非正弦波磁束下におけるアモルファス磁性材料の鉄損特性

学生員 堀 慎一朗* 正員 原田 和郎*
正員 石原 好之* 正員 戸高 敏之*

A Study of the Loss Characteristics of the Amorphous Magnetic Material under the Non-sinusoidal Wave Magnetic Flux

Shinichiro Hori*, Student Member, Kazurou Harada*, Member, Yoshiyuki Ishihara*, Member, Toshiyuki Todaka*, Member

This paper has investigated iron loss characteristics of amorphous magnetic materials under the non-sinusoidal wave magnetic flux. The iron loss characteristics of amorphous magnetic materials have been compared with grain-oriented magnetic steel sheet. The measurement of the iron loss has been carried out with SST. As a result, it is found that the increase ratio of the iron loss of the amorphous magnetic material under the excitation of distorted waveforms and symmetric PWM-waveforms is less than that of the grain-oriented magnetic steel sheet. On the other hand, it is found that the increase ratio of the iron loss of the amorphous magnetic material under the excitation of asymmetric PWM-waveforms is larger than that of the grain-oriented magnetic steel sheet.

キーワード : アモルファス磁性材料, 方向性電磁鋼板, 鉄損, 歪み波磁束, 対称 PWM 波, 非対称 PWM 波

Keywords : amorphous magnetic materials, grain-oriented magnetic steel sheet, iron loss, distorted waveforms, symmetric PWM-waveforms, asymmetric PWM-waveforms

1. はじめに

現在, 変圧器の鉄心材料の多くは, 方向性電磁鋼板が使用されている。しかし近年, 鉄心材料としてアモルファス磁性材料を用いる事により更なる損失の低減が達成されている。変圧器などの電気機器の中で生じる磁束波形は, 巻線に正弦波電圧が印加されても, 機器鉄心の部分的な磁束波形は歪むため, 歪み波磁束下での鉄損特性を知る必要がある。また近年, パワーエレクトロニクス技術の発展により, モーターの制御やスイッチング電源に PWM インバータが広く用いられている。アモルファス磁性材料及び方向性電磁鋼板はモーターには使用されていないが, 今後各種機器の高周波駆動化に伴い, PWM 波による高調波が変圧器鉄心に影響することが考えられ, PWM 波励磁下での鉄損特性を知る必要があると考えられる。さらにスイッチングタイミングのずれにより, PWM 波形が非対称になる可能性がある。波形が非対称になると, 直流成分及び偶数調波が重畳してくる。アモルファス磁性材料の偶数調波の影響はまだ検討されておらず, 明確にしておく必要がある。

本論文では, 方向性電磁鋼板とアモルファス磁性材料に

ついて, 実機の変圧器に生じる波形に近い歪み波磁束下での鉄損特性を測定し, 磁束正弦波条件との違いについて検討した⁽¹⁾。さらに, 対称 PWM 励磁下及び対称 PWM 波に直流を重畳させた非対称 PWM 波形励磁下における鉄損特性を明らかにした⁽²⁾。

2. 測定方法

〈2・1〉 歪み波作成方法 図 1 に示す鉄心を用いて歪み波を発生させる磁気回路を構成した。鉄心は磁路長の異なる 2 つの方向性電磁鋼帯で作られたカットコアで構成した。幾何学的平均磁路長はそれぞれ 671mm と 471mm で, 断面積は両方とも 800 mm²である。

図 2 に本実験の測定系を示す。まず, 図 2 の励磁装置の位置に図 1 の歪み波磁束発生用鉄心を置き, 一次巻線に正弦波を印加する。二つの二次巻線からは, 波形の異なる歪み波が得られる。各磁路の磁束波形及び調波解析結果を図 3 に示す。高調波含有率にそれほど大きな変化は見られないが, 各高調波の位相はそれぞれ逆相に入っており, この二つの波形を足し合わせると正弦波になる。この波形をパソコンにとり込み, 図 2 の励磁装置を単板磁気試験器 (SST) に置き変えて, 得られた歪み波により試料を励磁する。

〈2・2〉 PWM 波励磁 対称 PWM 波形は三角波と正弦波の両波形瞬時値の大小関係から生成する⁽³⁾。本実験では単

* 同志社大学工学部電気工学科
〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3
Department of Electrical Engineering, Doshisha University
1-3, Tatara-Miyakodani, Kyotanabe 610-0321

図 1 歪み波磁束発生用鉄心

Fig. 1. Iron cores for distorted waveform generation.

図 2 実験の測定系

Fig. 2. Block diagram of measurement system.

図 3 歪み波磁束波形

Fig. 3. The distorted magnetic flux waveforms.

相の三値 PWM 波形を使用し、変調三角波の振幅に対する正弦波の振幅である変調度を 50% にした。また三角波の変調周波数は基本波周波数の 6 倍、16 倍、36 倍（変調次数 6 次、16 次、36 次）とし、鉄損特性の検討を容易にするため、実際に使用される PWM より低次で実験を行った。図 4 に本実験で使用したそれぞれの理想 PWM 波形と、図 5 にそれらの調波解析結果を示す。図 5 より各変調次数の側帯波の高調波（例えば変調次数 6 次の場合、5 次と 7 次）が最も大きく重畳していることがわかる。それらの大きさは変調次数によらずほぼ一定になっているため、側帯波の高調波含有率の大きさは変調度によって決まってくる。各高調波の重畳の様子を含有率 0.1 以上でみると、変調次数 16 次、36 次

図 4 対称 PWM 波形

Fig. 4. Symmetrical PWM-waveforms.

図 5 対称 PWM 波形の調波解析結果

Fig. 5. Harmonics of symmetrical PWM-waveforms.

では、変調次数の 2 倍、3 倍と倍周期付近の奇数次調波が大きく重畳しており、規則性を帯びて高調波が重畳することがわかる。しかし、変調次数 6 次では次数が低いため、この規則性がくずれている。

非対称 PWM 波形は図 4 の波形に直流成分を重畳させて作成した。直流成分は対称 PWM 波形の零ピークの振幅に対して 5% 及び 10% 重畳させた。以降、これを直流重畳度と呼ぶ。直流成分を重畳させても奇数次調波の高調波含有率は対称時と変わらず、新たに直流成分と偶数調波が重畳してくる。図 6 に重畳する偶数調波の大きさを示す。各変調次数の高調波が最も大きく重畳している。また各変調次数ともに、直流重畳度が 2 倍になると、偶数調波の大きさも 2 倍となり、比例関係であることがわかる。

測定系は図 2 の励磁装置を SST とし、任意波形発生装置から対称 PWM 波形及び非対称 PWM 波形を発生させ、電力増幅器を通して SST 内の試料を励磁する。

〈2・3〉 測定条件 基本波周波数を 50Hz とし、測定試料は電磁鋼板（30P105 相当）及び、焼鈍済みのアモルファスとした。試料を正弦波で励磁する場合は、磁束密度検出

図6 非対称PWM波形の偶数調波含有率
Fig. 6. An even harmonics component rate of asymmetric PWM-waveforms.

コイル（Bコイル）の誘起電圧波形が正弦波となるように、高調波の第9次成分までの振幅が基本波成分の0.5%以下になるまでフィードバック制御し、励磁を行った。〈2・1〉節で述べた歪み波磁束でそれぞれの試料を励磁する場合、基本波に対する高調波の含有率は、目標とする磁束波形よりほぼ0.2%以内、高調波含有率5%以上の波形で位相が5度以下になるようにフィードバック制御し、目標波形に収束した後励磁を行っている。この時、最大磁束密度を0.7Tから1.4T及び1.5Tまで変化させるが、試料を励磁している波形率の誤差は1%程度に収まっている。PWM波励磁の場合、波形制御は、最大磁束密度が設定した磁束密度の値に対して±0.5%以内の誤差範囲に収まるようにフィードバックを繰り返したが、高調波の位相及び含有率の制御は行っていない。

3. 測定結果及び検討

〈3・1〉 鉄損分離 磁束正弦波条件での鉄損分離の結果を示す。鉄損分離は、50Hzと100Hzにおける測定結果から二周波法を用いて行った。全鉄損値に対する各損失の比率を試料毎に図7に示す。これよりアモルファス磁性材料はヒステリシス損の全鉄損に対する割合が多く、渦電流損の割合が非常に小さいことがわかる。これに対して方向性電磁鋼板は、1.5Tまでは渦電流損の割合がヒステリシス損に比べて、若干大きくなっている。また、アモルファス磁性材料の渦電流損の割合は、磁束密度が高くなるにつれて増加している。方向性電磁鋼板は磁束密度が高くなると、渦電流損の割合は減少している。

〈3・2〉 歪み波磁束下における鉄損特性 表1に図3に示した波形の最大磁束密度(B_{max})と実効値磁束密度(B_{eff})の比率⁽⁴⁾を示す。これより、両方の試料の励磁に用いられている波形がほぼ同じであることがわかる。両波形とも高調波含有率はほとんど変わらないが、磁束密度の波形歪みであ

図7 全鉄損に対する各損失の割合(50Hz)
Fig. 7. Ratio of each loss to total iron loss (50Hz).

表1 歪み波磁束の B_{max} と B_{eff} の比率

Table 1. Ratio of B_{max} and B_{eff} of distorted waveforms.

Waveform	Specimen	B_{max}	B_{eff}	B_{eff}/B_{max}
Fig.3(a)	Amorphous	1.009	1.017	1.004
	Grain-oriented	1.005	1.013	1.008
Fig.3(b)	Amorphous	1.014	1.207	1.190
	Grain-oriented	1.003	1.194	1.191

る B_{eff}/B_{max} の値が変わっているのは、高調波の位相ずれが大きく影響しているためである。

正弦波磁束下に対する歪み波磁束下の鉄損増加率を図8に示す。高調波の位相のずれ方で、振幅が同じでも鉄損の増え方も変わっていることがわかる。 B_{eff}/B_{max} の値がほぼ1である図3(a)の波形励磁下では、両試料とも正弦波磁束下での鉄損と大きな変化はない。 B_{eff}/B_{max} が大きくなる図3(b)の波形励磁下では、アモルファス磁性材料の方が方向性電磁鋼板より鉄損増加が小さいことがわかる。これは、アモルファス磁性材料の渦電流損の割合が小さい事が原因である。また、アモルファス磁性材料の鉄損増加率は磁束密度が増加するにつれて増加している。これに対し、方向性電磁鋼板の鉄損増加率は磁束密度が増加するにつれて減少している。これは渦電流損の割合がアモルファス磁性材料では磁束密度に対して増加傾向にあるが、方向性電磁鋼板では減少傾向であるためと考えられる。

図9に最大磁束密度1.0Tにおける各励磁磁束波形での交流ヒステリシスループを示す。アモルファス磁性材料の交流ヒステリシスループの方が、方向性電磁鋼板に比べて正弦波からの変化が少ないことがわかる。

図10に各高調波鉄損の振る舞いを示す。二つの歪み波形は高調波の位相ずれが異なるため、高調波鉄損の振る舞いも大きく変わっている。図3(a)の波形励磁下では、どの調波の鉄損も正弦波磁束下の鉄損より小さくなっているが、図3(b)の波形励磁下では基本波鉄損が正弦波磁束下の鉄損を上回っていることがわかる。また、高調波の鉄損を見ると、図3(a)の波形励磁下では、磁束密度の増加に伴い第3調波鉄損は増加傾向で、第5調波鉄損は減少傾向となっているのに対して、図3(b)の波形励磁下では、第3調波鉄損

図 8 正弦波磁束下に対する歪み波磁束下の鉄損増加率
Fig. 8. The increasing ratios of the iron loss under the distorted wave flux to sinusoidal wave magnetic flux.

図 9 図 3(a),(b)波形励磁時の交流ヒステリシスループ
(最大磁束密度 1.0T)

Fig. 9. Alternating hysteresis loop in Fig.3(a),(b) waveforms excitation (B_{max} 1.0T).

図 10 各高調波鉄損の振る舞い

Fig. 10. Behavior of each higher harmonic iron loss.

は減少傾向で第 5 調波鉄損は増加傾向となっている。これは、両波形は各高調波の位相が 180 度異なるためと考えられる。磁束密度が増加すると、高調波の鉄損が負になる個所があるが、これは計算上算出されたものであり、負の鉄損が発生するわけではない。しかし両試料とも、各高調波鉄損の振る舞いは全損失に対する渦電流損の割合に関係なく、同じ傾向を示していることがわかる。

〈3・3〉 対称 PWM 波励磁下における鉄損特性

図 11 に正弦波磁束下に対する対称 PWM 波励磁下の鉄損増加率を示す。どちらの試料も変調次数が高くなるほど、鉄損は小さくなっていることがわかる。これは励磁波形で、変調次数が高くなると重畳する高調波の次数が高くなり、B コイルに生じる磁束波形も正弦波に近づいていくためと考えられる。アモルファス磁性材料は励磁波形の変調次数が変わっても、方向性電磁鋼板に比べて、鉄損増加が非常に小さいことがわかる。また、アモルファス磁性材料はどの変調次数においても、磁束密度が高くなるに従い鉄損増加率は大きくなる。それに対して、方向性電磁鋼板は、変調次数 6 次では磁束密度が高くなるに従い、鉄損増加率は減少傾向になっていることがわかる。これは全鉄損に対する渦電流損の割合が、磁束密度が高くなると、アモルファス磁性材料は増加していく傾向があり、方向性電磁鋼板は減少していく傾向があるためと考えられる。また、方向性電磁鋼板は変調次数が高くなると、磁束密度によらず鉄損増加率がほぼ一定となる傾向を示す。これは渦電流損が実効値磁束密度の関数と仮定でき、重畳する高調波の次数が大きくなると実効値磁束密度が小さくなるため、渦電流損の影響が小さくなると考えられる。

図 11 正弦波磁束下に対する対称 PWM 波励磁下の鉄損増加率

Fig. 11. The increasing ratios of the iron loss under the symmetrical PWM-waveforms excitation to sinusoidal wave magnetic flux.

図 12 対称 PWM 波励磁の交流ヒステリシスループ
(最大磁束密度 1.0T)

Fig. 12. Alternating hysteresis loop in symmetrical PWM-waveforms excitation (B_{max} 1.0T).

図 12 に最大磁束密度 1.0T における交流ヒステリシスループを示す。変調次数が高くなるほど交流ヒステリシスループの正弦波からの膨らみが小さくなるが、変調次数 16 次と 36 次ではほとんど変化がない。しかし、ループの窪んでいる箇所が変調次数 36 次の方が多いため、その分鉄損が小さくなると考えられる。また、アモルファス磁性材料の交流ヒステリシスループは、方向性電磁鋼板に比べて正弦波からの変化が少ないことがわかる。

〈3・4〉 非対称 PWM 波励磁下における鉄損特性 図 13 に非対称 PWM 波励磁及び対称波励磁における実測値と理論値の B_{eff}/B_{max} の比率を示す。波形が決まればどの材料でも、いかなる磁束密度でも同一になるべき値であるが、高調波の位相及び含有率の制御を行っていないため、両試料で多少ばらつきが見られる。しかし、どちらの試料も変調次数が高くなるにつれて B_{eff}/B_{max} の値は小さくなっている。これは磁束密度の波形歪みが小さくなっていることを示している。変調次数が 6 次の時は、直流重畳度が大きくなるにつれて、 B_{eff}/B_{max} の値は対称波より小さくなっていることがわかる。変調次数 16 次も同様の傾向がみられるが、変調次数 6 次の場合ほど大きくは変化していない。変調次数が 36 次になると、直流重畳度の影響はほとんどみられなくなっている。理論値と測定値を比べると多少誤差はあるが、上記と同様の傾向がでていることがわかる。直流を重畳させた場合、 B_{eff}/B_{max} の値が対称波より小さく、一見波形歪みが小さくなっているように見えるが、これは B_{max} で波形制御しているため、基本波磁束密度は対称波より大きくなっており、波形歪みが小さくなっているわけではない。 B_{eff}/B_{max} の値を示したのは、両試料をほぼ同じ波形で励磁していることを示すためである。

図 14 に対称 PWM 波励磁下に対する非対称 PWM 波励磁下の鉄損増加を示す。高調波の位相及び含有率の制御を行っていないため多少ばらつきが見られるが、両試料とも変調次数が大きくなるほど、直流重畳による鉄損増加が小さ

図 13 B_{eff}/B_{max} の振る舞い

Fig. 13. Behavior of B_{eff}/B_{max} .

図 14 対称 PWM 波励磁下に対する非対称 PWM 波励磁下の鉄損増加率

Fig. 14. The increasing ratios of the iron loss under the asymmetric PWM-waveforms excitation to symmetrical PWM-waveforms excitation.

くなっている。アモルファス磁性材料は磁束密度の増加に伴い鉄損増加率は減少傾向を示している。それに対して方向性電磁鋼板は磁束密度の増加に伴い鉄損増加率は増加傾向を示している。これは、全鉄損に対するヒステリシス損の割合が、磁束密度が高くなると、アモルファス磁性材料は減少していく傾向があり、方向性電磁鋼板は増加していく傾向があるためと考えられる。また、直流重畳度が大きくなると、どちらの試料も鉄損増加が大きくなっている。この場合の鉄損増加は、アモルファス磁性材料の方が大きいことがわかる。これは全損失に対するヒステリシス損の割合がアモルファス磁性材料の方が方向性電磁鋼板より大きいからと考えられる。つまり、偶数調波の影響は、ヒステリシス損の割合に起因し、アモルファス磁性材料は偶数調波の影響を受けやすいと考えられる。

4. むすび

本稿では、非正弦波磁束下におけるアモルファス磁性材料の鉄損特性の検討を行った。

比較的次数の低い高調波が重畳した歪み波磁束下及び、多量の高調波が重畳した対称 PWM 波励磁下では、アモルファス磁性材料は方向性電磁鋼板より磁束正弦波に対する鉄損増加が非常に小さいことがわかった。それに伴い、交流ヒステリシスループの正弦波からの変化も小さくなることがわかった。これらの波形は奇数次調波だけを含み、奇数次調波が重畳した場合の鉄損増加は、全損失に対する渦電流損の割合に大きく起因してくることがわかった。

また、対称 PWM 波励磁下に対する非対称 PWM 波励磁下の鉄損増加は、アモルファス磁性材料の方が方向性電磁鋼板より大きいことがわかった。このように偶数調波が重畳した場合の鉄損増加は、全損失に対するヒステリシス損の割合に大きく起因し、ヒステリシス損が多い材料は偶数調波の影響を受けやすいと考えられる。これについては今後詳しく検討するつもりである。

なお、試料など種々ご配慮いただきました新日本製鐵株式会社の開道力氏に厚く御礼申し上げます。

(平成 14 年 9 月 20 日受付, 平成 15 年 2 月 27 日再受付)

文 献

- (1) S.Hori, K.Harada, Y.Ishihara, and T.Todaka : "Iron Loss Characteristics of The Amorphous Magnetic Material under the Distorted Wave Magnetic Flux", The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan. MAG-01-87 (2001) (in Japanese)
堀 慎一郎・原田和郎・石原好之・戸高敏之:「歪み波磁束下におけるアモルファス磁性材料の鉄損特性」, 電気学会マグネティックス研究, MAG-01-87 (2001)
- (2) S.Hori, K.Harada, Y.Ishihara, and T.Todaka : "Iron Loss Characteristics of the Amorphous Magnetic Material under the Asymmetry PWM-waveform Excitation", The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan. MAG-02-86 (2002) (in Japanese)
堀 慎一郎・原田和郎・石原好之・戸高敏之:「非対称 PWM 波励磁下におけるアモルファス磁性材料の鉄損特性」, 電気学会マグネティックス研究, MAG-02-86 (2002) (in Japanese)
- (3) S.Takada : "Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets under PWM-waveform Excitation", 1996 National Convention Record IEE Japan, S. 6-3 (1996) (in Japanese)
高田俊次:「PWM 波励磁における電磁鋼板の磁気特性」, 平成 8 年電気学会全国大会, S.6-3 (1996)
- (4) T.Nakata, Y.Ishihara, M.Nakano : "Core Loss of Silicon Steel due to Distorted Wave Flux", *J.IEE Japan*, Vol.90, No.1, p.115 (1970-1) (in Japanese)
中田高義・石原好之・中野正典:「ひずみ波磁束によるけい素鋼板の鉄損」, 電学誌, 90, 1, p.115 (1970-1)

堀 慎一郎 (学生員) 平 13 同志社大・工・電気卒。現在同大学院工学研究科博士前期課程在学中。
(現・日本電気株式会社勤務)

原 田 和 郎 (正員) 昭 61 九大・工・電気卒。平 3 同大学院工学研究科博士後期課程修了。同年同志社大・工・助手, 平 4 同専任講師, 平 8 同助教授, 現在に至る。工博。主として, スイッチングコンバータ・インバータの高効率化, 低ノイズ化に関する研究に従事。

石 原 好 之 (正員) 昭 39 同志社大・工・電気卒。同年岡山大学・工・助手, 講師, 助教授を経て, 昭 56 同志社大助教授, 昭 60 同大教授, 現在に至る。工博。主として, 電気機器鉄心の磁気特性に関する研究及び太陽光発電システムに関する研究に従事。

戸 高 敏 之 (正員) 昭 36 同志社大・工・電気卒。昭 38 同大学院工学研究科修士課程修了。同年同大・工・助手, 昭 56 同教授, 現在に至る。工博。主として, 磁気応用に関する研究に従事。