D→ 最近のドイツ技術

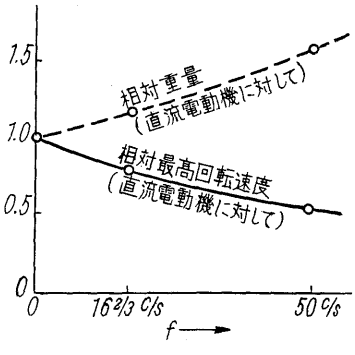
整流器から給電される車両用電動機

Traction Motor Operated from Rectifierd AC Supply

I. まえがき

従来の車両用電動機は直巻整流子電動機であり，この特性は車両運転の要求に最適であった．今までは車両用電動機は直流運転と交流運転のどちらか一方に適したものだけが使用されてきた．直流車両用電動機と交流車両用電動機は本質的に二つの特長に区別される。

一つは交流車両用電動機の固定子が交流磁束を考慮して積層されていることである．しかし構造におけるこの違いは決定的なものではなく，もう一つの著しい特長は根本的なもので，交流車両用電動機の場合は，短絡された電機子コイルに誘起される変圧器起電力により，1極あたりの磁束に限界があるということである．それゆえに周波数の増加につれて1極あたりの磁束を減らし，等しい出力をだすためには極数を増さなければならない．極数を多くすると整流子直径が大きくなり，最高許容整流子周速を考慮すると，回転速度を減少させなければならない．回転速度を低くすると，電動機の容積と重量が増加する．この周波数による電動機の大きさの変化を第1図に示す。



第1図　車両用電動機の最高回転速度，重量と電源周波数との関係

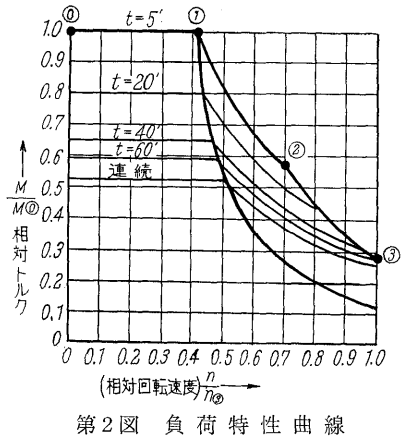
Fig. 1. Relation between maximum speed or weight of traction motor and net frequency

車両が商用周波数の交流で運転される場合には，整流器により直流に変換して使用される．この場合問題になることは，整流器の後方に発生する交流電圧が無視できない大きさになることである．これが電動機の出力特性にいかに影響するかを調べ，その防止対策を考えるのがこの論文の目的である。

II. 出力特性に対する一般的評価

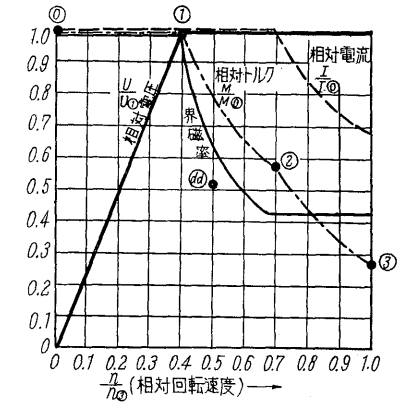
車両用電動機の出力性能は寿命と運転性能の二つの評価，すなわち許容運転範囲の大きさならびに熱的な過負荷能力から決められる．出力性能は三相交流電動機の定格出力のように，1点で示されるのではなく，図表として出力図表（第2図）で示される．許容運転範囲の限界は負荷の電気的特性（⓪～②：最大許容電流から，①～③：最大許容電圧から，②～③：最小許容界磁率から）から第3図のように示される。

第2図，第3図に示したものはすでに述べた寿命と運転性能の評価を判断しての結果であり，電動機がある運



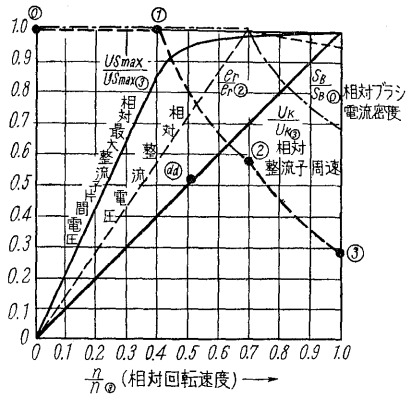
第2図　負荷特性曲線

Fig. 2. Load characteristic curves



第3図　負荷特性曲線の限界と機械的特性，電気的特性との関係

Fig. 3. Relation between limits of load characteristic curve and mechanical or electrical characteristics



第4図　負荷特性曲線の限界，整流子負荷特性，直流運転

Fig. 4. Limits of load characteristic curve, load characteristics of commutator, DC drive

転計画に適しているかどうかの判断のために決定的なものである．しかし寿命の評価の尺度となる熱的な過負荷能力は，負荷の許容される大きさと時間の関係で決まるものであり，絶対的な限界ではない．負荷の絶対的限界—運転範囲の限界—は整流子の責務で定まる．第4図は整流子責務に対して尺度となる特性値の経過を示している．ここでは集電，整流，フラッシオーバに対する安全性が問題になる。

集電に対する特性値はブラシ電流密度と整流子周速である．ブラシ電流密度は整流子の平面化をおこす可能性のある静止状態での責務を考慮して限界をおいている．整流子の周速はブラシ—整流子の接触が安定していることで限界が引かれる。

整流の際のブラシと整流子の責務に対しては，短絡電機子巻線中の誘起電圧が尺度となる．これは補極のない小形回転機では整流電圧と同一である．また整流電圧はおのおののコイルや，おのおのの時間ではなく平均値として補極によって補償されるため，補極付回転機でも整流電圧は制限され，許容とみられる値は補極の補償の良否により大きく変動する．整流電圧は第4図の点②で最大になるが，機械の飽和が小さいほど②と③の値の差は小さい。フラッシオーバに対する安全性を示す特性値は最大整流子片間電圧である．それが2子片間のアークを保持するに必要な電圧を越えるとフラッシオーバの可能性ができてくる．整流子片間電圧を調べる場合には，電機子反作用の影響を考慮しなければならない．補償巻線は電機子の磁束を平均値としてのみ補償するだけなので，補償巻線付機械でもこれを考慮しなければならない．整流子片間電圧は点③で最大になり，機械が良く補償されているほど②と③の値はたがいに近づく。

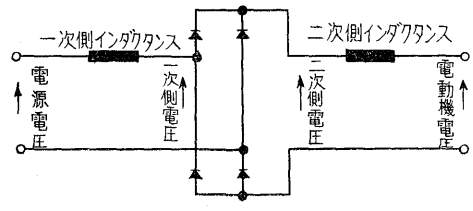
直流運転の場合の整流子の責務に対する考察は交流運転（整流器から給電）においても変圧器起電力を付加的に考慮することによって同様に行なわれる。

今までの検討で出力特性の評価とその判断のための尺度が定義ずけられ，それから車両用電動機の設計のための一般的方針が導きだされた．つぎに整流器運転の場合に電動機の出力特性にどのような付加的影響が加わるかを調べる。

III. 整流器運転の出力に対する影響

整流器運転の場合に無限に多くの高調波が生じるが，どの高調波が基本波に対して重要であるか考慮する。

第5図は等価回路を示し，この入力側に大電源容量をもった正弦波電圧を入れ，出力側に直流電圧として電動機の回転による電圧をおく．整流器の前後のリアクタンスは考慮されるが，抵抗は重要でないので無視することとする。



第5図　単相整流器運転等価回路

Fig. 5. Equivalent circuit of single phase rectifier drive

第6図からわかるように，整流器の前後のリアクタンスと電動機の負荷との関係は二つの無次元の大きさ

$$Z_1=\frac{\omega L_1}{\frac{U_0}{I_0}},\quad y=\frac{L_1}{L_2}$$

ω：電源周波数

L_1：一次側リアクタンス

L_2：二次側リアクタンス

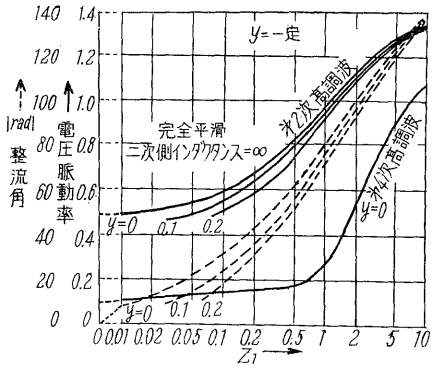
U_0：電動機電圧

I_0：電動機電流

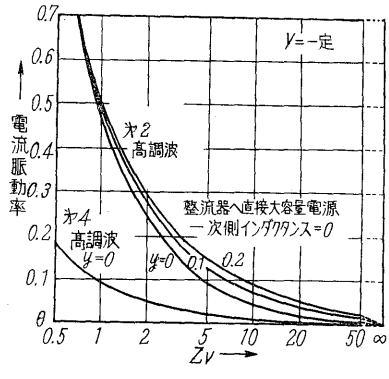
で表わされる。

Z_1は始動（電圧—小，電流—大）から最高速度（電圧—大，電流—小）までの範囲で変わる．整流器の前方のリアクタンスは一般に車両用変圧器を考慮することで充分である．整流器前後のリアクタンスの関係としてのyは飽和でリアクタンスが変わるので，負荷に影響されるのみである．始動の場合にはZ_1は大きくなるが，脈動による交流分電圧の絶対値が小さいので無視してよく，一般的に$Z_1<1$の範囲を考えれば充分である．第2高調波

と第4高調波の電圧脈動率をこの範囲でおたがいに比較すると，第4高調波と第2高調波との比は大体¼で，リアクタンスは 2：1 であるため，第4高調波の電流脈動率は第2高調波のそれより大幅に小さくなる．このことから車両用電動機の責務としては第2高調波だけが重要であり，それ以上高次の全高調波は無視することとする。



第6図 電 圧 脈 動 率
Fig. 6. Pulsating voltage factor

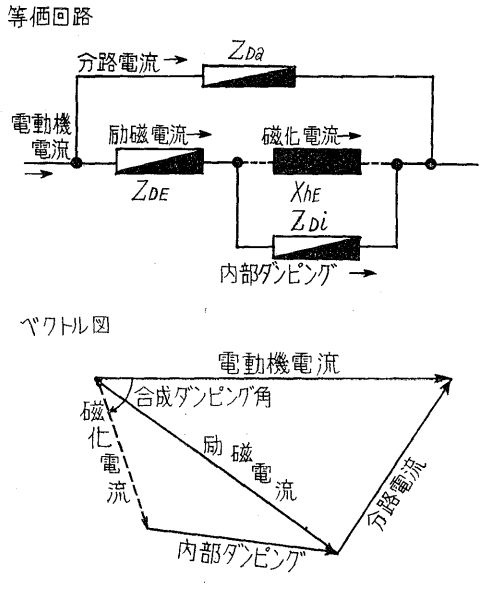


第7図 電 流 脈 動 率，電 動 機 電 流
Fig. 7. Pulsating current factor, motor current

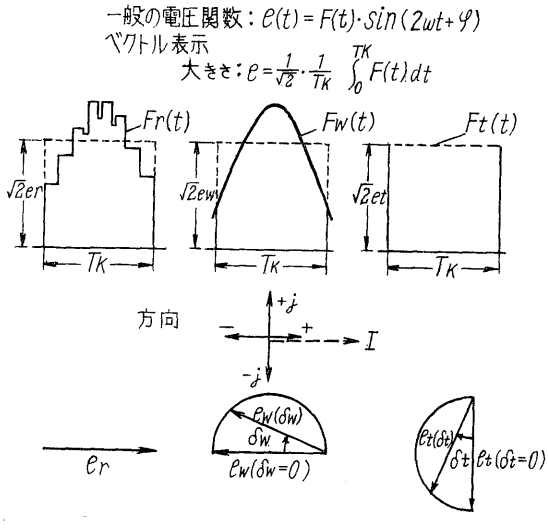
第7図は第6図に類似して無次元の特性値 $Z_\nu=\dfrac{\nu\omega L_2}{U_0/I_0}$ y（ν：高調波の次数）と電流脈動率との関係を示している．第7図の図表からある電流脈動率を得るに必要な Z_ν を知ることができ，Z_ν の式により必要な二次回路の全インダクタンス L_2 を求めることができる。

脈動率として重要な第3の形は磁束の脈動率である．電流脈動率から磁束の脈動率を推測するために，磁気回路のダンピングと飽和を考慮すべきである．ダンピングの場合には第8図に示すように，内部と外部のダンピングに分けられる．内部ダンピングはすでに機械の中にあるダンピング Z_{Di} であり，外部ダンピングは付加的に励磁巻線に並列なインピーダンス Z_{Da} として作ることができる．ダンピングを考慮して実効磁化電流が決まると，はじめて磁気回路の飽和を考慮して磁束脈動率が決められる。

交流運転の場合ブラシ—整流子の責務は直流を整流する責務の上に，さらに大きな責務が電源周波数の2倍の整流電圧，変圧器起電力，補極磁束電圧によって課せら

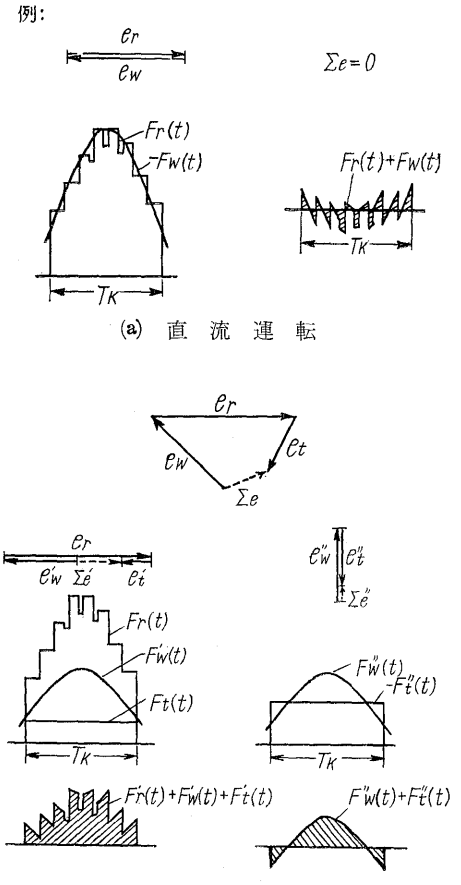


第8図 電流脈動率，励磁と磁化，第2高調波
Fig. 8. Pulsating current factor, exitation and magnetization, 2nd harmonic



I：電動機電流
ω：電源角周波数
T_K：1スロットの整流周期
δ：ダンピング角
e_r：整 流 電 圧
e_ω：補極磁束による電圧
e_i：変圧器起電力

第9図 1スロット内の整流時コイルの電圧，個々の電圧，交流運転
Fig. 9. Voltage of commutating coils in one slot, each voltage, AC drive



第10図　1スロット内の整流時コイルの電圧，合成電圧

Fig. 10. Voltage of commutating coils in one slot, resultant voltage

れる．これらは一般に互いに位相が異なり，平均値として打ち消すことができないが，整流時のコイル中で種々の時間の経過にかかわらずベクトルで示されることを第9図で示している．これらのブラシ—整流子の責務を比較するための尺度は第10図(a)に示すように整流時のコイルにおける実効残留電圧である．整流電圧に対する補極磁束の最適の調整は第10図(a)に示すように両電圧を平均的に対抗させ，実効残留電圧を最小にするものである．直流運転の場合と同様な方法が交流運転の場合にも第10図(b)が示すように可能である。

今まで述べてきた直流運転に対する整流器運転の場合の付加される責務（最大整流子片間電圧$U_{s\,max}$，実効電流I_{eff}，実効残留電圧Δe）は次の各式で表わされる。

最大整流子片間電圧：

$$U_{s\,max}=U_{s\,max0}+U_{s\,max2}=U_{s\,max0}\cdot V_{us}$$

$$V_{us}=1+\frac{\sqrt{2}\,w_{i2}}{f_s}\cdot\sqrt{\left(f_s-1+\frac{w_{\varphi 2}}{w_{i2}}\cos\delta\right)^2+\left(\frac{w_{\varphi 2}}{w_{i2}}\sin\delta-Z'_A\right)^2}\quad\cdots\cdots(1)$$

実効電流：$I_{eff}=\sqrt{I_0^2+I_2^2}=I_0\cdot V_I$

$$V_I=\sqrt{1+w_{i2}^2}\quad\cdots\cdots(2)$$

実効残留電圧：$\Delta e=\sqrt{\Delta e_0^2+\Delta e_2^2}=\Delta e_0\cdot V_{\Delta e}$

$$V_{\Delta e}=\sqrt{1+w_{i2}^2\cdot\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0}\right)^2}\quad\cdots\cdots(3)$$

$U_{s\,max0}$，$U_{s\,max2}$，I_0，I_2，Δe_0，Δe_2は各部の直流分と第2高調波分を示す。

w_{i2}：電流脈動率，$w_{\varphi 2}$：磁束脈動率，

$f_s=\dfrac{\text{主磁束}+\text{電機子磁束}}{\text{主磁束}}$（磁束のとがり係数），$\delta$：ダンピング角，$Z'_A=\dfrac{\alpha_i X_A}{U_0/I_0}$（$\alpha_i$：極弧度比，$X_A$：電機子リアクタンス），$\varepsilon_0=\dfrac{\Delta e_0}{e_{r0}}$，$\varepsilon_2=\dfrac{\Delta e_2}{e_{r2}}$

ここでV_{us}，V_1，$V_{\Delta e}$なる増加係数をいかにしたら小さくなるかを検討する。

IV. 整流器運転時の過酷な責務を抑制する方法

高調波により生じる過酷な責務を減少させるには，一方は電流脈動率そのものを下げることであり，他方は与えられた電流脈動率に対してその作用を小さくすることである．第一の方法は整流器の後方に平滑リアクトルなどを入れてインダクタンスを増すことにより，電流脈動率を減少させることはできるが，電流脈動率を零にするためにはリアクトル無限大となるため，効果と費用に関してある最適値がある．それゆえ，ある電流脈動率は常に存在するため，電流脈動率の作用を減少させる第2の方法が重要になってくる。

この第2の方法は

(1) 補極磁束を完全なダンピングなしとすること。

(2) 主極磁束を完全に平滑にすること，$\dfrac{w_{\varphi 2}}{w_{i2}}\to 0,\delta\to 90°$

(3) 完全に電機子磁束を補償すること，$f_s\to 1$

を行なうことにより増加係数は$V_u\to 1$，$V_{\Delta e}\to\sqrt{1+w_{i2}^2}$に近づき，理想的な機械になる。

整流器運転の回転機を分類すると，一方は平滑リアクトルによって電圧脈動が実際にかからないようにするものが考えられる．このときは，電動機は限界の場合として直流電圧，脈動電流で運転される．直流電動機と脈流電動機はこの分類に属する．他方は交流運転からきており，この特長は完全な電圧脈動が電動機にかかることである．ここでは平滑リアクトルはなく，自己の主極インダクタンスによってまかなっている．この場合には，高調波はトルクに寄与するが，交流車両用電動機の場合と

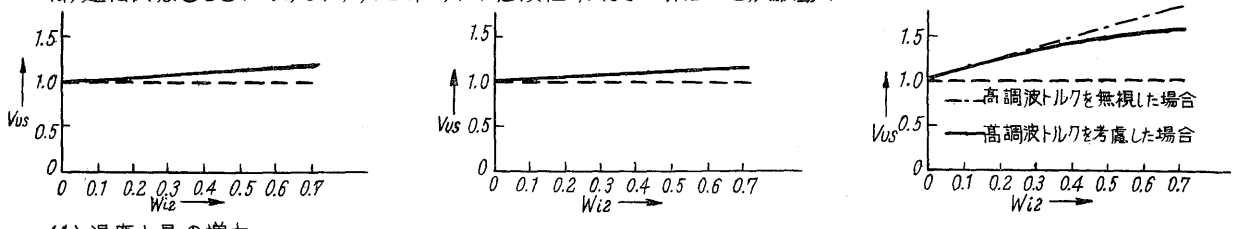
第1表 整 流 器 運 転 と 出 力 特 性

Table 1. Rectifier drive and output characteristics

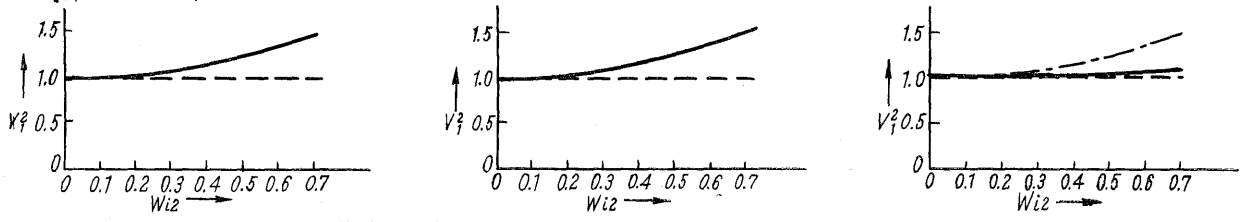
直流電動機	脈流電動機	脈圧電動機

1. 同じ出力特性の場合の増加責務

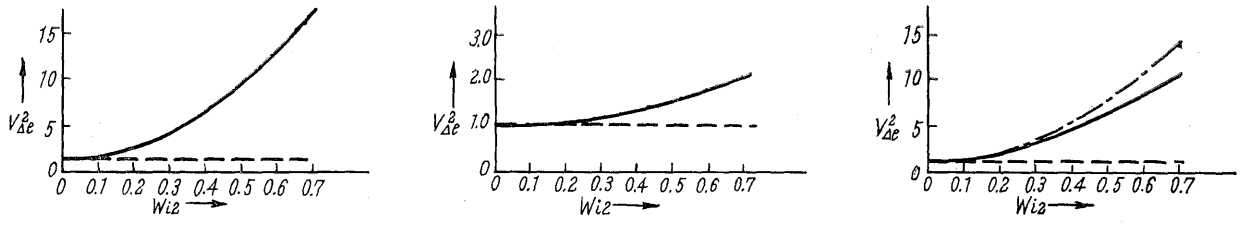
(a) 運転状態②と③におけるフラッシュオーバの危険性の大きさ　W_{i2}：電波脈動率



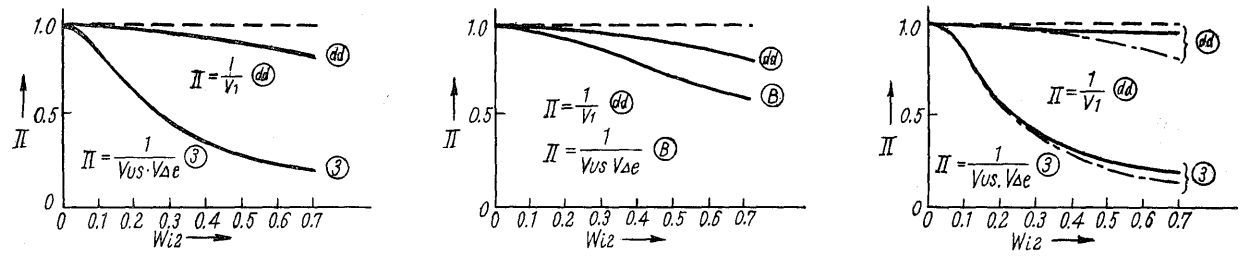
(b) 温度上昇の増大



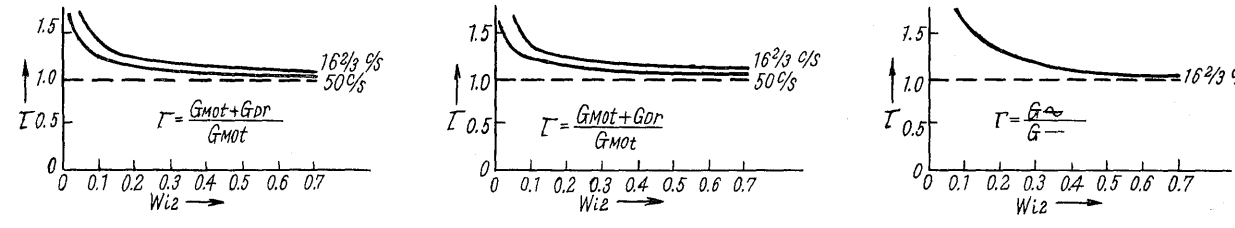
(C) 運転状態②と③における整流子責務の大きさ



2. 同じ責務の場合の出力係数 Π

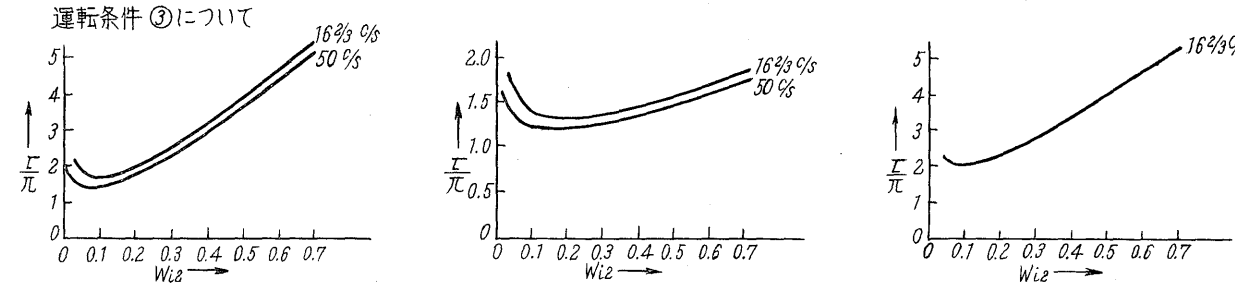


3. 出力重量 Γ の増大　(G_{MOT}：電動機重量, G_{DR}：リアクトル重量)



4. 出力重量比 Γ/π の関係

運転条件 ③について



同じように，ただ1点の運転状態でしか変圧器起電力を補償できない不利な点がある．この種の電動機の特色は脈動電圧での運転であり，それは脈圧電動機とよばれる。

直流電動機，脈流電動機，脈圧電動機の三つの構造の増加係数について検討してみると第1表のように，いずれの増加係数についても脈流電動機が最適である。

次にもう一つの判断のための量はいわゆる出力重量の関係式 Γ/Π である．これはほかのものと同様に無次元の値であり，重量増加の出力減少に対する比として表わされる。

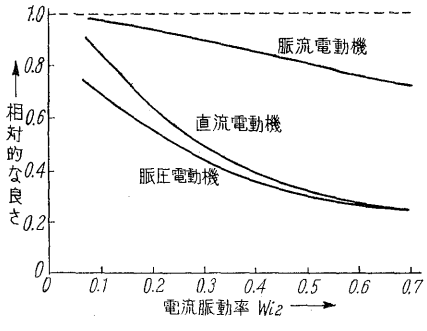
電流脈動率に対する係数 Γ/Π の関係を動作点③で考えると，第1表の4.に示すようになる．この大きさは整流器運転の場合に必要な費用増加の尺度と見なすことができ，Γ/Π の値はある電流脈動率のところで最低値をもっている．これは最適な電流脈動率が存在することを意味するが，その脈動率は比較的小さく，脈動率の高いところではかなりの費用増加があることを示している．電動機として最適なものの条件は，

(1) Γ/Π の値が最も小さいこと。

(2) その最小値が大きな電流脈動率のところにあること。

(3) 電流脈動率に対するその経過が平らであること。

であり，これらすべての要求を脈流電動機が最も満たしてる．また三つの構造について理想的な電動機に対する相対的な良さが第 11 図に示されているが，脈流電動機の良さは絶対的にみても理想に最も近いのみならず，電流脈動率によってわずかしか変化しないことが明らかである。



運転条件③

架線周波数：16⅔ $\sim$

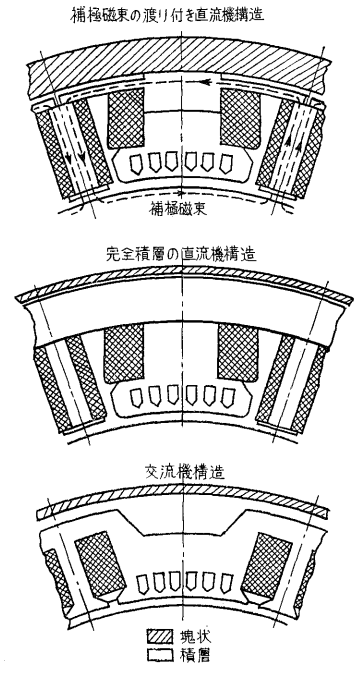
判　　定：性能と費用

$$良さ=\frac{性能}{費用}=\frac{\Pi}{\Gamma}$$

$$相対的な良さ=\frac{性能}{費用}の理想的な場合との比$$

第11図　整流器運転の電動機の構造の比較

Fig. 11. Comparison of motor-construction on rectified power supply



第12図　脈 流 電 動 機 の 構 造

Fig. 12. Construction of pulsating current motor

最適の脈流電動機に対しても，それ自身種々の構造でつくることができる（第12図)。

(1)　補極磁束の渡り付直流電動機構造

(2)　完全積層の直流電動機構造

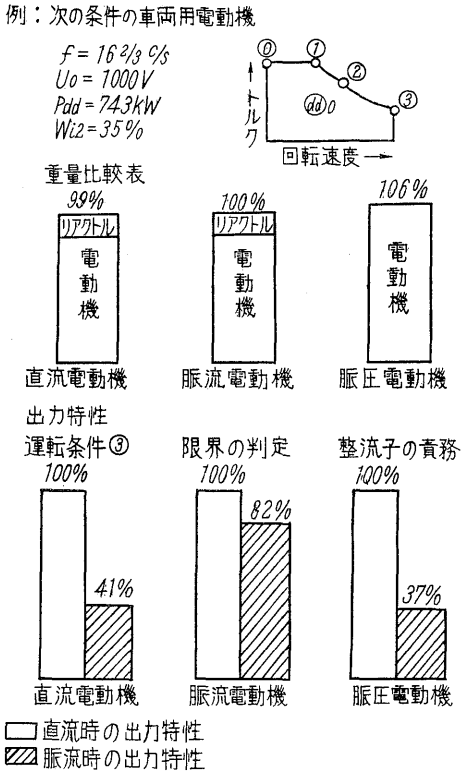
(3)　完全積層の交流電動機構造

第1の方法は補極磁束の交流分にダンピングのない路を造るという考え方に基づいている．この方法の構造上の難点は，広い空間と高価な抜型を必要とし，鉄板の歩止りが悪いことである．このように高価になるにもかかわらず，直流磁束と交流磁束との分離が不完全にしかできず，他の2方法に対して不充分である。

他の二つの構造は電気的には全く同価値である．完全積層構造にするときの価格が交流車両用電動機の固定子の場合に高く見積られているようであるが，交流車両用電動機の kg あたりの価格が高いことは本質的には積層構造のためではなく，極数が多いためである．脈流電動機は極数では直流電動機と同じであり，それほど価格は高くならない．交流電動機構造は直流電動機に対して固定子寸法を小さくでき，それによって重量を軽くできる利点がある．その理由はスロット内の巻線の放熱が原則として極の背中にあるものよりも良いということによる．さらに大きな利点として，完全な一体抜型が可能で量産の場合には価格低減が可能である．そのほか交流電

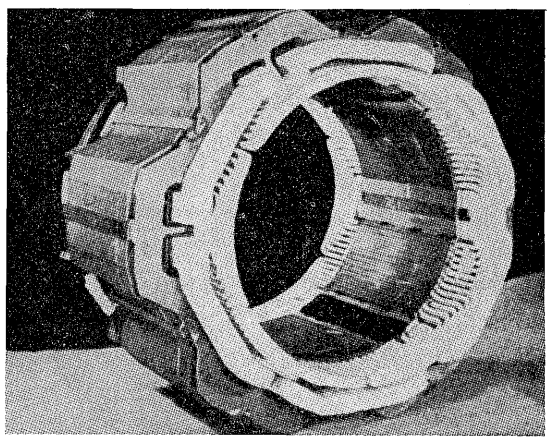
動機構造の場合には直流電動機構造に比較して特に合理的な工程をとることができる．それゆえ，交流電動機構造は脈流電動機には最適なものとみなされる．それは重量低減のほかに，寿命と運転性能に対しても価値がある。

第 13 図はこのような脈流電動機，直流電動機，脈圧電動機間の重量比較を示している．同じ直流出力の場合には，3 者とも重量的にはほとんど差がないが，脈流運転



第13図　整流器運転の電動機の構造の比較

Fig. 13. Comparison of motor-costructions on rectified power supply



第14図　脈流車両用電動機 MB 302/22 の固定子鉄心と巻線

Fig. 14. Stator core and coil of pulsating current traction motor MB 302/22

の場合の出力性能には大きな差がでてくる．この比較は電源周波数 16⅔ ~/s で行なわれているので，50~/s の運転の場合には，直流電動機と脈流電動機に対する関係は変わらないが，脈圧電動機にはさらに不利なものになる。

交流電動機構造の脈流電動機はシーメンス社によりはじめてドイツ国鉄の 2 周波数機関車 E 320.21 に実用された．第 14 図はこの電動機の固定子を示している．機関車 E 320.21 はこれらの電動機を付け Saarbrücken と Kaiserslautern 間の急行列車に広く使われている．これは 16⅔ ~/s 電源で高速度という整流器付き機関車に対して最も不利な条件のもとでも安定な運転を続けている。

（原著：Gerhard Calvi, Jürgen Kuhlow: Der Bahnmotor bei Gleichrichterpseisung. Elektrische Bahnen. **34** H 10 (1963)
抄訳者：川崎工場設計部　黒川凱雄）

（49）ページからつづく

題　　名	所　属	執　筆　者	発　表　機　関	
インパルスコロナの測定法（第3報）	中央研究所	井関　昇 倉橋晟 松浦清	電気四学会連合大会　講演および論文集　昭40・4・2～5	電気学会
油入絶縁におけるコロナ開発電位傾度	中央研究所	井関　昇 倉橋晟 松浦清	電気四学会連合大会　講演および論文集　昭40・4・2～5	電気学会
同期式1サイクルしゃ断器	開発部	新田義雄 清国宣明 田中信一	電気四学会連合大会　講演および論文集　昭40・4・2～5	電気学会
84kV 3,500MVA 常時充電式空気しゃ断器のしゃ断特性	開発部	中村博 白井禎一郎 金田元四郎	電気四学会連合大会　講演および論文集　昭40・4・2～5	電気学会
計装の実際（ボイラ）	計測技術部	佐武昇	計装の進め方（単行本の一部）昭40・3月末	日本電子工業振興協会
電動機制御回路のシーケンスの見方	電機技術部	永江正臣 鈴木勇	電気と工事誌　昭40・3および4月号	オーム社
船の電気推進装置	川）設計部	鈴木慶三	新電気誌　昭40・3月号	オーム社

（63）ページにつづく

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。