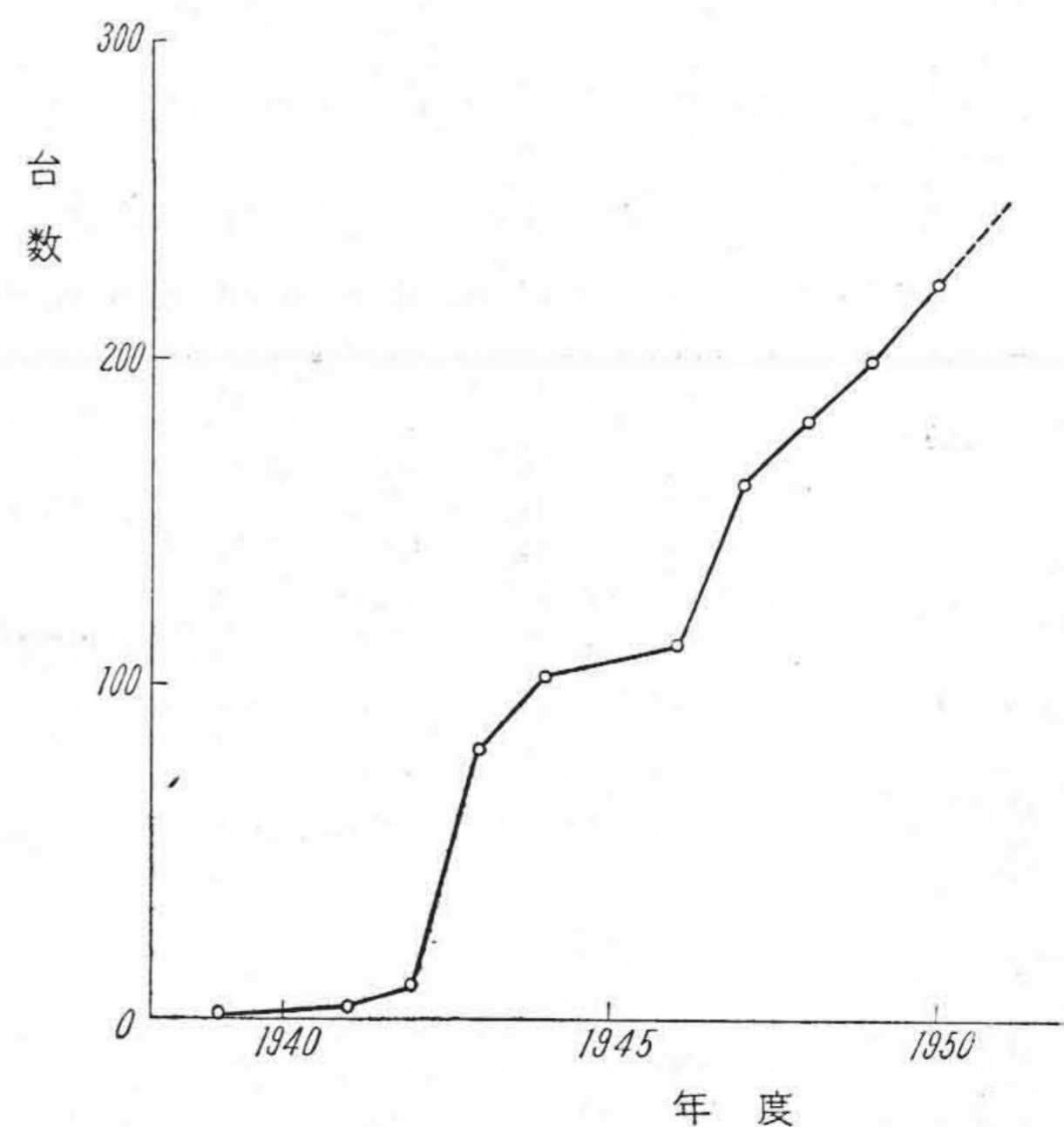
(註) 何れの方式も電気制動、界磁制御器及び限流器付とすることが出来る。

同じ電動車を使用し、必要に応じて起動加速度を加減するのが便利である。前節同様にして $x=6, a=1.5$ とすれば $I_e=115 \text{ A}, I_o=276 \text{ A}, I_o=\frac{276}{225}I_1=1.23 I_1,$
 $V_c=0.92 V_1, V_o=45,$ 故に $V_1=\frac{45}{0.92}=49 \text{ km/h}$ となつて、前節の定格速度と一致する。従つて 21 ノッチ、200 HP×4 で充分である。

これ等の結果を纏めて第 1 表に、又ペンダー計算による運転特性を第 19 図に示す。何れも種々の仮定を前提とするものであるが、大体の傾向は示し得ていると思う。

[VI] 本邦に於ける多段式制御方式

上述の如く高加速度起動には多段式制御方式の採用が有利である。第 2 表は現在本邦に於て使用されている多段式制御方式の主要項目一覧表であつて、制御方式としては、電動機操作カム軸式、電磁空気油圧操作カム軸式、電磁空気操作カム軸式、単位スイッチ式等が採用されており、直並列渡り方式は殆ど大部分が橋絡式である。抵抗区分短絡方式は一方向二回転式、一方向一回転式、逆



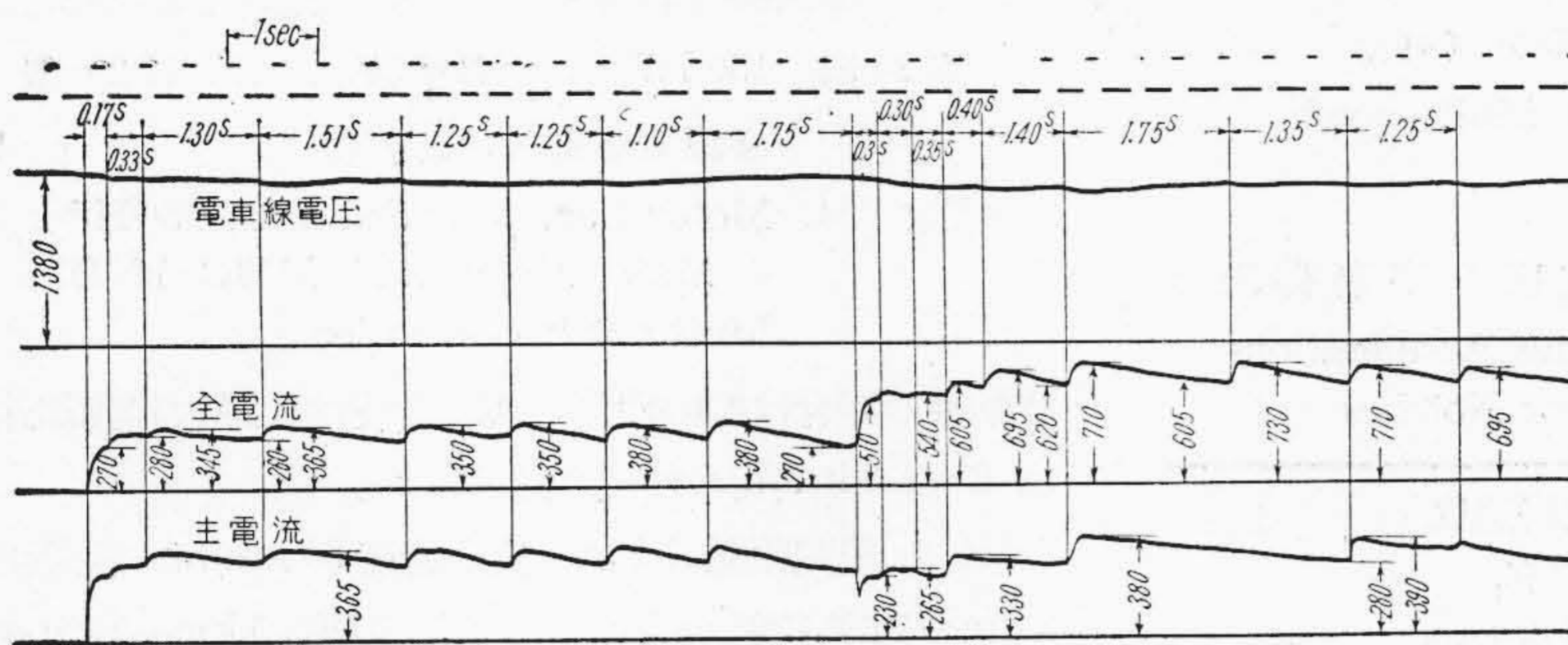
第 20 図 日立 MMC 型多段式制御器製作数量 (1940~1950)

Fig. 20. Hitachi Type MMC Multi-notch Controllers Manufactured in 1940~1950

第3表 MMC 制御器 起動試験結果

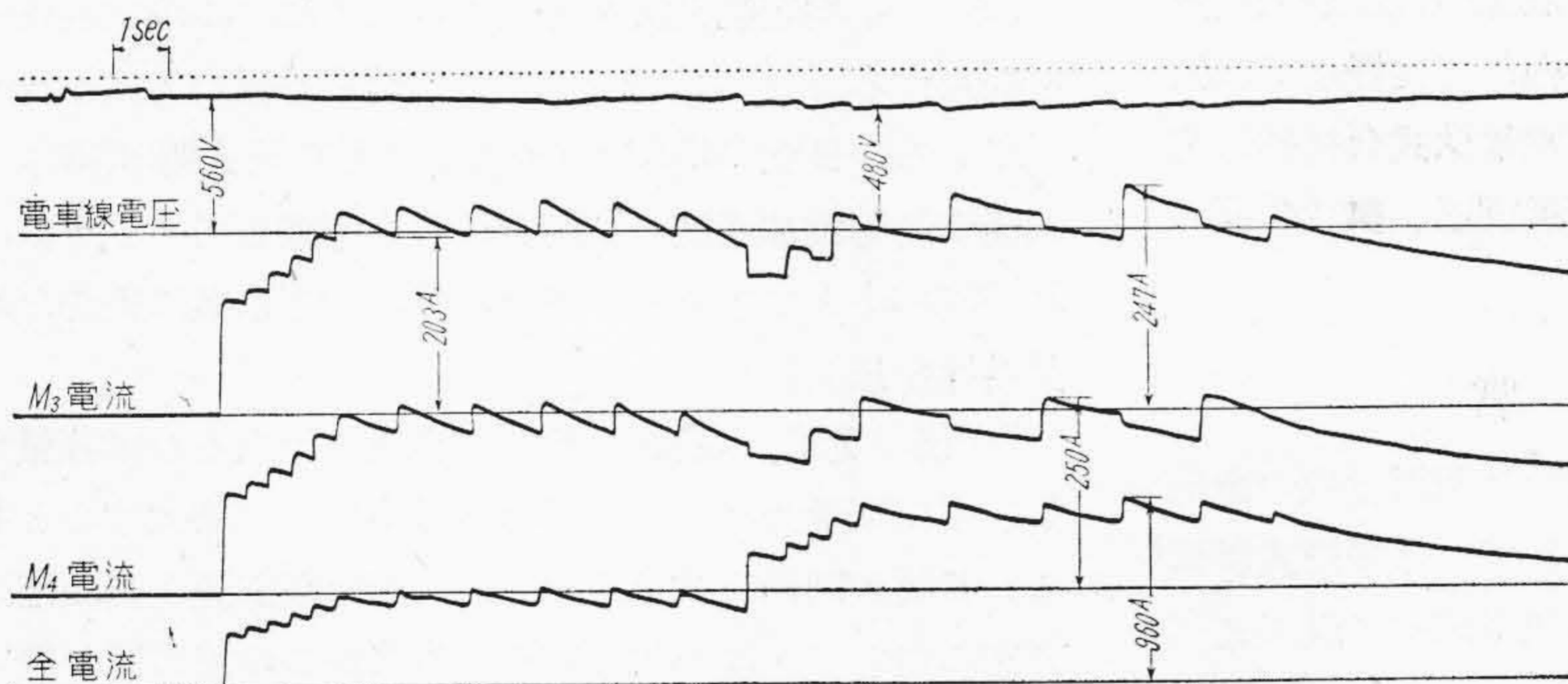
Table 3. Test Results of Starting by MMC Controllers

| 番号 | 会社名 | 列車編成 | 自重 (t) | 電車線電圧 (V) | 主電動機容量 (HP) | 制御器型式 | ノッチ数 | 限流値 (A) | 最大起動電流 (A) | 平均起動電流 (A) | 起動加速度 (km/h/s) |
|----|-----|------|--------|-----------|-------------|--------------|------|---------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1 | 近鉄 | M | 47 | 1500 | 200×4 | MMC H 200 EZ | 16 | 280 | 390 (1.74 I ₁) | 315 (1.4 I ₁) | 3.04 |
| 2 | 阪神 | MTM | 72 | 600 | 50×4 | MMC L 50 | 21 | 112 | 117 (1.58 I ₁) | 113 (1.53 I ₁) | 2.1 |
| 3 | 京王 | MT | 69 | 600 | 150×4 | MMC H 20 | 21 | 200 | 250 (1.51 I ₁) | 220 (1.33 I ₁) | 1.61 |



第21図 起動特性 (MMC H 200 EZ)
電車線電圧 1,500 V 主電動機容量 200 HP×4

Fig. 21. Starting Characteristics (MMC H 200 EZ)
Line Voltage 1,500 V Motor Capacity 200 HP×4



第22図 起動特性 (MMC H 20)
電車線電圧 600 V 主電動機容量 150 HP×4

Fig. 22. Starting Characteristics (MMC H 20)
Line Voltage 600 V Motor Capacity 150 HP×4

転式等があり、ノッチ数は 13-16-18-19-21-24-25 等が用いられている。

この中日立 MMC 制御方式⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾は電動機操作カム軸式で、高速電車用のものは一方向二回転式を採用してある。即ちカム軸は一方向に一回転して直列制御を終り、渡りに於て並列に切換えられてから更に同一方向に一回転して並列制御を終るものであるから、その起動特性は極めて優秀であり、同時にノッチ間の角度を十分に

とり得るので、ノッチ進め作用も極めて確実であるという特長を有している。ノッチ数は前記経済的起動加速度及び制御段数に就て検討した所を考慮し、且特にノッチ刻みの確実なこと、小型軽量なことに重点をおいて路面電車用は 13, 高速電車用は 16 及び 21 とした。必要に応じて界磁制御及び電気制動付とする。第 20 図は日立 MMC 制御器の製作数量を示すもので昭和 14 年開発されて以来今日に至る迄に既に 220 輛分を突破した。

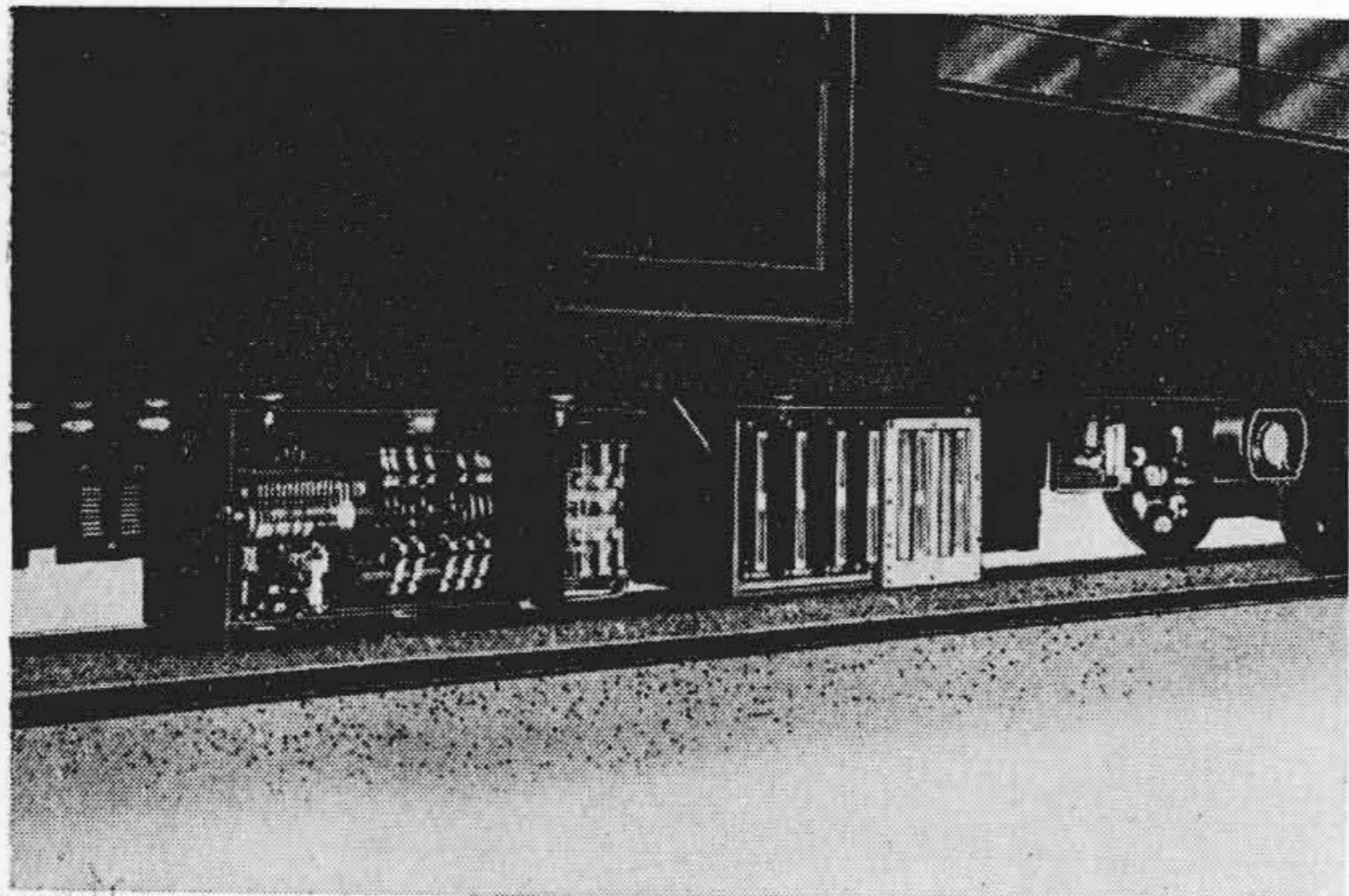
最後に MMC 制御器による現車起動試験の中、比較的最近行われたもの、二三に就て略述する。第 3 表はその試験条件及び結果の概略を示すものである。

1 は国鉄技術研究所によつて行われたもので、近鉄の電動車に就て 4 種の制御器を選び、現車試験によつて制御器起動特性を調査したものであつて、その結果 MMC 制御器が最優秀なりと発表せられた⁽⁷⁾。第 21 図

はそのオシログラムの一例である。

2 は阪神電気鉄道株式会社によつて行われたもので、 $I_0 = 1.53 I_1$, $I_{max} = 1.58 I_1$ で可成重負荷起動であるが限流継電器の動作及びノッチ進みは極めて確実であつた。

3 は最近京王帝都電鉄株式会社及び日立製作所によつて行われたもので、電動車二輛連結とし一輛の主電動機を開放して附随車として試験した。第 22 図はそのオシ



第 23 図 MMC H 20 型多段式制御器
Fig. 23. Type MMC H 20 Multi-notch Controller

第 4 表 経済的起動加速度及び制御段数
Table 4. Economical Starting Acceleration-rate and Number of Notches

| 平均駅 間距離 L (km) | 表定速度 V_{sch} (km/h) | 起 動 加 速 度 a (km/h/s) | 定格速度 V_1 (km/h/s) | ノッチ数 n |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------|
| 1 | 30 | 3~3.5 | 30~40 | 20~25 |
| 2 | 40 | 2~2.5 | 45~55 | 20~25 |
| 5 | 50 | 1.5~2 | 50~60 | 15~20 |

プログラムの一例で、各有効ノッチの限流値及び最大電流ノッチ刻み時間は略々一様であり、極めて良好なる起動特性を示した。第 23 図は京王帝都電鉄株式会社納入電動車に取付けられた MMC H 20 型制御器、第 24 図は同電動車の外観を示す。

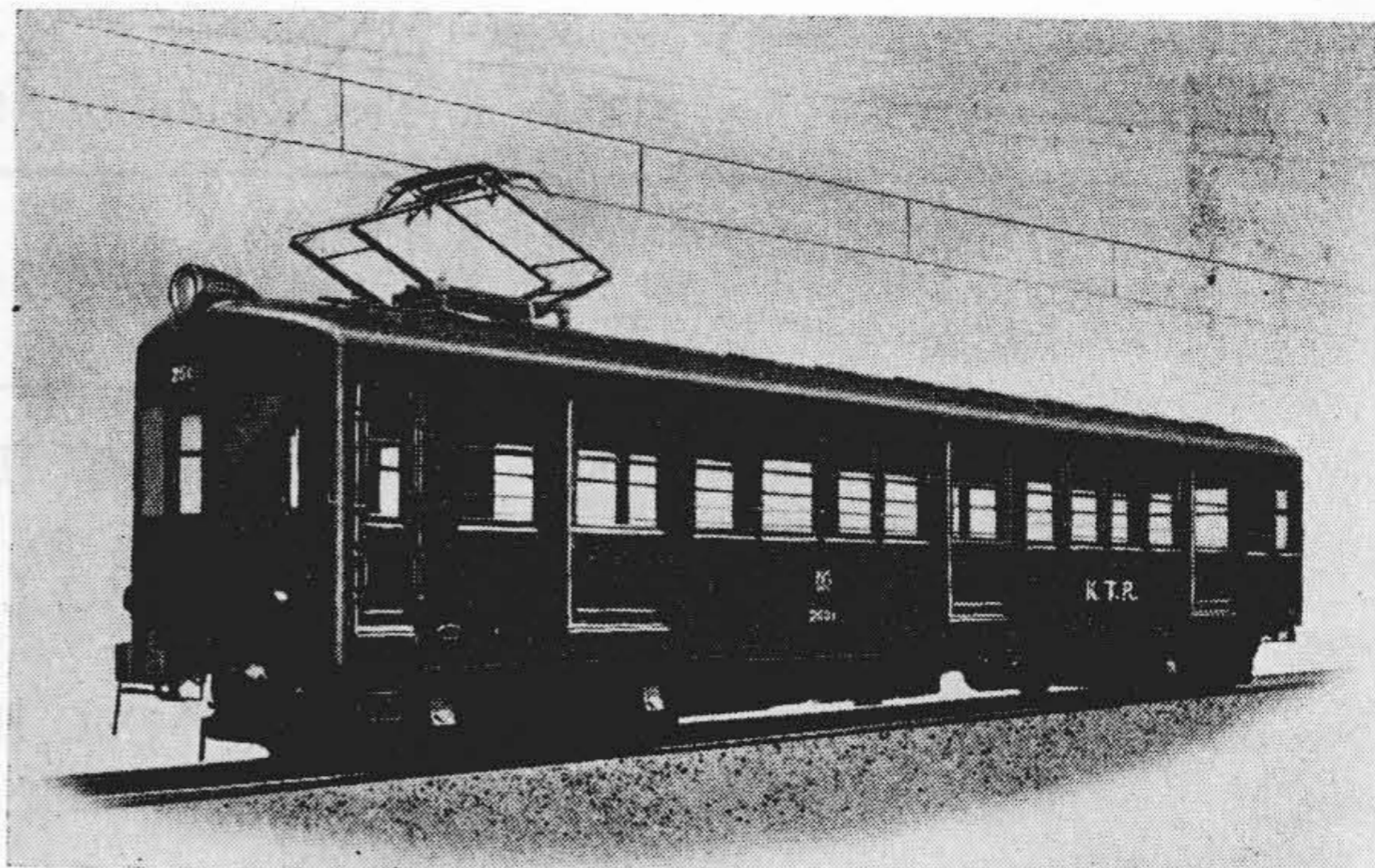
[VII] 結 言

以上高速電車の経済的起動加速度及び制御段数の選定に就て考究し、現在本邦に於て行われている多段式制御方式の概要及び日立 MMC 制御器の現車試験に就て述べた。その結果を要約すれば下記の如くである。(第 4 表)

(1) 駅間距離 1~2 km の場合は起動加速度 2~3.5 km/h/s, 制御段数 20~25 ノッチ、駅間距離 5 km の場合は起動加速度 1.5~2 km/h/s, 制御段数 15~20 ノッチが経済的で起動も円滑に行われる。

(2) 駅間距離が 5 km 以上の場合は高加速度とすることにより、電力消費量の節減は比較的少いけれども、起動尖頭電流を減少する結果、主電動機整流を改善して閃絡事故を減少すると同時に、変電所尖頭負荷を低下する効果がある。又起動時の衝動は著しく減少して乗心地は良好となる。

(3) MM 編成 8 個電動機の場合は 3.5~4.5 km/h/s 程度の起動加速度を出すことが出来るが、MT 編成 4 個



第 24 図 150 HP×4 主電動機, MMC H 20 型
多段式制御器付電動車

Fig. 24. Motor Car, provided with 150 HP×
4 Main Motors and MMC H 20
Multinotch Controller

電動機の場合は動輪滑動の制約を受け、最大起動加速度は 2~2.5 km/h/s 程度に過ぎない。

(4) 駅間距離 1 km—表定速度 30 km/hr, 駅間距離 2 km—表定速度 40 km/hr, 駅間距離 5 km—表定速度 50 km/hr の場合に於ける経済的定格速度は夫々 30~40 km/hr, 45~55 km/hr, 50~60 km/hr 程度である。定格速度に比し最高速度の高いときは界磁制御を併用することが多い。

(5) 平均起動電流を増大するためには多段式制御器を採用することが必要であつて、現在各種の方式が行われている。日立 MMC 型高速電车用多段式制御器は上記経済的起動加速度及び制御段数を考慮してノッチ数は 16 及び 21 としてある。実車試験の結果は共に優秀な起動特性を示した。

「今後の電車」の設計に於ては自重は出来るだけ軽量化し、単位重量当りの主電動機容量 kw/t を増大すると共に、多段式制御方式を採用して円滑な高加速、高減速の方向に進むべきは当然である。本文がこの点に関し読者諸氏の御参考となれば幸これに過ぎるものはない。

最後に本文中ノッチ数と平均起動電流及び起動時衝動との関係を調査した古山義雄君の労を多とする。又実車試験を施行せられた近畿日本鉄道株式会社、阪神電気鉄道株式会社及び京王帝都電鉄株式会社各位に対し厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) T. A. I. E. E. 66, 247 (1947)
- (2) 平田：日立評論 33, 523 (1951-7)
- (3) 平田：同 上 31, 187 (1949-5)
- (4) 平田：同 上 23, 135 (1940-2)
- (5) 平田：同 上 22, 423 (1939-7)
- (6) 平田：同 上 20, 761 (1937-12)
- (7) 堀端：電気車の科学 2, 4 (1949-8)