

無方向性電磁鋼板の鉄損に及ぼすインバータ励磁の影響

Influence of Inverter Excitation on Iron Loss of Non-Oriented Electrical Steel

上坂 正憲 UESAKA Masanori JFE スチール 西日本製鉄所(倉敷地区) 薄板商品技術部 電磁室 主任部員(副課長)
大村 健 OMURA Takeshi JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員(副部長)
千田 邦浩 SENDA Kunihiro JFE テクノリサーチ 西日本ソリューション本部 倉敷材料評価センター 主査(部長)・博士(工学)

要旨

インバータ励磁下の無方向性電磁鋼板の鉄損に及ぼす材料板厚および ON 電圧の影響を調査した。板厚の増加による鉄損の増加量は、正弦波励磁に比べてインバータ励磁の方が大きくなった。これは、インバータ励磁では鉄損に占める渦電流損の割合が正弦波励磁に比べて大きくなるからと考えられる。また、インバータ用の直流電圧に対する ON 電圧の比が増加するにしたがい、PWM インバータ励磁下の鉄損が増加した。これは、磁束密度の重畳により形成されるマイナーループ生成によるヒステリシス損の増加によるものと考えられる。

Abstract:

The influence of material thickness and ON voltage on iron loss of non-oriented electrical steels under PWM ~~excitation~~ excitation increased with the increase in the ratio V_{ON}/V_{DC} . This is thought to be due to an increase in hysteresis loss caused by the generation of minor loops formed by superposition of magnetic flux densities.

1. はじめに

省エネルギー化の要請から、モータの高効率化が推進されており、消費電力低減と制御性向上のためにインバータを用いた PWM 制御によるモータの駆動が、ブラシレス DC モータを中心として主流となり、モータ鉄心により得られた磁気測定値を参考に選択

下では板厚の薄い材料の方が低鉄損となることを報告しており⁴⁾、本田らは、インバータ駆動させたときの、そのメカニズムに

するが、通常行われている電磁鋼板の磁気特性評価方法では、高調波を含まない正弦波励磁により評価するため、インバータ励磁で駆動されるモータの鉄損との間に乖離が生じるという課題がある⁴⁾。本稿に報告する内容は、風

まで踏み込んで詳細に説明した研究例はほとんどない。そこで、板厚のみを種々変更した電磁鋼板の磁気測定用試験片を使い、インバータを用いた制御方法により励磁したときの材料鉄損の評価結果を報告する⁶⁾。

また、笹山らは異なる積層枚数のリング試験片を用いてインバータ励磁下での鉄損を評価し、インバータ励磁下では試験片の断面積を変化させたとき、インバータの ON 電圧に起因するマイナーループの面積が変化し、鉄損に影響することと報告している。究

といえる。そこで、インバータの ON 電圧が材料鉄損に及ぼす影響を実際の PWM インバータ励磁下で評価することを目的とし、試験片条件と励磁波形条件を変更して鉄損を測定した結果についても報告する⁹⁾。

2. 無方向性電磁鋼板の板厚がインバータ励磁下での鉄損に及ぼす影響

2.1 実験方法

本実験は、インバータを用いた PWM 制御により測定用試験片を励磁する磁気測定により行った。図 1 に測定システムを示す。インバータ部には Si-N チャンネル IGBT による単相インバータを使用した。電流センサーを用いて 1 次電流 I と 2 次電圧 V の波形をデジタルオシロスコープにより記録した。評価サンプルは、Si: 3 mass% の鋼塊から 0.25 mm, 0.35 mm, 0.50 mm の 3 種類の板厚の冷間圧延鋼板を作製し、仕上焼鈍を施した。これら 3 種は同じ Si 含有量であり、結晶粒径も同水準であることを断面組織から確認した。そして、仕上焼鈍板をワイヤーカットで内径 60 mm, 外径 80 mm のリング形状に加工した後、ポリアセタール製の厚み 1 mm のリングケースに入れ、1 次巻線 N_1 150 ターン, 2 次巻線 N_2 100 ターンを施した。インバータ励磁下では、鉄心の断面積が鉄損に影響を及ぼすことから⁷⁾、各板厚の材料の積層厚みが 7 mm, 重量のバラつきが 2% 以内となるよう積層枚数を調整した。1 次電流波形から磁場の強さ H を, 2 次電圧波形から磁束密度 B を求めた。 H と B の計算式は以下のとおりである。

$$H = \frac{N_1}{L} I \quad [\text{A/m}] \dots\dots\dots (1)$$

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int V dt \quad [\text{T}] \dots\dots\dots (2)$$

鉄損 W を以下に示すようにヒステリシス曲線の内部面積から求めた。ここで、 L はリング試料の磁路長、 S は試料の断面積、 f は基本周波数、 ρ は電磁鋼板の密度である。

$$W = \frac{f}{\rho} \int H dB \quad [\text{W/kg}] \dots\dots\dots (3)$$

インバータ励磁時の鉄損 W_{inv} と正弦波励磁時の鉄損 W_{sin} , 正弦波励磁からインバータ励磁にしたことによる

ンバータ励磁では正弦波励磁に比べて、板厚の変化に伴う鉄損の変化量が増加

き、磁束密度の変化量 ΔB はほとんど変化しないが、磁界の強さの変化 ΔH は減少していることが分かる。この傾向はすべてのマイナーループで確認できたことから、薄厚化した場合にインバータ励磁下の鉄損が大きく低減した理由は、板厚低減によりマイナーループの ΔH が小さくなり、その分鉄損が減少したためと考えられる。

次に、インバータ励磁下での渦電流損とヒステリシス損の板厚依存性を評価するため、BH 曲線がマイナーループを含むときのヒステリシス損を以下の方法で測定した。

マイナーループを形成するとき、マイナーループの起点 B_1 および、 ΔB の大きさがヒステリシス損に影響することが知られている^{10,11)}。そこで、インバータ励磁で形成されたすべてのマイナーループに対して、個々の起点 B_1 と折り返し点 B_2 を読み取り、ヒステリシス損測定の磁束密度波形がインバータ励磁での磁束密度波形と同じ磁束密度で反転するように電圧を制御し、一周期が 120 s となる励磁速度でヒステリシス損を測定した。図 9 にヒステリシス損測定での BH 曲線の一例を示す。メジャーループはマイナーループの有無によらず同じ軌跡をたどった

高調波成分が大きな影響を与える渦電流損の鉄損

の推定値を求めた(図 20)。PWM リニアアンプ励磁では鉄損の実測値と推定値が良く一致するが、PWM インバータ励磁では実測値と推定値の差が大きく、試料断面積が小さいほど差が大きくなった。Marcelo らによると、マイナーループを高磁束密度域で形成するほどマイナーループの