UDC 621.318.13.017.32: 621.3.018.783.3

論文

48-A 72

電気鉄板に生じるマイナーループヒステリシス損に関する研究

岡山大学 石原好之
岡山大学 中田高義
岡山大学 中野正典

1. ま え が き

最近サイリスタにより位相制御された電圧で電動機などが運転される。この場合、印加電圧波形のひずみが損失にどのような影響を与えるかが問題となってきた。また、五脚鉄心の変圧器では、その構造上磁束はひずみ波となる。

このように励磁電圧などがひずんでいる場合の商用周波領域における鉄損算定法として、われわれは鉄損を対称ヒステリシスループヒステリシス損、うず電流損およびマイナーループのヒステリシス損に分けて計算することを提案した。⁽¹⁾ 前論文では、マイナーループのヒステリシス損は、振幅の等しい対称ヒステリシスループのヒステリシス損と同じとして鉄損を計算した。

しかしながら、前論文でも述べたようにマイナーループの含有率の大きいときには、その振幅だけでなく位置、対称ヒステリシスループの最大磁束密度なども考慮しなければならない。ところが、現在までマイナーループ損に関する研究はきわめて少なく、わずかに Ball 氏ら⁽²⁾の研究があるが、これは主として磁化曲線上に描かせた非対称ヒステリシスループについての検討である。これもヒステリシスループの頂点に生じたマイナーループには違いないが、これだけであらゆる位置に生じたマイナーループ損を論ずるには不十分である。なぜなら、同じ高さに生じたマイナーループでも、それが

ヒステリシスループの頂点に位置するものと、途中に位置するものとはその形状は当然異なり、マイナーループのヒステリシス損も異なってくる。さらに、最近の電気鉄板について、マイナーループのヒステリシス損がどのようなになっているか検討しておくことは意義がある。

そこで本論文では、マイナーループのヒステリシス損がマイナーループの振幅、位置、ヒステリシスループの最大磁束密度、材質などの諸因子によってどのような影響をうけるかについて実験的検討を行なった。

実験結果から、任意のマイナーループの変位係数を求める方法を見いだすとともに、これを利用してマイナーループの含有率の大きいひずみ波による鉄損を、精度よく算定できることを確かめた。

2. 実験および結果

〈2・1〉 実験項目と実験方法 前述のように、われわれの提案した方法でマイナーループを含むひずみ波による鉄損を算定するには、マイナーループのヒステリシス損を知る必要がある。交流のヒステリシスループ上に生じたマイナーループでは、そのループの中にヒステリシス損とうず電流損を含んでいるため、マイナーループのヒステリシス損について論ずるには不適當である。そこで本論文では、一部の実験を除き直流ヒステリシス曲線上にマイナーループを描かせ、その実測した面積から鉄損を計算する方法をとった。それによってマイナーループのヒステリシス損に与える諸因子の影響について検討を行なった。

マイナーループの損失に影響する因子としては次の項目が考えられる。

Minor Loop Hysteresis Losses in Electrical Steel Sheets. By Y. ISIHARA, Member, T. NAKATA, Member & M. NAKANO, Member (Faculty of Engineering, Okayama University).

石原好之: 正員, 岡山大学工学部電気工学科
中田高義: 正員, 岡山大学工学部電気工学科
中野正典: 正員, 岡山大学工学部電気工学科

第 1 図 最大磁束密度 B_m 、マイナーループの振幅 B_k 、マイナーループの位置 B_c 、象限の定義

Fig. 1. The definition of the maximum flux density B_m , the minor loop amplitude B_k , minor loop position B_c and Quadrant.

- (1) マイナーループの振幅 B_k
- (2) マイナーループの位置 B_c
- (3) 対称ヒステリシスループの最大磁束密度 B_m
- (4) マイナーループの発生象限
- (5) ヒステリシスループの形状 (材質)

ここで、 B_k, B_c, B_m は第 1 図のように定義する。また、発生象限は第 1 図のマイナーループ 1 のようにヒステリシスループの上り曲線上に生じるものを第 1 象限、2 のように下り曲線上に生じるものを第 2 象限と定義する。

B_k, B_c, B_m および象限のすべての組み合わせで実験を行ない、それらがマイナーループのヒステリシス損に及ぼす影響を検討するのが理想的であるが、実験点が膨大になりすぎる。そこで、少ない実験点で諸因子がマイナーループのヒステリシス損に与える影響を推定できるように、以下に述べる (I)～(IV) の条件で実験を行なった。

(I), (II) および (III) 項では、直流ヒステリシス曲線上第 1 象限に生じたマイナーループのヒステリシス損の傾向を検討した。また (IV) 項については後述の理由から交流で実験を行なった。

実験に使用した材料は、方向性ケイ素鋼板として G10^{*1}、無方向性ケイ素鋼板として S10^{*2} および角形ヒステリシス特性を有するものとして 50% NiFe^{*3} を用いた。

参考のために、第 2 図にこれら 3 種の材料の $B_m = 10\text{ kG}$ の直流ヒステリシスループを示した。

(I) ヒステリシスループの形状の影響 ヒステリシスループの形状の違いによる影響を検討するため G10, S10, 50% NiFe の各材質について $B_m = 10\text{ kG}$, $B_k = 2\text{ kG}$ 一定で、 B_c を 0 から 1 kG ごとに変化させて、そのマイナーループのヒステリシス損を測定した。

(II) B_k, B_m 一定で B_c を変化した実験 こ

*1: 新日鉄 Z10 使用, *2: 新日鉄 MC10 使用, *3: 東北金属センデルタ使用

第 2 図 材質によるヒステリシス曲線の違い

Fig. 2. Hysteresis loops of various materials.

の実験ではマイナーループの位置によってそのヒステリシス損がどのように変化するか、またそれが B_m とどのような関係にあるかを検討する。

まず $B_k = 2\text{ kG}$ 一定とし、 B_m をパラメータとして実験を行なった。 B_k が小さいと面積測定時に誤差が生じやすいし、あまり大きいと B_c の変化範囲が小さくなる。このことを考慮して、プランメータでの種々の面積測定結果より誤差が 3% 以下であると推定される $B_k = 2\text{ kG}$ で測定を行なった。 B_m は G10 では 10 kG から 15 kG, S10 では 8 kG から 14 kG まで 1 kG ごとに実験を行なった。XY レコーダの記録寸法制限のため、高磁束密度ではヒステリシスループが細くなるので、面積測定誤差を 3% 以下にするには前述の最大磁束密度までしか実験を行なうことができなかった。

次に、 B_m を G10 では 13 kG, S10 では 12 kG 一定とし、 B_k をパラメータとして実験を行なった。 B_k は G10, S10 とも 3 kG から 5 kG まで 1 kG ごとに变化させた。これらのいずれの実験においても、 B_c は 0 kG から $(B_m - B_k)\text{ kG}$ まで 1 kG ごとに变化させた。

(III) B_c, B_m 一定で B_k を変化した実験 この実験では B_k により損失がどのように変化するか、またそれが B_m とどのような関係にあるかを検討する。 B_c を大きくすると B_k を広範囲に変化させることはできない。そこで B_c の値として B_k を最も広範囲に変化させることのできる $B_c = 0\text{ kG}$ とした。 B_k は 2 kG から 1 kG きざみで $(B_m - 1)\text{ kG}$ まで実験を行なった。 B_m は前項と同じにとった。

(IV) マイナーループ発生象限の影響 マイナーループがヒステリシス曲線の上り側にできる第 1 象限の場

合と下り側にできる第2象限の場合とでは、たとえ B_c , B_k が同じであってもその形状は変化する。したがって、象限の違いによってマイナーループのヒステリシス損に違いが生じることが考えられる。この問題を検討するためには、マイナーループを第1象限と第2象限に同じ B_c , B_k で描かなければならない。直流でこの実験を行なうのは困難である。そこで、以下に述べるひずみ波の性質を利用して実験を行なった。

ひずみ磁束によりヒステリシスループにマイナーループが生じる場合、そのひずみ波と逆波形⁽³⁾の関係にある二つの波形では B_m , 実効値磁束密度 B_e ⁽⁴⁾, B_k および B_c はまったく同一であるが、ただマイナーループの発生象限のみが異なる。 B_m , B_c が同一であることから、二つのひずみ波の対称ヒステリシスループのヒステリシス損およびうず電流損は同じである。したがって、逆波形の関係にある二つのひずみ波による鉄損に差があるとすれば、マイナーループの発生象限の違いがマイナーループのヒステリシス損に影響を与えたものと考えることができる。

そこで、この関係を利用して、50Hzの基本波に第三調波が単独に混入したひずみ波と、その逆波形のひずみ波について、それぞれの鉄損を測定することによってマイナーループの発生象限の影響を検討した。この実験は、ヒステリシス損の全鉄損に占める割合の大きいものについて行なわないと明確な結論が得られないおそれがある。そこで、材質はヒステリシス損分の多い S10 に限り、 B_k は 2, 3, 4kG で、また最大磁束密度は 10kG で実験を行なった。 B_k の値は小さすぎても無論だめであるが、大きすぎても後述の〈2.4〉節の(3)項より損失の差は大きくならないと考えられる。参考までに、第1表にはそのときの基本波と第三調波の最大磁束密度も示した。表中の角度はひずみ波を次式で表わしたときの位相角 θ_3 の絶対値である。

$$b = B_1 \sin \omega t + B_3 \sin 3(\omega t + \theta_3) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 B_1 : 基本波の振幅, B_3 : 第三調波の振幅

同位相とは $0^\circ \leq \theta_3 < 60^\circ$ の場合で、このときのマイナーループは第1象限に発生する。また、逆位相とは $0^\circ \geq \theta_3 > -60^\circ$ の場合で、マイナーループは第2象限に発生する。⁽¹⁾

〈2.2〉 実験装置 第3図に直流ヒステリシス曲線の測定回路を示した。試料のケイ素鋼板 G10, S10 については厚さ 0.35mm, 縦目の試料を用いて 25cm エプスタイン試験器で測定した。また、50% NiFe に

第3図 測定回路

Fig. 3. Measuring circuit.

ついては、厚さ 0.1mm の試料で内径 130mm, 外径 140mm, 高さ 10mm の巻鉄心を作って測定した。なお、G10 は厚さ 0.35mm の試料で内径 133mm, 外径 200mm, 高さ 30mm の巻鉄心, S10 は厚さ 0.35mm, 内径 270mm, 外径 330mm のものを 23 枚重ねた環状試料について、エプスタイン試験器での実験と比較しほぼ同様の結果が得られることを確認した。

実験項目の(IV)項は前述の理由で交流で実験を行なった。その測定回路の構成などは文献(1)と同じであるので省略した。

〈2.3〉 実験結果 第4図から第6図に実験結果を示す。(a)図は材質 G10, (b)図は S10 についての結果である。結果を検討し、理解するうえで便利のように変位係数で示した。振幅 B_k のマイナーループのヒステリシス損を W_{hi} , また同じ振幅をもつ対称ヒステリシスループのヒステリシス損を W_h とすれば、変位係数 η は

$$\eta = W_{hi}/W_h \quad \dots\dots (2)$$

で定義する。

第4図に B_k が一定のときの B_c/B_m と変位係数の関係を示した。第4図(a)には 50% NiFe の $B_m=10$ kG での実験結果も示した。G10 および S10 の変位係数は B_c によってかなり大きな変化を示しているが、50% NiFe の変位係数の変化はきわめて少ない。これは 50% NiFe が角形ヒステリシス特性を有するためである。それゆえ、50% NiFe については〈2.1〉節の(I)項以外の実験は行なわなかった。

第5図には $B_c=0$ kG における B_k/B_m と変位係数の関係を示した。 $B_k/B_m=1$ のときには、当然のことながら変位係数は1である。

第6図に B_m が一定のとき、 B_c/B_m と変位係数の関係を示した。 B_k が変位係数に及ぼす影響を検討するため、第7図に第6図から求めた変位係数の増加率と B_c/B_m の関係を示した。ここで変位係数の増加率とは、任意の B_c における変位係数を同じ B_m, B_k に

第4図 $B_k=2\text{kG}$ における B_c/B_m と変位係数の関係
Fig. 4. Relation between B_c/B_m and displacement factor at $B_k=2\text{kG}$.

第5図 $B_c=0\text{kG}$ における B_k/B_m と変位係数の関係
Fig. 5. Relation between B_k/B_m and displacement factor at $B_c=0\text{kG}$.

第6図 B_m 一定としたときの B_c/B_m と変位係数の関係
Fig. 6. Relation between B_c/B_m and displacement factor at constant B_m .

第 7 図 B_m 一定としたときの B_c/B_m と変位係数増加率の関係Fig. 7. Relation between B_c/B_m and increasing ratio of displacement factor at constant B_m .

における $B_c = 0 \text{ kG}$ の場合の変位係数で除した値と定義する。これは B_m, B_k が一定のとき、任意の位置にできたマイナーループと $B_c = 0 \text{ kG}$ に生じたマイナーループの損失の比を意味している。

第 4 図から第 6 図の実測点は非常に多く、実測値をすべてプロットすると図が複雑になって見づらいので、推定曲線のみを描いたが、実測値と推定曲線との誤差は 3% 以内である。

第 4 図の実験点は、 $B_c = (B_m - 2) \text{ kG}$ 以下であるが、後述の変位係数推定法に利用する関係上、 $B_c/B_m = 1$ まで推定曲線を延長し一点鎖線で示した。また第 5 図の実験点は $B_k = 2 \text{ kG}$ 以上であるが、同じ理由から 2 kG 以下も示した。第 4 図および第 5 図の点線は、後述の推定法に便利のように、それぞれ B_c, B_k の等しい点を結んだものである。また第 4 図の点線からは、 B_k が一定の場合の B_m と変位係数の関係を知ることができる。

第 1 表には〈2・2〉節(IV)項のマイナーループの発生象

第 1 表 象限によるマイナーループのヒステリシス損の比較

Table 1. Comparison of the hysteresis losses of various minor loops arisen on the two quadrants.

位相角 (度)	マイナーループの 振幅 (kG)	マイナーループの位置 (kG)	基本波の 振幅 (kG)	第三調波の 振幅 (kG)	全鉄損 (W/kg)	
					第 1 象限	第 2 象限
4	2.06	6.97	9.15	4.21	1.33	1.33
14	2.00	5.10	7.69	4.31	1.27	1.26
29	2.00	3.04	6.39	4.41	1.23	1.23
49	2.00	0.99	5.64	4.45	1.21	1.21
5	3.00	5.90	7.95	5.01	1.44	1.44
17	3.01	3.97	6.41	5.13	1.38	1.37
35	3.02	2.02	5.25	5.20	1.35	1.34
5	4.00	5.02	6.83	5.80	1.66	1.65
20	4.01	3.03	5.25	5.88	1.60	1.60
44	4.01	1.05	4.23	5.92	1.58	1.57

(注) 1. 材質: S10, 2. 基本波周波数: 50 Hz

限の影響を検討するための実験結果を示した。

〈2・4〉 実験結果の総括 〈2・3〉節の実験結果より次の諸点が明らかとなった。

(1) 変位係数は 1 よりも大きい。すなわち、マイナーループのヒステリシス損は振幅の等しい対称ヒステリシスループのヒステリシス損より大である。

(2) B_k が一定の場合は B_c/B_m が大きくなるほど変位係数は大きくなる。また、 B_c/B_m の値が同じでも B_m が大きくなるほど変位係数は大きくなる。すなわち、マイナーループの位置が高くなるほど変位係数は大きい。

(3) B_c が一定の場合は変位係数は B_k が大きくなるにつれて減少し、 $B_c = 0 \text{ kG}$ 一定の場合は 1 に漸近する。

(4) B_k, B_c が同じ場合は B_m が大きいほど変位係数は大きい。すなわち、マイナーループの中心位置の磁化力が大きくなるほど変位係数は大きくなる。

(5) B_m を一定にして、 B_c を変化させたときの変位係数の増加率曲線は B_k の値にかかわらず、ほぼ一本の曲線で表わされる。

(6) B_k, B_c, B_m および象限のうち変位係数に与える影響は B_c がいちばん大きい。

(7) ヒステリシス曲線の形状(材質)によって、 B_m, B_k, B_c の値が同じでも変位係数が異なってくる。ヒステリシス曲線の角形比が大きくなるほど変位係数は減少して 1 に近づく。

(8) 今回の実験の範囲内では、象限による変位係数の違いはほとんど認められなかった。したがって、ひずみ磁束による鉄損を算定する際には、象限の問題は考慮する必要はないと思われる。

3. 変位係数の簡易推定法

第2章で述べたように、変位係数は B_k , B_c , B_m などによって変化するため、任意の条件における変位係数を知るためには無限の実験データが必要である。そこで本章では、〈2・4〉節の実験結果をもとにして、実験曲線から任意の条件での変位係数を算定する方法について述べる。

〈2・4〉節の(5)項「 B_m を一定にして、 B_c を変化させたときの変位係数の増加率曲線が B_k の値にかかわらず一本の曲線で表わされる」ということは、第8図で変位係数 η_1 と η_3 の比が η_2 と η_4 の比に等しいということの意味している。ここで、 $\eta_1 \sim \eta_4$ は第8図のマイナーループ1～4の変位係数で、マイナーループ1と3は振幅 B_{k1} (kG), 2と4は振幅 B_{k2} (kG) であり、また1と2は $B_c = 0$ kG, 3と4は $B_c = B_{c0}$ (kG) である。前述の関係を用いれば、変位係数 $\eta_1 \sim \eta_4$ のうち3個が求まれば、以下に述べる方法で残る1個は求めることができる。

いま、 η_4 が未知であるとき、基準となる η_1 の振幅を 2 kG, 位置を 0 kG にとれば、第4図を用いて $B_{k1} = 2$ kG での η_1 と η_3 を求めることができる。また、第5図より $B_c = 0$ kG での η_1 と η_2 を求めることができる。したがって、第4図、第5図を利用して、未知の変位係数 η_4 が次式より求まる。

$$\eta_4 = \eta_3 \cdot \eta_2 / \eta_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

第4図から、 $B_{k1} = 2$ kG のマイナーループの変位係数 η_3 が求まるのであるから、第5図を書き換えて、 $B_{k1} = 2$ kG を基準にした場合の η_2/η_1 が求まる図を作っておけば(3)式で計算するうえで便利である。この考えに基づいて求めたのが第9図で、縦軸の倍率とは、パラメータが B_m , B_k , $B_c = 0$ kG のマイナーループの変

第8図 マイナーループ説明図

Fig. 8. Schematic diagram of minor loops.

(a) 材質 G10 の場合

(b) 材質 S10 の場合

第9図 B_k/B_m と倍率の関係

Fig. 9. Relation between B_k/B_m and magnification.

位係数 η_2 をパラメータが B_m , $B_k = 2$ kG, $B_c = 0$ kG のマイナーループの変位係数で除した値を表わし、(3)式の η_2/η_1 に一致する。

グラフを利用するうえで便利のように、振幅 B_k の等しい点を結んで点線で示した。

第2表に第4図、第9図を利用して計算した変位係数とその実測値の比較例を示した。なお、第2表の実験点は材質 G10, S10 とともに B_m , B_k , B_c の広い範囲について検討できるように選定した。次に、第2表の

第2表 変位係数の計算値と実測値
Table 2. Comparison of calculated with measured displacement factors.

No.	最大磁束密度 (kG)	マイナーループの振幅 (kG)	マイナーループの位置 (kG)	変位係数		
				実測値	計算値	誤差(%)
1	10	3	1	1.07	1.08	0.9
2	10	6	1	1.05	1.03	-1.9
3	10	6	3	1.10	1.08	-1.8
4	14	3	1	1.16	1.17	0.9
5	14	3	5	1.36	1.37	0.7
6	14	3	9	1.85	1.87	1.1
7	14	3	3	1.24	1.26	1.6
8	14	6	3	1.15	1.18	2.6
9	14	9	3	1.14	1.12	-1.8
10	8	3	1	1.07	1.09	1.9
11	8	6	1	1.02	1.03	1.0
12	8	4	3	1.14	1.12	-1.8
13	13	3	1	1.17	1.19	1.7
14	13	3	5	1.43	1.46	2.1
15	13	3	9	2.19	2.14	-2.3
16	13	3	3	1.27	1.28	0.8
17	13	6	3	1.18	1.21	2.5
18	13	9	3	1.13	1.16	2.6

(注) 1. No. 1~No. 9: G 10, No. 10~No. 18: S 10
2. 誤差=(計算値-実測値)×100/実測値

No. 1 の例について変位係数の推定法を具体的に説明する。まず、第4図(a)から $B_m=10\text{kG}$, $B_e=1\text{kG}$ における変位係数として 1.10 を得る。次に、第9図(a)より $B_m=10\text{kG}$, $B_e=3\text{kG}$ での倍率として 0.981 を得る。変位係数 1.10 に倍率 0.981 を乗じて、 $B_m=10\text{kG}$, $B_e=3\text{kG}$, $B_c=1\text{kG}$ での変位係数として 1.08 を得る。

第2表から、この方法で求めた変位係数の誤差は3%以内に入っていることがわかる。

4. 高ひずみ磁束による鉄損算定法への応用

第3章で提案した変位係数の推定法を、高ひずみ磁束による鉄損算定に応用した場合について述べる。

ひずみ磁束による鉄損 W は次の(4)式で推定できるものとして計算した鉄損を実測値と比較検討した。

$$W = W_h(B_m) + W_e(B_e) + 2 \sum \eta W_h(B_k) \quad (4)$$

ここで、 $W_h(B_m)$ 最大磁束密度が $B_m(\text{kG})$

のときのヒステリシス損(W/kg), $W_e(B_e)$:

実効値磁束密度が $B_e(\text{kG})$ のときのうず電

流損(W/kg)

第3表に実験に用いた磁束波形の諸元、マイナーループのヒステリシス損の計算値、(4)式で計算した鉄損、実測値などを示した。なお、(4)式に用いたうず電流損 $W_e(B_e)$ の算定法は文献(5)の方法によった。この方法は、波形の特性が既知であるひずみ波⁽¹⁾によって生ずる鉄損を多数測定し、全鉄損から計算で求めた対称ヒステリシスループのヒステリシス損、マイナーループヒステリシス損を差し引いてうず電流損を求める方法である。この場合の磁束波形は、いずれも変位係数が1に近いものであったので、マイナーループのヒステリシス損算定時に変位係数を考慮する必要のないものであった。実験は磁束波形が不特定多数の奇数次高調波を含むひずみ波の場合〔第3表(1)~(4)〕、基本波に第五調波が単独に同位相で混入した波形〔第3表(5)~(7)〕、基本波に第五調波が単独に逆位相で混入した波形〔第3表(8)~(10)〕について行なった。第五調波が同位相で混入した場合は2組のマイナーループが同じ位置に発生し、逆位相の場合にはヒステリシスループの頂点と真横に発生する場合である。これらの波形

第3表 高ひずみ磁束による鉄損の計算値と実測値

Table 3. Comparison of calculated with measured core losses produced by high distorted flux.

No.	最大磁束密度 (kG)	実効値磁束密度 (kG)	マイナーループの振幅 (kG)	マイナーループの位置 (kG)	変位係数の 計算値	マイナーループの ヒステリシス損 (W/kg)	全 鉄 損		
							計算値 (W/kg)	実測値 (W/kg)	誤差 (%)
1	13.6	29.1	6.4	2.8	1.22	0.63	3.68	3.73	-1.3
2	13.9	27.5	5.2	5.2	1.42	0.53	3.52	3.49	0.9
3	14.6	34.9	10.0	0.9	1.06	0.25	3.17	3.25	-2.5
4	14.7	27.0	6.3	6.7	1.45	0.15	2.18	2.24	-2.9
5	10.0	14.9	1.0	4.3	1.33	0.06	1.23	1.22	0.8
6	10.0	18.9	2.1	3.7	1.26	0.20	1.67	1.65	1.8
7	10.0	22.2	3.0	3.2	1.21	0.35	2.13	2.11	0.9
8	10.0	13.4	1.1	8.9	1.99	0.05	1.12	1.13	-0.9
9	10.0	16.4	2.0	8.0	1.78	0.16	1.44	1.43	0.7
10	10.0	20.4	3.1	6.9	1.57	0.32	1.94	1.92	1.0
			1.7	0.0	1.14				

(注) 1. No. 1~No. 4: 任意のひずみ波, No. 5~No. 7: 基本波+第五調波(同位相), No. 8~No. 10: 基本波+第五調波(逆位相)
2. 材質: No. 3, No. 4 は G 10, その他は S 10, 3. 基本波周波数: 50 Hz, 4. 誤差=(計算値-実測値)×100/実測値

第 10 図 ひずみ磁束波形

Fig. 10. Distorted flux waveforms.

の B_m , B_c , B_k および B_c は、多数の高調波を含むひずみ波の場合は XY レコーダに記録した波形より読み取り、基本波に第五調波が混入したひずみ波の場合は計算により求めた。なお、材質は No. 3, No. 4 は G 10 で、それ以外は S 10 である。

磁束波形の代表例を第 10 図に示した。なお、波形につけた番号は第 3 表の No. と対応している。

この結果、高ひずみ磁束による鉄損も誤差 3% 以内で算定できることが判明した。

5. む す び

マイナーループのヒステリシス損に影響を及ぼす因子として、マイナーループの振幅、位置、象限、対称ヒステリシスループの最大磁束密度および材質を取り上げ、これらを実験的に検討した。その結果の要約は〈2・4〉節に示した。なぜこのようになるかの理論的考察は稿を改めて検討する。

また、実験結果をもとに変位係数の簡易算定法を提案した。この方法によれば、変位係数を 4% 以内の誤差で求めることができる。この方法によって得た変位係数からマイナーループのヒステリシス損を計算するこ

とにより、マイナーループを含む高ひずみ磁束による鉄損を 3% 以内の誤差で求めることができるようになった。

終わりに、本論文は電氣学会磁性材料研究会において発表した資料⁽⁶⁾に加筆したもので、熱心にご検討下さった研究会の方々、また有益な助言を賜った九州大学工学部 成田教授に深謝します。実験にあたって献身的な協力を得た吉村修治君(現、大阪変圧器)、平田承夫君(現、横河電機)および伏見一郎君(現、三菱石油)に感謝します。また、本研究の一部は文部省科学研究費によるものである。

(昭和 48 年 3 月 19 日受付, 同 48 年 8 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 中田・石原・中野: 電学誌 90, 115 (昭 45-1)
- (2) J. D. Ball: A.I.E.E. Trans. 34, Pt II, 2693 (1915)
- (3) 中田・石原: 電氣学会論文誌 92-A, 241 (昭 47-5)
- (4) 中田・石原・中野: 電学誌 91, 877 (昭 46-5)
- (5) 石原・中田・中野・吉村: 昭 46 電氣四学会中国支部連大 No. 10322
- (6) 石原・中田・中野: 磁性材料研究会資料 MAG-72-4 (昭 47)
- (7) 石原・中田・中野・吉村: 昭 47 電氣学会全国大会 No. 252
- (8) 石原・中田・中野: 第 4 回応用磁気学術講演会 73a A-8 (昭 47)