

プレイモデル、1D 法、異常渦電流損失係数 による高調波鉄損解析手法の検討

成田 一行*, 佐野 広征, 山田 隆 (JSOL)
赤木 亮介, 青山 真大 (スズキ)

Estimation of iron loss due to harmonics by play model, 1D method, anomalous loss factor

Katsuyuki Narita*, Hiroyuki Sano, Takashi Yamada (JSOL Corporation)

Ryosuke Akaki, Masahiro Aoyama (SUZUKI Motor Corporation)

1. はじめに

近年、自動車主機用回転機等で小型、高回転化が進み、磁束波形が歪んでいること、インバータを含めた回転機システムのトータル効率の最適化を求められていること等から、空間高調波や時間高調波を含んだ実機磁束波形での鉄損計算の精度が要求されている。従来の鉄損計算手法は正弦波磁束励磁下の鉄損値を利用して算定しているため、高調波を含んだ波形では実機鉄損と乖離することが指摘されている。それに対し、プレイモデル⁽¹⁾や 1D 法⁽²⁾といった手法が提案されているが、異常渦電流損失が考慮されておらず、その算定が実用化への課題となっている。これまでは古典的渦電流損失に対する補正係数 κ として異常渦電流損失を考慮する試みが行われてきた。 κ は二周法で鉄損より分離された渦電流損失と表皮効果を含まない古典的渦電流渦電流損失の比をもって決められる事が多い。この κ を高周波の鉄損算定に適用すると実態とかい離する可能性がある。今回任意の磁束密度振幅、周波数に対し補正係数 κ を決定し、高調波鉄損計算に適用した検証結果を報告する。

2. 異常渦電流損失を含んだ高調波鉄損算定手法

任意の磁束密度振幅、周波数に対し異常渦電流損失を分離し補正係数 κ を求める手順を図 1 に示す。プレイモデルおよび 1D 法で表皮効果を考慮したヒステリシス損失と古典的渦電流損失を算出し、実測鉄損から差し引くことで異常渦電流損失を算出する。

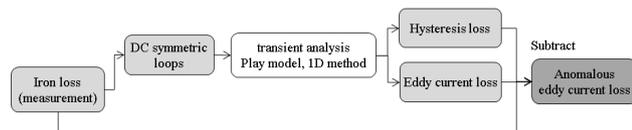


図 1 異常渦電流損失算定法⁽³⁾

Fig. 1. Anomalous loss calculation method

次に、異常渦電流損失の磁束密度、周波数特性を等価な磁束密度変動量 dB/dt に置き換え、動的な異常渦電流損失係数とする。無方向性電磁鋼板 35A360 に対し図 1 で求めた補正係数 κ を dB/dt に対しプロットした結果を図 2 に示す。図

2 によると補正係数は dB/dt 増加とともに低下し、概ね式(1)のような dB/dt の対数関数でフィッティングすることができる(図 2 中の実線)。この様に関数で表現することで測定範囲外の高調波にも適用することが可能となる。他のいくつかの鋼種でも試みたが同様にフィッティングすることが可能であった。

$$\kappa = \alpha - \beta \ln\left(\frac{dB}{dt}\right) \quad (1)$$

最後に高調波を含んだ任意の磁束密度波形に対し、時刻ステップ間の dB/dt から式(1)より補正係数 κ を決定し、その 1 周期の平均値を古典的渦電流損失に乗ずることで異常渦電流損失を考慮する。

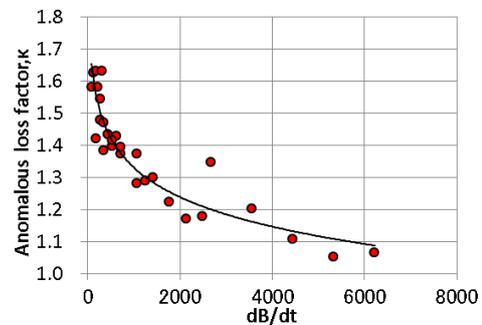


図 2 補正係数 κ の dB/dt による変化

Fig. 2. Anomalous loss factor dependent on dB/dt

3. 測定および解析条件

異常渦電流損失分離に用いる鉄損および高調波による鉄損を測定するために用いた測定系を図 3 に示す。磁束密度が指令波形となるようにフィードバック制御を行っている。今回以下の 2 条件で測定を行った。

- 基本波+7 次高調波 20%重畳
空間高調波を想定
 - 基本波+6kHz 高調波 5%重畳
インバータキャリアによる時間高調波を想定
2. の測定波形の例を図 4 に示す。

磁界解析では、測定で得られた磁束密度波形を入力とし、プレイモデルと 1D 法で損失を計算し、図 2 の補正係数 κ で異常渦電流損失を算出した。プレイモデルには磁束密度振幅 0.05~1.8T 間を振幅の刻みを 0.05T 間隔で測定した計 36 本の対称ループを入力した。

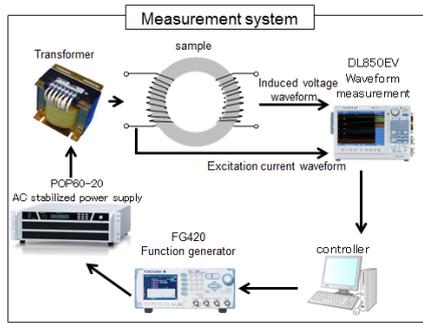
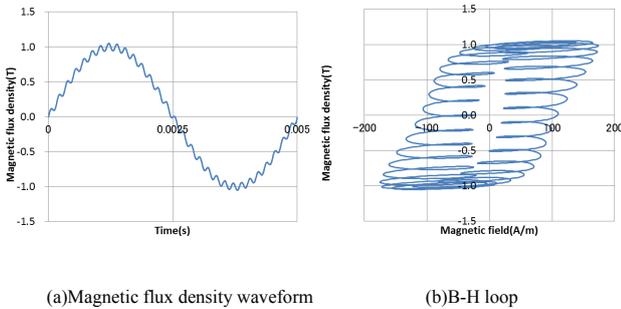


図 3 測定系

Fig. 3. Measurement system



(a)Magnetic flux density waveform (b)B-H loop

図 4 測定された波形の例

Fig. 4. Example of measured waveform

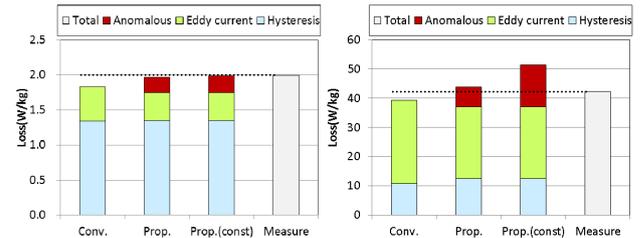
4. 実測と解析結果の比較

実測と解析値の比較結果を図 5 に示す。図中の”Conv.”は正弦波磁束励磁下の鉄損値を利用した従来の鉄損計算手法によるもの、”Prop.”は今回の提案法によるものである。ただし、”Conv.”の渦電流損失(Eddy current loss)には異常渦電流損失を含んでいる。結果を見ると基本波が 1T の場合は従来法でも実測との誤差は 10%以下だが、1.4T になると誤差が拡大している。これは基本波振幅が高くなることで高調波が生じるマイナーループがメジャーループの高い位置に生じ、損失が増加する現象が従来法ではその影響が考慮できないためである。一方、今回の提案法は基本波振幅、周波数に寄らず数%程度の誤差に収まっている。鉄損の内訳をみると、低周波ではヒステリシス損失の割合が高いため、プレイモデルの寄与が大きく、高周波では渦電流損失の割合が高いため、1D 法の寄与が大きい。一方で、”Prop.(const)”は補正係数 κ を 1T,50Hz 時の値で一定とした場合だが高周波では大きく過大評価となっている。

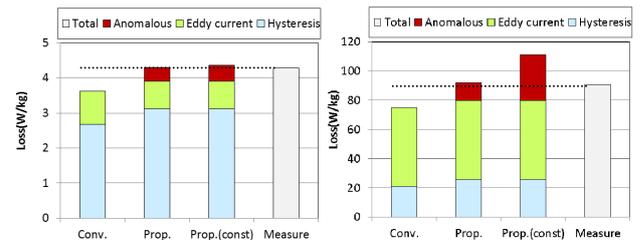
5. まとめ

今回プレイモデルと 1D 法に任意の磁束密度振幅、周波数

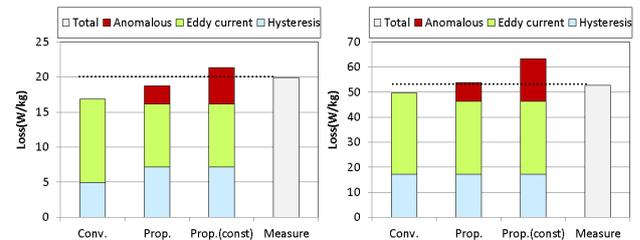
条件で分離した異常渦電流損失補正係数を適用することで、高調波を含んだ磁束波形による鉄損の算定精度を向上させることができた。今回異常渦電流損失補正係数を対数関数でフィッティングしたが、この物理的な解釈と、高周波で係数が 1 を下回ってしまう点の改善が今後の課題として挙げられる。また、正弦波磁束励磁条件で同定した補正係数 κ をマイナーループに適用することによる誤差も今後評価する必要がある。



(a) 1T,50Hz+7th order (b) 1T,400Hz+7th order



(c) 1.4T,50Hz+7th order (d) 1.4T,400Hz+7th order



(e) 1.4T,100Hz+6kHz (f) 1.4T,400Hz+6kHz

図 5 高調波による鉄損

Fig. 5. Iron losses due to harmonics

文献

- (1) 松尾・下出・寺田・島崎：「ストップモデルおよびプレイモデルを用いた電磁鋼板の磁気特性表現に関する検討」, 電学静止器・回転機合同研資,SA-02-51,RM-02-87(2002)
- (2) 山崎・谷田・里見：「電磁鋼板の渦電流を直接考慮した回転機の鉄損解析」, 電学論 D, vol. 128, no.11, pp.1298-1307 (2008)
- (3) 成田・山田・佐野：「無方向性電磁鋼板の異常渦電流損失分離方法に関する一考察」, 電学静止器・回転機合同研資,SA-16-59,RM-16-105(2015)