

無火花帯移動現象とその補償方式

Drift Phenomenon of Black Band and its Compensating System

石 川 博 章* 田 原 和 雄**
Hiroaki Ishikawa Kazuo Tahara

要 旨

可変速の直流電動機に発生する無火花帯移動現象の発生原因は整流コイルのインダクタンスの周波数特性に基づくもので、回転数の上昇とともに無火花帯は強め整流の方向にほぼ直線的に移動することが確認できる。この結果に基づいて新しく開発した直流励磁機を使用した補償回路方式について検討を加え、実機による試験を行なって定常および過渡整流ともに良好な整流特性が得られることを示した。また本方式を採用することにより速度特性の尻上がりも改善されることを述べた。

1. 緒 言

最近の業界の設備として新設される直流電動機は高度の自動制御技術と組合せて使用されるため、過酷な運転条件を要求される場合が多くなってきている。特に最近では大容量機に対して広範囲の速度制御を行なう仕様のものが多く要求される。このような使用条件における直流電動機の整流性能については詳細な検討が必要である。整流性能の最も過酷な条件は最高速度運転時における負荷条件によって決定されることはいままでもないが、可変速運転を行なう直流電動機においては、高速運転時と低速運転時の無火花帯の中心位置が異なる「無火花帯移動現象」を発生するため、高速運転時のみの整流性能を検討するだけでは不十分であり、高速運転時の整流性能が良好であると同時に低速運転時の整流を補償しうるものでなければならない。

従来、可変速直流電動機の無火花帯移動現象については、詳細な検討があまり加えられていなかった。このたび無火花帯移動現象について実験的検討を加え、その因子が整流コイルのインダクタンスの周波数特性に基づくもので、回転数の変化によってほぼ直線的に移動することを確認した。いままではこの無火花帯移動現象を補償するため、一般に界磁電流を検出して、補極励磁電流を段階的に切換える補極分路方式が採用されていたが、本実験結果に基づいて、整流補償発電機を採用した新しい補償方式を考案し、実機に適用して良好な結果を得たので、ここにその概要について報告する。

2. 無火花帯移動現象

2.1 概 要

可変速運転を行なう直流電動機では、図1に示すように低速運転時の無火花帯に対して、高速運転時の無火花帯が強め整流の方向に移動する現象が発生する。これを「無火花帯移動現象」と呼んでい

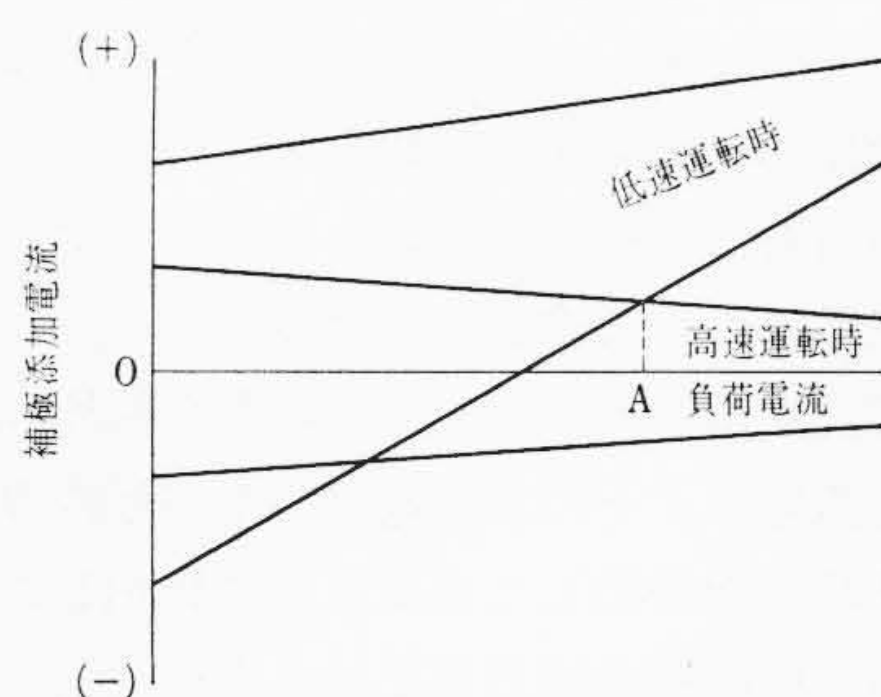


図1 無火花帯移動現象

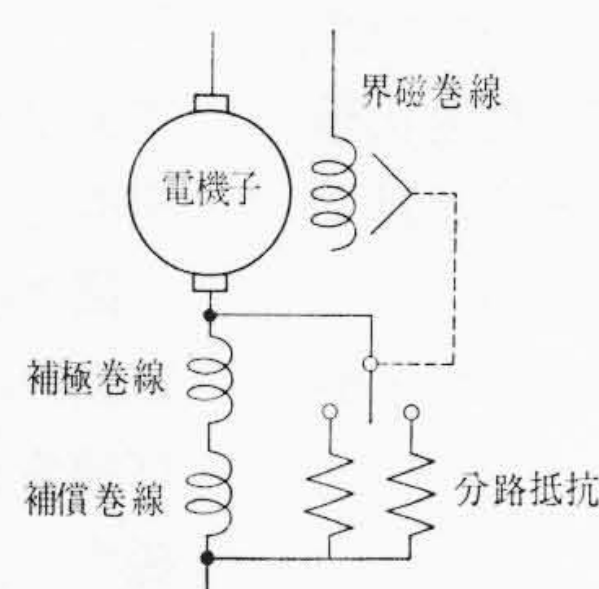


図2 従来の補極調整法

る。無火花帯移動現象の発生する直流電動機では、低速運転時および高速運転時にそれぞれ無火花帯が存在するとしても、共通する無火花領域は図1に示したA点以上の負荷電流では存在しないため、高速運転時に無火花整流となるように補極を調整しておく、低速運転時において整流火花が発生する。そのため、無火花帯移動現象が存在する場合には、従来は図2に示すように界磁電流を検出して補極の分路抵抗値を切り換え、補極の強さを調整する方法がとられていたが、不連続調整であることと、負荷急変時の整流を悪化させることがあるため問題があった。

2.2 移動原因の検討

直流電動機に速度変化を与える方法としては、一般に端子電圧と界磁電流を調整する二つの方法があるが、無火花帯移動現象に及ぼす因子を調べるため、500~3,000 kWの比較的大容量の機種について、次のそれぞれの場合における無火花帯について測定を行なった。

- (1) 端子電圧一定で界磁電流によって回転数を変化させた場合
- (2) 界磁電流一定で端子電圧によって回転数を変化させた場合
- (3) 回転数が一定となるように端子電圧と界磁電流を調整した場合。

図3に一例として2,125 kW、変速比2.6の直流電動機の実測結果を示す。(A)は端子電圧または界磁電流を一定として回転数を変化させた場合の100%負荷時の無火花帯の幅を回転数に対して示したもので、回転数の上昇とともに無火花帯が強め整流の方向に移動

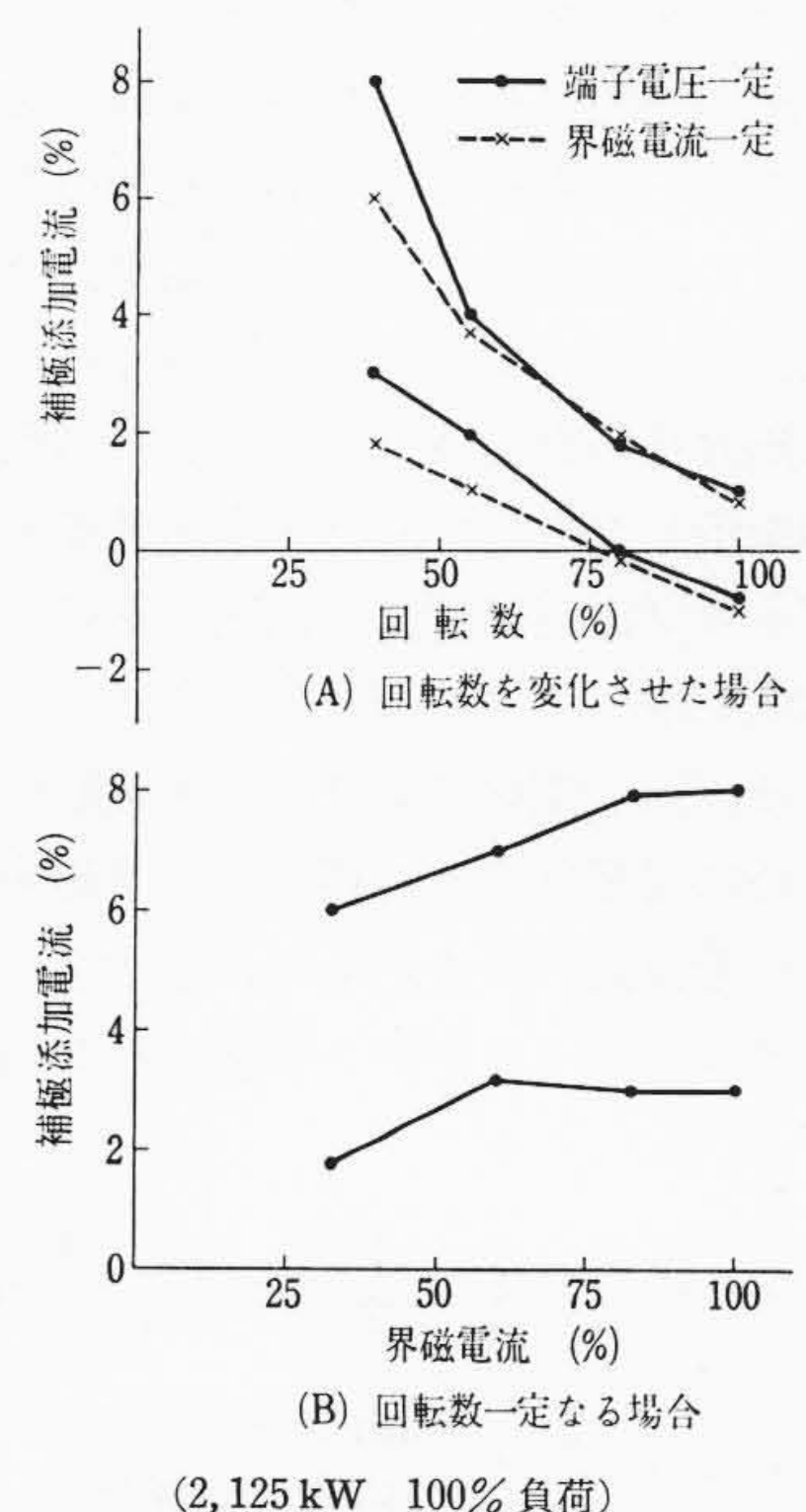


図3 無火花帯移動現象に及ぼす因子

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立研究所

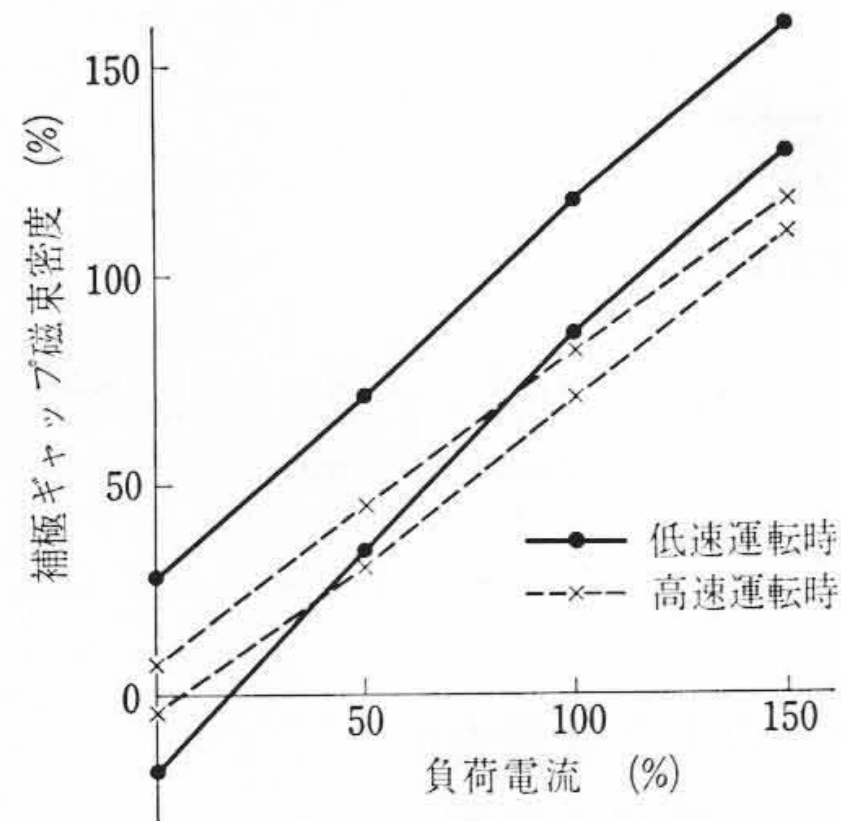


図4 補極ギャップ磁束密度の関数として測定した無火花帯

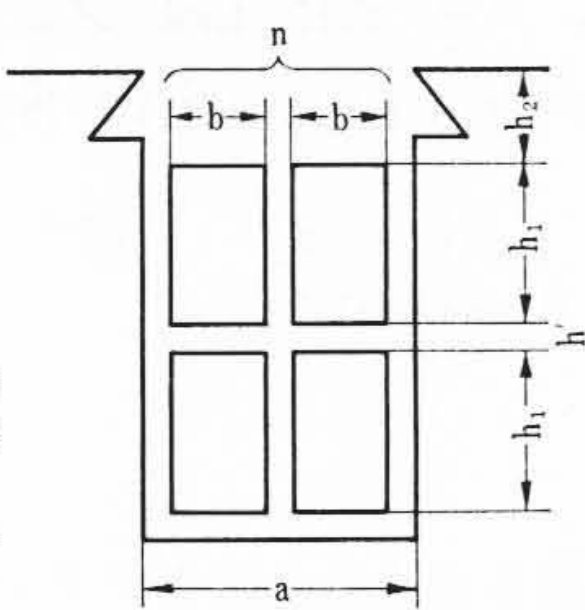


図5 スロット記号の説明

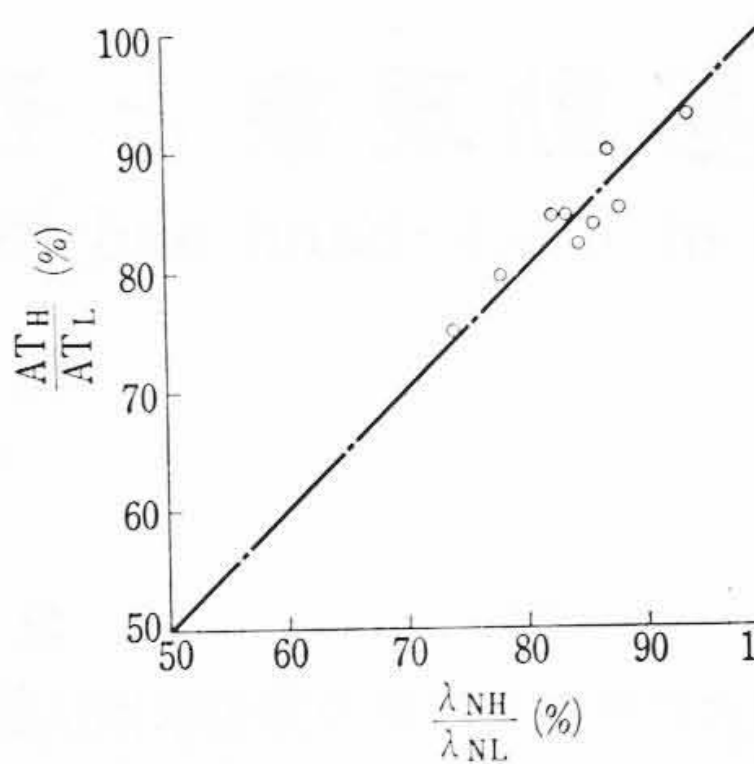


図6 高速運転時と低速運転時のパーミアンス係数の比と補極ギャップ起磁力の比の関係

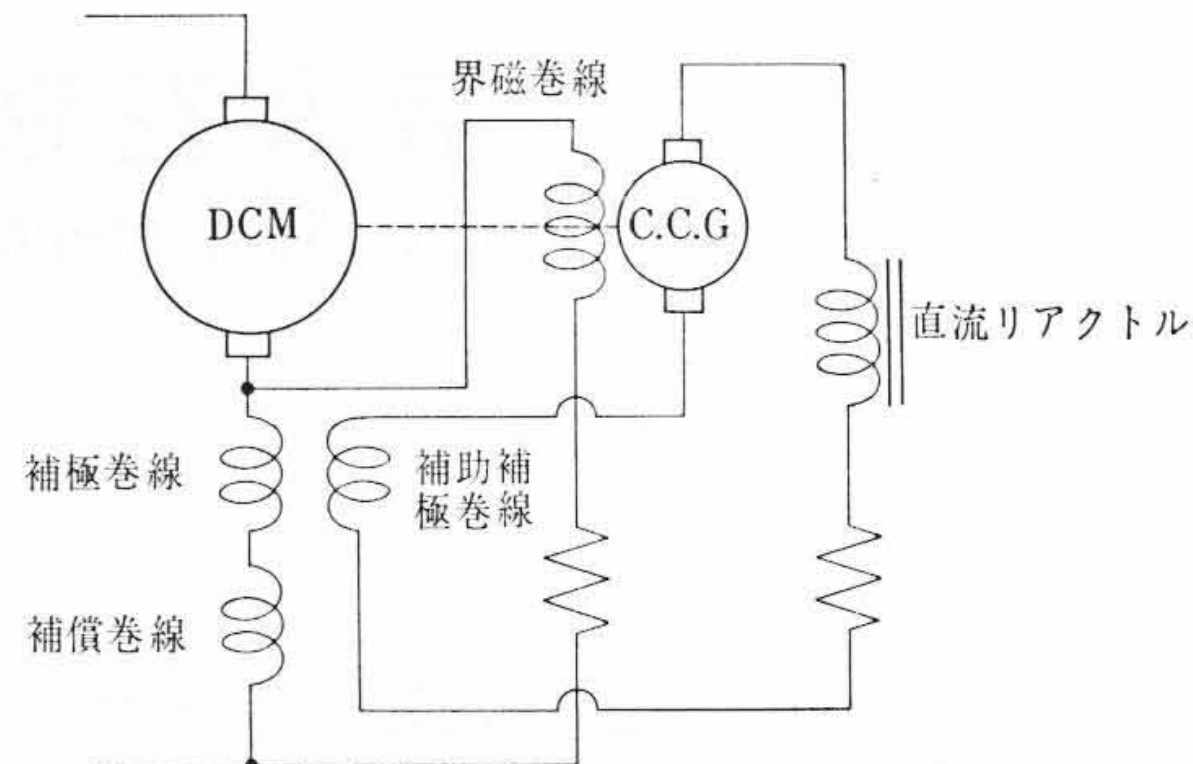


図7 補償回路接続図

している。これに対して(B)は回転数が一定となるように界磁電流および端子電圧を調整した場合の100%負荷時の無火花帯の幅を界磁電流に対して示したもので、ほとんど変化を生じていない。この傾向はすべての測定結果について共通の現象であることがわかった。

以上の結果、無火花帯の移動現象は端子電圧と界磁電流の変化にはほとんど無関係であり、回転数の変化によってのみ発生するものであることが確認された。なお、無火花帯移動現象は高速時の無火花帯が強め整流の方向に移動するので、ブラシの座乗性が原因しているとは考えられない⁽¹⁾。

2.3 整流コイルのインダクタンス

整流現象を巨視的に考察すれば、整流の最適条件はリアクタンス電圧と補極磁束によって誘起する整流電圧の平衡条件によって与えられる。すなわち、

$$L \frac{di}{dt} = Blv \quad \dots\dots\dots (1)$$

しかるに同一負荷電流において回転数が異なる場合には、整流コイルの電流変化率 di/dt および電機子周速 v はともに回転数に比例するため、

$$\frac{di}{dt} \propto v \quad \dots\dots\dots (2)$$

であり、また電機子導体長さ l は定数であるため、無火花帯移動現象発生の原因は整流コイルの漏れインダクタンス L または補極ギャップ磁束密度 B のいずれかが回転数によって変化するものと考えられる。

直流機の磁気回路のうち電機子および継鉄鉄心は主極磁束および補極磁束が同一磁路を通るため、主極磁束量によって補極磁束量が影響されることが考えられるが、前節の1および3の各条件における補極磁束の飽和特性を実測した結果、補極磁束の飽和特性は界磁電流の大きさによってまったく影響されないことが確認された。

図4は無火花帯を補極ギャップ磁束密度の関数として実測した結果の一例を示したものであり、高速運転時の無火花帯の中心における補極ギャップ磁束密度は、低速運転時の無火花帯の中心における値の約80%に減少していることがわかる。ほかの機種についての測定結果もほぼ同じ傾向であり、高速運転時において良好な整流状態を得るために必要とする補極ギャップ磁束密度の低速運転時に対する減少率は変速比の大きいものほど大きいことがわかった。

整流コイルのパーミアンス係数 λ_N は次式によって求めることができる⁽²⁾。

$$\lambda_N = \left[\frac{1}{6} \varphi(\xi) + \frac{1}{2} \psi(\xi) \right] \frac{h_1}{a} + \frac{h_2}{a} + \frac{h'}{4a} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\varphi(\xi) = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\psi(\xi) = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\sinh \xi + \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\xi = 2\pi h_1 \sqrt{\frac{nb}{a} \cdot \frac{f}{\rho \times 10^9}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、	a : スロット幅	cm	図5参照
	b : 導体幅	cm	
	n : コイル辺数		
	h_1 : 導体高さ	cm	
	h_2 : 上部空間高さ	cm	
	h' : 中間絶縁厚さ	cm	
	ρ : 導体の固有抵抗	$\Omega \cdot \text{cm}$	
	f : 周波数	Hz	

図6は1,000 kW以上の大容量機について、無火花帯の実測移動量より求めた高速運転時と低速運転時の補極ギャップ起磁力の比 AT_H/AT_L と、(3)式より算出したパーミアンス係数の比 $\lambda_{NH}/\lambda_{NL}$ との関係プロットしたものであるが、両者はよく一致していることがわかる。

以上の結果より、可変速直流電動機に発生する無火花帯移動現象の原因は、整流コイルのインダクタンスが回転数の上昇に伴って減少するため、整流電圧に対してリアクタンス電圧が小さくなり、高速運転時に過整流の傾向を示すものであることは明らかである。

3. 補償方式

3.1 補償動作の説明

整流コイルのインダクタンスが回転数によって変化するの、導体中に流れる整流電流の表皮効果によるもので、交差導体を使用することが根本的な対策として必要であると考えられる。しかしながら、すべての可変速直流電動機に交差導体を採用することはスロット利用率、工数、価格などの点で実施が困難であるため、比較的簡単な回路を用いた補償方式について検討を進めた。

図3の実測結果からもわかるように、回転数の変化に対する無火花帯の移動量は直線で近似できる。したがって無火花帯移動現象を補償するためには、補極の励磁量を回転数および負荷電流に比例して調整を行えばその目的は達せられることになる。そこで直流励磁機を使用した補償回路について検討を行なった。

図7は補償回路の接続を示したものである。動作原理は被補償主電動機に直流励磁機を直結し、その界磁巻線を主電動機の補極および補償巻線の抵抗電圧降下を検出して負荷電流に比例した電圧で励磁する。したがって直流励磁機の出力電圧は、主極磁束が飽和しない範囲では主電動機の回転数および負荷電流に比例するので、この電圧によって主電動機の補助補極巻線を励磁して無火花帯の移動現象を補償するのである。

従来の補極分路方式では回転数の関数として界磁電流を検出して

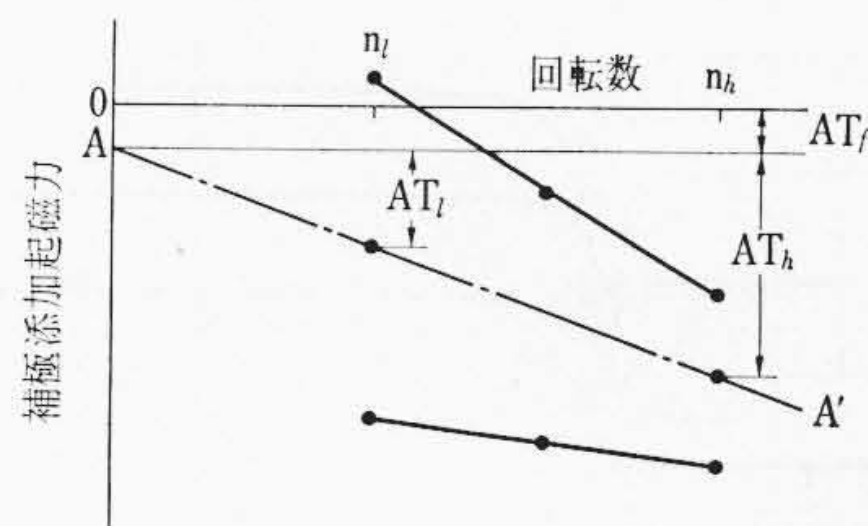


図8 主電動機の補極調整法

いたが、本方式では回転数を直接検出しているため、界磁電流一定で電圧による速度調整領域まで完全に補償しうる特長がある。なおこの直流励磁機を以下 CCG (Commutation Compensating Generator) と呼ぶことにする。

3.2 静特性に関する設計法

無火花帯移動現象を補償するためには回転数の上昇とともに補極ギャップ磁束密度を減少させることが必要であるので、補助補極巻線の励磁極性は直列補極巻線に対して差動接続となる。また CCG の出力電圧は低速運転時においても 0 にはならないため、図 8 に示すように主電動機の単独運転における補極を若干強めに調整し、同一負荷電流における低速および高速運転時の補助補極巻線起磁力 AT_L および AT_H は CCG の界磁電流による減磁成分 AT_f を考慮して、

$$AT_H = \frac{n_h}{n_l} AT_L \quad (7)$$

なる関係で補極を調整した場合に、回転数の全範囲にわたって図 8 の AA' 線が無火花帯よりはずれないように、無火花帯の位置を決定しておく必要がある。

いま高速運転時における補助補極巻線起磁力と主電動機の単独運転時における補極ギャップ起磁力との比を P とおけば、

$$P = \frac{V_c W_c}{R_c \{ (I_L - I_f) (W_{IP} + W_{CP}) - I_L W_a \}} \quad (8)$$

ここで、
 I_L : 主電動機負荷電流
 I_f : CCG 界磁電流
 I_c : CCG 出力電流
 W_{IP} : 直列補極巻線の毎極巻数
 W_{CP} : 補償巻線の毎極巻数
 W_a : 電機子巻線の等価毎極巻数
 W_c : 補助補極巻線の毎極巻数
 R_c : CCG の出力回路抵抗
 V_c : CCG の出力電圧

一方、CCG の機械定数を k とすれば次式が成立する。

$$V_c = k I_f \quad (9)$$

(9) 式を (8) 式に代入し、 k に関して整理すれば、

$$k = \frac{P R_c}{W_c} \left\{ \frac{R_f}{R_{IC}} (W_{IP} + W_{CP}) - \frac{R_{IC} + R_f}{R_{IC}} W_a \right\} \quad (10)$$

ここで、
 R_f : CCG の界磁回路抵抗
 R_{IC} : 直列補極および補償巻線抵抗

CCG 方式は大容量機を対象としているので $R_f \gg R_{IC}$ と考える。また

$$W_{IP} + W_{CP} - W_a = W_{IC} \quad (11)$$

$$\frac{R_{IC}}{R_f} = F \quad (12)$$

と置けば、CCG の機械定数は

$$k = \frac{P}{F} \cdot \frac{W_{IC}}{W_c} R_c \quad (13)$$

また、CCG の出力 K は

$$K = \left\{ P \frac{W_{IC}}{W_c} (I_L - I_f) \right\}^2 R_c \quad (14)$$

で与えられる。

P は無火花帯の移動量、 W_{IC} は主電動機の巻線仕様によって与えられるが、 F 、 W_c 、 R_c は定常状態においては任意に定めうる値であり、 F および W_c を大きく、 R_c を小さくすれば CCG の機械定数および出力は小さくなるが、これらの値は過渡状態を考慮して決定する必要がある。

3.3 過渡特性の検討

CCG 方式では、CCG の界磁回路および出力回路が補極に短絡回路を形成するため、定数の選定を適切に行なわないと負荷変動時の過渡整流を悪化させるおそれがある。

補償回路の方程式を求めると

$$L_{IC} \frac{d(i_L - i_f)}{dt} + R_{IC} (i_L - i_f) - M_{IC-C} \frac{di_c}{dt} = L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f \quad (15)$$

$$k i_f = L_t \frac{di_c}{dt} + R_c i_c - M_{IC-C} \frac{d(i_L - i_f)}{dt} \quad (16)$$

$$AT_{IP} = (i_L - i_f) W_{IC} - i_f W_a - W_c i_c \quad (17)$$

ここで、 L_{IC} : 電機子反作用を考慮した主電動機の補極および補償巻線の実効インダクタンス

M_{IC-C} : 補助補極巻線との相互インダクタンス

L_t : CCG 出力回路の全インダクタンス

AT_{IP} : 補極ギャップ起磁力

一般に無火花帯の移動量は 30% 以下であり、また補助補極巻線と直列補極巻線との結合係数は小さいので、(16) 式右辺の第三項は無視できる。したがって

$$FL_f = L_{IC} \quad (18)$$

にとれば、

$$i_L R_{IC} = (R_f + R_{IC}) i_f \quad (19)$$

となり、また

$$P = \frac{M_{IC-C}}{L_t} \sqrt{\frac{L_c}{L_{IC}}} \quad (20)$$

として設計することにより

$$i_c = \frac{W_{IC}}{W_c} \cdot \frac{M_{IC}}{L_t} \sqrt{\frac{L_c}{L_{IC}}} \cdot \frac{R_f}{R_f + R_{IC}} i_L \quad (21)$$

となり、 i_f および i_c は過渡状態においても i_L に比例することがわかる。これより CCG の出力回路抵抗を求めると

$$R_c = \frac{M_{IC-C}}{P T_c} \sqrt{\frac{L_c}{L_{IC}}} \quad (22)$$

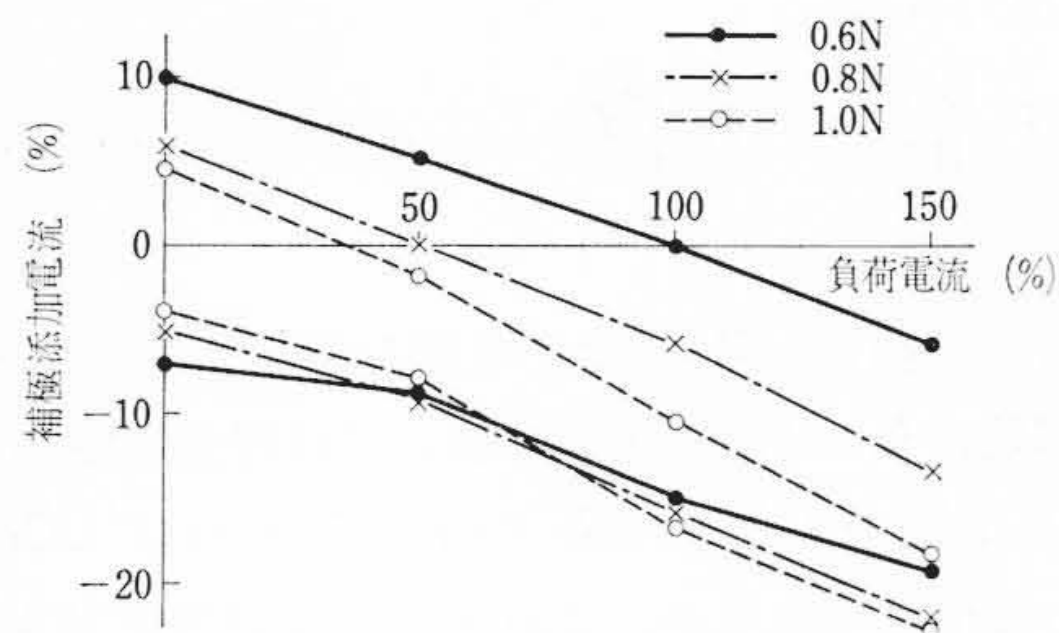
となる。 R_c の最適値は P の値に左右されるため、最適値は回転数によって異なるが、実用上は高速運転時の整流が最も苦しくなるため、抵抗値は高速運転時の P の値より求めなければならない。なおアナログ計算機による検討の結果、CCG の出力回路の時定数 T_c を負荷電流の時定数以下に選定すれば、低速運転時においても非常に良好な過渡整流を達成することがわかった。

以上の結果より、回路定数の選定を適切に行なえば過渡整流はまったく問題のないことがわかる。

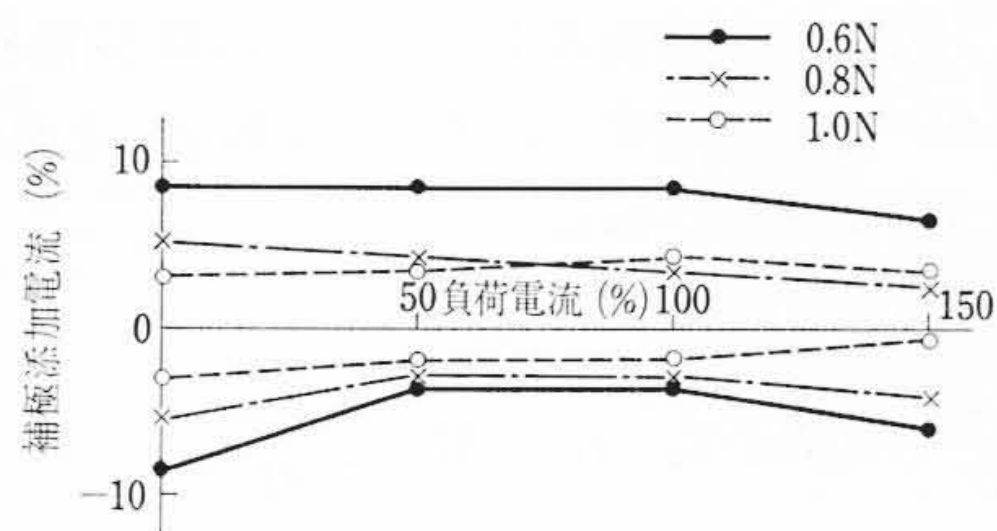
一例として 600 kW の直流電動機についての設計定数を示すと、 $P=0.138$ 、 $F=0.002$ 、 $T_c=10$ ms より、

$$k=50 \text{ (V/A)}, \quad K=1,200 \text{ W}$$

となり、CCG の出力は主電動機の出力のわずか 0.2% となり、実用上なら問題がない。

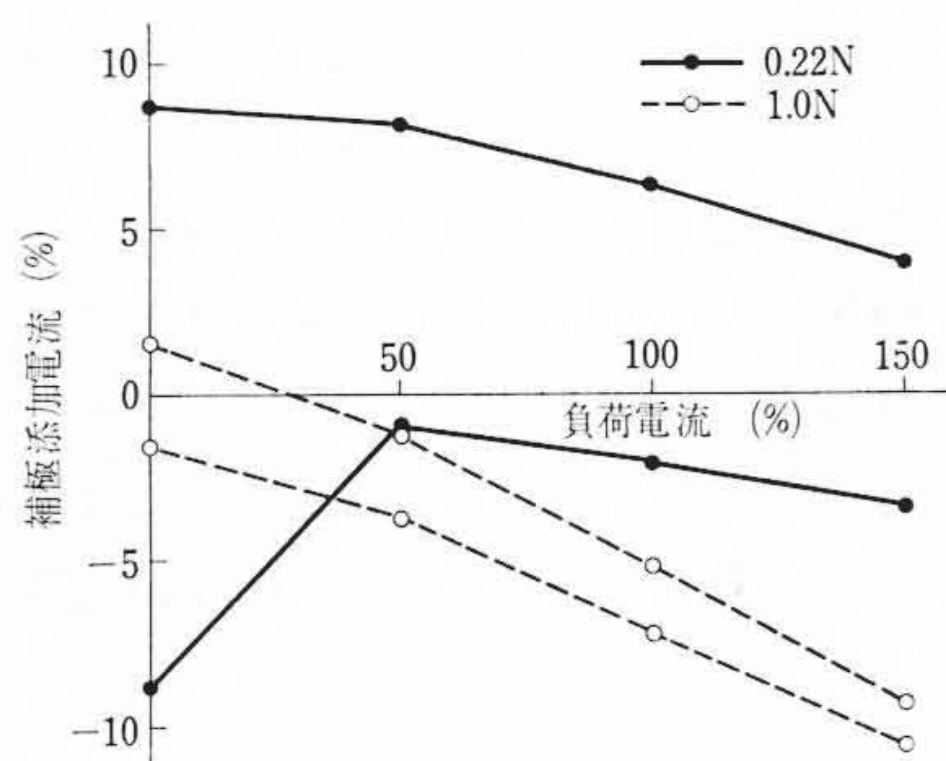


(A) 単独運転時

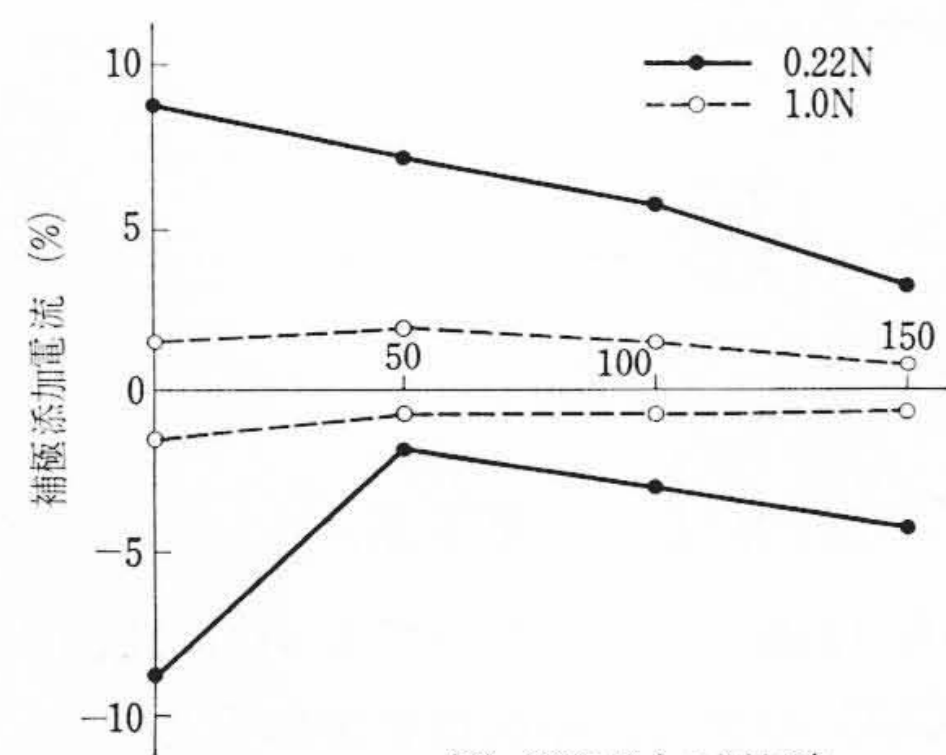


(B) CCG組合せ運転時
(600 kW)

図 9 無火花帯移動現象の補償効果 (測定例 1)



(A) 単独運転時



(B) CCG組合せ運転時
(1,000 kW)

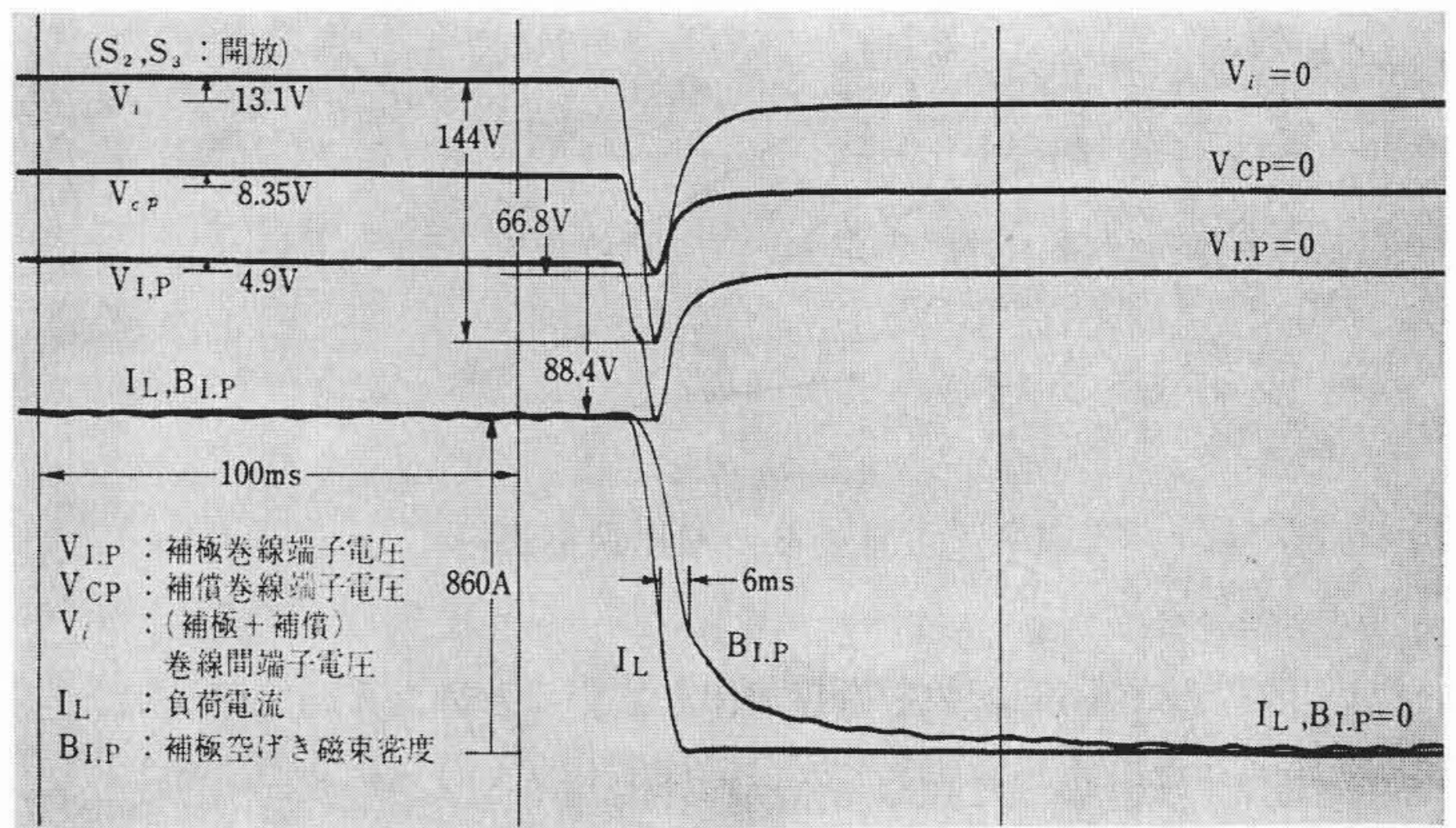
図 11 無火花帯移動現象の補償効果 (測定例 2)

4. 実機による検討

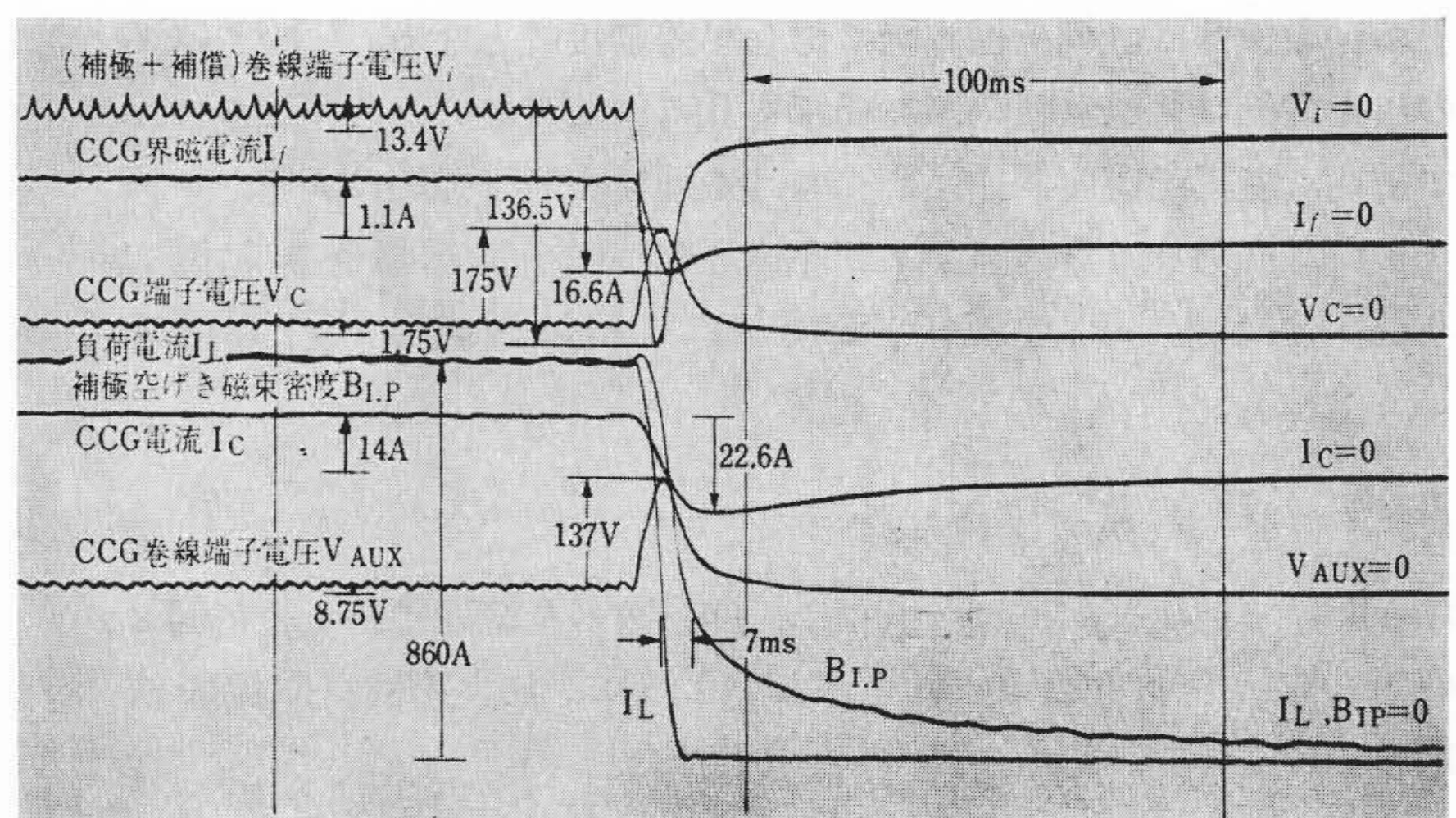
4.1 600 kW 機の実測例

図 9 (A) は 600 kW 機単独運転時の無火花帯で、0.6 N 回転時の無火花帯に対して 1.0 N 回転時の無火花帯は強め整流に移動していることがわかる。この機械に CCG 方式を採用して求めた結果が (B) の無火花帯であり、回転数の変化による移動現象は完全に補償されていることがわかる。

図 10 は負荷しゃ断時のオシログラムを示したもので、(A) は単独運転の場合、(B) は CCG 方式を採用した場合であるが、補極磁束の追従特性はほとんど変化していないことがわかる。また過渡整流を観測した結果でも整流の悪化はまったく認められなかった。

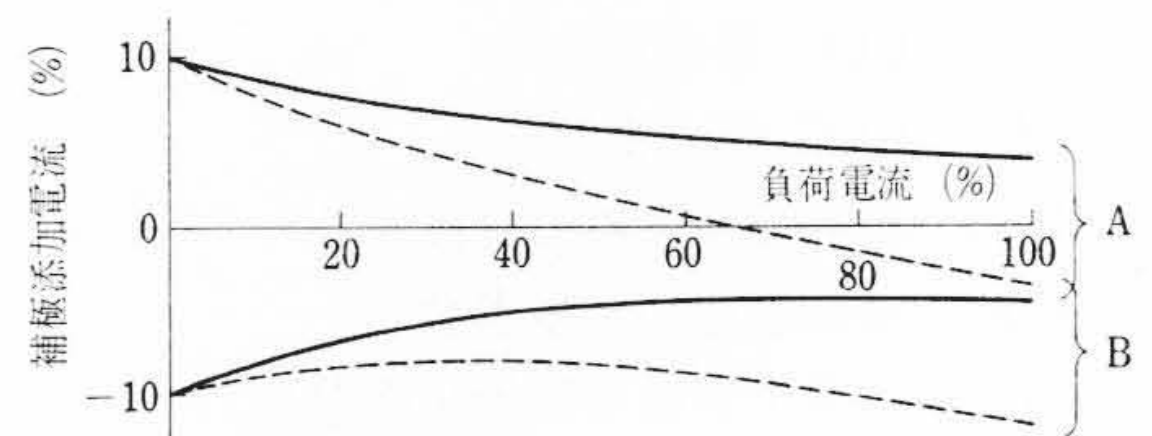


(A) 単独運転

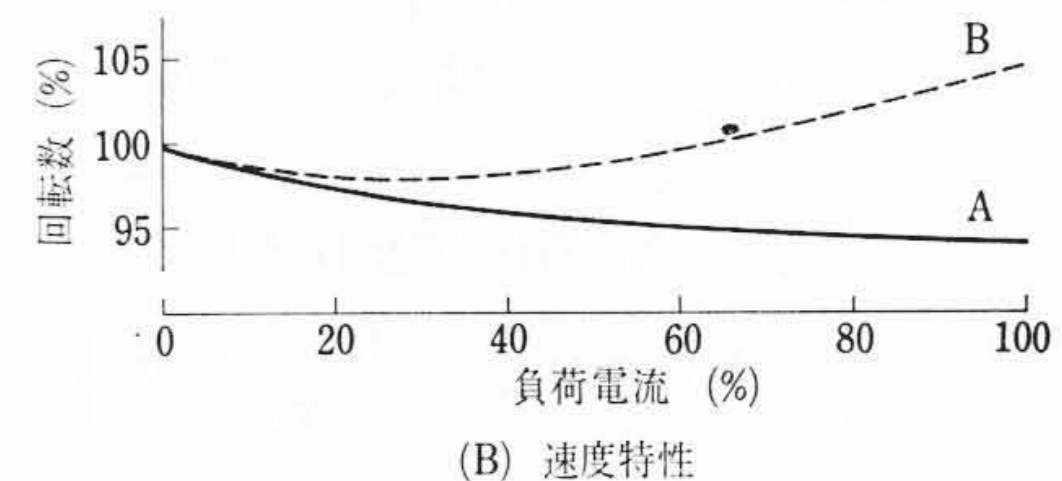


(B) CCG組合せ運転

図 10 600 kW 機負荷しゃ断時のオシログラム



(A) 無火花帯



(B) 速度特性

図 12 無火花帯の強さと速度特性の関係

4.2 1,000 kW 機の実測例

図 11 は 1,000 kW、変速比 4.5 の広範囲の速度調整を行なう直流電動機に適用した結果を示したもので、(A) は単独運転時における無火花帯であり、低速と高速運転時における無火花帯の共通領域が 50% 負荷以上では存在しないのに対して、CCG 方式を採用すれば、回転数に無関係に 150% の過負荷においても完全な無火花運転が可能であることを示している。

4.3 速度特性の改善効果

直流電動機は速度特性は電機子内部抵抗、主磁束のひずみによる減磁作用によって影響されるが、速度調整範囲が広く、とくに界磁調整によって速度調整を行なう機械では、整流電流による起磁力が大きな影響を及ぼすことはよく知られている⁽³⁾。無火花帯移動現象の発生する機械では弱界磁の高速運転時において強め整流となるため、従来は速度特性の尻上がり防止対策が必要であった。図12は無火花帯と速度特性の関係を示したもので、高速運転時において強め整流となった場合、速度特性はかなり尻上がりとなるのに対して、CCG方式を採用し、補極の強さを無火花帯の中心に調整した場合には、速度特性の尻上がりは完全に除去されていることがわかる。

このように CCG 方式は整流特性を改善するばかりではなく、速度特性をも改善するなど、多くの利点をもった方式といえる。

5. 結 言

以上、可変速直流電動機に発生する無火花帯移動現象とその補償対策として新しく開発した CCG 回路方式について述べた。本方式はすでに多くの大容量可変速直流電動機に採用し、その運転性能の良好なことが確認されており、今後製作される可変速直流電動機に対しても採用していく予定である。

終わりに本方式の開発に際しご協力いただいた日立製作所日立工場 立石、大浜両主任技師に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 一木、石川：炭素，第28号，3（1961）
- (2) R. Richter：Elektrische Maschinen, I, 277 Birkhäuser（1951）
- (3) 石川、一木：昭和39年電気四学会連合大会論文集 554



登録実用新案第827532号

新 案 の 紹 介



塙 俊 郎・五味 重 則
守 山 和 義

遊 星 齒 車 装 置

比較的小さな機構で大きな減速比をうるための遊星歯車装置に関し、組立性を考慮し、かつ機構を複雑にすることなく減速比を大きくしようとするもので、原動機軸2と直結した第1段の減速用小歯車3、3'とかみ合う遊星歯車4、4'およびこの遊星歯車4、4'と同軸に設け、ギヤケース1の内周面に固定された内歯車8とかみ合う第2段の減速用小歯車6、6'を歯車軸5、5'を介して支持わく9、9'に支承して減速するものにおいて、歯車軸5、5'と支持わく9、9'との間に軸受10を介在せしめるとともに、支持わく9、9'を軸受部を長径とした円形に形成し、さらに第2段の減速用小歯車6、6'を歯車軸5、5'と一体に形成し、かつ上記遊星歯車4、4'を歯車軸5、5'に形成した第2段の減速用小歯車6、6'の歯並と同形状なスプライン7を介して固定したもので、第2段の減速用小歯車を歯車軸を利用して形成せしめることにより、外径も径小となし、ひいては減速比を要求に応じて比較的大きくとすることが可能となるばかりでなく、遊星歯車をスプライン嵌合（かんごう）するようにしたため、歯車の固定および加工がきわめて容易であり、また支持わくは軸受部を長径とした円形にし、短径部を内歯車の内径より短くなるようにしたため、支持わく間への組込みを何ら支障なく行なうことができる。

(石原)

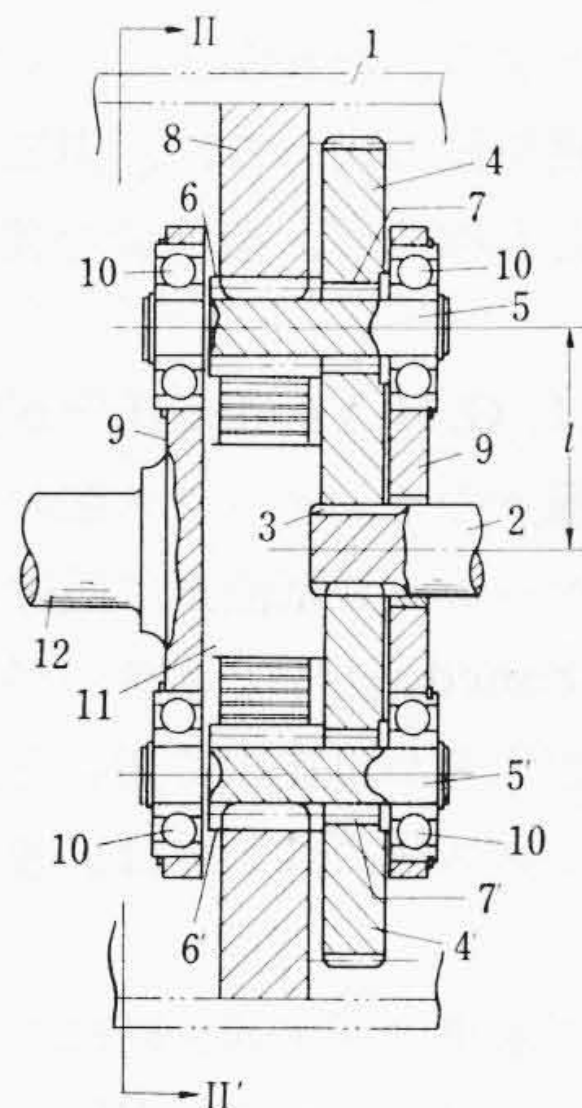


図 1

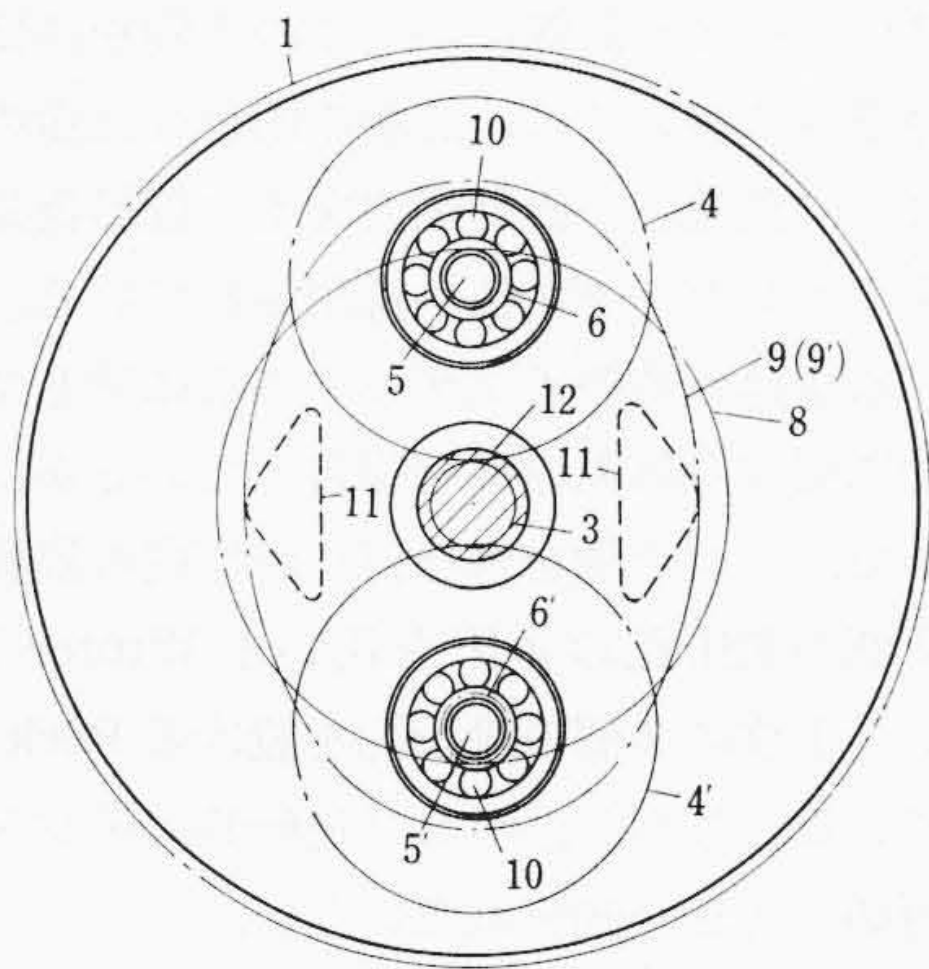


図 2

Vol. 51

日 立 評 論

No. 11

目 次

■ 論 文

- ・タービン発電機ロータの遠心応力解析
- ・長時間運転用MHD発電機の開発
- ・配電線断線検出装置の開発
- ・特殊鋼用ビレットの誘導加熱装置
- ・羽田線500形モノレールカーの乗りごこち
- ・電話用ダイヤルの操作騒音についての一考察
- ・超小形電子計算機HITAC10
- ・Low G₂形高駆動率受像管の特性

- ・カーステレオ用トランジスタ制御マイクロモートル
- ・高耐圧パイプ形OFケーブルの負荷しゃ断時の絶縁体半径方向油圧低下

■ テレビ受信機特集

- ・19形オールトランジスタカラーテレビ受信機
- ・トランジスタ白黒テレビ受信機の信号回路
- ・オールチャンネルテレビ受信機用チューナ
- ・カラーテレビ受信機用半導体素子の開発
- ・17形カラー受像管17FEP22

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101

振替口座 東京20018番