学術論文

トルクマップを用いた磁気減速機の動特性解析

Dynamic Analysis of a Magnetic Gear Using its Torque Map

新口 昇^{*1} (正員), 平田 勝弘^{*1} (正員), 高原 一品^{*1} (学生員), 鈴木 寛典^{*1} (学生員), 大藤 啓生^{*2}Noboru NIGUCHI (Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.), Kazuaki TAKAHARA (Stu. Mem.),
Hironori SUZUKI (Stu. Mem.), Hiroki DAITO

This paper proposes a dynamic simulation method of a magnetic gear using its torque map. The phase angle difference between the input and output rotors depends on a load of the output rotor. The load contains an external load and brake torque due to internal mechanical and iron losses. In this situation, the dynamic performance of a magnetic gear is computed by a transient analysis using a motion equation, and the computation cost is large. In order to reduce the computation cost of a magnetic gear, a dynamic simulation method using its torque map is proposed and discussed.

Keywords: magnetic gear, torque map, dynamic simulation, eddy current loss.

(2020 年 5 月 20 日受付, 2021 年 3 月 17 日再受付)

1 緒言

近年, 高調波磁束を用いた磁気減速機が提案され, 様々な分野への適用のための研究が続けられている [1-3]. この高調波磁束を用いた磁気減速機は, 入力ロータ (高速ロータ), 出力ロータ (低速ロータ), ステータから構成される。両ロータには位相差という概念があり, 無負荷であれば位相差がゼロで, 低速ロータの負荷の増加に伴い, 位相差が増加し, 一般的に 90 deg を超えると両ロータがスリップする。低速ロータの負荷から両ロータの位相差が決まり, これにより両ロータのトルク波形を有限要素解析などで求めることが可能となる。

低速ロータの負荷は, 外部負荷と内部負荷に分類でき, 外部負荷は低速ロータと接続された外部機器による負荷, 内部負荷は鉄損や機械損などの磁気減速機内部の負荷である。特に, 内部負荷の原因となる鉄損は, 両ロータの回転速度だけでなく位相差にも依存する。そのため, 磁気減速機のトルク特性を有限要素解析を使って求めるためには, 低速ロータの挙動を運動方程式から求める必要があり, さらに構成部品の渦電流を考慮した 3 次元解析が必要であった。しかし, 電磁鋼板の積層状態のモデル化による要素数の増加や低速ロータの正確な挙動の導出のための時間ステップ縮小に

より, 解析コストが莫大になっていた。

この問題を解決するため, 本稿ではトルクマップを用いた磁気減速機のトルク特性の解析方法を提案する。この方法では, 鉄損は有限要素解析結果をもとに近似計算によって求めるが, 両ロータの位相差による変化

Fig. 1 Magnetic gear in this study.

連絡先: 新口 昇, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1,
大阪大学大学院工学研究科,
e-mail: noboru.niguchi@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*1}大阪大学 ^{*2}三菱電機

をマップ化により対応している。このように求めたトルク特性を静解析結果と比較し、本手法の有効性を検証する。

2 解析対象の磁気減速機

本稿で扱う磁気減速機を Fig. 1 に示す。高速ロータは炭素鋼 S45C でできたヨークにリング磁石 ($B_r=1.35$ T) が貼り付けられ、3 極対を形成している。低速ロータは厚さ 0.3 mm の電磁鋼板を周方向に積層した 16 個のポールピースから構成されている。ステータは、厚さ 0.3 mm の電磁鋼板を回転軸方向に積層したヨークとそれに貼り付けられた 26 枚の平板磁石 ($B_r=1.34$ T) から構成され、13 極対を形成している。

本磁気減速機は、3 極対の高速ロータの磁界が 16 個のポールピースで変調されることで 13 極対の磁束分布が低速ロータとステータの間のエアギャップ中に発生し、これが 13 極対のステータの永久磁石の磁束とカップリングすることで動作する。この現象を数式で表すと、以下の通りであるが、ここでは基本波成分のみを考慮する[4]。

まず、高速ロータが初期位置 θ_0 (機械角) から α だけ回転したとき、永久磁石による起磁力 M_h は式(1)で表される。

$$M_h = M_0 \sin 3(\theta_0 + \alpha) \quad (1)$$

ここで、 M_0 は起磁力の振幅を表す。このとき、低速ロータが β 回転すると仮定すると、低速ロータのパーミアンス分布 P_l は、式(2)で表される。

$$P_l = P_{dc} + P_0 \sin 16(\theta_0 + \beta) \quad (2)$$

ここで、 P_{dc} はパーミアンスの DC 成分、 P_0 はパーミアンスの振幅を表す。起磁力とパーミアンスの積が磁束を表すので、低速ロータとステータの間のエアギャップ中の磁束は、式(3)で表される。

$$\phi = M_h P_l = M_0 P_{dc} \sin 3(\theta_0 + \alpha) + \frac{1}{2} M_0 P_0 \{\cos(13\theta_0 - 3\alpha + 16\beta) - \cos(19\theta_0 + 3\alpha + 16\beta)\} \quad (3)$$

式(3)より、低速ロータとステータの間のエアギャップ中には、高速ロータ 1 回転を 1 次としたときの 3 次、13 次、19 次の磁束が存在することがわかる。ステータの永久磁石は 13 極対のため、これらの磁束のうち 13 次成分とカップリングすることがわかる。また、両ロータが回転してもステータは回転しないことから、13 次成分の磁束が回転しないことを表す次式が得られる。

$$-3\alpha + 16\beta = 0 \Leftrightarrow 3\alpha = 16\beta \quad (4)$$

式(4)より、本磁気減速機の回転速度比 (減速比) は 5.33 と求まる。

3 トルクマップの作成

磁気減速機の両ロータのトルクは、両ロータの位相差と一方のロータ (ここでは低速ロータとする) のステータとの位置関係により決まる。本稿では、低速ロータとステータの位置関係を 0.1 deg おきに 225 パターン設定し、それぞれのパターンにおいて高速ロータを磁氣的に安定な位置関係から電気角 360 deg 分を 1deg ごとに強制回転させることで $225 \times 360 = 81000$ パターンのトルク情報を取得する。

磁気減速機では、両ロータの位相差が 0 deg、つまり磁氣的に安定な位置関係にあるときに回転軸方向への漏れ磁束が最も少なく、90 deg に近づくほど漏れ磁束が増加する。そのため、トルクマップ作成には 3 次元解析が必要であるが、81000 パターンのトルク情報を得るための計算コストが膨大になるため、2 次元解析結果に補正係数をかけることで 3 次元解析結果に近似する手法を採用する。ここで、渦電流による磁界は永久磁石の磁界に比べてはるかに小さいとして、これを無視した解析を行う。

3 次元および 2 次元有限要素モデルをそれぞれ Fig. 2(a), (b) に示すが、対称性から 3 次元解析では軸方向に 1/2、周方向に 1/2 モデル、2 次元解析では周方向に

Fig. 2 Mesh models (3-D: (a), 2-D: (b)).

Fig. 3 Magnetically-stable position ($\theta_h = \theta_l = 0$).

Fig. 4 Transmission torque.

Fig. 5 Torque ratio between 2-D and 3-D FEAs.

1/2 モデルを採用している。また、両ロータが磁気的に安定な位置関係にあり、低速ロータのポールピースがステータの永久磁石に正対している位置 (Fig. 3) を解析の基点とし、両ロータの初期位置とする。Fig. 3 の位置関係から高速ロータのみを電気角 1 周期回転させる解析を 2 次元と 3 次元モデルで実施した。このときのトルク波形を Fig. 4 に示すが、3 次元解析のトルクの方が小さいことがわかる。このとき、3 次元解析の 2 次元解析に対するトルク比を Fig. 5 に示すが、トルクが

Fig. 6 Eddy current loss in the PMs.

Table 1 Losses (W) in the magnetic gear.

rpm deg	0	20	40	60	80	90
5000	12.7	12.6	12.3	12.1	11.8	11.7
10000	42.9	42.6	41.8	40.9	40.3	40.0
20000	152	151	148	145	143	142
40000	580	575	563	551	545	542
80000	2073	2055	2015	1979	1962	1958

ゼロ付近の位置を除き、およそ 0.93 倍であることがわかる。以上より、トルクマップを形成する 81000 パターンのデータを 2 次元解析により取得し、それらを 0.93 倍することで 3 次元解析結果相当に補正する。

ここで、高速ロータのコギングトルクの基本次数は、高速ロータの永久磁石 3 極対とステータの永久磁石 13 極対の最小公倍数である 39 次である。コギングトルク 1 周期は約 9.2 deg になり、これを低速ロータの角度に換算すると $9.2/5.33=1.73$ deg である。したがって、低速ロータの位置を 0.1 deg ずつ変更した解析を行うことで、1.73 deg を約 17 分割でき、コギングトルク 1 周期を 17 個のデータで形成することが可能となる。

4 鉄損マップの作成

4.1 永久磁石の渦電流損失

本稿では、磁気減速機内部の損失として、永久磁石の渦電流損失、低速ロータとステータの鉄損のみを考慮する。まず、永久磁石の渦電流損失を求めるが、Fig. 2(a)の解析モデルにて、永久磁石のみに電気抵抗率 ($1.4E-6 \Omega m$) を与え、両ロータを減速比に従って同期回転させる。磁気減速機では、両ロータの位相差によって軸方向漏れ磁束が変化するため、両ロータの回転速度だけでなく、位相差も変化させた。ここでは、高速ロータの回転速度が 5000 rpm, 10000 rpm, 20000 rpm,

Fig. 7 Rotation speed of the low-speed rotor vs. brake torque.

Fig. 8 Phase angle difference vs. internal loss.

40000 rpm, 80000 rpm の 5 通り, 両ロータの位相差が 0, 20 deg, 40 deg, 60 deg, 80 deg, 90 deg の 6 通りで, 合計 30 通りの解析を実施した。

一例として, 高速ロータの回転速度が 40000 rpm, 両ロータの位相差が 40 deg 時の渦電流損失波形を Fig. 6 に示すが, 平均 445 W の渦電流損失が発生していることがわかる。また, ステータの永久磁石での渦電流損失が支配的であることもわかる。なお, 本稿では, 永久磁石の渦電流損失はステータと低速ロータの位置関係に依存しないとし, 一定値として扱う。

4.2 電磁鋼板の鉄損

前節で永久磁石の渦電流損失を 3 次元解析により求めたが, その際の磁束密度情報をもとに電磁鋼板中の鉄損を解析する。具体的には, 磁束密度の変化を FFT 解析し, 基本波から 10 次成分までの振幅を求め, 材料の鉄損曲線から鉄損を算出する。ここで, 本磁気減速機では式(3)で表されるように高調波磁束を利用する

が, 磁束の変化は高速ロータの回転のみによって生じるため, 磁束密度の FFT 解析時の基本周波数は高速ロータの回転周波数 (電気角) のみでよい。

まず, 前節に記載した 30 通りの高速ロータの回転速度と両ロータの位相差で鉄損を解析する。そして, 前節で求めた永久磁石の渦電流損失を加え, 磁気減速機内部の損失とする。本磁気減速機について, 高速ロータの回転速度, 両ロータの位相差ごとの損失を Table 1 に示す。次に, Table 1 を低速ロータの回転速度と低速ロータに発生するブレーキトルクの表に換算し, 位相差 0 deg 時の低速ロータの回転速度とブレーキトルクの関係を求める (Fig. 7)。Fig. 7 の関係に対して近似曲線を 2 次多項式で作成すると, 磁気減速機の内部損失による低速ロータのブレーキトルク T_{brake} は, 式(5)で表される。

$$T_{brake} = -1.3E - 9 \times N_l^2 + 1.06E - 4 \times N_l \quad (5)$$

ここで, N_l は低速ロータの回転速度 (rpm) を表す。

最後に, 各回転速度において, 位相差 0 deg 時の損失を 1 として, 位相差 90 deg までの損失を求める。そして, 5 通りの回転速度で平均化した比率と位相差の関係を Fig. 8 に示す。

以上より, 本稿では, 低速ロータの回転速度から式(5)で位相差 0 deg の損失を求めた後, Fig. 8 のマップを用い, 位相差の影響を考慮した鉄損とする。

5 磁気減速機の運動モデル

最後に, 磁気減速機の運動モデルを求める。低速ロータの運動方程式は, 式(6)で表される。

$$J_{lsr} \frac{d\omega_{lsr}}{dt} = T_{LSR} - T_{load} + T_{traction} \quad (6)$$

ここで, J_{lsr} は低速ロータの慣性モーメント, ω_{lsr} は低速ロータの回転角速度, T_{LSR} はトルクマップで決まる低速ロータのトルク, T_{load} は外部負荷, $T_{traction}$ は高速ロータおよび低速ロータの渦電流損によって発生する回転方向のトルクである。この回転方向のトルクは, 高速ロータに対して低速ロータの回転速度が低いため, 誘導機のすべりと同様の現象が生じることで発生する。

また, 高速ロータの運動方程式は, 式(7)で表される。

$$J_{hsr} \frac{d\omega_{hsr}}{dt} = T_m - T_{HSR} - T_{brake} \quad (7)$$

ここで, J_{hsr} は高速ロータの慣性モーメント, T_m はモータなどで高速ロータを回転させるために必要なトルク (入力トルク), T_{HSR} はトルクマップで決まる高速ロ

ータのトルク, T_{brake} は両ロータとステータの渦電流損によって発生するブレーキトルクを表している。また, 両ロータの特性は, 式(8)で接続されている。

$$G_{rmap} T_{HSR} = T_{LSR} \quad (8)$$

ここで, G_{rmap} はトルクマップから得られる減速比で, トルク脈動により理論上の減速比 5.33 を中心にロータ位置に応じて変動する。以上より, 磁気減速機のシミュレーションモデルは Fig. 9 のようになる。

6 シミュレーションモデルの妥当性検証

Fig. 9 のシミュレーションモデルを Matlab/Simulink で構成し, 本モデルの妥当性を検証するため, 高速ロータへの入力回転速度を 100 rpm, 外部負荷を 9.8 Nm としたときの両ロータのトルク波形を求めた。このとき, 両ロータの位相差は 40 deg 程度であったため, 位相差 40 deg の 3 次元静解析結果と比較して Fig. 10 と Fig. 11 に結果を示す。Fig. 10 より, 高速ロータのトルクの絶対値は渦電流損失の分だけ Matlab/Simulink の方が高くなっていることがわかる。また, Fig. 11 の低速ロータのトルクは, 両ロータの渦電流損が回転方向のトルクとして働くため, Matlab/Simulink の方が高くなっていることがわかる。最後に, Fig. 12 に示すように, Matlab/Simulink における低速ロータの回転速度は, 減速比通り (18.7rpm) になっていることがわかる。

Fig. 9 Simulation model.

Fig. 10 Comparison of the high-speed rotor torque between Matlab/Simulink and 3D-FEM.

Fig. 11 Comparison of the low-speed rotor torque between Matlab/Simulink and 3D-FEM.

Fig. 12 Simulated rotation speed of the low-speed rotor.

また, 損失の評価をするため, 高速ロータに 40000 rpm を与え, 外部負荷 9.8 Nm 時の損失を計算した。その結果, 位相差は 43.7 deg で, 鉄損は 567 W となり,

Table 1 の位相差 40 deg の結果と比較しても妥当であることがわかる。

7 結言

磁気減速機の動特性計算のコストを下げるため、トルクマップと損失マップを用いた解析方法を提案し、Matlab/Simulink を用いて解析モデルを作成した。提案モデルの妥当性を検証するために 100 rpm 時のトルク波形を有限要素解析モデルと比較したところ、渦電流損失による低速ロータへのトラクショントルク、高速ロータへのブレーキトルク分の差が反映されていることを確認できた。また、40000 rpm 時の損失を有限要素解析結果と比較したところ、両者の渦電流損失は良好に一致した。以上より、トルクマップと損失マップを用いた解析手法の妥当性が示されたと言える。

参考文献

- [1] K. Atallah and D. Howe, A novel high-performance magnetic gear, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.37, No.4, pp.2844-2846 2001.
- [2] 平田, 山本, 村松, アキシシャルギャップ形磁気減速機, 電学論 D-130, No. 6, pp.802-807, 2010.
- [3] 新口, 平田, 山本, 村松, ハイブリッド型磁気伝達減速機構のコギングトルク低減に関する研究, 電学論 D-130, No. 5, pp.692-698, 2010.
- [4] 新口, 平田, 村松, 加藤, 表面磁石型磁気伝達減速機構に関する研究, 日本 AEM 学会誌, Vol.18, No.3, pp.221-226, 2010.