高次高調波を重畳した励磁における 電磁鋼板の磁気ひずみ

正員 佐々木 堂 (岐阜大)
 正員 高田 俊次 (岐阜大)
 正員 佐伯 鈴弘 (岐阜大)
 正員 石橋 文徳 (東芝)
 正員 野田 伸一 (東芝)

Magnetostriction of Electromagnetic Steel Sheets under AC Magnetization Superimposed with Higher Harmonics

Tadashi Sasaki, Member, Shunji Takada, Member, Suzuhiro Saiki, Member (Gifu University),
 Fuminori Ishibashi, Member, Shinichi Noda, Member (Toshiba Co.)

Effects of superposition of higher harmonics on magnetostriction of non-oriented electromagnetic steel sheets were examined. Magnetostriction was measured using base-less semiconductor strain gauges applied at four points on ring specimens.

Higher harmonic components of magnetostriction were markedly observed by the PWM inverter excitation, although magnetic flux contained only a small amount of higher harmonic components. They have been considered to be the main cause of noise in the electrical machine driven by the inverter.

To evaluate contribution of the superimposed higher harmonic magnetization, specimens were magnetized at power frequency superimposed with the 49th higher harmonic frequency. Magnetostrictive components at the superimposed frequency resulted in about 100 times higher value than that obtained from magnetization at the frequency corresponding to higher harmonics. This fact means that the superimposed higher harmonics is supported by the rotational components of magnetization such as the 90° wall movement, which is in part included in magnetizing processes at the fundamental frequency.

キーワード：磁気ひずみ，重畳磁化，電磁鋼板，高調波

1. ま え が き

電力用磁性材料には飽和磁気ひずみが 30×10^{-6} 程度の鉄系軟質磁性材料が多く用いられる。その磁気ひずみは，実用上また磁化過程の解析上，励磁磁束密度と周波数を変化させた磁束正弦波条件で測定されてきた^{(1)~(5)}。しかし近年，回転機はインバータ駆動されることが多くなり，関連する磁性材料はPWMパルス波列の電圧（電流）で励磁されることになる⁽⁶⁾。

著者らは，騒音との関連で，実用されているPWMインバータを用いて高磁束密度に磁化した無方向性電磁鋼板の磁気ひずみを測定し，その結果，形状共鳴に伴う大きな磁気ひずみ振動が存在すること，この振動が機器の騒音源となり得ることを明らかにした⁽⁷⁾。更に，PWMのキャリア周波数を変えた場合の磁束損失の検討⁽⁸⁾および高調波の重畳効果としての磁気損失の検討⁽⁹⁾を行い，PWMインバータ励磁においては磁束波形はほぼ正弦波状であるにもかかわらず，検討

結果は通常の磁束正弦波条件での測定結果と異なるため、インバータ励磁に特有の損失機構が存在することを明らかにしてきた。

本論文は、PWM インバータ波形のような、多次数にわたり大きい振幅をもつ一連の高調波が重畳した電力周波数の電圧で電磁鋼板を励磁した場合の、電磁鋼板に生じる磁気ひずみを明らかにすることを実用上の目的とし、磁化機構解明上、重畳高調波が磁気ひずみに及ぼす効果を明確にすることを目的としている。

本論文では、まず電圧形 PWM インバータによって、電磁鋼板を励磁した場合の磁気ひずみ振動の観測結果を示す。結果は、高磁束密度励磁の場合⁽⁷⁾と同様に、大部分の高調波振動が、本来の磁気ひずみではなく、試料の形状共鳴に基づく磁気ひずみ振動となった。これは、共鳴周波数と一致する振動周波数の磁気ひずみが存在すると大きな共鳴振動をもたらすことを意味するため、高調波を重畳して磁化した場合の本来の磁気ひずみの性質を明確にすることが必要となった。そこで、等価的な単一高調波を重畳することにより、重畳磁化状態における磁気ひずみを観測し、同様に測定した磁気損失⁽⁹⁾を参考に、重畳高調波が磁気ひずみに及ぼす影響を検討している。

2. 試料ならびに測定法

試料には無方向性電磁鋼板のうち、旧 JIS 分類で S23 と S30 の 0.5 mm 厚フルプロセス材から打抜いた外径 200 mm、内径 100 mm のリングを用いた。S30 は打抜き後、N₂ ガス中 800°C 1 h の熱処理を施した。磁気ひずみの検出のために基板なし半導体ひずみゲージを用いた。ゲージの大きさは大体 0.25 mm × 0.3 mm × 3 mm で、抵抗は 1 kΩ、ゲージファクタは公称 140 である。図 1 に示す 4 箇所にはひずみゲージを貼付した。励磁は外部にトロイダルに施した巻線に

図 1 試料およびゲージ貼付位置
Fig. 1. Dimensions of the specimen and sensing directions of strain gauges applied on samples.

よって行い、磁束密度は試料に直接巻いた検出コイルによって検知した。従って、磁化は円周方向になされる。ひずみゲージ貼付け位置により、鋼板の圧延方向、磁化方向、磁気ひずみの検出方向の関係が異なるため、図 1 のように、これらの測定点に順に番号を付した。①番は鋼板横目方向に磁化され、ひずみの検出が磁化と垂直な縦目の方向になされる点、②番は磁化もひずみの検出方向も鋼板縦目に沿ってなされる点、③番は磁化も磁気ひずみの検出方向も横目と一致している点であり、④番は縦目方向に磁化され、ひずみの検出が横目方向になされる点を示している。

測定系は図 2 に構成図を示すように構成した。波形記憶装置は 2 ch であり、磁束電圧波形と 1 箇所のひずみ波形を同時に入力する。磁束電圧波形はマイコンにより制御を行い、二次誘起電圧波形が 60 Hz の正弦波と多くの場合 49 次高調波 (2,940 Hz) の正弦波が加わった図 3(a) に示す波形にする。重畳高調波の基本波に対する電圧比は 1 : 1 とした。実際のインバータで駆動する場合には、図 2 の D/A 変換器と電力増幅器部分を市販のインバータに入換え、その出力の単相分を用いて励磁した。この場合波形制御を行わない

図 2 測定系
Fig. 2. Block diagram of measuring system.

図 3 誘起電圧および磁束波形
Fig. 3. Waveforms of secondary induced voltage and magnetic flux.

ため、インバータ出力はPWMパルス波列になっているが、実際の二次誘起電圧波形と磁束波形は既に前報⁽⁷⁾で示したように、いずれもくずれた波形となり、励磁磁束密度によって大きく変化する。使用したインバータは、基本周波数を60 Hzとした場合、キャリア周波数は49次高調波になるものであった。図3に示す測定での重畳正弦波次数はこれになったものである。重畳正弦波で波形制御した場合の磁束密度波形は図3(b)に示すようになり、PWM励磁と比較すると高調波成分が多いことがわかる。ひずみ測定のブリッジ増幅器の動作帯域はDC~100 kHzであった。

3. インバータ励磁による磁気ひずみ振動

実際の電圧型PWMインバータを用いた磁気ひずみ振動の測定結果については既に報告し⁽⁷⁾、その高調波振動成分はほとんど試料の機械的共振形状共鳴によって示した。

磁束密度 $B=1.5$ T における S23 と S30 の磁気ひずみ振動も本質的にはこれと変わらない。従ってここでは、単に測定点②すなわち縦目方向磁化における縦目方向振動の磁束密度との関係、 B - λ 曲線だけを図4に例示するにとどめる。

図4(a)に示すS23の②における磁気ひずみ信号を、FFTにて調波解析した結果を図5に示す。基本励磁周波数は60 Hzであるから、2次高調波、120 Hz

図4 測定点②における B - λ 曲線
Fig. 4. B - λ curves at the point ②.

図5 磁気ひずみ振動の周波数解析結果 (S23)
Fig. 5. FFT analysis of magnetostrictive vibration (S23).

の成分が最大であり、図はこの最大値を基準にした比率で示してある。192次 (11.5 kHz) 付近以上にあるピークは前に報告したように試料形状に基づく機械的共振周波数に対応し、これらが高調波振動の大部分を占めている。49次近くのキャリア周波数の振動成分は小さい。(b)図のS30に関する磁気ひずみ振動では高調波成分は小さくしか見えない。調波解析結果も図5ほど高調波成分は大きくなく、図5の1/10程度になる。しかし、このことは図4(a), (b)の高調波振動の絶対値がほぼ等しいことを意味し、結局、形状共鳴による振動であることを示している。

以上のように、実際のインバータを用いた励磁によって、材料本来の磁気ひずみを正確に検出することは不可能である。そこで等価的な正弦波の重畳により、量的検討を行うこととした。

4. 重畳波による磁気ひずみ振動

重畳高調波の基本波に対する位相が磁気的性質に影響を与えないほど、高調波の周波数が高い場合、この重畳高調波を高次高調波と呼ぶこととする⁽⁹⁾。いま、

図6 重畳励磁における調波解析
Fig. 6. Harmonic analysis in the superposed excitation.

PWM インバータ励磁にならって 60 Hz の正弦波に 49 次の高調波を重畳し、電圧の振幅比を 1:1 に保つと図 3(a) のような励磁電圧波形が得られる。これを積分した (b) 図の磁束波形は高調波成分が 1/49 に減じほとんど基本正弦波のみになる。 B があまり高くない範囲では磁気ひずみの大きさはほぼ B^2 に比例する⁽⁴⁾ から、周波数依存性を無視すると 2,940 Hz の単一周波数で基本波 60 Hz の 1/49 の B まで磁化した場合の磁気ひずみの大きさは基本波の 1/2,400 となって検知できない量なることが予測される。

励磁磁束波形と測定点②における磁気ひずみ振動の調波解析結果を図 6 に示す。図から明らかに、磁束は基本波分とわずかな 49 次高調波分だけから構成されている。ひずみ振動にはいずれも図 5 のような形状共鳴に基づく高調波成分は観測されず、変調された高調波成分が磁束での含有比より大きな比率で存在する。基本波の励磁磁束密度は 1.4 T である。図 5 と図 6 を比較すると、励磁磁束密度に形状共鳴に相当する周波数成分を含まない場合、磁気ひずみ振動にも形状共鳴に由来する成分が存在しないことがわかる。また、

高調波のひずみ振動は変調されて検出されるが、磁気損失の測定結果によると⁽⁹⁾ 高調波成分の損失電力は重畳高調波の周波数のみに集中しているから、この振動を変調された状態で一つの高調波成分とみるのが適当である。

上に示した励磁条件での両試料における各測定点の代表的な B - λ 曲線を図 7 に示す。いずれも等方性の電磁鋼板ではあるが、磁気ひずみについては異方的であることがわかる。特に S23 では、磁化方向のひずみである②と③の大きさ、極性共に変わり、大変異方的であることが知られる。磁化の横方向は①と④のひずみであり、 B の増加につれて負のひずみを示す点は共通しているが、大きさに差があり異方性は大きい。これに対して、S30 は熱処理を施したこともあって、わりあい②と③、①と④の形が近く、等方性に近い。

正弦基本波のみによる励磁によって得られる B - λ 曲線は両試料とも図 7 の各曲線から高調波成分を除去したものとほぼ等しい。高調波分は図からわかるとおり、S23 より S30 に多く含まれている。これは後に述べるように鋼板の磁気的性質の差に由来していると考えられる。

5. 検 討

以上の測定結果の代表例を数値でまとめて表 1(a) ~ (c) に示す。各表におけるひずみの値は p - p 値の最大値を示している。表中、基本正弦波は 60 Hz の単独の励磁を意味し、この励磁が 1.4 T になるよう調整し、その磁気ひずみを α で示している。重畳全ひずみ振動は図 7 の諸図の p - p 値を示し、これを調波解析して得た基本波成分 β と高調波成分 γ をそれぞれ表に示してある。

表 1(a) と (b) の比較からわかるように、重畳高調波の次数が低いほど高調波成分の磁束密度は増大するため、高調波成分 γ は増大し、その全磁気ひずみに占める割合も増加するが、磁気ひずみの基本波成分 β にはほとんど影響を与えない。従って、磁気損失に対する場合⁽⁹⁾ と同様に、磁気ひずみにおいても 25 次高調波で十分な高次高調波ということができる。

先に述べたように、②と③のひずみ量の差が磁気ひずみ振動の異方性を表している。調波解析した各成分についても同様に異方性を見ることができる。S30 では全体もそうであったように、解析した基本波と高調波も異方性はわずかでありほぼ等方的である。S23 の解析した基本波成分の異方性は大きく、③のひずみ/②のひずみ ≈ 8.3 となる。25 次高調波の高調波成

図 7 B - λ 曲線
Fig. 7. B - λ curves.

表 1 磁気ひずみ振動のまとめ
Table 1. Summary of magnetostrictive vibrations.

(a) S23, 49次高調波重畳

	B [T]	磁気ひずみ λ [$\times 10^{-6}$]			
		①	②	③	④
基本正弦波 α	1.40	5.46	0.89	7.31	1.50
重畳全ひずみ振動	1.41	5.54	0.91	7.42	1.56
重畳基本波成分 β	1.38	5.37	0.86	7.16	1.45
重畳高調波成分 γ	0.03	0.45	0.17	0.65	0.15
高調波割合 γ/β [%]	2.0	8.1	19.0	8.7	9.9
基本波成分比 β/α [%]	98.6	98.2	96.2	98.0	96.5

(b) S23, 25次高調波重畳

	B [T]	磁気ひずみ λ [$\times 10^{-6}$]			
		①	②	③	④
基本正弦波 α	1.40	5.46	0.89	7.31	1.50
重畳全ひずみ振動	1.45	6.08	0.93	7.80	1.85
重畳基本波成分 β	1.39	5.43	0.89	7.31	1.45
重畳高調波成分 γ	0.06	1.36	0.15	1.04	0.58
高調波割合 γ/β [%]	3.9	22.3	16.2	13.3	31.4
基本波成分比 β/α [%]	99.4	99.4	99.3	100.	96.3

(c) S30, 49次高調波重畳

	B [T]	磁気ひずみ λ [$\times 10^{-6}$]			
		①	②	③	④
基本正弦波 α	1.39	2.25	2.53	2.69	1.83
重畳全ひずみ振動	1.43	1.99	2.20	2.35	1.71
重畳基本波成分 β	1.40	1.90	1.99	2.24	1.58
重畳高調波成分 γ	0.03	0.21	0.47	0.30	0.31
高調波割合 γ/β [%]	2.0	10.6	21.5	12.9	18.0
基本波成分比 β/α [%]	100.	84.3	78.7	83.3	86.1

分についてのこの比は6.8となり、49次の高調波成分については3.7となる。すなわち、重畳した高調波のひずみの異方性は周波数が高くなるにつれて減少し、次第に等方的となることが読取れる。

重畳した場合の高調波成分の磁気ひずみの振幅は表1に見るように測定し得るほど大きく、これは高調波に相当する周波数の正弦波で磁化した場合より、はるかに大となることは先に説明したところである。単独励磁を行って磁気ひずみを実測すると、49次高調波に相当する周波数での磁束密度は低いため、生じる磁気ひずみ量も小さく、同期検波をしてようやく大略値を得ることができた。電圧比を1:1に保ったまま、磁束密度を変えて重畳励磁した場合の磁気ひずみを調波解析した高調波成分と、上の単独励磁の結果を比較した。結果の一例をS23の①について図8に示す。図から明らかなように、高調波として重畳した場合の磁気ひずみは、単独で励磁した場合の約100倍の大きさとなることがわかる。単独磁化の場合、ひずみの値は先の予測値より大きく観測されている。この増加は磁気ひずみの周波数特性とみることができよう。

磁気ひずみは電磁鋼板の場合、磁化の回転によって生じ、磁束密度が1.4 T程度の場合は90°磁壁の移動に由来していると考えられる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。S23においては高調波の重畳による基本波成分の磁気ひずみは単独基

図 8 高調波成分の磁気ひずみ

Fig. 8. Higher harmonic components of magnetostriction.

本波励磁による場合と大きな変化はなく、重畳した高調波の磁気ひずみが増加した状態となっている。他方、S30においては、高調波を重畳することにより基本波成分の磁気ひずみは単独励磁の場合に比し15~20%減少する。このことは、S23のように異方性のある電磁鋼板では重畳した高調波は基本波の磁化過程に関係ない90°磁壁を主に動かし、一方、等方的なS30では基本波の磁化過程に関与する90°磁壁の一部を動かすと考えられ、基本波の残りの磁化は180°磁壁移動によって補われることを意味する。この状況は磁気損失の測定結果⁽⁹⁾による、高調波重畳によってS23の基本波成分損失はわずかに減少するが、S30の基本波成分は顕著に減少する事実と対応している。結局90°磁壁の移動にはより多くのエネルギーが必要であり、磁気ひずみ量も大きくなることを意味している。量的には差があるが、以上の傾向は各測定点において同様に成り立っている。

ひるがえってPWMインバータ励磁の場合に以上の検討結果を適用すると、複合された高調波が重畳することにより、広周波数範囲に磁気ひずみが比較的大きく励振され、これを起振源とした形状共鳴振動を生じることとなり、この種の磁気ひずみは励磁騒音の源となる。

6. む す び

無方向性電磁鋼板を高次高調波を重畳して励磁した場合の磁気ひずみ振動の性質について、以上のように実験的検討を行った。

単一高調波を重畳した場合の磁気ひずみの性質は次のようにまとめられる。

磁気ひずみの高調波成分は、周波数の増加につれて

等方的になるが、基本波成分は相当に異方的である。重畳した高調波成分の磁気ひずみは高調波に相当する単一の周波数で励磁した場合の100倍以上の大きさになる。一方、基本波成分は重畳した場合、多い場合には20%程度減少する。これらのことは高調波成分が重畳した場合、主に90°磁壁移動によってその磁化過程が支えられていると考えると説明でき、磁気損失の測定結果とも矛盾しない。

また、磁気ひずみには周波数依存性があり、周波数の増大につれてその値は増加するようである⁽⁴⁾。

インバータ励磁における磁気ひずみの特徴は広周波数範囲にわたる磁気ひずみが生じることにある。このため、形状による共鳴周波数があると強い磁気ひずみ振動を励起し、周波数によっては騒音の原因となる。

既に、重畳励磁の場合の磁気損失⁽⁹⁾については報告した。本論文と合せることにより、重畳励磁の場合の磁気的性質を全般的に明らかにすることができた。

今後、更に方向性電磁鋼板などの電力用軟質磁性材料に関し、これと同様な検討を続けると同時に、この結果を生かした磁気ひずみの解析法を開発することが必要である。

最後に、常時検討していただいている電気学会電力用高品位磁性材料調査専門委員会の委員各位に厚く感謝申し上げるものである。(平成3年8月28日受付)

文 献

- (1) G. H. Simmons & J. O. Thomson: "Magnetic properties of grain-oriented silicon iron (pt.5)", *Proc. Instn Elect Engrs*, **118**, 1302 (1971)
- (2) P. Allia, et al.: "Theory of negative magnetostriction in grain oriented 3 percent Si-Fe for various inductions and applied stresses", *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-14**, 362 (1978)
- (3) M. Imamura, T. Sasaki & A. Saito: "Magnetization process and magnetostriction of a four percent Si-Fe single crystal close to (110) [001]", *ibid.*, **MAG-17**, 2479 (1981)
- (4) M. Imamura, T. Sasaki & H. Nishimura: "AC magnetostriction in Si-Fe single crystals close to (110) [001]", *ibid.*, **MAG-19**, 20 (1983)
- (5) 佐々木・杉山・霧村・今村: 「電力用非晶質薄帯の磁気ひずみ」, 電学論 A, **107**, 371 (昭62)
- (6) 村井: 「高周波共振を応用した半導体電力変換技術」, 電学誌, **110**, 43 (平2)
- (7) T. Sasaki, et al.: "Magnetostrictive vibration of electrical steel sheets under a non-sinusoidal magnetizing condition", *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-23**, 3077 (1987)
- (8) T. Sasaki & S. Takada: "Power losses of electrical iron sheets with quasi-sinusoidal magnetic flux change by PWM voltage excitations", *Analcs de Fisica(B)*, **86**, 258 (1990)
- (9) 佐々木・佐伯・高田: 「高次高調波を重畳した励磁における電気鉄板の磁気損失」, 応用磁気学誌, **15**, 271 (平3)
- (10) S. Chikazumi & S. H. Charap: *Physics of Magnetism*, p. 170 (1978) New York, Krieger

佐々木 堂 (正員)

昭和9年9月22日生。32年3月電気通信大学電気通信学部卒業。同年4月工業技術院電気試験所入所。44年4月九州大学工学部助教授。48年4月岐阜大学工学部教授、現在に至る。主として、磁気工学(磁気計測・磁性材料・磁化過程)の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、日本物理学会、日本応用磁気学会、IEEE会員。

高田 俊次 (正員)

昭和35年4月17日生。60年3月岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。61年9月岐阜大学助手、現在に至る。主として、軟質磁性材料の磁気特性に関する研究に従事。日本応用磁気学会会員。

佐伯 鈴弘 (正員)

昭和41年11月18日生。平成3年3月岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月いすゞ自動車(株)入社。現在、小型エンジン設計第2部にて、ガソリンエンジンの設計、開発に従事。

石橋 文徳 (正員)

昭和19年2月3日生。42年3月京都大学工学部電気工学科第2学科卒業。同年4月(株)東芝入社。同社三重工場回転機部門および重電技術研究所にて、誘導電動機、特殊可変速電動機やパワーエレクトロニクス関係の研究・開発に従事。工学博士。IEEE会員。

野田 伸一 (正員)

昭和30年7月6日生。57年3月芝浦工業大学機械工学科卒業。49年4月(株)東芝入社。51年同社京浜事業所重電技術研究所にて、電気機械の振動解析に従事。58年より同社三重工場重電技術研究所にて同分野および構造解析に従事。日本機学会会員。