

論文・解説

13 電流／磁気／構造連成によるモーターノイズの予測技術開発**Development of Prediction Technology for Motor Noise**

安達 亮一^{*1} 川口 真^{*2} 山田 眞平^{*3}
Ryoichi Adachi Makoto Kawaguchi Shimpei Yamada
田辺 裕樹^{*4} 楠見 隆行^{*5} 堤 洵也^{*6}
Hiroki Tanabe Takayuki Kusumi Junya Tsutsumi

要 約

マツダは環境に配慮した商品開発に取り組む一方で、お客様から選ばれる商品となるために、マツダらしい商品価値の向上にも取り組まなければならない。中でも重要な価値の一つに静粛性があり、EV 特有の不快な異音であるモーターノイズを低減させることで、音楽や会話を楽しめる上質な室内空間造りを目指している。このような中、開発効率化のためモーターノイズの予測技術開発に取り組んできたが、モーターノイズの起振源である電磁力の予測には、モーターに入力される三相交流電流の基本波に加えて、高調波成分の再現も必要であった。そこで、モーターに流す電流や回転による時々刻々と変化するモーターコイルのインダクタンスを考慮し、電流と磁束が相互に影響を及ぼしあう連成モデルを構築することで、高調波成分込みの電流予測を可能にし、モーターノイズの予測精度を向上させてきた。本稿では、その取り組みについて報告する。

Abstract

While we work to develop environmentally conscious products, we must also work to improve product value that is unique to Mazda to create products chosen by customers. One of the most important values is quietness. By reducing motor noise, an EV-specific unpleasant noise, we aim to create a high-quality interior space in which occupants can enjoy music and conversation. Under such circumstances, we have been working on developing the technology to predict motor noise to improve development efficiency. However, to predict the electromagnetic force that is the excitation source of motor noise, it is necessary to reproduce not only the fundamental wave of the three-phase AC input to the motor, but also the harmonic components. Therefore, by taking into account the inductance of the motor coil, which changes from moment to moment due to interaction with the motor back electromagnetic force and constructing a coupled model in which the current and magnetic flux mutually affect each other, it is possible to predict currents that include harmonic components, thereby improving the accuracy of motor noise predictions. This report explains the efforts on our achievement.

Key words : Power transmission, NVH, Electronic control, Co-simulation

1. はじめに

マツダでは 2030 年に全てのクルマへ電動化技術を搭載し、2050 年にはクルマのライフサイクル全体でカーボンニュートラル化を目指している⁽¹⁾。環境に配慮した商品開発に取り組む一方で、お客様から選んでいただける商品とするためには、マツダらしい商品価値の向上にも取り組まなければならない。中でも重要な価値の一つ

に「静粛性」があり、マツダが追求してきた「走る喜び」を際立たせるためにも、不快な異音は無くす必要がある。特に、本稿で述べるモーターノイズは、EV 特有の不快な異音であり、パフォーマンスフィール (P-Feel) と両立する形でノイズレベルを低減させることで、音楽や会話を楽しめる上質な室内空間を目指している。

このような中、マツダでは効率的な開発実現のためモデルベース開発 (MBD: Model Based Development) に

*1~4 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*6 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*5 電気駆動システム開発部
Electric Drive System Development Dept.

よるプロセス革新を進めており、これまでモーターノイズ予測の構築に取り組んできた。モーターノイズを精度よく予測するためには、モーターの磁気特性と、モーターへ入力されるインバーター電流の高調波成分も考慮して予測を行う必要がある。よって、本稿ではモーター磁気回路モデルと、インバーターモデルを構築し、それぞれのモデルを連成させて解くことで、電流と磁束が相互に影響を及ぼし合うモーター・インバーターの連成解析モデルを構築してきた。これにより高調波を含む電流、及び磁束の予測を可能にし、モーターノイズの予測精度を向上させてきたので、その取り組みについて紹介する。

2. モーターノイズ概要

2.1 モーターノイズについて

モーターノイズとは、モーターで発生する電磁力が起振力となり、モーター筐体からの直接放射や、PT/車両の構造伝達系を伝って、車室内で認知される中高周波の音である。この電磁力は、Fig. 1 に示すようにローターとステーターのエアギャップ間で生じるマクスウェル応力の式によって表現でき、モーター通電時に生じる磁束の予測が重要となる。特に、三相交流のIPMモーターでは、Fig. 2 に示すように、電気角6次を主成分とする電磁力が発生するため、電流・磁束の高次成分を含めて正確に予測する必要がある。

$$F_r = \frac{B_r^2 - B_\theta^2}{2\mu_0} \quad F_\theta = \frac{B_r B_\theta}{2\mu_0}$$

- F_r : 径方向起振力
- F_θ : 周方向起振力
- μ_0 : 真空の透磁率
- B_r : 径方向磁束密度
- B_θ : 周方向磁束密度

Fig. 1 Maxwell's Equations

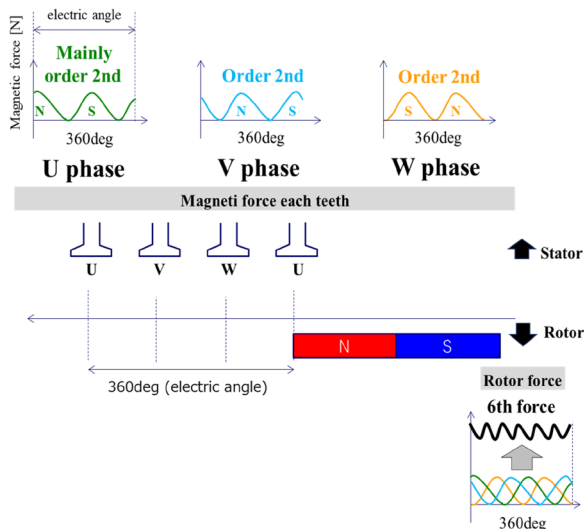


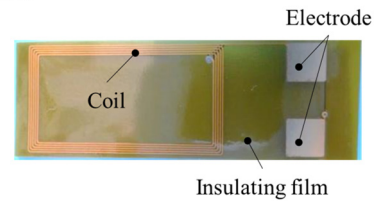
Fig. 2 Order of Electromagnetic Force

2.2 モーターノイズ評価手法

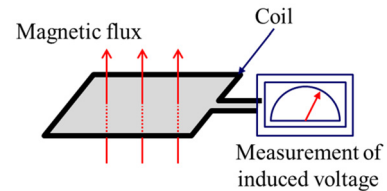
モーターノイズの予測モデルを構築する上で、モーターから生じる磁束の把握が重要となる。そこで、ステーターのティース先端部へサーチコイルを貼り付け、エアギャップ間に生じる磁束の直接計測を行った。サーチコイルとは、Fig. 3 に示すように、絶縁性・耐熱性に優れたポリイミド樹脂のシート中にコイルを巻き、磁束がコイルを通過した際の誘起電圧を計測することで、ファラデーの電磁誘導則より磁束を導出できる。

そのサーチコイルを貼り付けたモーターを Fig. 4 の台上試験装置へ搭載し、汎用インバーターより任意の電流でモーターを駆動できる状態にした。モーターは8極48スロットの分布巻きタイプを選択し、筐体へ振動加速度ピックアップを貼り付け、同時に振動計測も実施している。モーターノイズを構成する各物理値である、電流、磁束、振動を同時計測できる試験装置を構築し、振動まで伝わっていく過程で、どこに予測とのズレが生じるか判別可能とした。

(A) Search coil



(B) Principle



$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} [V]$$

Induced voltage	: E [V]
Coil turns	: N [-]
Magnetic flux	: Φ [Wb]

Fig. 3 Principle of Magnetic Flux Measurement



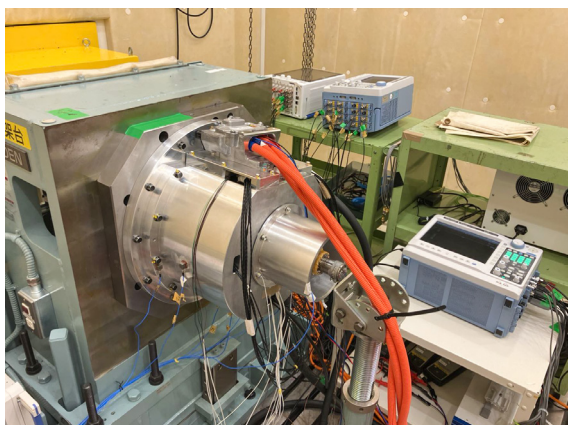


Fig. 4 Motor Noise Bench Test Equipment

3. 予測モデル概要

モーターノイズ予測モデルとは、モーター本体の磁気特性を再現したモーター磁気回路モデルと、そのモーターへ通電するインバーター電流制御モデルで構成され、各系を強連成した状態で解析が可能なモデルである。

3.1 モーター磁気回路モデル

Fig. 5 に示すような、対象モーターの磁気特性を考慮した有限要素法 (FEM) モデルを作成し、入力電流に応じて発生する磁束やトルクを算出する。また、偏心などの寸法公差によるエアギャップの偏りを考慮するため、モーター全周を表現したフルモデルでモデル化を行い、空間的な磁束の偏りも再現可能とした。ローター・ステーター間では作用・反作用が働き、双方に生じる周方向成分は、それに準じた値を取る。そのため、ローター・ステーター間に発生するトルクの比較でモデル精度を検証した。偏心などの物性の偏りが無い条件で、ローター・ステーター間の比較を行った結果、周期ごとのトルクが安定性や作用・反作用とは離れた領域が散見された。これを改善するために、モデルの対称性やエアギャップ間のメッシュ解像度を時間分解能に合わせて設定することで安定したトルク波形を得られることを確認した。結果を Fig. 6 へ示す。

なお、解析ソフトは(株)JSOL の JMAG を用いた。

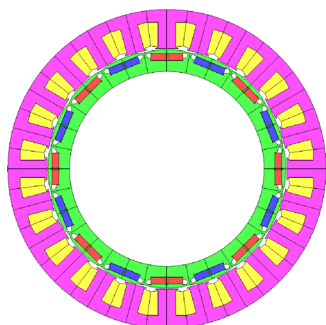


Fig. 5 Motor FEM Model

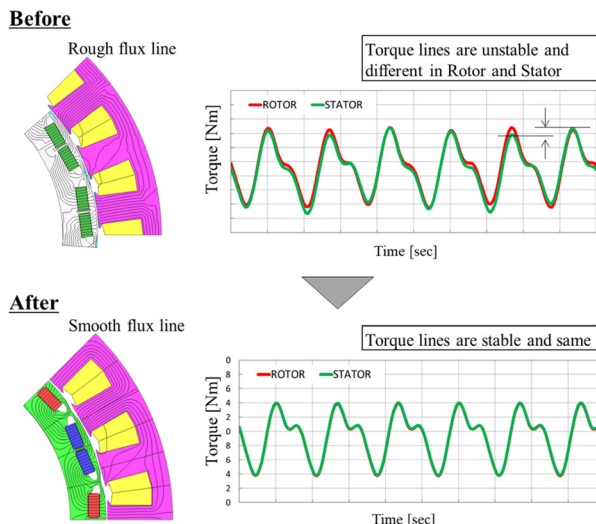


Fig. 6 Improved Prediction Accuracy of Motor Model

3.2 インバーター電流制御モデル

電磁起振力を精度よく予測するためには、モーターに入力される三相交流電流を机上で予測できる状態にする必要がある。電流だけでなく熱等の多目的制御も視野に入れ、モジュールの拡張性が高い Simscape を用いてインバーター電流制御モデルを構築した。モデル構成としては、モーターの回転角と電流を読み取り、所望の回転数、及びトルクからモーターに流すべき電流指令値と直流電源でそれを再現するためのパルス幅変調 (PWM) 信号を計算する Fig. 7 の制御部と、制御部からの電流指令値を受け取り、半導体素子のスイッチングにより三相交流に変換された電流をモーターに流す Fig. 8 の主回路部からなる。なお、本モデルでは汎用的なインバーターを想定しており、保護回路等の個々のインバーターで異なる要素については実装していない。

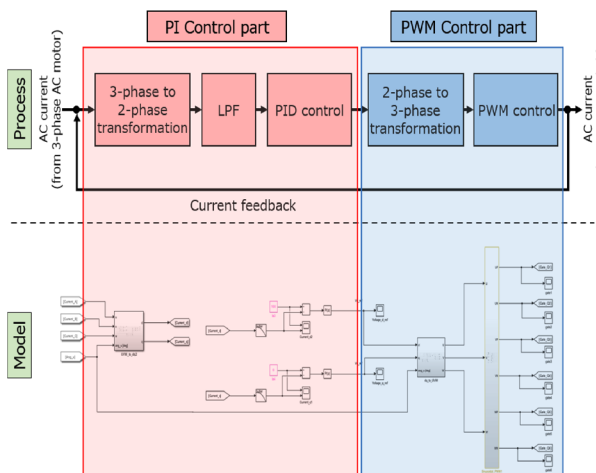


Fig. 7 Control Diagram of Inverter

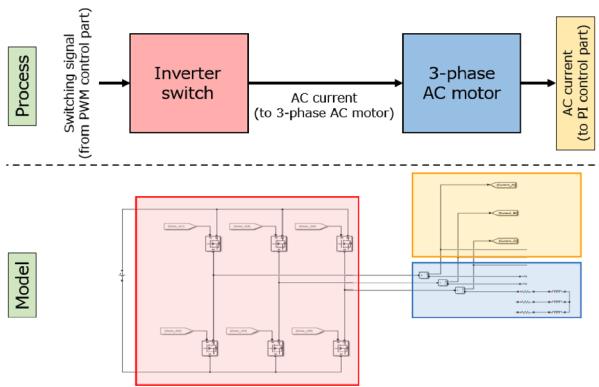


Fig. 8 Schematic Diagram of Inverter

3.3 モーター・インバーターの連成モデル

前節で基礎となるインバーターモデルの構築は完了したが、このモデルでは、モーターに流す電流や回転による時々刻々と変化するモーターコイルのインダクタンスが考慮されず、電流基本成分に加えて出現する高調波成分を再現できない。そこで、3.1 で構築したモーター磁気回路モデルを縮退し、物理モデルを扱える Simscape モデルに組み込み、電流と磁束が相互に影響を及ぼし合う、連成モデルを構築した。これにより、モーターノイズに影響する電流高調波の予測を可能にした。連成モデル概略については Fig. 9 に示す。

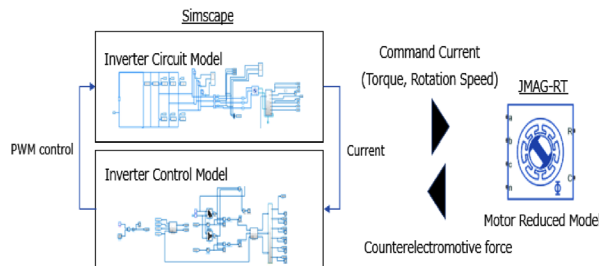


Fig. 9 Overview of Motor Inverter Coupling Model

4. 連成モデルの妥当性検証

4.1 予測精度検証

Fig. 10 に、構築した連成モデルによる電流予測結果と、2.2 の台上試験で計測した電流値との比較結果を示す。電流の基本波成分に加え、高調波成分を精度よく予測できている。また、Fig. 11 に実稼働状態での筐体振動の計測結果と、予測結果を示す。筐体振動の予実差が小さく、連成モデルの精度は良好といえる。

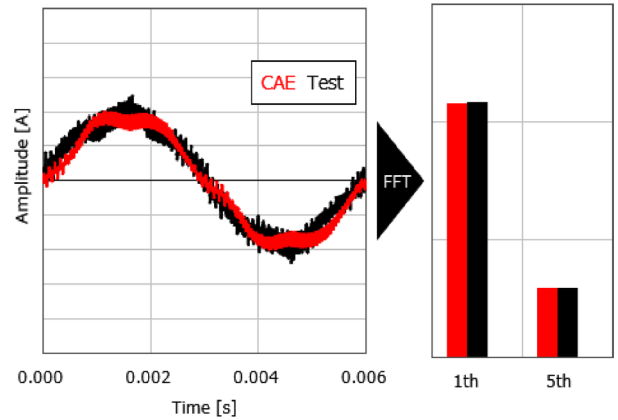


Fig. 10 Current Prediction Accuracy

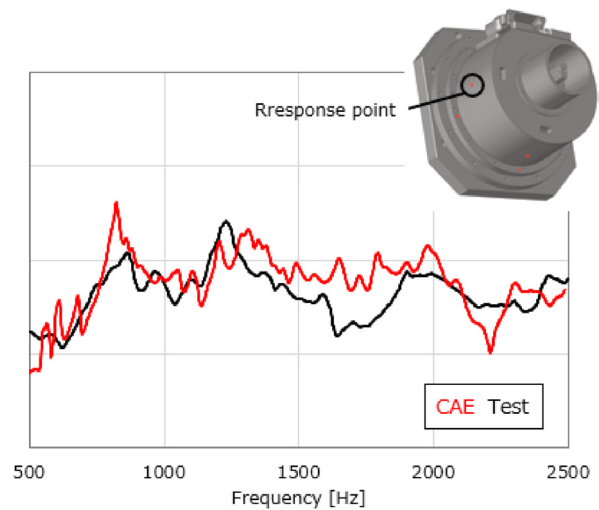


Fig. 11 Accuracy of Motor Housing Vibration Prediction

4.2 仕様検討

JMAG では、さまざまな物理量の出力が可能で、この機能を用いることで Fig. 12 に示すように効率と NV を両立するモーター動作点を求めることができる。今後は機能を更に拡張し、効率、熱、NV を含めた多目的に制御できる機能を拡充し、NV だけでなく他性能を含めた電流制御の仕様を決定していく。

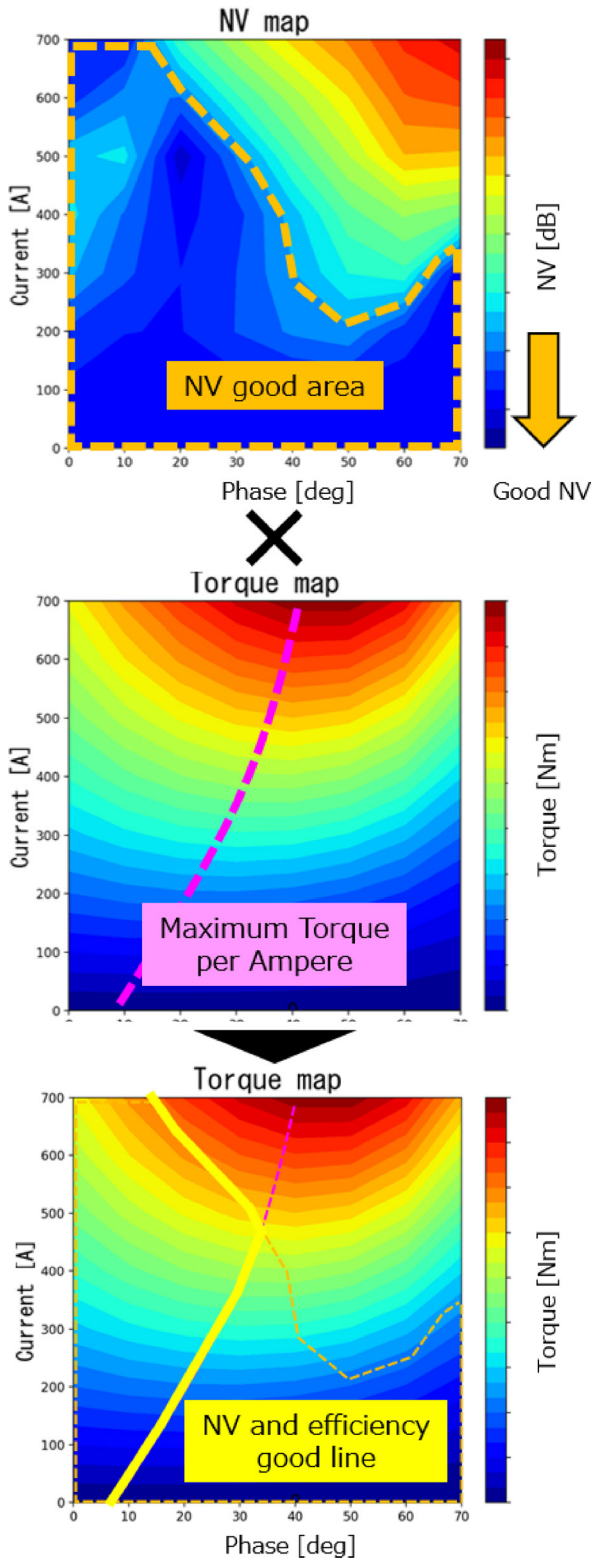


Fig. 12 Motor Operating Point from NV Requirements

5. おわりに

本稿では、モーターノイズの予測手法として、電流・磁気の連成解析を用いた MBD 技術を紹介した。本モデルを活用して、インバーター電流の高調波成分を精度よく予測できたことで、モーターノイズ予測の肝であった電磁力の予測精度を大幅に向上させた。また、精度検証

では、特にエアギャップ部に発生する磁束の直接計測を始め、電流・振動との同時計測が可能な実験検証を通じ、現象把握・カラクリ解明が進み、高精度のモーターノイズの予測技術を構築できた。

今後、制御を含めたクルマ全体での機能配分として、本モデルを活用していき、静粛性が高く、音楽や会話が楽しめる上質な室内空間を造ることで、マツダ車の魅力を高めていきたい。

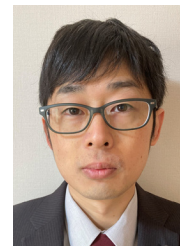
参考文献

- (1) MAZDA 統合報告書 2024 より

■ 著 者 ■



安達 亮一



川口 真



山田 真平



田辺 裕樹



楠見 隆行



堤 洵也