
インバータモータ効率に及ぼす無方向性電磁鋼板素材の影響

Effects of Core Materials on Efficiency of Inverter Drive Motor

本田 厚人 (Atsuhito Honda) 佐藤 圭司 (Keiji Sato) 大山 勇 (Isamu Ohyama)

要旨：

3 相・6 極・400 W インバータモータの効率、銅損および鉄損におよぼす無方向性電磁鋼板の磁気特性、板厚および歪取焼鈍の影響を調査した。PWM(pulse width modulation) インバータ周波数は 30 から 300 Hz まで変化させ、そのキャリア周波数はインバータ基本周波数の 40 倍とした。インバータ周波数が低いとき、つまり低回転域ではモータ効率に及ぼす素材 Si 量の影響は小さいが、周波数が高く高回転の時にはその影響が大きく、素材 Si 量が増加するほど効率が向上する。モータの設計磁束密度によって最適素材 Si 量が存在する。また素材板厚を薄くすることおよび歪取焼鈍によりモータ効率は向上する。

Synopsis：

Properties of a 3-phase 6-pole 400 W inverter drive motor, using 6 kinds of non-oriented Si steel sheets as stator core materials, were investigated. PWM (pulse width modulation) inverter wave frequency was changed from 30 to 300 Hz and a frequency of 40 times of the fundamental inverter frequency was adopted as the carrier wave. It was found that the effect of Si content on motor efficiency is small when the PWM frequency is low, while when the PWM frequency is high, the motor efficiency rises as Si content of the core material increases. There exists an optimum Si content of the material depending on the design of the flux density of a motor. Both reduction in the thickness of material and stress relief annealing of stator cores also improve the motor efficiency.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

インバータモータ効率に及ぼす 無方向性電磁鋼板素材の影響*

川崎製鉄技報
29 (1997) 3, 169-173

Effects of Core Materials on Efficiency of Inverter Drive Motor



本田 厚人
Atsuhito Honda

技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(課長)



佐藤 圭司
Keiji Sato

水島製鉄所 管理部電
磁鋼板管理室 主査
(課長)



大山 勇
Isamu Ohyama

川鉄テクノロジー
(株) 技術支援セン
ター 主任研究員(課
長)

要旨

3相6極400Wインバータモータの効率、銅損および鉄損におよぼす無方向性電磁鋼板の磁気特性、板厚および歪取焼鈍の影響を調査した。PWM(pulse width modulation)インバータ周波数は30から300Hzまで変化させ、そのキャリア周波数はインバータ基本周波数の40倍とした。インバータ周波数が低いとき、つまり低回転域ではモータ効率に及ぼす素材Si量の影響は小さいが、周波数が高く高回転の時にはその影響が大きく、素材Si量が増加するほど効率が向上する。モータの設計磁束密度によって最適素材Si量が存在する。また素材板厚を薄くすることおよび歪取焼鈍によりモータ効率は向上する。

Synopsis:

Properties of a 3-phase 6-pole 400 W inverter drive motor, using 6 kinds of non-oriented Si steel sheets as stator core materials, were investigated. PWM (pulse width modulation) inverter wave frequency was changed from 30 to 300 Hz and a frequency of 40 times of the fundamental inverter frequency was adopted as the carrier wave. It was found that the effect of Si content on motor efficiency is small when the PWM frequency is low, while when the PWM frequency is high, the motor efficiency rises as Si content of the core material increases. There exists an optimum Si content of the material depending on the design of the flux density of a motor. Both reduction in the thickness of material and stress relief annealing of stator cores also improve the motor efficiency.

1 緒 言

インバータ電源は、制御方法の発展と半導体の高性能化、集積回路の高速、高集積化および低価格化などによって総合性能が著しく向上した。このため、小型化、可変速化のニーズに応えるべく、回転機器に対してもインバータ駆動方式が広く用いられるようになった。これにともなう、低次の高調波成分を含む非正弦波励磁下での損失^{1,2)}、さらに、インバータ励磁下での損失^{3,4)}、回転機固定子および回転子鉄心内の回転磁束分布⁵⁾などが調査されてきている。特に、電磁鋼板が励磁されるとき、同一の基本周波数であれば正弦波よりインバータ波の方がわずかではあるが鉄損が大きくなる³⁾ことが報告されている。しかし、インバータ励磁下のモータ特性そのものにおよぼす鉄心材料の影響についての系統だった報告は少ない。著者らは前に、正弦波励磁された単相誘導モータの効率に及ぼす鉄心材料の影響を調べて、鉄心材料のSi量に最適値が存在することおよび、モータの設計磁束密度が大きいほど最適素材Si量が減少することを明らかにした⁶⁾。

本報では、インバータ励磁下でのモータ特性を向上させるための最適鉄心材料を明らかにすることを目的として、種々の素材を用いた3相誘導モータを作成しその特性を調査した結果を報告する。

2 実験方法

2.1 モータ仕様と測定装置

本実験で使ったモータの仕様を以下に示す。モータ特性におよぼすロータの影響は、その素材よりも加工精度の影響の方が大きいと言われるため、ここでは常に同一の市販ロータを用いて測定した。したがって、素材の影響を調べるためステータの素材のみ変更して実験した。

(1) 電気仕様

3相6極、定格120Hz-120V-400W

(2) 結線

3相6極スター結線、150ターン/相

(3) 寸法

ステータ外径:140mm、内径:84mm、積厚:66.3mm、36スロット

ロータ外径:83.4mm、積厚:66.3mm、44スロット

*平成9年9月11日原稿受付

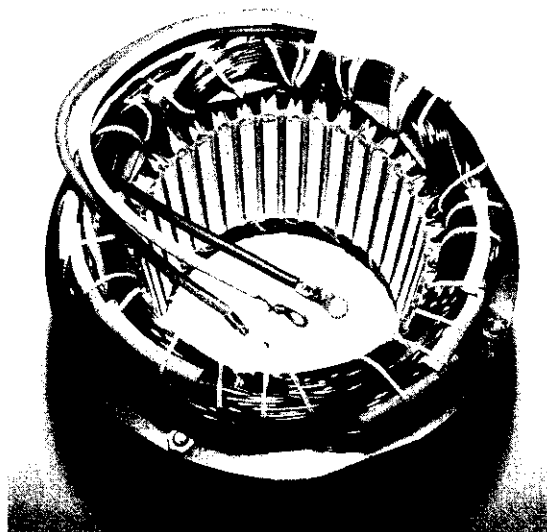


Photo 1 Appearance of tested stator core

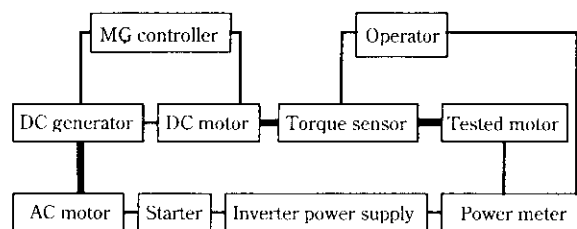


Fig. 1 Block diagram of apparatus for measuring motor efficiency

一つの素材につき3個づつのステータを打抜き加工した。これらを巻線処理した後、モータ測定に供した。その後、歪取焼鈍の影響を明らかにするため、ステータ巻線をほどいて750°Cで2h、N₂雰囲気中で歪取り焼鈍し、再度巻線したものをまた同様の手順で測定した。Photo 1に供試モータのステータ外観写真を示す。Fig. 1に測定装置のブロック図を示す。インバータ電源は任意波形発生装置と増幅器からなり、出力は3相1500Wで、最大インバータ周波数400Hzで、最大キャリア周波数は20kHzである。

2.2 測定条件

インバータ波は、PWM(pulse width modulation)電圧波形とした。一般的に、誘導モータの回転速度はインバータ電源の基本周波数 f を変えることにより同期回転数 $N_s = 120 f/p$ (p は極数)を変化させることで制御する。PWMの基本周波数はキャリア波といわれる高周波をスイッチングすることで変化させる。佐々木らはPWM励磁下におけるキャリア周波数の影響を詳細に調査した⁹⁾。その結果、基本波とキャリア波の電圧がほぼ同じ(通常条件)であれば、キャリア周波数の増加にともなって電磁鋼板の鉄損が低下することを見出した。この知見をもとに、本実験で用いるキャリア波の周波数を決定するため、予備実験として実際のモータ効率に及ぼすキャリア周波数の影響を調べた。その結果をFig. 2に示す。基本波周波数が60Hzの時、佐々木らの結果と同様にキャリア周波数の増加とともにモータ効率が向上したが、2400Hz以上ではその向上代が小さかった。したがって、本実験ではキャリア波として基本波の40倍の周波数を使用した。

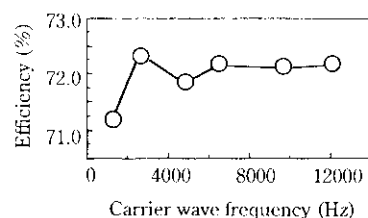


Fig. 2 Effect of carrier wave frequency on efficiency of motor

Table 1 Motor driving condition

Inverter freq. (Hz)	Carrier freq. (Hz)	Voltage (V)	Rotation (rpm)	Flux density (T)
30	1200	55	600	1.84
60	2400	80	1200	1.34
60	2400	110	1200	1.84
60	2400	120	1200	2.00
120	4800	120	2400	1.00
240	9600	200	4800	0.84
300	12000	240	6000	0.80

モータをどのような目的で使用するかによってその駆動条件はいろいろ設定できるが、ここでは、低速域、低回転域での駆動力を必要とする場合を想定し、インバータ周波数と電圧の関係をTable 1に示すごとく設定した。それらの駆動条件時のステータ鉄心部の設計磁束密度もあわせて示す。また、設計磁束密度 B の影響を調べるため、基本周波数60Hzのときに B を1.34から2.0Tに変化させてモータ銅損を測定した。モータ効率の評価には、同期回転速度の付近における最大効率の値を使用した。この最大効率評価に加え、さまざまな駆動条件における効率も測定し効率マップを作成した。

2.3 素材の評価

モータの鉄心用素材として用いられる無方向性電磁鋼板は、完全な等方性材料ではなく、わずかではあるが異方性を有している。Fig. 3に一例を示す⁹⁾。図に示したように無方向性電磁鋼板には、圧延方向からの角度90°において磁性が劣化するものと、約55°付近において磁性劣化するものと少なくとも二つの種類が存在する。したがって、磁束が板面内のあらゆる方向に流れるモータ用素材の特性評価には、通常の圧延方向 L とその直角方向 C のみの試験片からなるエプスタイン試験より、全方向平均の磁気特性を評価できるリング試験が好ましい。しかし、リング試験は試料ごとの巻線が必要となるため測定に余分の時間と手間を必要とする。Fig. 4に示すように、著者らは先に L 、 C 方向のエプスタイン試験片に45°方向 D の試験片を加えておのおのを測定し、これらを $(L+2D+C)/4$ のように平均することでリングの特性とほぼ同等の特性値が得られることを報告している⁹⁾。本報告における磁気特性評価はすべてこの方法を用いた。

Fig. 5に本実験供試材の磁気特性におよぼす素材Si量と歪取焼鈍の影響を示す。丸印で示す通常のJIS規格の材料は、素材のSiが増加するほど比抵抗が増加してうず電流損が低下するため鉄損は低減する。一方、Si増加にともない飽和磁束密度が低下するために B_{50} は低下する。いずれの材料も歪取焼鈍により鉄損が低下し、磁束密度はさほど変化しない。しかし四角印で示すRMAシリーズ材は、JIS規格材に比べて歪取焼鈍後の鉄損が著しく低いのが特徴である。

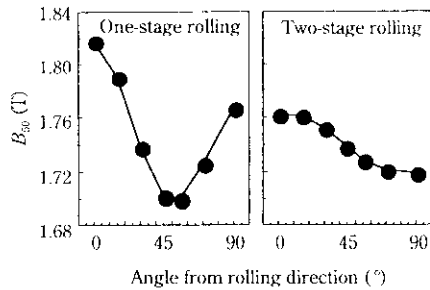


Fig. 3 Anisotropy of non-oriented Si steel sheets

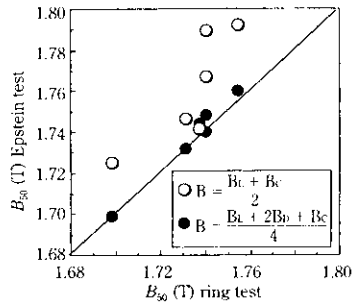


Fig. 4 Relation between ring test and Epstein test for non-oriented Si steel

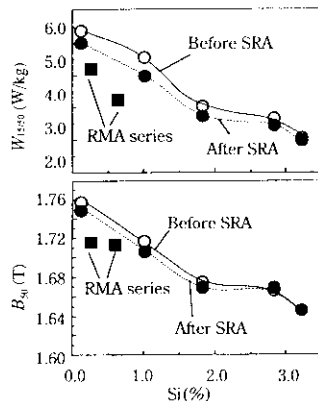


Fig. 5 Effects of Si content and stress relief annealing (SRA) on material characteristics

3 実験結果と考察

インバータモータの効率におよぼす素材 Si 量、PWM 周波数および歪取焼鈍の影響を Fig. 6 に示す。前述のごとく PWM 周波数にしたがって設計磁束密度を変化させている。いずれの場合も歪取焼鈍によりモータ効率が向上する。またモータ効率は励磁周波数が低いほど、つまり低回転域ほど低い。ただし低回転域でのモータ効率の変化に及ぼす素材 Si 量の影響は小さい。高周波、高回転域では低回転域よりモータ効率の変化は大きく、素材 Si 量が約 1.8% の時に効率が最大となる。低、高周波いずれの場合でも RMA 材の効率は高く高 Si 材の効率とほぼ同等である。

Fig. 7 に歪取焼鈍後のモータ鉄損および銅損の測定結果を示す。低周波、低回転域では素材 Si 量の増加にともなってモータ銅損が増加し、モータ鉄損は逆に低下する。高周波、高回転域ではモータ鉄損が主体となり、素材 Si 量が増加するほどモータ鉄損は低下す

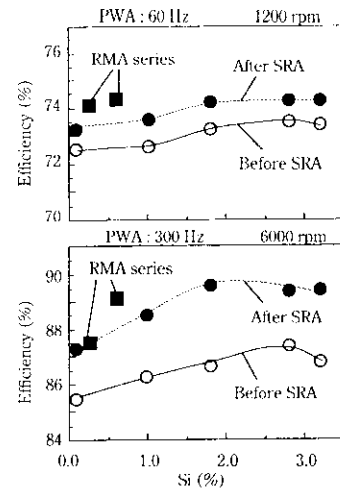


Fig. 6 Effect of Si content of core materials, SRA and PWM frequency on motor efficiency

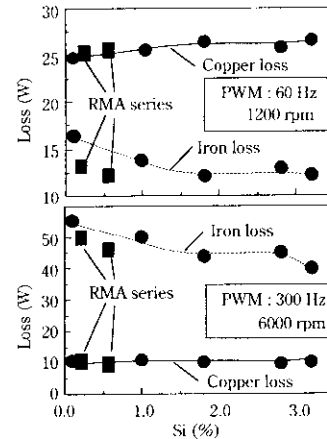


Fig. 7 Effect of Si content on iron loss and copper loss of motor after SRA

る。一方、モータ銅損は小さく、素材 Si 量による変化も小さい。ただし、RMA 材は JIS 規格材よりモータ鉄損も低い。これらの変化は歪取焼鈍後のモータ効率の変化を比較的良好に反映している。

AC 誘導モータの場合にはすべりを考慮しなければならないが、簡単のためにすべりを無視し、DC モータの場合を参考として議論を進める。モータの効率は一般に以下の式で表わされる⁷⁾。

$$\begin{aligned}\eta &= \text{Output} / (\text{Output} + \text{Copper loss} + \text{Iron loss}) \\ &= nT / (nT + k_c R^2 + k_p n^2) \\ &= 1 / (1 + k_c R I / N A B_m n + k_p n^{-1} / N A B_m I)\end{aligned}$$

ここで n は回転数、 R は巻線抵抗、 $T = N A B_m I$ はトルク、 I は電流、 N は巻線巻数、 A はコア断面積、 B_m は設計磁束密度を示す。 k_c 、 k_p および $k(>1.0)$ はモータの形状などから経験的に求められる定数である。

上式より、回転数 n が小さいときにはモータ損のうち銅損が主体となり、回転数が大きくなると鉄損が主体となることがわかる。したがってモータ効率は、回転数が低いときには銅損が大きいため低下し、回転数が極端に増加するとモータ鉄損が増大するため効率は低下する。ただし通常の回転数域では回転数が高いほど銅損が低下する効果が大きいため効率が向上する。回転数が中間領域である 1200 rpm (PWM 周波数が 60 Hz) の時には、Fig. 7 に示すように

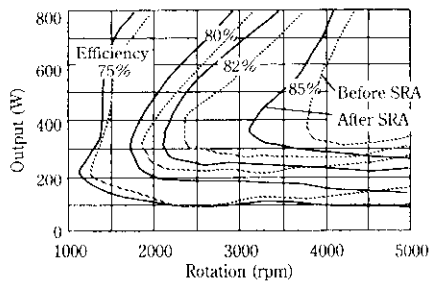


Fig. 8 Efficiency map of motor using 3.2%Si material before and after SRA

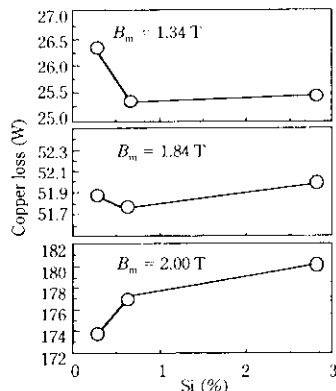


Fig. 9 Effect of design flux density B_m on copper loss of motor

銅損が主体ではあるが鉄損も同程度存在するためこれらが打ち消し合ってモータ効率変化を抑えたと考えられる。また素材 Si 量によりモータ銅損が増加するのは、モータの透磁率 $\mu \propto B_m/I$ が鉄心素材の透磁率に比例するため、高 Si 材ほど透磁率が低かった (Fig. 5) ことを反映している。同図において、回転数が高い 6000 rpm (PWM 周波数が 300 Hz) の時には、前式から予想されたように銅損は小さく鉄損が主体となっている。そのモータ鉄損は素材の鉄損を反映するため、素材 Si 量が高い程モータ鉄損が低下している。このため 6000 rpm における効率の素材 Si 量依存性が大きかったと考えられる。

すべての素材で歪取焼鈍によりモータ効率が向上している。ただしこれによるモータ効率の改善代は低周波域より高周波域の方が大きい。これは、歪取焼鈍による素材鉄損の向上代が低周波域より高周波域の側で大きいためであり、低周波域での設計磁束密度を大きくし、高周波域のそれを小さく設計したことによる。つまり、板の剪断時の歪は、高磁束密度域の鉄損より低磁束密度域の鉄損をより大きく劣化させるため、歪取焼鈍により低磁束密度域すなわち高周波域の鉄損がより大きく改善されたことによるものであると考えられる。

Fig. 8 に効率マップを示すが、歪取による効率改善は最大効率付近のみでなくすべての駆動域で達成されていることがわかる。

一方、この式より高効率化のためには NAB_m を大きくすることも有効である。ただし、これにはモータサイズを大きくして磁束数を高め、巻線数を増やす必要があるため、当然限界が存在する。

Fig. 9 に回転数が 1200 rpm (PWM 周波数が 60 Hz) の時のモータ銅損におよぼす設計磁束密度と素材 Si 量の影響を示す。Fig. 10 には素材磁束密度におよぼす素材 Si 量の影響を示す。両図を比較すると設計磁束密度が小さいときには、低磁場での素材磁束密度を反映して高 Si 材ほど銅損が小さい。ところが設計磁束密度が大き

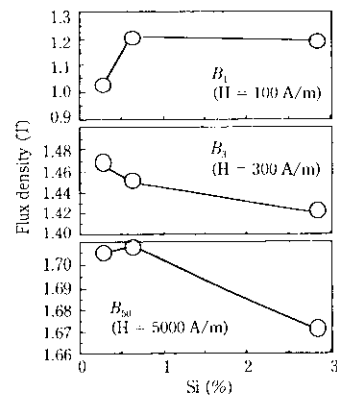


Fig. 10 Effect of Si content and magnetizing force on flux density of core material

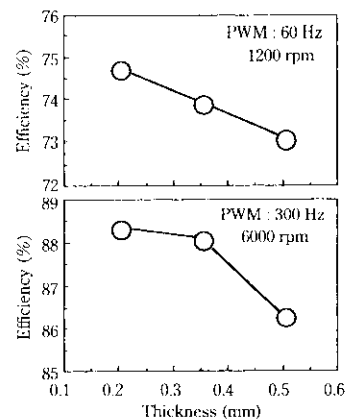


Fig. 11 Effect of material thickness on motor efficiency (1.8%Si steel)

いときには、低 Si 材ほど素材磁束密度が高いためむしろ低 Si 材の方が銅損が小さい。以上のように設計磁束密度によって最適な素材の Si 量が変わることが明らかとなった。

Fig. 11 に未焼鈍の 1.8%Si 材を用いて素材板厚を変更したときのモータ効率を示す。回転数によらず板厚が薄いほどモータ効率が向上する。これは板厚が薄いほど素材の渦電流損が低減されモータ鉄損が低減されたことによる。一般に板厚低下による素材の磁束密度の変化は小さいため、銅損への影響が小さかったと考えられる。したがって薄厚化はモータ効率向上のための理想的な方法であるといえる。

4 結 論

3 相 6 極 400 W インバータモータの効率、銅損および鉄損におよぼす素材の磁気特性、板厚、歪取焼鈍の影響を調査した結果以下が明らかとなった。

- (1) インバータ周波数が低くモータ回転数が小さいときには、モータ効率に及ぼす素材 Si 量の影響は小さい。
- (2) 回転数が大きときには、モータ損に占める鉄損の割合が増大するため素材 Si 量が増加するほど効率が向上する。
- (3) モータの設計磁束密度によって最適素材 Si 量が変わるため、設計にあった素材を選択することが重要である。
- (4) 素材板厚を薄くすることによりモータ効率は向上する。
- (5) 素材によらず歪取焼鈍により効率は向上するが、特に高周波域での効率の向上代が大きい。

参 考 文 献

- 1) 中田高義, 石原好之, 中野正則: 電気学会誌, **90**(1970), 115
- 2) A. J. Moses and H. Shirkoochi: *Physica Scripta*, **39**(1989), 523
- 3) 佐々木堂, 佐伯鈴弘, 高田俊次: 日本応用磁気学会誌, **15**(1991), 271-276
- 4) 田中 隆, 屋鋪裕義, 高田俊次, 佐々木堂: 電気学会マグネティクス研究会, MAG-93-180
- 5) 矢野 隆, 榎園正人, 桑原克己, 佐藤茂信, 岡田 将: 電気学会マグネティクス研究会, MAG-83-57
- 6) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, **12**(1990), 141
- 7) 清水 浩: 電気学会論文誌D, **111**(1991)7, 513-522