U.D.C. 621.313.3-8 : 629.113

自動車用交流発電機の一考察

A Study on AC Generators for Automobile Use

渡辺 晃* 森岡 健*
Akira Watanabe Takeshi Morioka

内 容 梗 概

自動車用充電発電機には一般に直流分巻発電機が使用されているが，定回転で運転される回転機と異なり広い使用回転範囲，負荷の変動，振動，高温度などの過酷な条件で使用されているので整流や機械的強度に問題がある。この問題を解決する方法として交流発電機を対象に，そのすぐれた点，特殊な点について考察を加えるとともに実車試験によってそのすぐれた性能を確認した。

1. 緒 言

自動車用充電発電機には，特に小形のものを除いて一般に自動電圧調整器を用いた直流分巻発電機が使用されている。

近年乗用車の普及，トラック輸送の発達により自動車が急激に増加し，市街地では交通難のために低速で走ることが多くなっている。一方郊外地では高速道路の発達が車速を上昇させている。このため発電機は低い回転から高い回転まで広い回転範囲で使われるようになってきた。また発電機の所要出力は点灯負荷の増加，カーヒータ，カークーラ，パワーシートなどの開発により増加している。これらの状況に対し発電機を大形化し，対処してゆくことは自動車の技術的な進歩に逆行することになるため，小形軽量化の可能な新しい充電発電機が要望されて，そこでわれわれは近年著しい進歩をとげた半導体を組み合わせた自動車用交流発電機を開発しあらゆる角度から性能を検討した。本論文ではその結果の一端を紹介し参考に供する次第である。

2. 自動車用充電発電機の特殊性

自動車における電力系統は第1図に示す構成となっている。点灯，点火などの定常および非定常負荷に電力を供給するとともに，蓄電池を充電する充電発電機はエンジンよりベルトで駆動されるために一般の電源用発電機と異なった特殊性を有する。そのおもなものを列挙すれば次のようである。

（1） 回転数は車速，いいかえればエンジンの回転によって大幅に変化し0～約10,000 rpm の範囲を変動する。

（2） 昼間と夜間，また蓄電池の状態によって発電機負荷が大きく変動する。この変動する負荷に対して適切な出力を供給しなければならない。

（3） エンジンに直接取り付けられる関係上周囲温度が高く，また装着位置によって局部的に加熱される場合もある。

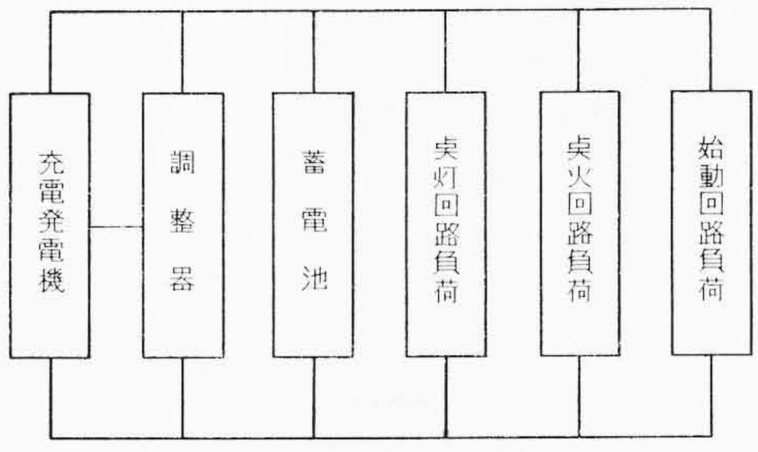
（4） エンジンの振動を直接うけ，かつほこりにさらされる。

（5） 使用電圧は組み合わせ蓄電池に対応して定められ，一般に6～30Vの低電圧である。

以上のように自動車用充電発電機は一般の発電機と非常に異なった特殊な使用状態にあり，この過酷な条件に対し十分な性能が保証されなければならない。

3. 充電発電機の交流化

自動車にはエンジン停止中の電力供給源として蓄電池を使用しているため，またエンジンの始動に直流直巻電動機を使用しているため，充電発電機の出力は直流でなければならない。このため今までは直流分巻発電機が使用されてきたが，低速で走るときは出力が小さく，また高速で走ると整流が悪くなり刷子の摩耗が大きく，それに対処するためには発電機の大形化が避けられない。これに反して交流発電機では低速時の出力が大きく，かつ回転子にはスリップリングを介して励磁電流を流すのみであるから，整流の問題も解消するので広い回転範囲にわたって，良好な性能を有する充電発電機の製作が可能となる。以下充電発電機として直流発電機と交流発電機について比較考察を行なってみる。



第1図 自動車における電力系統

3.1 アンペアコンダクタ

直流発電機と交流発電機では細部について異なった点はあるが，機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換することについては同一の機能をもち，また構造的にも固定子と回転子が一つの回転軸に対して対称的に配置されており両者には原則的な共通点がある。その電気出力は次の出力方程式で与えられる[1]。

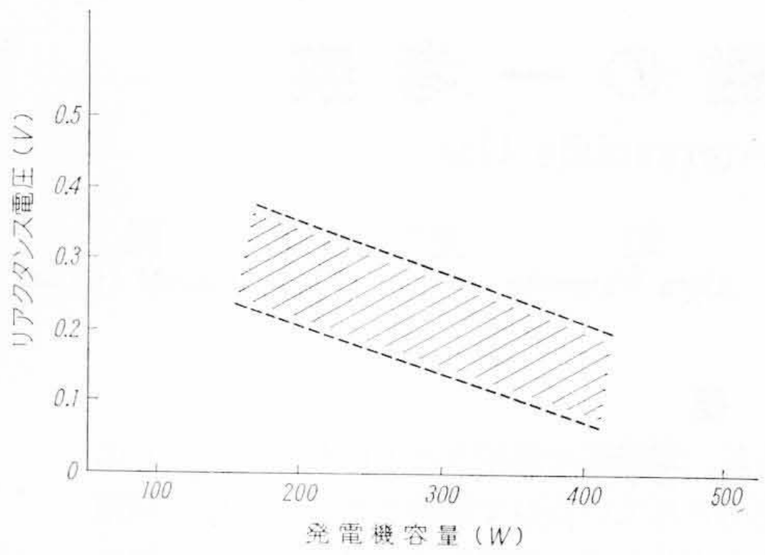
$$W=KB_0(AC)_0D^2ln \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに W：出力
K：係数
B_0：磁束密度
$(AC)_0$：アンペアコンダクタ
D：空げき直径
l：鉄心積厚
n：回転数

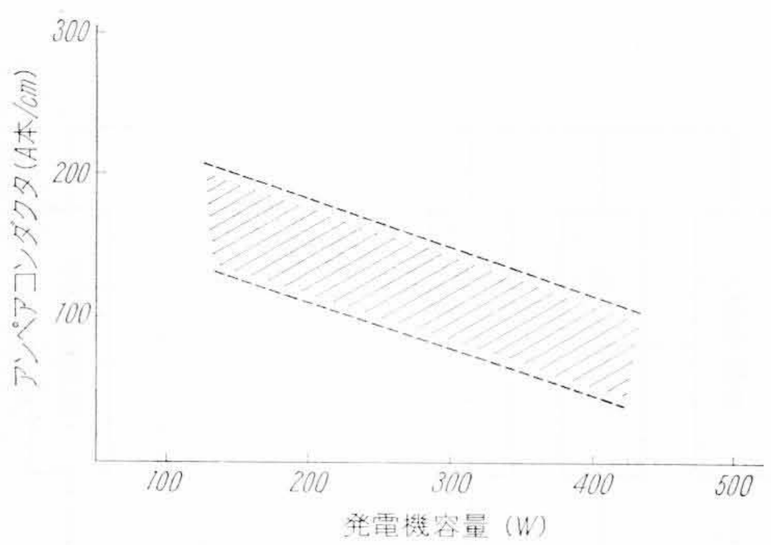
すなわち回転機の出力は磁束密度，アンペアコンダクタ，空げき直径，鉄心積厚，回転数の関数である。ここで直流機と交流機について各項について検討すると空げき磁束密度，空げき直径，鉄心積厚，回転数は条件を合わせることができるから回転機の主要寸法を決める D^2l，すなわち空げき直径と鉄心積厚を同じくした場合，直流機と交流機の出力はアンペアコンダクタ $(AC)_0$ によって決定される。

直流発電機のアンペアコンダクタは整流の良否を左右するリアクタンス電圧と関連あり，その関係は次の(2)式で表わされる。

* 日立製作所多賀工場



第2図　自動車用直流発電機のリアクタンス電圧



第3図　自動車用直流発電機のアンペアコンダクタ

$$(AC)_0=\frac{e_r}{2\zeta svl\left(\frac{p}{a}\right)}\times 10^6 \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに　e_r：リアクタンス電圧
ζ：Pickelmayer Constant
s：線輪巻数
v：周速
l：鉄心積厚
p：極数
a：並列回路数

このようにアンペアコンダクタはリアクタンス電圧に比例しこの値は発電機の整流状態から制限される。現在自動車用充電発電機として使用されている直流発電機のリアクタンス電圧は**第2図**に示すように約0.4V以下，アンペアコンダクタは**第3図**に示すように約200 A•本/cm以下に設定されるのが普通である。

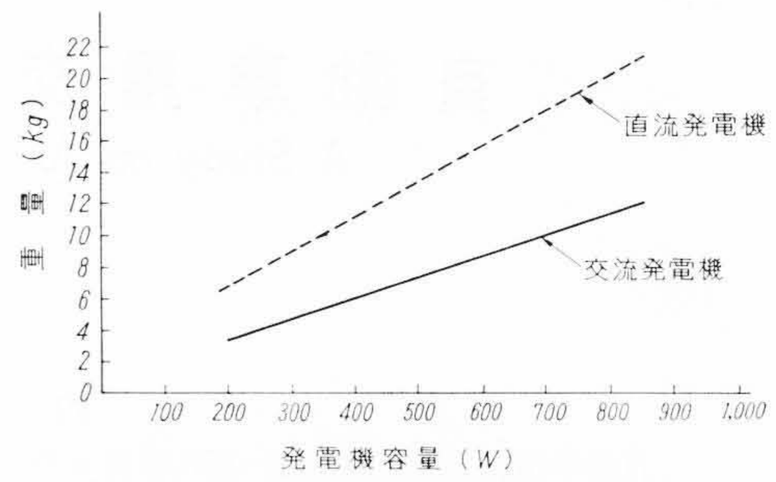
交流発電機では直流発電機のリアクタンス電圧による整流悪化に対応する現象として，負荷による電圧変動率の増加があるが自動車用充電発電機は可変速度で使用されるため，必然的に自動電圧調整器を必要とするので，この電圧変動は調整され問題とならない。

アンペアコンダクタは電流と抵抗をもつ導体の積であるから熱の発生源となっている。したがって直流機，交流機にかかわらずアンペアコンダクタは温度上昇の点より制限が生ずる。この場合直流発電機では発熱体である電機子が発電機の内側にあり，熱放散が悪いのにたいし交流発電機では，電機子が外側にあって熱放散がよいので設計に際しアンペアコンダクタを大きくとることができる。この点を考慮して計算してみると交流発電機は直流発電機の40～70%の重量で同一出力を出せることが判明した。

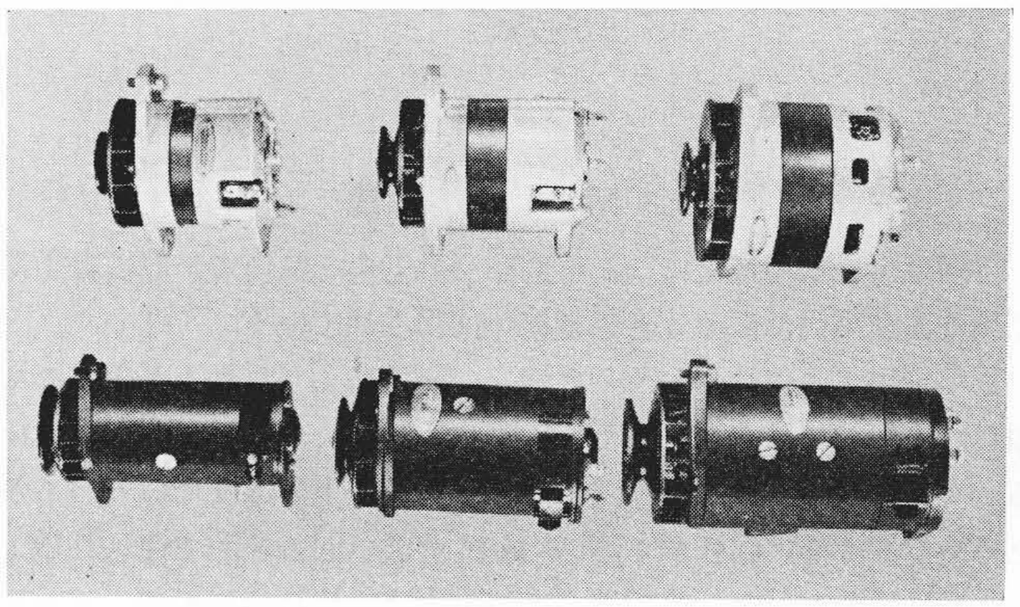
第4図は各種の直流発電機と交流発電機の重量の比較を示したもので**第5図**はこれら試作品の外観を示したものである。

3.2　電流制限作用

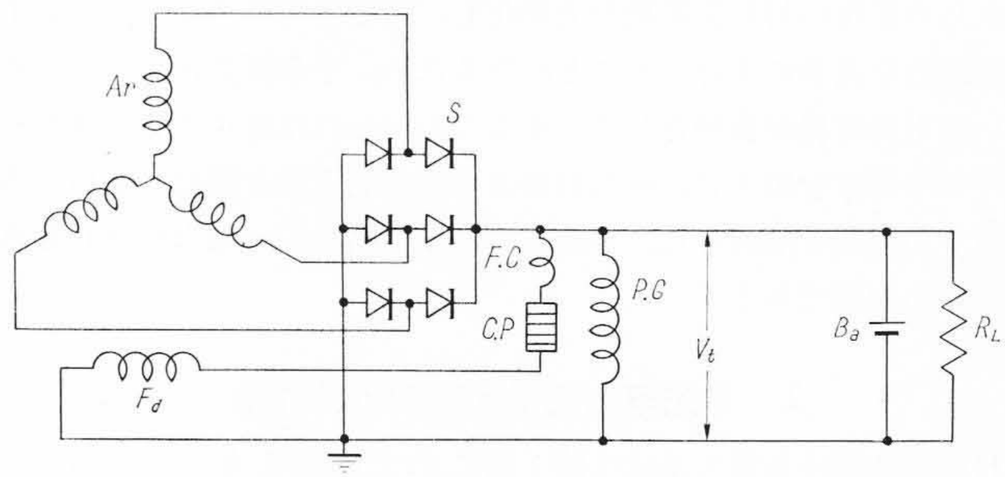
直流発電機の回転数n，界磁電流I_fにおける発生電圧は一般に次の(3)式で与えられる。



第4図　直流発電機と交流発電機の重量比較



第5図　自動車用直流発電機(下)と交流発電機(上)



A_r：電機子　　C.P：カーボンパイル可変抵抗体
F_d：界磁線輪　　P.C：電圧線輪
S：整流器　　B_a：蓄電池
F.C：界磁直列線輪　　R_L：負荷抵抗

第6図　自動車用交流発電機回路

$$V=n(a+bI_f) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに　V：発生電圧
a, b：発電機によって定まる定数

自動車用発電機の場合，負荷時の端子電圧は蓄電池より定まる一定の電圧V_tにおさえられるため電機子反作用を省略すると出力電流Iと端子電圧V_tの間には次の式が成立する。

$$V_t=n(a+bI_f)-V_B-IR_a \quad \cdots\cdots(4)$$

これより発電機の出力電流Iを求めると次のようになる。

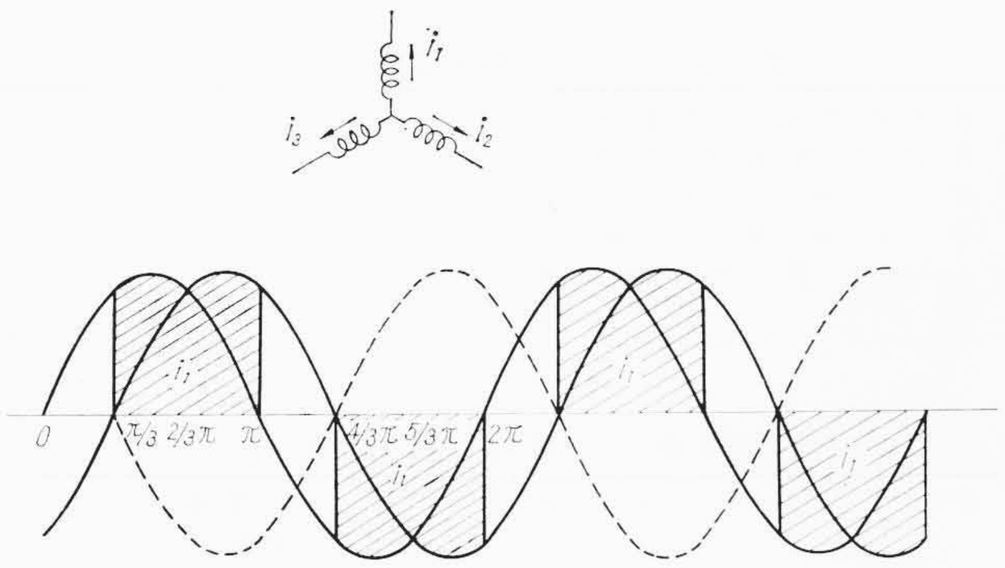
$$I=\frac{n(a+bI_f)}{R_a}-\frac{(V_t+V_B)}{R_a} \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに　V_B：刷子電圧降下
R_a：電機子抵抗

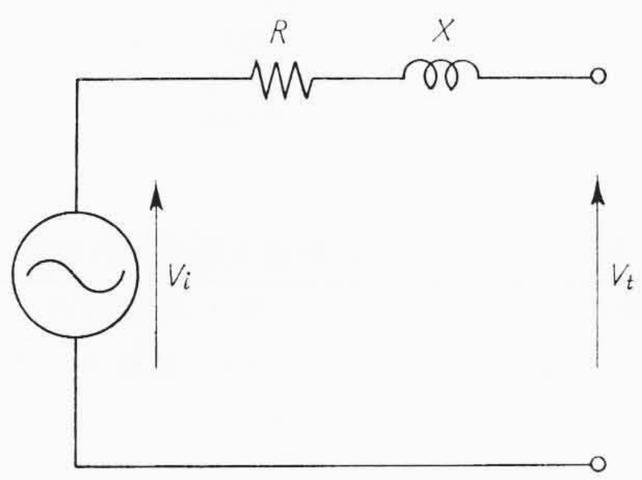
上式において第二項は一定であるが第一項により出力電流は回転とともに増加することがわかる。

これに対して**第6図**の交流発電機では全波整流を行なった場合端子電圧は一定であるが各相を流れる電流は**第7図**に示すように発生電圧と同一の基本周波数をもつ方形波に近いひずみ波となる。

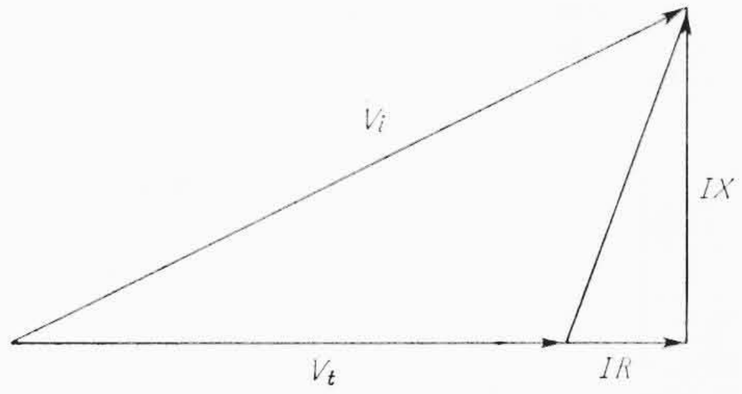
これをエネルギーの点から等価的な正弦波として求めるとその実効値は(6)式となり，電流は(7)式によって表わされる。



第7図　交流発電機線電流波形



第8図　交流発電機の等価回路



第9図　交流発電機のベクトル図

$$I_e=\sqrt{\frac{2I_M^2}{\pi}\int_{\pi/3}^{2\pi/3}\sin^2\omega t d\omega t}=\sqrt{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{2\pi}}\,I_M \quad ...(6)$$

$$I_A=\sqrt{\frac{2}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}}\,I_M\sin\omega t \quad .....(7)$$

ここに　I_A：等価線電流

I_e：等価交流線電流実効値

I_M：脈流電流波高値

この(7)式で表わされる電流が発電機回路を流れるものとして検討すると**第8図**のように抵抗Rと巻線リアクタンスXの直列回路となる。したがってその電圧，インピーダンス，出力電流の関係は**第9図**のベクトル図で表わされ，これより(8)式が成立する。

$$I_A(R+jX)=V_i-V_t \quad .....(8)$$

ゆえに出力電流は次の(9)式によって求められる。

$$I_A=\frac{V_i-V_t}{R+jX} \quad .....(9)$$

また　$V_i=A\,n\,I_f$ .....(10)

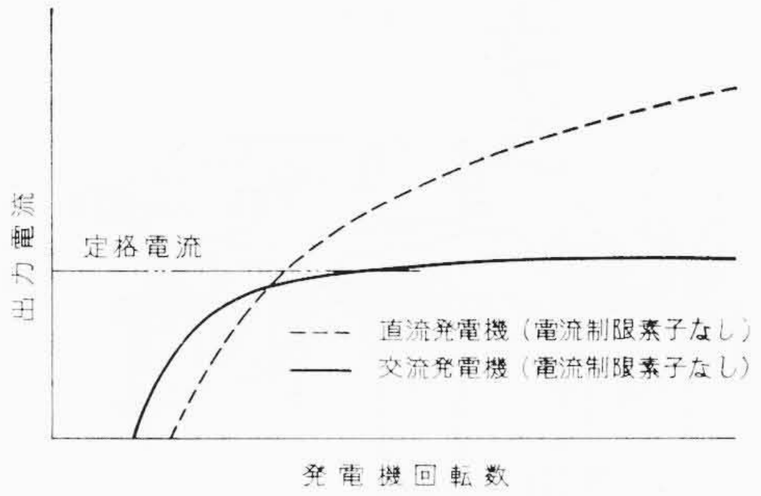
$$X=\frac{2\pi p}{120}L\,n=F\,n \quad .....(11)$$

ここに　V_i：発電機の発生電圧

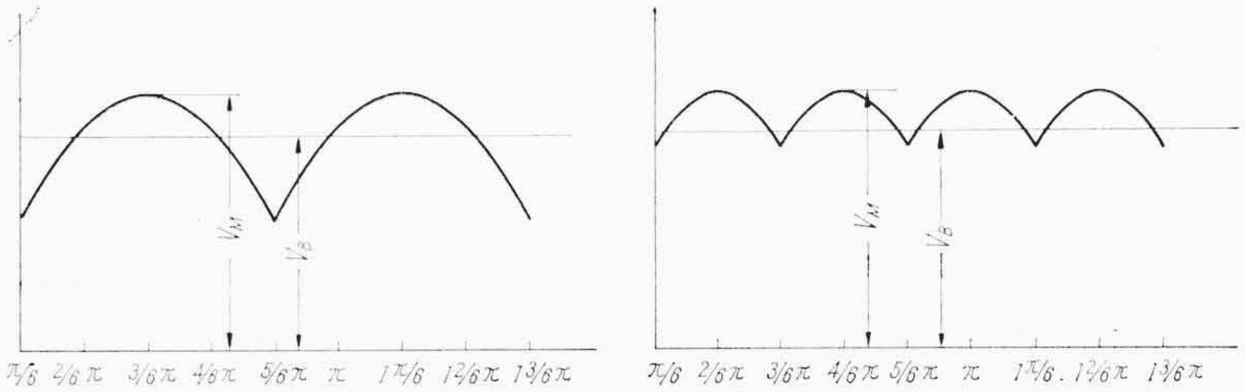
V_t：蓄電池より定まる端子電圧を交流側に換算した値

R：発電機巻線抵抗

X：発電機巻線リアクタンス



第10図　直流発電機と交流発電機の出力速度特性



第11図　交流発電機の整流波形

A：発電機によって定まる係数

n：回　転　数

p：極　　数

L：発電機巻線インダクタンス

(10)，(11)式を(9)式に代入することによって交流発電機の出力電流は次の(12)式で求められる。

$$I=\frac{AI_f-\dfrac{V_t}{n}}{\dfrac{R}{n}+jF} \quad .....(12)$$

(12)式より発電機出力は回転の低いときは回転とともに上昇するが，回転が高くなるにつれてほぼ一定値になることがわかる。以上要するに直流発電機では**第10図**に示すように回転とともにその出力電流は増加しこのために調整器で電流制限を行なうことが必要である。交流発電機では(12)式を満足する常数を与えることにより所要出力を得ることができる。

3.3　交流発電機における刷子摩耗

直流発電機では刷子に全負荷電流が流れ，かつ整流火花を生ずるのにたいし，交流発電機では刷子に励磁電流のみしか流さないので，刷子の摩耗が少なく長寿命化が期待される。特に負荷高速回転時，直流発電機は整流が悪化するので交流発電機の方が非常に有利になってくる。

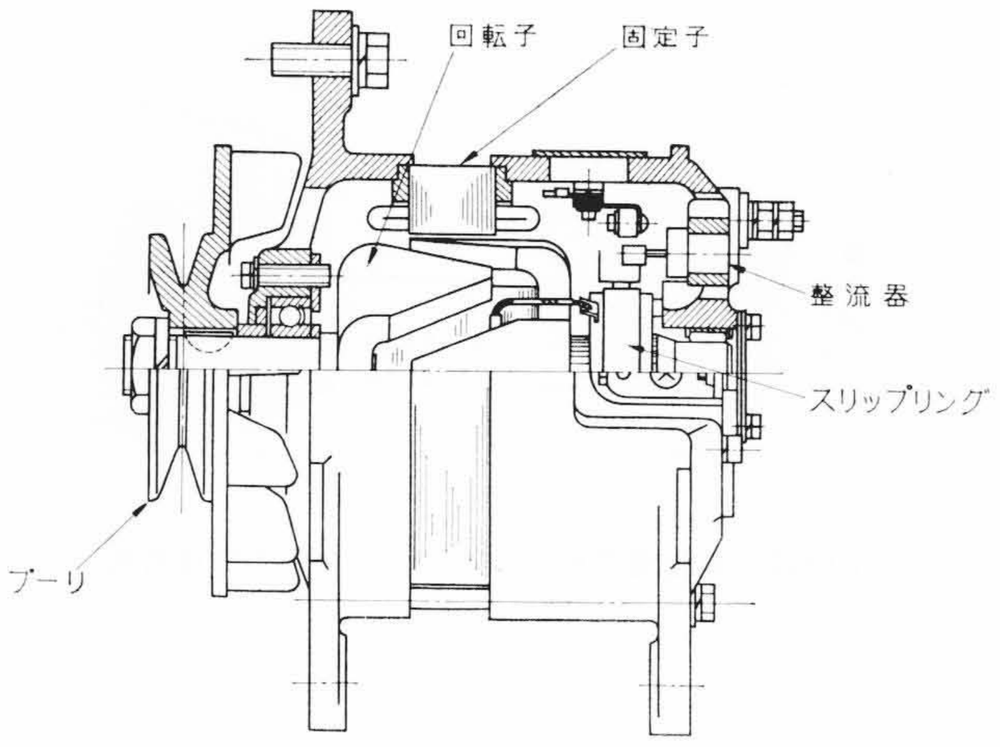
3.4　整　流　方　式

従来の直流発電機では整流子と刷子による機械的整流を行なっていたが，交流発電機では整流器を使って整流すればよい。三相交流発電機の場合，半波整流方式と全波整流方式の二つが考えられるが，蓄電池を接続した場合の充電電流は，**第11図**から半波整流方式では(13)式により，また全波整流方式では(14)式によって求められる。

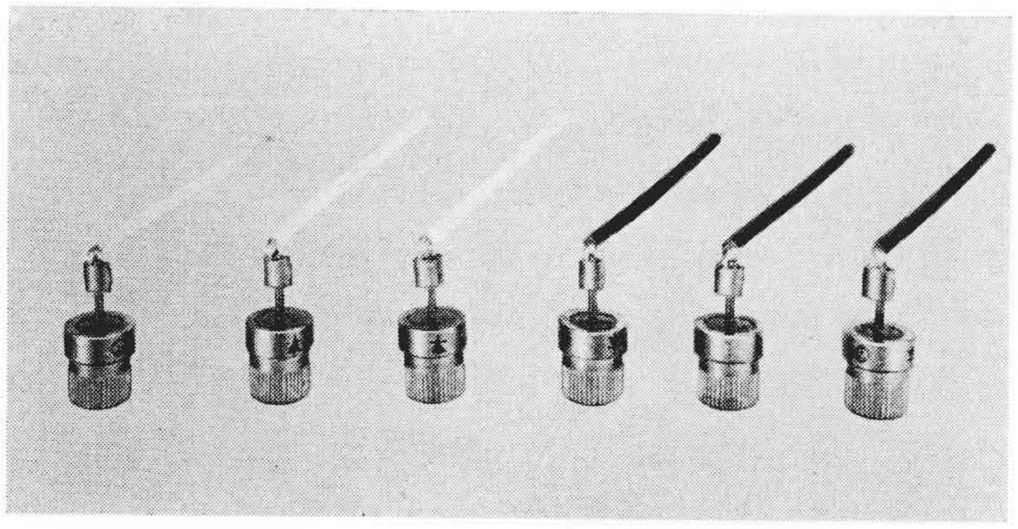
$$I_{CH}=\frac{3}{2\pi R_B}\int_{\pi/6}^{5\pi/6}(V_M\sin\omega t-V_B)\,d\omega t$$

$$=\frac{3}{2\pi R_B}\left(\sqrt{3}\,V_M-\frac{2\pi}{3}V_B\right) \quad .....(13)$$

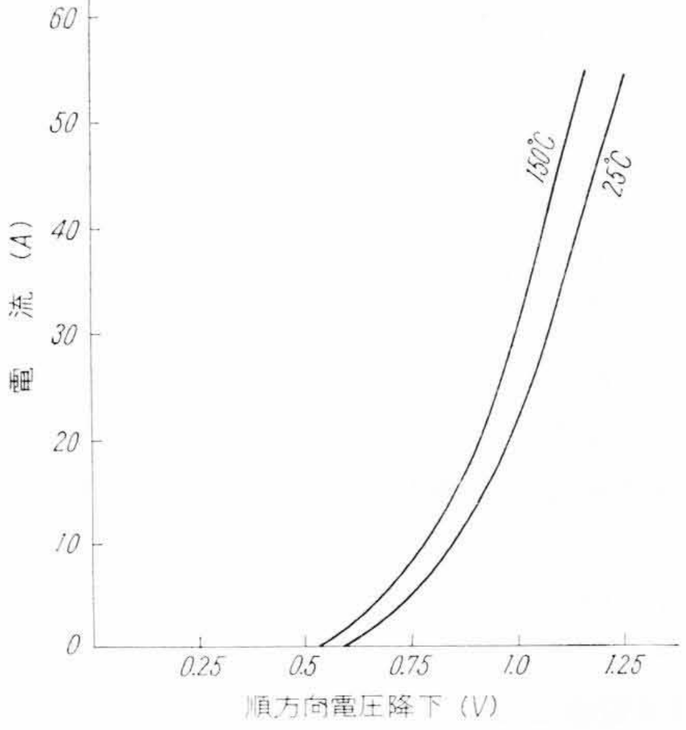
$$I_{CF}=\frac{3}{\pi R_B}\int_{\pi/6}^{\pi/2}(V_M\sin\omega t-V_B)\,d\omega t$$



第12図　自動車用交流発電機の構造



第13図　交流発電機用シリコン整流器



第14図　シリコン整流器順方向特性

$$= \frac{3}{\pi R_B}\left(V_M - \frac{\pi}{3} V_B\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

ここに　I_{CH}：半波整流方式の場合の充電電流

I_{CF}：全波整流方式の場分の充電電流

R_B：充電回路抵抗

V_M：脈流電圧波高値

V_B：蓄電池電圧

ここでI_{CH}とI_{CF}の比較により全波整流方式が有利であることがわかる。

4. 交流発電機の構造

自動車用交流発電機は可変速度で駆動されるという特殊性のために一般の交流発電機とは異なった点が多い。**第12図**は自動車用小形交流発電機の一例を示す。出力電流は固定子に巻かれた電機子線

第1表　シリコン整流器のおもな仕様

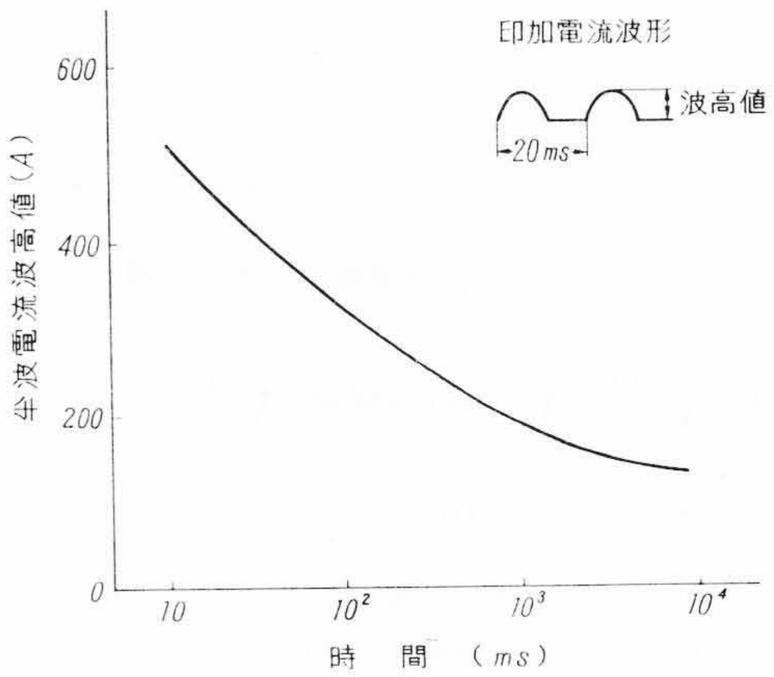
最大許容せん頭逆電圧	50V
最大許容瞬時逆電圧	150V
定格電流	10A
順方向電圧降下	1.3V 以下（10A時）
最大動作温度	150℃
重量	14g

第2表　交流発電機仕様

形式	ジェネレータ	L-X 29
	レギュレータ	T-X 94
呼称出力		12V 200W
定格回転数		3,000 rpm
回転方向	（プーリ側からみて）	右
無負荷電圧		14.5~15.5V
出力電流		15A
重量	ジェネレータ	3.8kg
	レギュレータ	0.5kg

第3表　シリコン整流器10A負荷50万回断続試験前後の特性

測定項目 / 資料番号	順方向電圧降下（10A時）		逆電流（30V時）	
	試験前（V）	試験後（V）	試験前（μA）	試験後（μA）
1	0.90	0.89	0.10	0.37
2	0.93	0.93	0.08	0.12
3	0.91	0.91	0.35	0.31
4	0.90	0.90	0.40	0.61
5	0.91	0.91	0.60	0.31
6	0.90	0.90	0.40	0.45
7	0.90	0.89	0.38	0.88
8	0.89	0.89	0.67	0.70
9	0.89	0.88	0.75	0.51
10	0.89	0.89	0.50	0.52



第15図　シリコン整流器許容電流特性

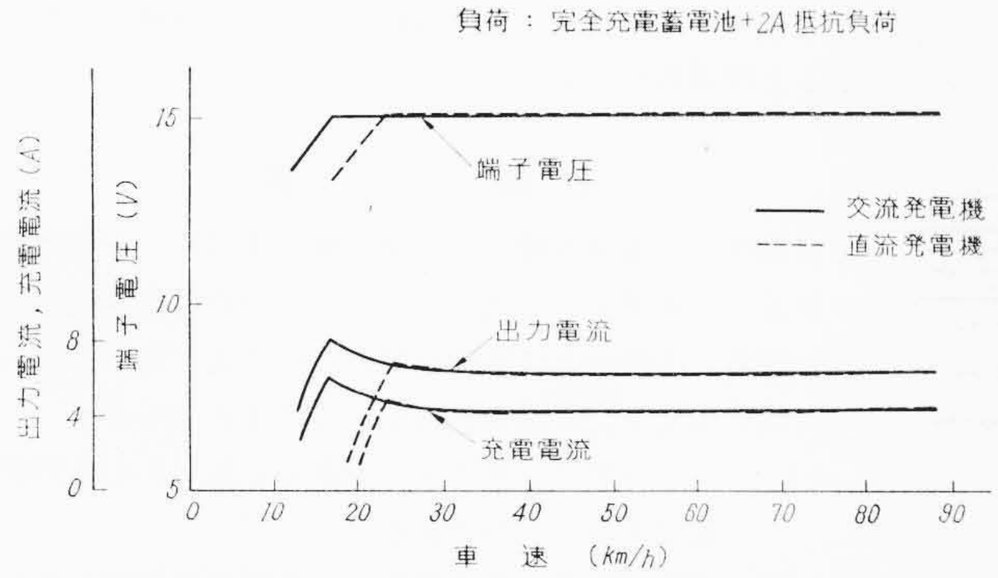
輪より6個の整流器によって全波整流されて取り出される。この整流器はエンジンルーム内に装着され高温，高湿にさらされるので耐熱性のすぐれたシリコン整流器が使用される。**第13図**はその外観を，**第1表**はおもな仕様の一例を示す。界磁は軟鋼のつめ形の磁極で励磁線輪は軸を中心として巻かれている。

5. 試験結果

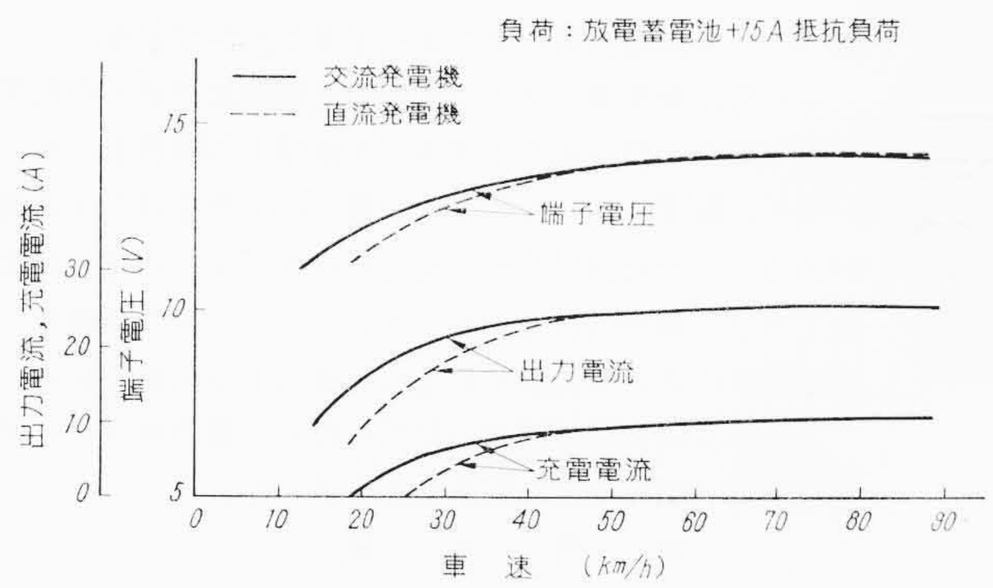
現在直流充電発電機としては130~1,000Wぐらいの容量まで使用されているが，一例として出力200Wのものを交流化した場合の種々の試験結果について記述する。**第2表**はこの12V 200W交流発電機の仕様を示したものである。

5.1　シリコン整流器の特性

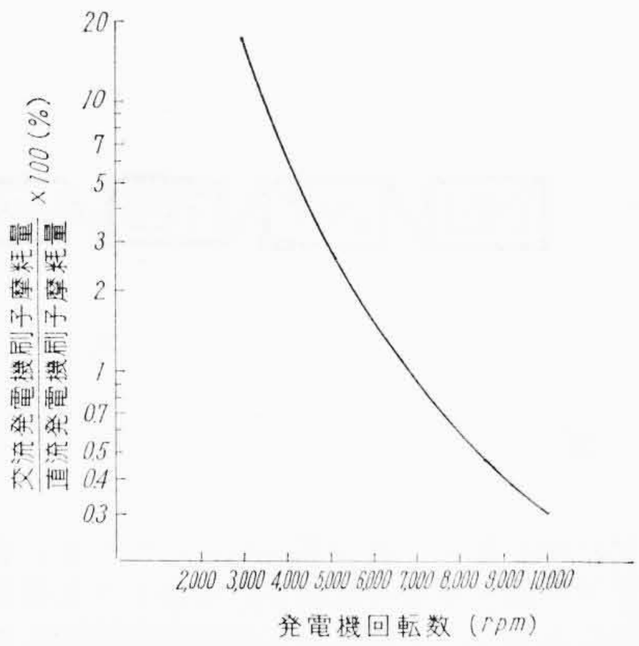
自動車用シリコン整流器は，発電機に内蔵される関係上小形であるとともに耐熱性にすぐれ耐振性，気密性のよいことが要求され



第16図　充　電　速　度　特　性



第17図　充　電　速　度　特　性



第18図　直流発電機と交流発電機の
刷子摩耗量の比較

る。この条件に合致するシリコン整流器は日立製作所日立工場において開発され，加熱試験，煮沸試験，冷熱繰返し試験，負荷断続試験，蒸気試験，振動試験などにおいても良好な結果を得た。**第14図**は12V 200W に使用するシリコン整流器の順方向特性を示したものである。また**第15図**は過電流と許容時間の関係を，**第3表**は負荷断続50万回前後の特性変化の一例を示したものである。

5.2　速　度　特　性

第16図は点火コイル相当2A 負荷と完全充電状態の蓄電池を負荷としたとき，**第17図**は200W の電気負荷と放電した蓄電池を負荷としたときの車速と電流，電圧の関係を示す。図中点線は同一出力の直流発電機の特性を示したもので，特に低速における充電性能が向上し，200W の夜間負荷時充電開始車速が直流発電機の約25km/h に対し約18 km/h より充電を始めている。

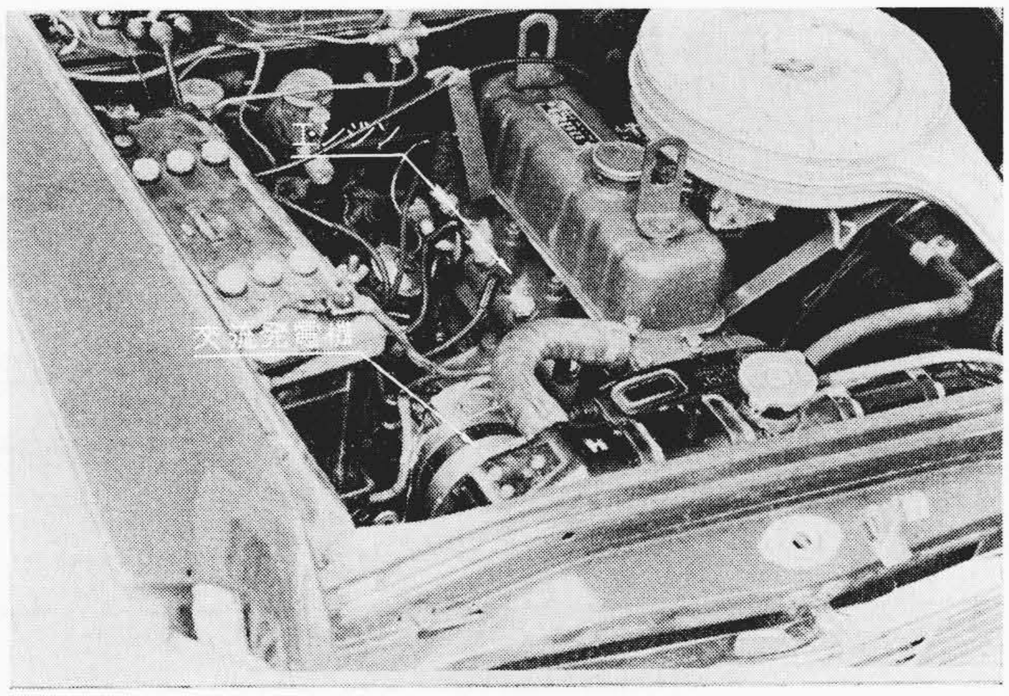
5.3　刷　子　摩　耗

自動車用交流発電機の特長の一つは刷子に励磁電流のみしか流さない点である。直流発電機のように全負荷電流が流れ，かつ整流の制限をうけるものと違って刷子の摩耗が少ない。**第18図**は同等出力の交流発電機と直流発電機の机上試験における刷子摩耗量の比較を示したものであるが，高速回転になるほど摩耗量の比率は小さくなっている。都内タクシーにおける実車走行試験では直流発電機の⅓という結果を得ている。これは平均車速が遅いことに起因しているものである。

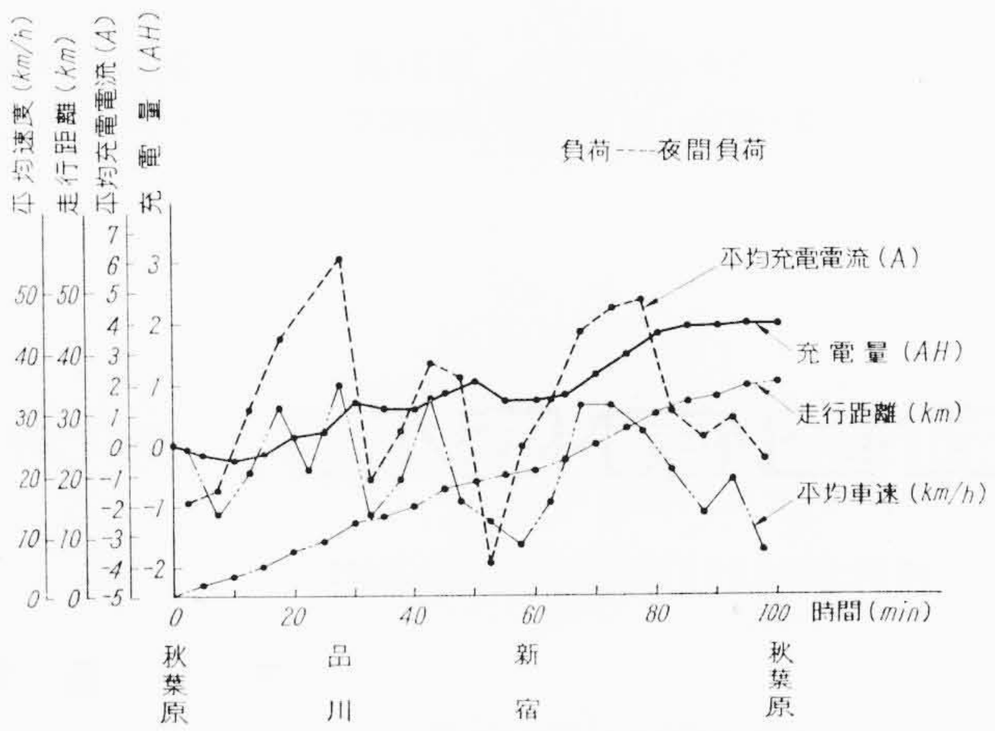
第4表　走行中の各部温度

試験条件		温度			大気温（℃）	ボンネット内温度（℃）
速度	負荷	発電機（℃）	⊕側整流器（℃）	⊖側整流器（℃）		
都内走行	200W 負荷＋蓄電池	54	82	62	30	50
郊外走行	200W 負荷＋蓄電池	49	78	59	30	45
登　坂	200W 負荷＋蓄電池	63	92	72	30	58

（各部温度は読みを示す）



第19図　交流発電機の取付状況



第20図　都内夜間負荷走行時交流発電機の充電特性

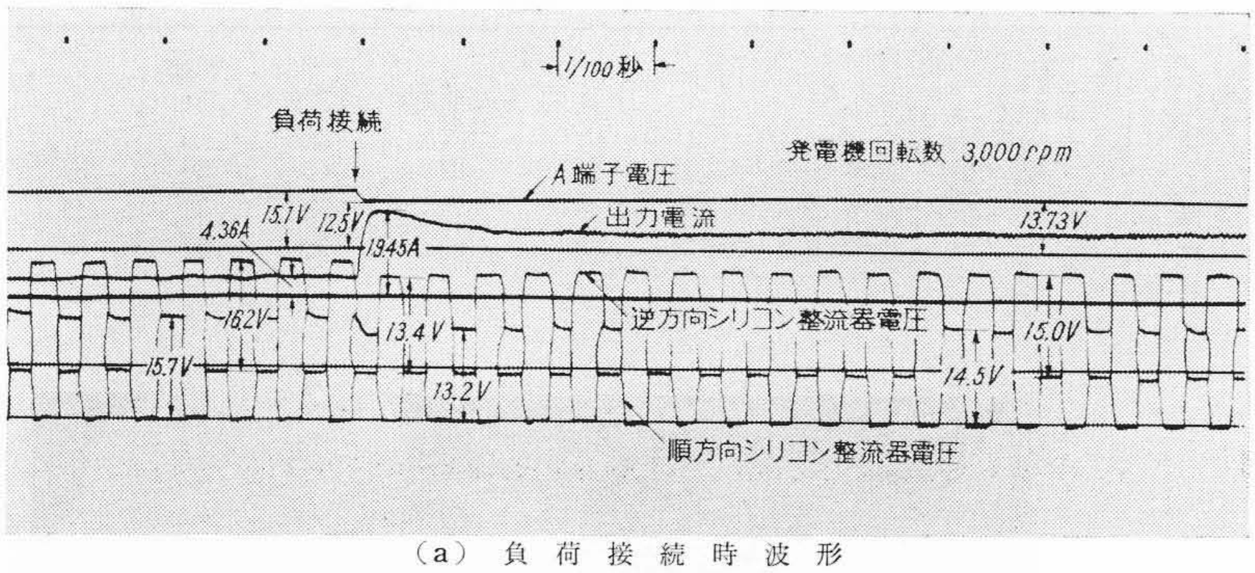
5.4　実　車　試　験

実車の取付状況は**第19図**よりわかるようにエンジンに近接して取り付けられるので，エンジンの放熱の影響をうける。このため発電機は巻線，絶縁物の温度上昇とともに整流器の温度上昇に注意を払う必要がある。走行中における発電機各部の温度測定結果は**第4表**のようであり，シリコン整流器も支障なく使用できることがわかる。

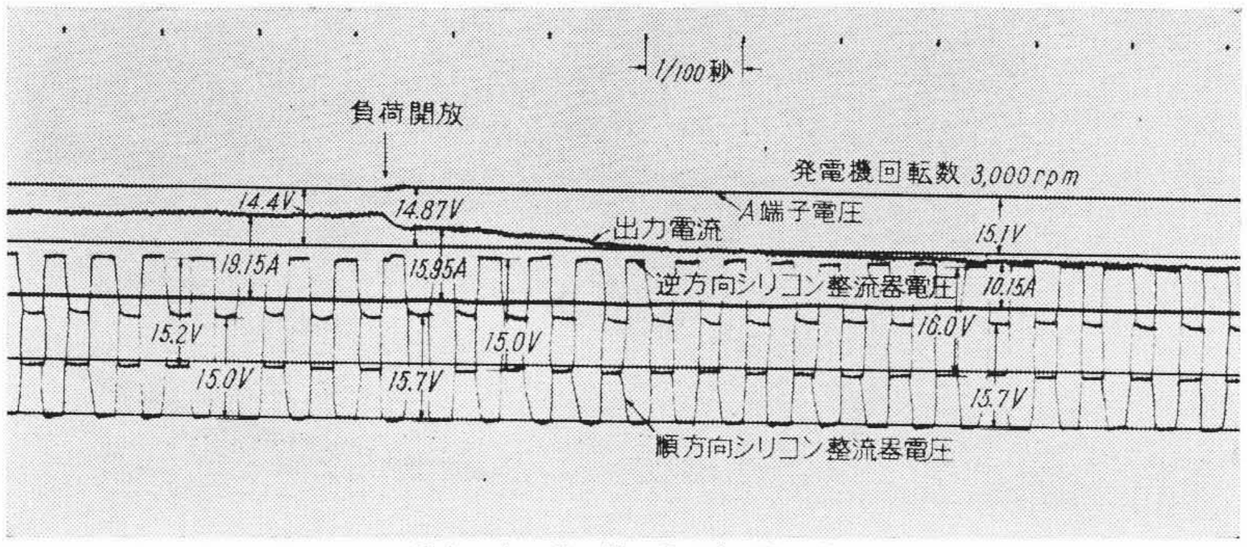
混雑する東京都心部を夜間負荷走行した場合，現用の直流発電機では放電気味となるが交流発電機を装着した場合は，低速充電性能の向上により**第20図**に示すように，平均時速約 20 km/h においても良好な充電状態を示している。

5.5　電圧電流波形

半導体は一般に使用時発生する逆電圧をその許容範囲内にはいる



（a）　負　荷　接　続　時　波　形



（b）　負　荷　開　放　時　波　形

第21図　負荷接続および開放時の特性

ようにおさえることが必要である。第21図は負荷を接続および開放したときの端子電圧，出力電流，整流器電圧のオシロを示したものであるが，発生電圧も許容値内にあり十分使用にたえることが明らかである。

6. 結　　言

自動車用充電発電機に交流発電機を使用し，その出力を整流して使用する方式について従来の直流発電機と比較し構造，性能および試験結果について述べた。

自動車用交流発電機の利点をここにまとめると

（1）　アンペアコンダクタが大きくとれるから小形軽量化することができる。

（2）　高速回転時の整流悪化による刷子摩耗増大の欠陥がない。

（3）　高速回転まで使用できるので回転比を大きくとり低速充電性能をよくすることができる。

この交流発電機は従来の直流発電機に比べ多くの長所を有するがその反面半導体素子を使用する関係上，サージ電圧，温度について十分取り扱いに注意をはらう必要がある。この交流発電機は現在のゆきづまった充電発電機を大きく進歩改善せしめるものとして今後の自動車技術の発展に大いに貢献するものと確信する次第である。

最後に本研究にご協力いただいた日立製作所日立工場整流機部の関係各位に感謝の意を表わす。

参　考　文　献

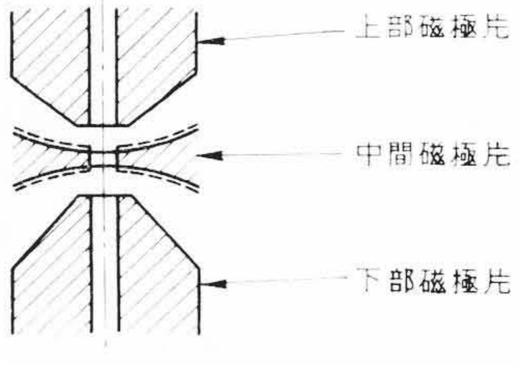
（1）　執行：　電気機械設計論

特　許　の　紹　介

特許第296575号（特公昭36-19877）

木　村　博　一

三　磁　極　電　子　レ　ン　ズ

従来の三磁極電子レンズは中間磁極片の厚さが一様であるため，中間磁極片内部の磁束密度は一様でない。したがって，このような構造のものでは磁束密度の極大値を示す部分の断面積，すなわち厚みによって有効磁束の値が押さえられてしまうので，中間磁極片は所要の磁束を通じ得る厚さより薄くすることはできない。

この発明は図に示すように中間磁極片の厚さを磁束密度がほぼ一様となるように，中心部より周辺部におもむくに従い順次厚くした三磁極電子レンズに関するものである。このような構造にすると有効磁束を減ずることなく，中間磁極片の中央部付近における厚さをきわめて薄くすることができるので，従来のものに比してきわめて短焦点の三磁極電子レンズが得られる。　（永田）