アルミ鋳込かご形誘導電動機の異常現象 (第 1 報)

Abnormal Phenomena of Cage-rotor Type Induction Motors with Aluminum Construction (part 1)

園 山 裕*
Yutaka Sonoyama

内 容 梗 概

かご形誘導電動機においては、各種高調波の相互作用によって種々の異常現象を発生するが、近年、量産品に広く採用されるようになったアルミ鋳込回転子においては、従来多く使用されていた銅バー回転子に比較して異常トルクが著しくなる傾向があり、また機種による差も大きい。これらは従来漂遊損として扱われており、本来の異常現象の理論との関連は不明確で、その諸性質も明らかにされていない。筆者は回転子バー間の短絡のある場合の高調波および二次電流について理論的な考察を行い、さらにこれらをもとにした各異常現象の解析ならびに実験を行って諸性質を検討したが、本稿においてはそのおもなものについて述べる。なお便宜上、第1報と第2報に分け、第1報においては、まずかご形電動機の異常現象について概説したのち、バー間短絡を考慮した二次電流および高調波ならびにバーと鉄心間のスロット絶縁インピーダンスなどのアルミ鋳込電動機の異常現負に関する基礎的な問題について論述し、第2報においては、これらの高調波によって発生する非同期トルクおよび同期トルクならびに磁気騒音の理論および諸性質について述べ、特に問題になる非同期トルクについてはその改善効果にもふれる。

1. 緒 言

アルミ鋳込回転子は生産性に富み、堅ろうであるため近年、誘導電動機の量産品に広く採用されるようになったが、電動機の需要の激増とともにその採用範囲はますます拡大されつつある。かご形誘導電動機においては、各種高調波の相互作用によって種々の異常現象を発生することが知られているが(1)~(4)、特にアルミ鋳込回転子においては、一般に回転子バーと鉄心間の絶縁(スロット絶縁)が良好でないため、バー間に短絡漏えい電流を生じ、異常現象は銅バー回転子のものに比較して著しく、かつ製品のばらつきも大きくなることが多い。

バー間の短絡電流によって電動機の加速中のトルクが害されることは、Packer 氏(5)などが指摘しているほか、Rossmaier 氏などによっても論じられているが(6),(7)、いずれも漂遊損失として取扱われており、従来論じられている異常現象との関連は不明瞭で、その諸性質についても十分明らかにされていない。日立製作所ではこれらの諸現象について早くから研究に着手し(8)、諸問題を解決してすぐれた電動機を市場に送っている。ここではまず一般の異常現象について概説し、さらに従来不明確であった上記アルミ鋳込かご形回転子に対する異常現象の理論ならびにその諸性質について述べる。

2. 異常現象の分類と発生概要

2.1 異常現象の分類

従来かご形誘導電動機の異常現象として扱われているものを大別 するとつぎのとおりである。

(1) 非同期トルク

主特性曲線によく似た特性を有する異常トルクで、すべり s=1 付近に多く生ずる (第1図(a))。

(2) 同期トルク

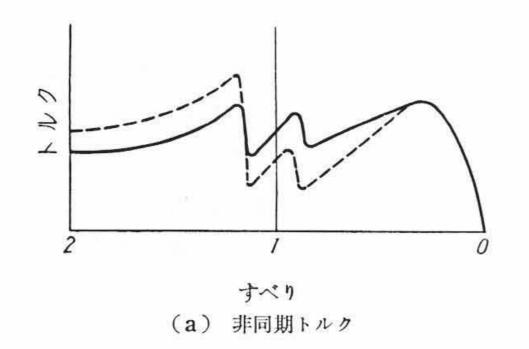
s=1 またはその付近において、ある一定の速度であらわれ、全く同期的性質を有する。一般に固定子と回転子の特定のスロット数組合せにおいて著しい(第1図(b))。

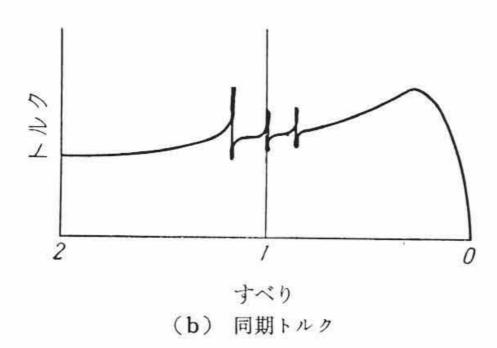
(3) 磁気騒音および振動

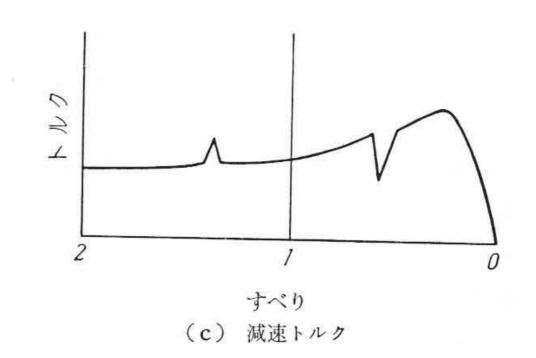
発生原因は種々あるが、同期トルクと同様、固定子と回転子のスロット数組合せに関係あり、各空間高調波間の次数の差に対応した振動の分布力を生ずるのがおもな原因と考えられる(第2図)。なお、これらの振動が著しい場合には、減速トルクを生ずることが多い。この種の異常トルクはすべりs < 1 のときは、トルク特性曲線は陥没し、s > 1 では上方へとがる (第1図 (c))。

(4) 漂遊損失による異常トルク

上記のほかに、高調波の鉄損による異常トルクを生ずる。これらは一般に(1)~(3)と区別して漂遊損として扱われている。 従来、アルミ鋳込かご形電動機において、バー間短絡のために生ずる異常トルク(第1図(a)参照)について論じたものは、ほとんど(4)の漂遊損として扱われており、その諸性質は明確にされていないが、これらは元来、非同期損失の一部に相当するべきものであると考えられる。またバー間短絡のある場合は、後に述べるように空間高調波も変化するから、同期トルクおよび騒音も影響をうけるものと考えられるが、これらについては従来全く論じられたものはない。筆者は、これらの短絡損失を別扱いとせず、短絡を考慮

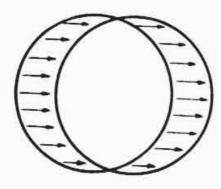




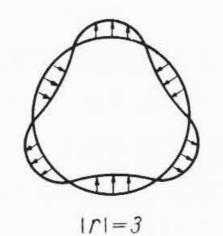


第1図 異 常 ト ル ク の 種 類

^{*} 日立製作所亀戸工場



|r|=1



|r|=2 第2図 振動分布力の種類

した場合の非同期ならびに同期トルクおよび騒音を一般的に取扱ってその諸性質を検討した。

なお, 高調波の鉄損などによる漂遊損は特にアルミ鋳込回転子に おいて問題になるものではないからここでは割愛する。

2.2 異常現象の発生概要

一般に、かご形誘導電動機において発生する高調波には、巻数が 分布していることにより生ずるジグザグ起磁力によるものと、スロット開口のために生ずる磁束の脈動によるものの二つがある。これ らのうちのいずれをとっても前述の異常現象の定性的な説明はつく が、ある程度定量的に検討するには両者を考慮する必要がある。しか し、一般に起動時においては前者、すなわちジグザグ起磁力によるも のが大きく、無負荷時付近になるとスロット開口の影響が大きくな る。したがって無負荷運転時付近における騒音に対してはスロット 開口の影響を考慮する必要があり、同期トルクおよび非同期トルク に対してはジグザグ起磁力でほとんど左右されるものと思われる。

いま,固定子の ν_b '次高周波起磁力 $a_{\nu b}$ ',磁束密度 $b_{\nu b}$ 'とすれば,

$$a_{\nu b}' = A_{\nu b}' \cos \left(\omega t - \nu_b' \frac{\pi}{p\tau} x_1 \right) \quad \dots (1)$$

また

$$b_{\nu b'} = B_{\nu b'} \sin\left(\omega t - \nu_{b'} \frac{\pi}{p\tau} x_1\right) \dots (2)$$

ただし、(1) および (2) 式におけるp は対極数、 τ は極間隔を示す。

また,他の固定子波 $\nu a'$ 次高調波によって生ずる回転子 $\mu a'$ 次高調波磁東密度 $b_{\mu a'}$ は

$$b_{\mu a'} = B_{\mu a'} \sin \left(\left\{ 1 + \frac{\mu a' - \nu a'}{p} (1 - s) \right\} \omega t - \frac{\mu a' \pi}{p \tau} x_1 \right)$$
.....(3)

ただし, かご形回転子においては

ここに N_2 : 回転子スロット数, k_2 : 正または負の整数であらわされる。

つぎに, これらの高調波によって生ずる異常現象の発生条件を求めてみる。

まず,異常トルクの発生条件は,一般に $\mu a'$ 次高調波と $\nu b'$ 次高調波の速度が等しいとき,すなわち

が成立する場合に生ずるが、このうち特に $\mu a' = \nu a'$ 、すなわち $k_2 = 0$ において発生するものが非同期トルクで、この場合はすべり s には無関係になる。また $\mu a + \nu a$ 、すなわち $k_2 + 0$ の場合を同期トルクとして前者と区別している。

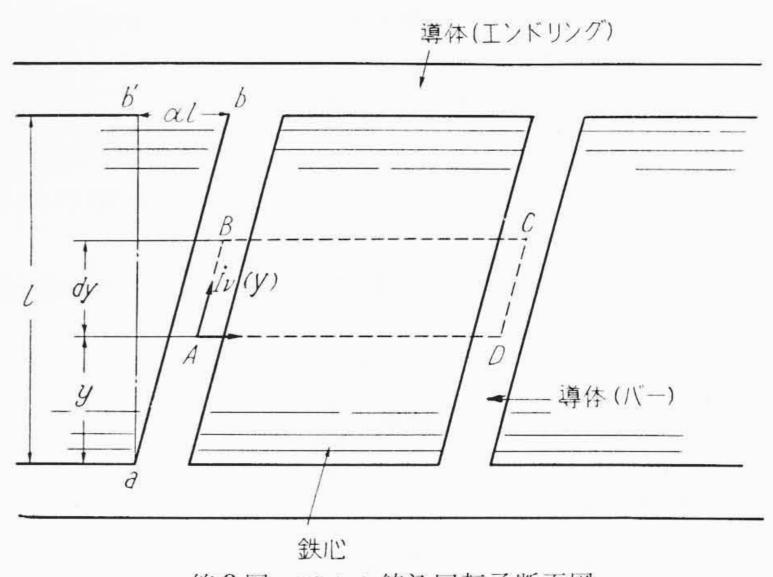
つぎに, (2) および(3) 式で示される磁束により生ずる径方向 に振動分布力 kr は次式であらわされる。

$$k_{r} \propto (b_{\nu b'} + b_{\mu a'})^{2} = b_{\nu b'} b_{\mu a'}$$

$$= \frac{1}{2} B_{\nu b'} B_{\mu a'} \left[\cos \left\{ \frac{\mu a' - \nu a'}{p} (1 - s) \omega t - \frac{\mu a' - \nu b'}{p\tau} \pi x_{1} \right\} \right]$$

$$-\cos \left\{ \left\{ 2 + \frac{\mu a' - \nu a'}{p} (1 - s) \right\} \omega t - \frac{\mu a' - \nu b'}{p\tau} \pi x_{1} \right\}$$

したがってこの場合は $r = \mu a' - \nu a'$ および $\mu a' + \nu a'$ に相当する多角形力を生ずることになる。すなわち,第2図のように |r| = 1 のと



第3図 アルミ鋳込回転子断面図

きは、回転子を一方向へ押しつけるような力を生じ、|r|=2 のときは固定子鉄心をだ円形に変形させる。さらに $|r|=3,4\cdots$ なるときはそれぞれに対して多角形に変形するような振動分布力を生ずることになる。

なお、磁気騒音は、上記のほか二つの固定子波間および二つの回転子波間においても生ずるが、前者は低周波で騒音としてはあまり問題にならず、後者は上記固定子波と回転子波間の場合と同様の振動分布力を発生する。

3. アルミ鋳込回転子の二次電流

アルミ鋳込回転子における異常現象が銅バーに比較して異なるのは,前述のように回転子導体(バー)と鉄心との間の短絡の影響と考えられる。したがってアルミ鋳込電動機の異常現象を明らかにするには,短絡のある場合の高調波二次電流を明らかにする必要がある。以下にこれらの解析と各異常現象に対する適用について考察する。

3.1 等価二次電流の解析

一般にかご形回転子においては、回転子にスキューを施すのが普通であるが、この場合バーと鉄心間の絶縁が完全でない場合にはバー間に短絡電流が流れる。第3図はその状況を回転子の一断面について示したものである。

いま,固定子の ν 次高調波によって生ずる二次電流を \dot{I}_{ν} とし,図のように回転子導体間で軸方向に微小長さ dy を考え,区画 ABC D の電位降下と誘起電圧との関係を求めると次式が得られる。

$$-\frac{d_{2}\dot{I}_{\nu}(y)}{dv^{2}}\dot{z}_{q\nu}+\dot{I}_{\nu}(y)\dot{z}_{e\nu}=\dot{E}_{0\nu}\varepsilon^{j\alpha_{\nu}y}....(7)$$

ここに、 $\dot{I}_{\nu}(y)$: y点におけるバー電流(A) $\dot{z}_{l\nu}=r_{l\nu}+s_{\nu}(x_{l\nu}+x_{m\nu})$: 単位長のバーインピーダンス (Ω/cm)

 $x_{l\nu} = x_s + x_{\sigma\nu}$: 単位長のバーの漏えいインピーダンス (Ω/cm)

 $x_{\sigma\nu}, x_s$: 単位長の高調波およびスロット漏えいリアクタンス (Ω/cm)

 $x_{m\nu}$: 単位長の励磁インピーダンス (Ω/cm)

$$\dot{\mathbf{z}}_{q\nu}' = \frac{\dot{\mathbf{z}}_{q\nu}}{\left(2\sin\nu\frac{p\pi}{N_o}\right)^2}:$$
バー間のインピーダンスの直列

換算値 (Ω)

$$\alpha_{\nu} = 2\nu \frac{p\pi}{N_2} \frac{b_2}{t_2} \frac{1}{l}$$
: スキュー角 (rad/cm)

 N_2 : 回転子スロット数, t_2 : 回転子溝ピッチ, b_2 : スロットピッチに対するスキュー比率

H

 $\dot{E}_{0\nu}=js_{\nu}x_{m\nu}\dot{I}_{1}U_{\nu}$: 第3図 a 点における ν 次高調波誘起電圧 (V)

 \mathbf{I}_1 : 一次電流 (A), U_{ν} : 巻数比

(7)式における左辺第1項はバー間のインピーダンス降下,第2 項はバーのインピーダンス降下をあらわし,右辺は誘起電圧をあら わす。

また、yにおける隣接バー間の電圧 $\dot{V}_{\nu}(y)$ に関しては次式が成立する。

$$\frac{-\frac{d\dot{I}_{\nu}(y)}{dy}\dot{z}_{q\nu'}}{2j\sin\nu\frac{p\pi}{N_{2}}} = \frac{\dot{V}_{\nu'}(y)}{2j\sin\nu\frac{p\pi}{N_{2}}} = \dot{V}_{\nu'}(y)$$

$$\frac{\dot{I}_{\nu}(0) = \dot{I}_{0\nu}}{dy} = \frac{\dot{V}_{0\nu'}}{\dot{z}_{q\nu'}}$$

$$\frac{\dot{V}_{\nu'}(0) = \dot{V}_{0\nu'}}{\dot{v}_{\nu'}(0) = \dot{V}_{0\nu'}}$$
(8)

とおいて、(7) および(8) 式から $\dot{I}_{\nu}(y)$ を求めると、

$$\dot{I}_{\nu}(y) = \frac{\dot{E}_{0\nu}}{(\dot{\tau}_{\nu}^{2} + \alpha_{\nu}^{2})} \left\{ \frac{\varepsilon^{j\alpha_{\nu}y}}{\dot{z}_{q\nu}'} - \frac{\cosh \dot{\tau}_{\nu}y}{\dot{z}_{q\nu}'} - \frac{-\sinh \dot{\tau}_{\nu}y}{\dot{z}_{q\nu}'} - \frac{-\sinh \dot{\tau}_{\nu}y}{\dot{z}_{\nu}} + \dot{I}_{0\nu} \cosh \dot{\tau}_{\nu}y + \dot{V}_{0\nu}' \frac{\sinh \tau_{\nu}y}{\dot{z}_{\nu}} \right\} - \frac{\sinh \tau_{\nu}y}{\dot{z}_{\nu}} \tag{10}$$

通常エンドリングインピーダンスはバー間インピーダンスに比較してスロット絶縁のよくない回転子においても十分小さい。したがって(10)式において $\dot{\mathbf{V}}_{0\nu}=0$ とおけるから,

(12)式が、バー上の任意の点における電流を示すものである。すなわち、 z_{qv}' キ ∞ の場合にはバーの各点における電流の大きさおよび位相は異なる。この場合、バー間のインピーダンス \dot{z}_{qv}' が全長にわたって一様に分布しているものと仮定し、第3図の ab' (スキューのない位置)上におよぼすバー上の任意の点における電流の影響を求め、その平均値をとり、これを従来のスキューファクタを考慮した二次電流に相当する等価二次電流と考えるのが便利である。

一般に回転子電流 I_{ν} によって, μ 次高調波起磁力を生ずるが,この起磁力に対応する等価二次電流 $\dot{I}_{\nu\mu}$ は,

$$\dot{I}_{\nu\mu} = -\frac{1}{l} \int_0^l \dot{I}_{\nu}(y) \, \varepsilon^{-j\alpha\mu y} \cdot dy \quad \dots (13)$$

から求められる。

ν 2 μ 2 と 2 μ 2 と 2 と 2 と 2 と 2 と 2 と 2 に 2 に 2 と 2 に 2 に 2 と 2 に 2 に 2 と 2 に 2 と 2 に 2 に 2 に 2 と 2 に 2 に 2 と 2 に 2 に 2 に 2 と 2 に 2 と 2 に 2 に

$$\dot{I}_{\nu} = \frac{\dot{E}_{0\nu}}{(\dot{\tau}_{\nu}^{2} + \alpha_{\nu}^{2})} \left\{ \frac{2 \alpha_{\nu}^{2} (\cosh \dot{\tau}_{\nu} l - \cos \alpha_{\nu} l)}{\dot{z}_{\nu} (\dot{\tau}_{\nu}^{2} + \alpha_{\nu}^{2}) l \cdot \sinh \dot{\tau}_{\nu} l} + \frac{1}{\dot{z}_{q\nu'}} \right\}$$
.....(14)

また、同期トルクおよび振動の分布力に対しては(13)式において $k_2
eq 0$ に対する $\mathbf{i}_{\nu\mu}$ を求めればよい。

最も普通に採用される回転子1スロットスキューについて求める と

$$\dot{I}_{\nu\mu} = \frac{\dot{E}_{0\nu}}{(\dot{r}_{\nu}^{2} + \alpha_{\nu}^{2})} \left\{ \frac{2 \alpha_{\mu} \alpha_{\nu} (\cosh \dot{r}_{\nu} l - \cos \alpha_{\nu} l)}{\dot{z}_{\nu} (\dot{r}_{\nu}^{2} + \alpha_{\nu}^{2}) l \cdot \sinh \dot{r}_{\nu} l} \right\}$$
......(15)

であらわされる。

3.2 等価二次電流の近似式とその考察

つぎに等価二次電流の近似式を求め、各条件に対してどのように なるかを考察してみる。

3.2.1 非同期トルク $(\mu=\nu)$ に対する二次電流

(14)式から、各スロット絶縁状態に対する近似式を求めてみるとつぎのようになる。

(1) スロット絶縁が比較的良好 $(\alpha_{\nu}^2 \gg \gamma_{\nu}^2)$ な場合 この場合, $\sinh \dot{r}_{\nu} l = \dot{r}_{\nu} l$, $\cosh \dot{r}_{\nu} l = 1$ とおけるから

$$\dot{I}_{\nu} = \dot{E}_{0\nu} \left\{ \frac{1}{\dot{z}_{\nu}} \left(\frac{\sin \frac{\alpha_{\nu} l}{2}}{\frac{\alpha_{\nu} l}{2}} \right)^{2} + \frac{1}{\dot{z}_{q\nu}' \alpha_{\nu}^{2}} \right\} \dots \dots (16)$$

(2) スロット絶縁が著しく不良 $(\dot{z}_{q\nu}' \, 小, \, \dot{r}_{\nu}^2 \gg \alpha_{\nu}^2)$ の場合 この場合, $\sinh \dot{r}_{\nu} l = \cosh \dot{r}_{\nu} l \gg \cos \alpha_{\nu} l$ とおけるから,

(3) スロット絶縁が完全 (デ_ν=∞) な場合

(4) スロット絶縁がきわめて悪い $(\gamma_{\nu} = 0)$ 場合 $\dot{I}_{\nu} = \frac{\dot{E}_{0\nu}}{\dot{z}_{l\nu}}$ (19)

さて,スロット絶縁が完全な場合およびきわめて悪い場合の二次電流がそれぞれ(18)および(19)式であらわされるのは当然であるが,つぎに(16)および(17)式に対するスロット絶縁状態における電流について考察してみる。

スロット絶縁が比較的良好な場合には、回転子バーの誘起電圧と電位降下は積厚全長にわたって考えればほぼ等しい。しかし、バーの任意の点までの誘起電圧と電位降下は等しくなく、両者のベクトル差に等しい電位差が生じ、これによってバー間に電流が流れることになる。このような状態における等価二次電流が近似的に(16)式であらわされる。すなわち、その第2項がバー間に流れる電流の影響を示すもので、スキュー角 α_{ν} が小さいほど大きくなる。

これに対してスロット絶縁があまり良好でない場合には、バーおよびバー間の電流の状況は著しく異なってくる。すなわち、スロット絶縁の良好な場合には電位降下は大部分バーのみについて考えればよいが、スロット絶縁状態が悪くなると、バー間に流れる電流による電位降下が問題になってくる。この場合、バー間に流れる電流ならびに電位降下は、スキュー角が大きいほど大きくなる。このような状態における等価二次電流が(17)式によって近似的にあらわされ、スロット絶縁インピーダンスおよびスキューに対しては(16)式と逆の傾向になる。

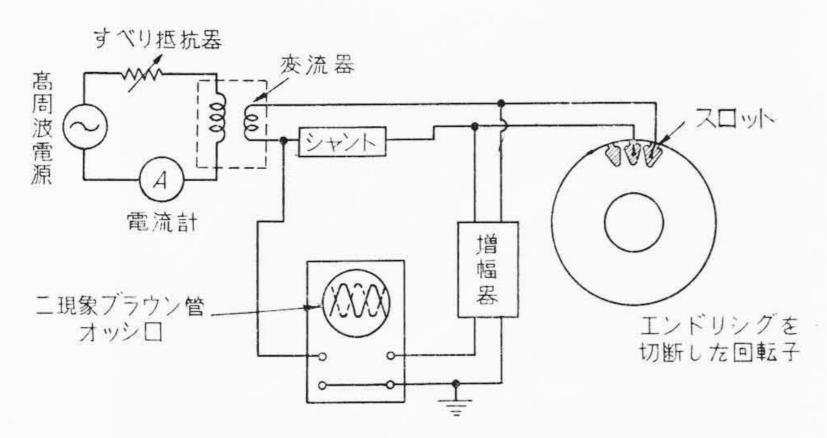
以上の考察から、バーおよびバー間に流れる電流は、スロット 絶縁インピーダンスによってその状況が著しく異なり、またスキューの影響も大きいことが知られる。しかし、一般のアルミ鋳込 回転子においては、スロット絶縁インピーダンスは後に述べるようにバーのインピーダンスに比較してはるかに大きく、またスキューは1スロットスキュー程度が普通であるから(16)式が適用できる場合が多いと考えられる。

第4図は、回転子1スロットスキュー付 ($N_1=24$, $N_2=32$) に

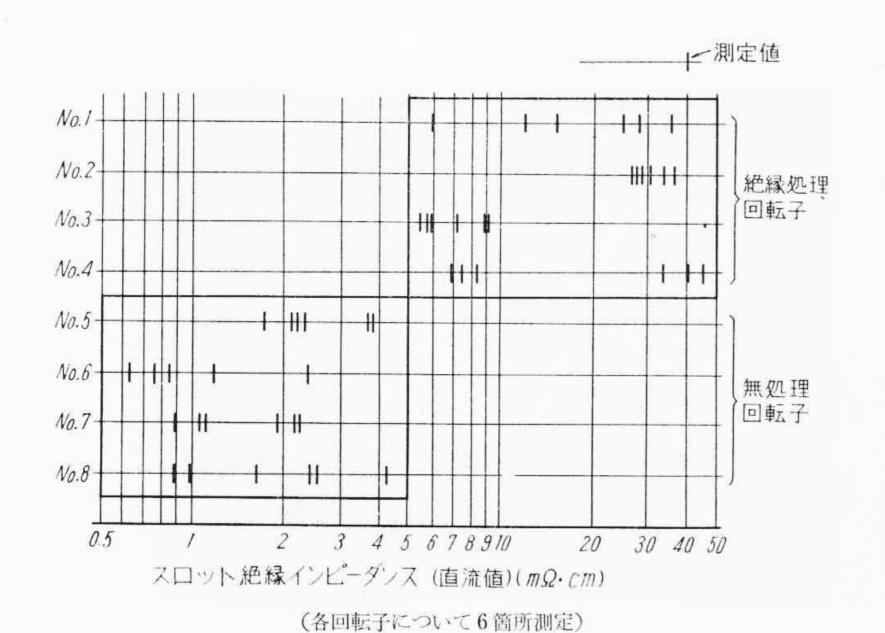
ついて(14)および (16) 式によって計算した等価二次電流の計算 例を示す。なお、スロット絶縁インピーダンスは厳密には多少リアクタンス分を有するが、その影響はわずかであるので、抵抗分のみとして計算した値を示した。図から明らかなように、スロット絶縁抵抗がある程度小さくなると二次電流は急増し、しかも、ある値において最大値を生ずる。また (16) 式による計算値を (14) 式によるものと比較してみると、ある程度以上のスロット絶縁抵抗に対してはほぼ同様の傾向を示す。したがって、スキュー角 α_{ν} およびスロット絶縁インピーダンスが特に小さくなければ、一般 (16) に式の近似式によっても十分その傾向を知ることができる。

3.2.2 同期トルク (μ+ν) に対する二次電流

この場合もμ=νの場合と同様な考察が可能であるが、前述の



第5図 スロット絶縁インピーダンス測定回路



第6図 スロット絶縁インピーダンス (直流値) の測定結果

ようにスキューが完全に回転子1スロットスキューの場合,すなわち (15) 式において, (16) 式の場合と同様 $\sinh \dot{r}_{\nu} l = \dot{r}_{\nu} l$, cosh $\dot{r}_{\nu} l = 1$ として近似式を求めると,

$$\dot{I}_{\nu\mu} = \dot{E}_{0\nu} \left\{ \frac{\alpha_{\mu}^{2} \cdot \alpha_{\nu}^{2}}{\dot{z}_{l\nu} (\dot{r}_{\nu}^{2} + \alpha_{\mu}^{2}) (\gamma_{\nu}^{2} + \alpha_{\nu}^{2})} \times \left(\frac{\sin \frac{\alpha_{\mu} l}{2}}{\frac{\alpha_{\mu} l}{2}} \right) \left(\frac{\sin \frac{\alpha_{\nu} l}{2}}{\frac{\alpha_{\nu} l}{2}} \right) \right\} \dots (20)$$

が得られる。

すなわち、 デュ=0のときは従来のスロット絶縁が完全な場合と

全く同様になる。したがって,スロット 絶縁が完全でないとき,すなわち $\dot{\gamma}$ v \neq 0 においては,スロット絶縁が完全な場合 に比較してかえって減少することになる。このことは,バー間に短絡のある場合は固定子高調波によって回転子に同次 数の短絡電流は増加するが,このために高調波は吸収されて減少することを示すものである。回転子に発生する高調波の うち優勢なものは固定子基本波(ν =1) およびスロット高調波 $\left(\nu$ =1± $\frac{N_1}{p}\right)$ によって生ずるものであるが,これらに対してはいずれも(20)式によるものはかなり小さくなる。

なお,上記はスキューが完全に回転子 1スロットの場合であるが,スキューが 回転子1スロットと異なる場合は必ずし

も短絡によって減少するとは限らず (16) 式と同様逆に増加することもあるが、これらの詳細は別に述べることとし、ここでは割愛する。

4. 回転子のスロット絶縁インピーダンスと高調波

上記の理論的な考察が妥当なことを確かめ,かつその状況を知る ための二三の実験例を示す。

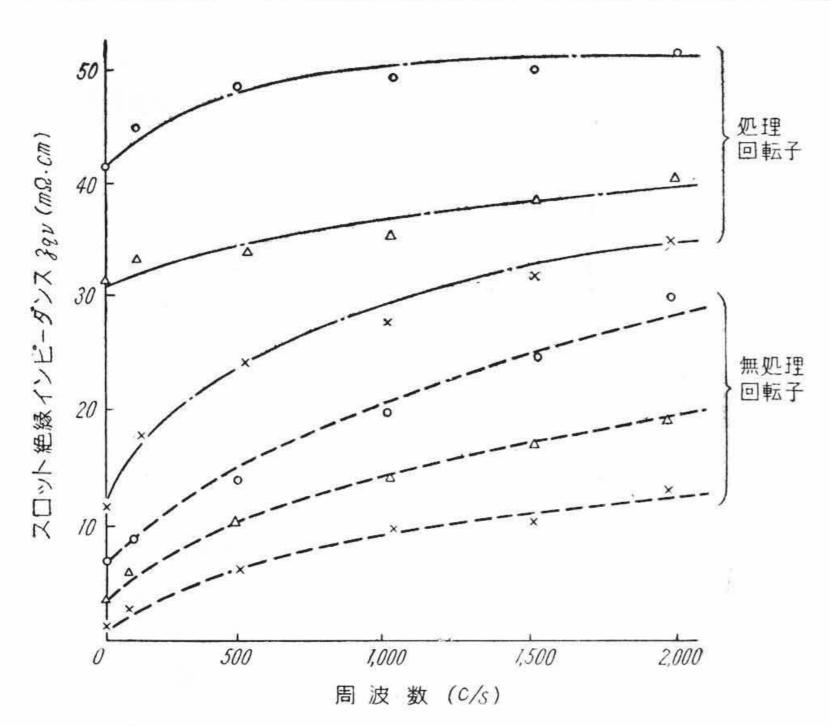
4.1 スロット絶縁インピーダンス

アルミ鋳込回軽子は製作条件のわずかな差によってバーと鉄心間の接触状態はかなり相違し、しかもスロット絶縁インピーダンスは周波数によっても異なるので、各種の回転子についてつぎのようにして測定した。すなわち、回転子の両端のエンドリングを切断し、バー間に直流および高周波電源を接続して電流を測定した。第5回は高周波に対するスロットインピーダンスの測定回路を示す。また、この場合、インピーダンスの位相は電圧と電流をブラウン管で観測した。

スロット絶縁インピーダンスの測定結果(直流値)の一例を**第6** 図に示す。図は一個の回転子について6箇所測定したものである。 No.5~8までは特にバーと鉄心間のスロット絶縁を良好にしたものについて測定したものである。

つぎに、交流による測定結果を**第7**図に示す。周波数に対するインピーダンスの増加傾向は、スロット絶縁状態によって異なり、スロット絶縁が良好なほど周波数に対するインピーダンスの増加の割合は少なくなり、スロット絶縁の良好でないものでは周波数の平方根に比例する傾向を示す。

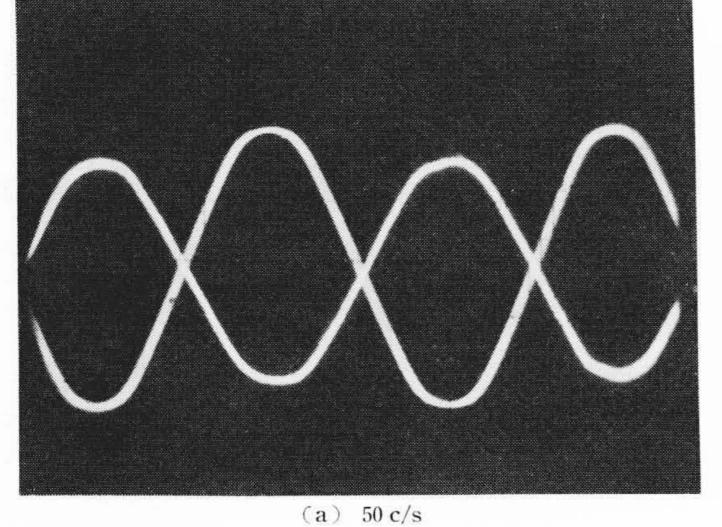
さらに、この場合の位相を確かめるための電圧および電流の位相 の測定例を第8,9図に示す。これらはいずれも位相差を明確にする 日

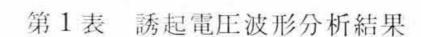


第7図 周波数とスロット絶縁インピーダンスの関係

ために電流の位相を180°ずらせたものである。

以上,スロット絶縁インピーダンスの測定結果について述べたが, これらから,一般のアルミ鋳込回転子におけるスロット絶縁インピ ーダンスは, バーと鉄心間の接触抵抗が大きく, (16) および (20(式の近似式による推定が十分可能であると考えられる。またスロッ ト絶縁インピーダンスは周波数によってその大きさおよび位相が異 なるが, その変化の度合はスロット絶縁インピーダンスの絶対値が 小さいほど大きい。しかしスロット絶縁は製品による差が大きく, また同一回転子においても位置によって相違するから、特に正確な 検討を必要とす合以外る場は、抵抗分のみを考慮してよく、また周 波数に対する変化はスロット絶縁の良好なものでは考慮する必要は





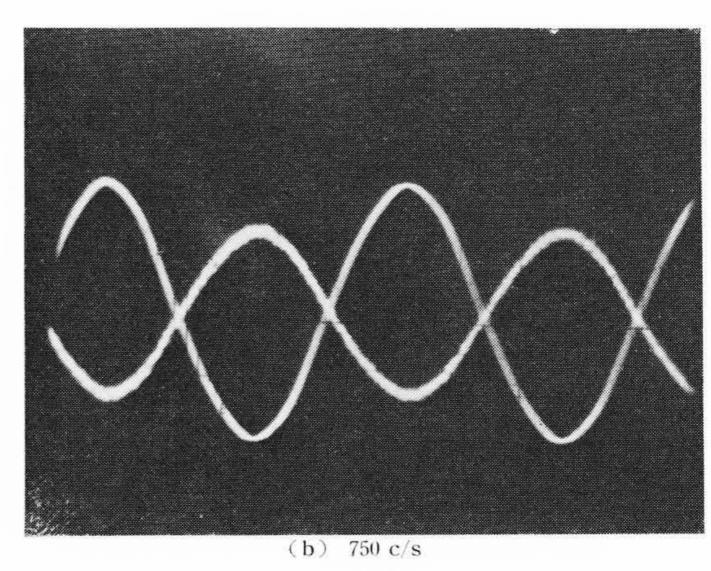
条	無 処 理 回 転 子				絶 緑 処 理 回 転 子			
件	周波数 (c/s)	回転数 (rpm)	成分周波数 (c/s)	誘起電圧 (mV)	周波数 (c/s)	回転数 (rpm)	成分周波数 (c/s)	誘起電圧 (mV)
無	60	3600	60	350	60	3610	60	370
負			1970	13			1850	34
荷							1970	80
時							3780	10
		3440	60	345	60	3450	60	350
			180	10				
全	60		1640	17			1650	25
負			1750	90			1770	200
			1880	62			1890	230
荷			1990	17			2000	36
時			2100	12			2130	14
							3610	14
							3730	14

ないが、良好でないものは近似的にその平方根に比例するものと考 えてよかろう。

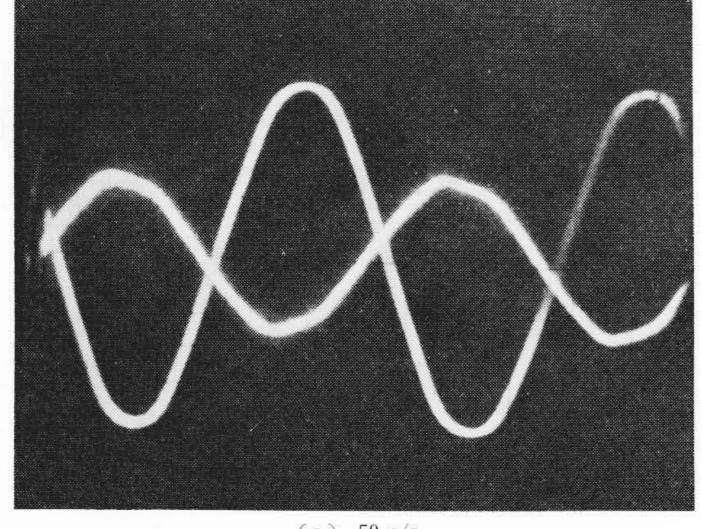
4.2 二次高調波

つぎに、アルミ鋳込回転子におけるバーと鉄心間の短絡が二次高 調波に対してどのような影響を与えるかを示す。

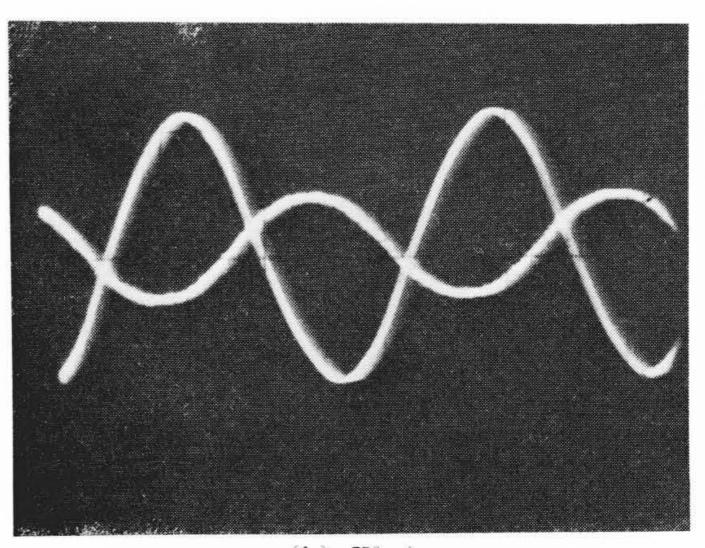
第10図(a),(b)は非同期トルクの著しい三相電動機(第6図 における No. 1, No. 7 で、いずれも N_1 =24, N_2 =32 回転子 1 スロ ットスキュー付)について短絡の影響をみるための実験例である。 すなわち, それぞれの回転子を使用した電動機について, 固定子歯 にサーチョイルを巻き,これに生ずる誘起電圧をブラウン管で観測 したものである。また第1表はその波形分析の結果を示す。これら 第9図の高調波は大部分 $N_2 \times 60$ (c/s) 付近のもので、二次の高調波 の漏えい磁束を示すものと考えられるが, スロット絶縁の良否に対 して比較してみると, 明らかにスロット絶縁の良好なものほど脈動 が大きく,スロット絶縁が良好でないものでは著しく減少している。



第8図 電圧と電流の位相差(処理回転子)

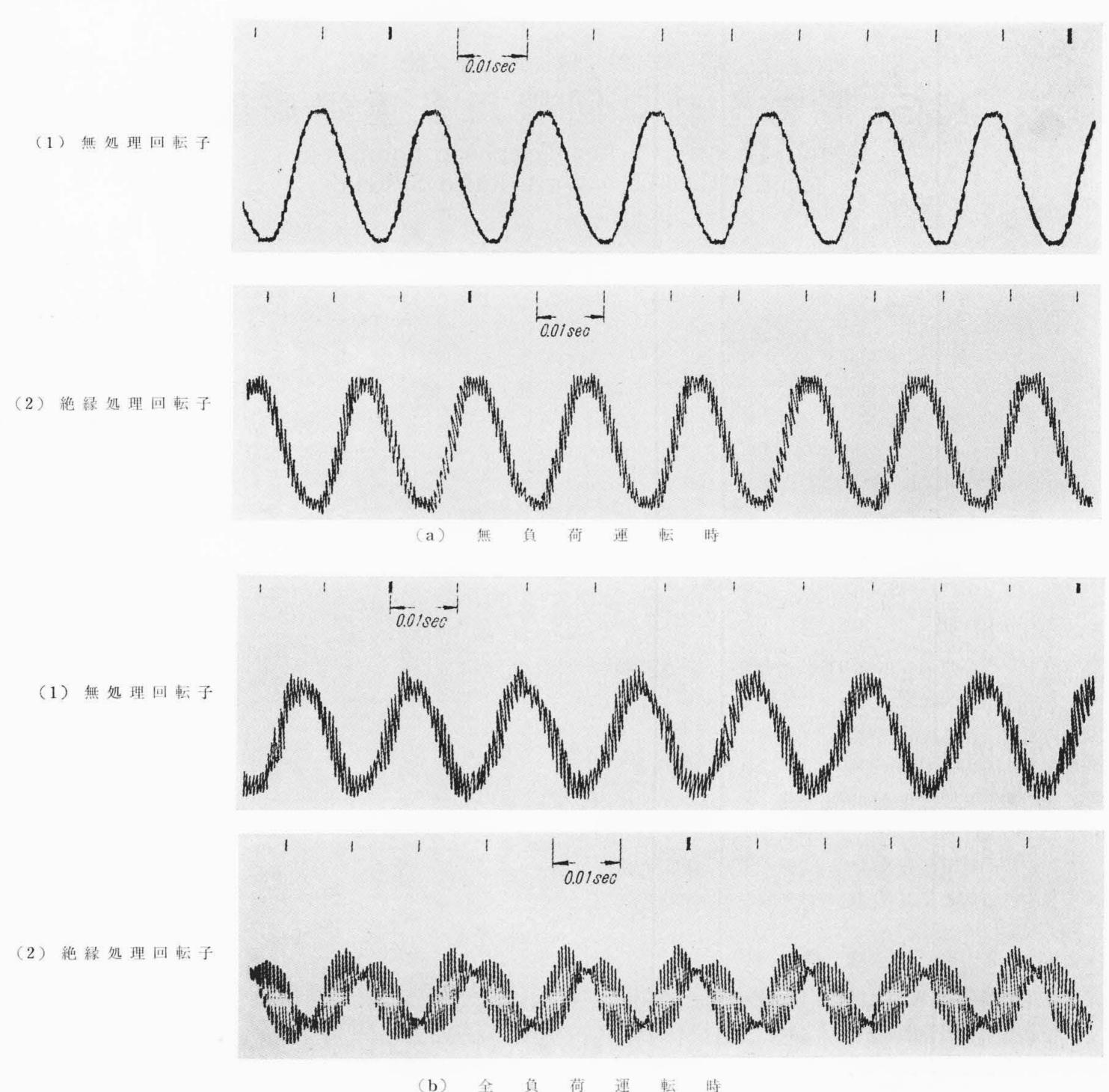


(a) 50 c/s



(b) 750 c/s

電 圧 と 電 流 の 位 相 差 (無処理回転子)



(E相 3.7 kW 2極, N₁=24, N₂=32, 1スロットスキュー 200 V 60 c/s) スロット絶縁の影響 第 10 図 固 定 子 歯 の 誘 起 電 圧 波 形

このことは前述の各高調波起磁力に対する等価二次電流の考察が妥当なことを裏書きするものである。すなわち、スロット絶縁の良好でない場合には、回転子バー間の短絡電流が増加するため I_{ν} も増加するが、一方これによって磁束の脈動がおさえられることになり、 $I_{\nu\mu}$ は減少することを示すものである。

したがって、後に述べるように、スロット絶縁が良好でミ鋳込ないアル回転子においては一般に短絡電流によって非同期損失は増大して大きな異常トルクを生ずるが、一方同期トルクおよび磁気騒音は増加せず、特に第9図に示した定常運転時付近における騒音はむしろ減少する傾向を示す。

しかし、前にも述べたように、スキューが回転子1スロットでない場合には短絡によって二次高調波磁束は必ずしも減少せずかえって増加することもある。またみかけ上回転子1スロットスキューであっても、スロット絶縁状態が積厚全長にわたって一様でない場合には、実質的には回転子1スロットスキュー斜溝とは異なってくる。このような場合に二次高調磁束が減少しないのは、バー間の短絡電流によってスキュー効果が減少するためと考えられる。特に単相電動機においては逆相電流によるものも生じ、短絡の影響がいっそう大きいから、二次高調波漏えい磁束も増加する場合が多い。

以上の実験結果から各異常現象を左右する二次高調波に対する等 価二次電流の考察が妥当なことが了解でき,一般にスロット絶縁の 良好でない場合には、設計、製作条件によって相違するが、特に非同期トルクが最も問題になるこが知られる。

5. 結 言

以上、かご形電動機における異常現象について概説し、アルミ鋳 込回転子における異常現象を支配する高調波二次電流について論述 し、さらにこれらに関する二三の実験結果を示した。

特に、各異常現象に対する等価二次電流を考えることにより、従来のスロット絶縁が完全な場合と同様の取扱が可能になり、またスロット絶縁インピーダンスの諸性質ならびに電流の近似式の適用を明らかにした。さらにこれらをもとにした各異常現象の諸性質については次号で述べる。

参考文献

- (1) Drease: Trans. A. I. E. E. 49, 1033 (1930)
- 2) Hildebrand: Trans. A. I. E. E. 848 (1930)
- (3) Richter: Elektrische Maschinen Bd. IV, 176, Zweite Auflage (1954)
- (4) 尾本,石崎:電工論,4,127(昭27)
- (5) Packer: Trans. A. I. E. E. 68, 253 (1949)
- (6) Rossmaier: E. U. M. 57, 249 (1934)
- (7) Odok: Trans. A. I. E. E. 77, 43 (1958)
- (8) 片木: 日立評論 40,27 (昭33)