

論文・解説

12 MX-30 ROTARY-EV に搭載するモーター駆動システムの開発

Development of MX-30 Rotary-EV Motor Drive System

野田 明裕^{*1} 高旗 達也^{*2} 山岡 祐也^{*3}
Akihiro Noda Tatsuya Takahata Yuya Yamaoka
児嶋 和也^{*4} 竹光 考昭^{*5} 廣田 充宏^{*6}
Kazuya Kojima Takaaki Takemitsu Mitsuhiro Hirota

要約

電動車（BEV）は走行時に二酸化炭素を排出しないという特徴をもつが、現時点では航続距離や電欠への不安がある。また、地域の電源事情によっては Well to Wheel の視点で見ると BEV が最適解にならない場合もあり、マツダは 2030 年頃までの電動化時代への移行期間において、内燃機関（ICE）、電動化技術、代替燃料などさまざまなソリューションを組み合わせて適材適所に提供していく「マルチソリューション」を提案している。このような状況において、マツダは、シリーズハイブリッド電気駆動システム e-SKYACTIV R-EV を開発し、MX-30 ROTARY-EV に搭載した。e-SKYACTIV R-EV は、普段は BEV として使える 107km の EV 走行距離に加え、8C 型ロータリーエンジン（RE）を発電用として搭載することで電欠の不安なく更なる長距離ドライブを楽しむことを可能にした。また、同程度出力のレシプロエンジンと比べコンパクトである RE の特徴を活かし、かつ、電動ユニットを小型化することで、既販 MX-30 の ICE ユニットの外観形状内に収め、既販モデルの快適な室内空間をそのまま確保した。

本稿では電動ユニットを小型化するための 1) ハード部品の小型化設計と、2) 小型化により懸念される電気ノイズに対するロバスト性を高めた制御ソフトウェアの開発について紹介する。

Abstract

Battery electric vehicles (BEVs) do not emit carbon dioxide while driving but the range and battery anxiety are still major concerns. Depending on local power supply situations, BEVs may not be the optimal solution from a Well-to-Wheel viewpoint. Mazda proposes a “multi-solution” approach, combining various solutions such as internal combustion engines (ICE), electrification technologies, and alternative fuels for the transition period to the electrification era around 2030. Under such circumstances, Mazda developed a series hybrid electric drive system, e-Skyactiv R-EV, and installed it in MX-30 Rotary-EV. The e-Skyactiv R-EV offers an EV driving range equivalent to 107km for daily use as a BEV, and by incorporating an 8C type rotary engine (RE) for electric generation, it enables longer drives without the battery anxiety. By taking advantage of the compact size of RE over a reciprocating engine with similar output and by downsizing the electric drive unit, they were able to be packaged within the production MX-30’s ICE unit while maintaining the interior space of the model. This paper introduces 1) the design of miniaturized hardware components to downsize the electric unit, and 2) the development of control software with improved robustness against electric noise caused by the miniaturization.

Key words : MX-30 Rotary-EV, Series hybrid, Miniaturization

1. はじめに

マツダは 2030 年頃までの電動化時代への移行期間において、ICE、電動化技術、代替燃料などさまざまなソリューションをもち、地域の電源事情に応じてそれぞれ

を適材適所に提供していく「マルチソリューション」のアプローチが有効と考えている。また、2030 年に全てのクルマを電動化し、グローバル販売の 25-40% を BEV とすることを想定している。その中でカーボンニュートラルの実現に向けて推進する「マルチソリューション戦

*1 PT 開発本部
Powertrain Development Division

*2~6 PT 開発本部 電気駆動システム開発部
Electric Drive System Development Dept.

略」を体現するモデルとして、MX-30 に BEV モデル、ICE モデルを投入してきた。

走行時に二酸化炭素を排出しない BEV の普及に注目が集まっているが、現時点において、BEV は航続距離の短さや充電スタンドが見つからないという不安がある。MX-30 ROTARY-EV は、発電用 8C 型ロータリーエンジン (RE) を搭載することで、普段は BEV として使える 107km の EV 走行距離に加え、今回開発した発電用 RE による発電により、更なる長距離ドライブでも、電欠の不安なく運転を楽しむことを可能にした。

モーター駆動は応答性に優れており、既販モデルである MX-30 EV モデルは、その応答性を活かして、人の感覚に合う加速特性を実現した。駆動力の全てをモーターが担うシリーズハイブリッドである e-SKYACTIV R-EV は、日常使用として十分な EV 航続距離を確保するバッテリーと、RE / ジェネレーターによる発電機構をもっているため EV モデルよりも車重が重い。駆動力を賄うモーターの出力を EV モデルの 107kW から 125kW に高めることで、EV モデルと同様に、アクセル操作に対して応答が良く、なめらかで扱いやすい加速特性を実現した。

2. PHEV ユニットの小型化

高電圧の電気駆動ユニットは、万が一衝突した場合でもお客様やレスキュー作業者を感電から守るためのクラッシュエリアを確保する必要がある。e-SKYACTIV R-EV は、外観形状を既販 MX-30 の ICE ユニットよりも小型にすることで、クラッシュエリアを確保しながら、既販モデルの快適な室内空間をそのまま確保することができた。e-SKYACTIV R-EV と ICE ユニットの外観形状の比較を Fig. 1 に示す。

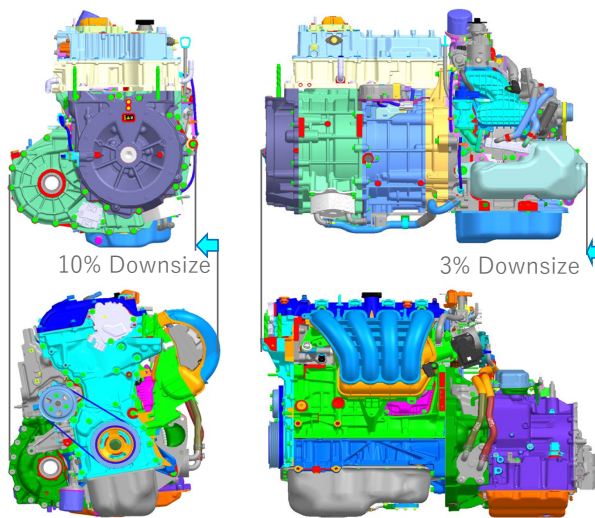


Fig. 1 Comparison of Appearance between e-Skyactiv R-EV and ICE Unit

2.1 電気駆動ユニットのパッケージ構想

電気駆動ユニットの構成部品を統合し、「7in1」構造とすることで小型化を図った。

動力を発生する駆動モーター、及び、ジェネレーターは、必要なトルクを確保するための体積を確保した上で大径薄型とし、減速ギアを含めて一直線上に配置した「3in1」と呼んでいるユニット構想とした。

また、モーターを制御するインバーター (INV) と、ジェネレーターを制御するコンバーター、高電圧と低電圧 (12V) を変換する DCDC コンバーター、及びジャンクションボックスの機能を一つの筐体に収めて「4in1」を形成し、「3in1」と「4in1」を上下に重ねて「7in1」とした。e-SKYACTIV R-EV の構成を Fig. 2 に示す。

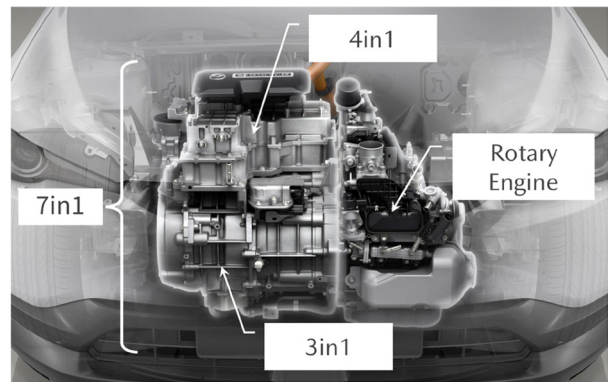


Fig. 2 e-Skyactiv R-EV

2.2 3in1 ユニットの小型化

モーターを高出力で駆動させるためには、モーター、ジェネレーター、ギアの径と幅で決まる 3in1 ユニットの外殻内に冷却 / 潤滑用の油路を収めることで外殻形状の物理量を最小化した。具体的には、筐体に溝を形成し、オイルを供給する穴をもった樹脂部品を嵌める構造とした。3in1 のオイル経路を Fig. 3 に示す。この油路システムに関連し、7 件の特許を出願している。

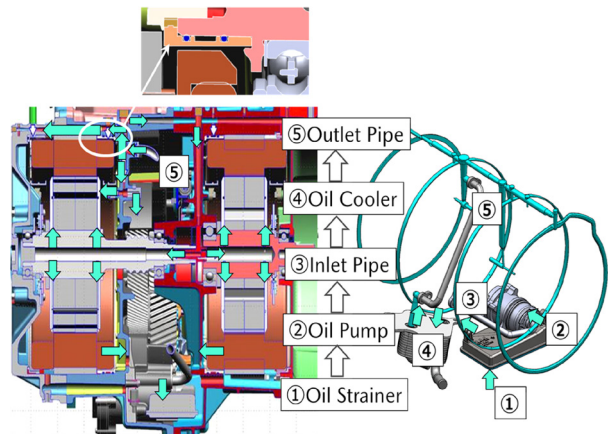


Fig. 3 3in1 Oil Passage

2.3 4in1ユニットの小型化

クラッシュエリアの要件に加え、サービス性や組み付け性の要件を満足するために、例えば以下のような小型化の工夫を織り込んだ。

- ・制御基板を分割しすきまなく配置
- ・信号品質のロバスト性を確保する対策を織り込んだ上で小さいすきまに配策できるフラットハーネスを採用
- ・熱伝導体を活用し発熱部品を集積
- ・パワーモジュール (PM) 冷却通路の小型化

この中から、PM 冷却通路の小型化の事例を紹介する。高電圧バッテリーから供給される直流電圧を、PM の高速スイッチングによりモーター、ジェネレーターを駆動する交流電圧に変換するが、その際に PM が発熱する。その熱は、筐体に設けられた冷却水通路を通して冷却水に放熱される。冷却水通路はアルミ合金の筐体に形成され、そこにアルミ合金製のカバーで蓋をする構造としているが、特に高さ方向の制約が厳しく、蓋のシールや取り付けボルトを設置する空間が確保できなかった。そこで、摩擦攪拌接合 (FSW) という接合技術を適用した (Fig. 4)。FSW とは接合部を摩擦熱で軟化させるとともに、工具の押し付け力及び回転力により接合部周辺を塑性流動させることで接合させる技術である。具体的には、Fig. 5 に示すように、2つのアルミ部材を突き合わせ、そこに先端に突起のある円筒状の工具を押し付け、高速で回転させることで接合している。

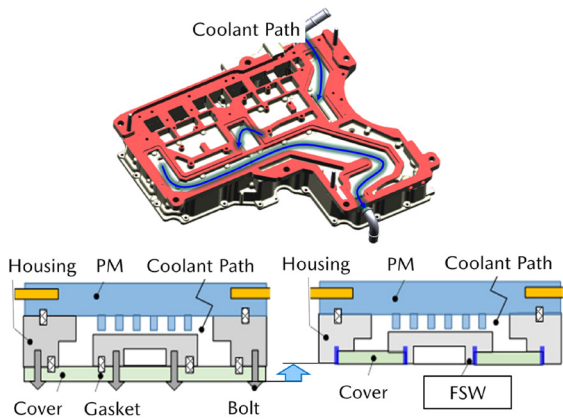


Fig. 4 Area of FSW

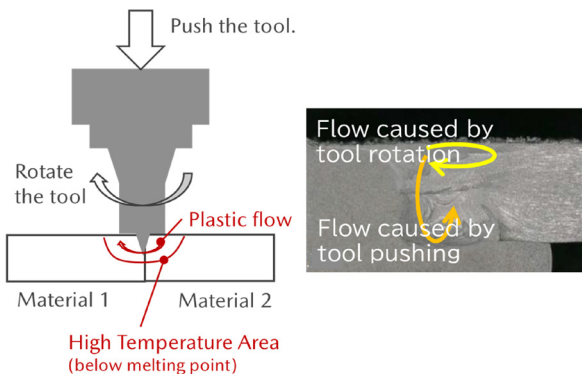


Fig. 5 FSW Conceptual Diagram and Weld Form

Fig. 6 に示すように、FSW 時の入熱で熱膨張した筐体が熱収縮の過程で変形する。高電圧部品を格納する本筐体は、絶縁距離の確保や、冷却水侵入を防止するシール性の確保が重要であり、以下に示す 2 つのステップで熱変形を抑制した。

Step1 変形の抑制：FSW 時の表面温度及び内部温度を実測することで筐体の受熱量を特定し、Fig. 6 の変形メカニズムに則って変形量を予測した (Fig. 7)。そのモデルを用いて形状と製造条件を造り込むことで、変形量を抑制した。

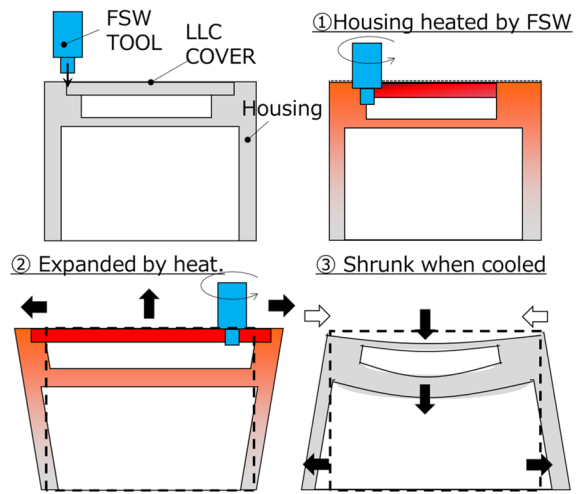


Fig. 6 Deformation Mechanism by FSW

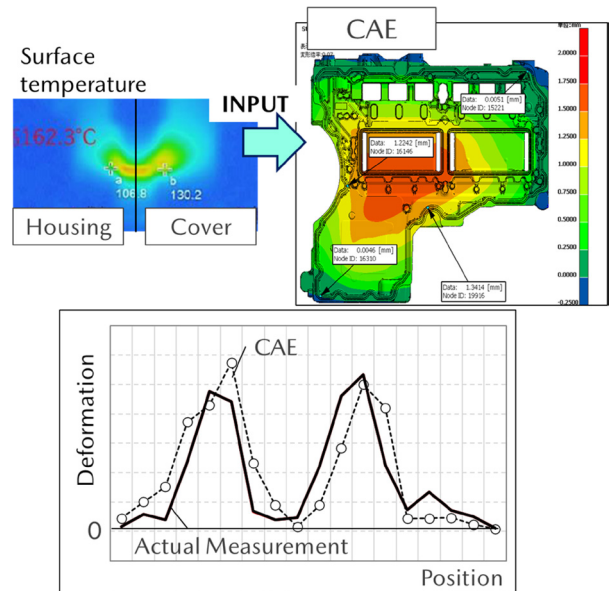
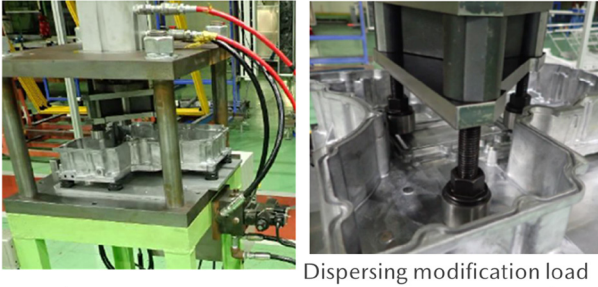


Fig. 7 Deformation Predicted by Modeling

Step 2 矯正：更なる変形量の縮小に向けて、矯正工程を追加した。矯正荷重を印加する場所、荷重を受ける場所を最適化し、複数個所に分散して荷重を印加することで機能目標を満足する変形量に抑えた (Fig. 8)。



Dispersing modification load

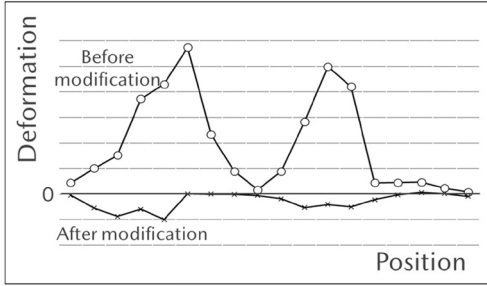


Fig. 8 Modification to Prevent Deformation

3. ソフトウェア (SW) の開発

小型化により、レゾルバとモーターの距離が近くなる等、電気的なノイズの影響を受けやすくなる (Fig. 9)。シールド等のハードウェア (HW) によるノイズ対策に加え、ノイズの影響を受けにくい構造を採用することで、ロバスト性の高いシステム (SW を含む) を開発した。

また、BEV, PHEV, HEV への展開性を備えておくことで、マルチソリューション戦略を効率的に進めることを可能にした。

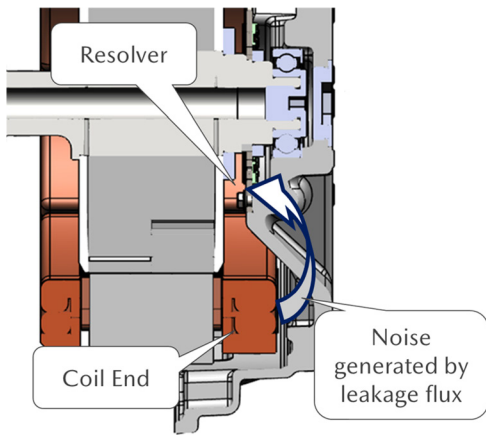


Fig. 9 Resolver Location

3.1 ソフトウェア構造

モーター制御を例に SW 構造を Fig. 10 に示す。プラットフォーム層とアプリ層の二層構造をとり、プラットフォーム層は AUTOSAR に準拠した SCSK 社製の QINeS-BSW をベースに対象マイコンに合わせたコンフィグレーションとハンドコーディングで構成した。また、アプリ層は制御機能モジュール単位で Simulink モデルを構成した。

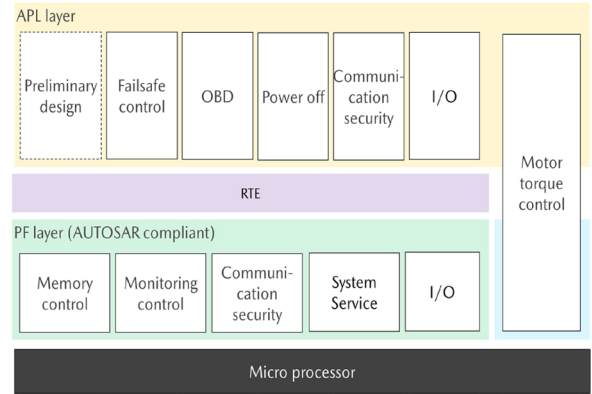


Fig. 10 Software Structure for Controlling Motor Inverter

3.2 開発の流れ

Fig. 11 に示した V 字プロセスに沿って、車両目標からユニット目標へカスケードした。更にユニット目標を SW 要求と HW 要求に機能分配し、SW 制御仕様に落とし込んだ。

詳細設計を進めるにあたり、SW を小さな設計ブロックに分けて MILS を使用した検証ループを回しながら、要件の抜け漏れや誤解釈による手戻りの最小化を図った。

また、設計工程である V 字プロセスの左バンク各工程に対応したテスト仕様を定義し、右バンクの各テスト工程に割り当て、SW 機能検証を積み上げ、ロバスト性を確認した。

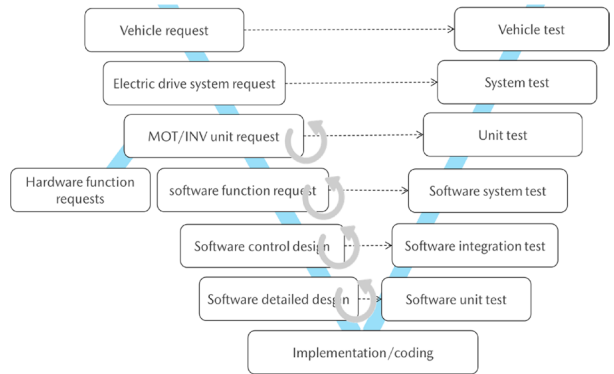


Fig. 11 V-model for Software Development

3.3 SW 設計

(1) HW/SW の機能配分

V 字プロセスの左バンクは、Fig. 12 に示すように、車両要求機能を INV 含む各部品への要求機能に落とし込む「INV システムレベルの機能要求設計フェーズ」と、INV への要求を HW/SW に機能配分する「詳細機能設計フェーズ」からなる。詳細機能設計フェーズでは、HW/SW の機能配分を行い、SW のアプリケーションロジック設計、各タスク周期の設定、I/O インターフェース設計等に反映した。例えば、電流センサの性能を引き出すための専用アンプ回路を設けつつも、フィルタ機能は SW からチューニング可能なマイコン部に配分する等、品質/コス

ト／納期の各目標を達成するための目標配分とした。

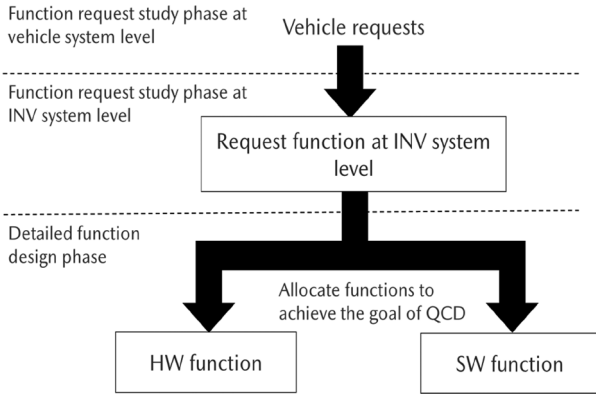


Fig. 12 Function Allocation

(2) 各 SW 機能ブロックの設計

SW に配分された各機能を具現化するために、アプリ層、プラットフォーム層への機能ブロック配置、並びに機能内部のロジック設計を行った。機能配置にあたっては、車種や HW の違いに応じた水平展開ができるよう、機能の追加／変更を容易にするための固定／変動構造を構築した。アプリ層は、基本トルク制御、電流フィードバック制御などベーシックな機能は固定、その他の商品価値を高めるための付加的な機能については変動部とした。プラットフォーム層は、HW が変わってもアプリ層とのインターフェースが変わらないよう設計した。ゲートドライバや RD コンバーターなどのインバーターユニーク部品を扱い、AUTOSAR 規格で構造が定義されていない CDD (Complex Device Driver) の設計は、Fig. 13 に示すように、HW 情報を抽象化する層を設けることで、異なる HW への水平展開が可能な構造とした。

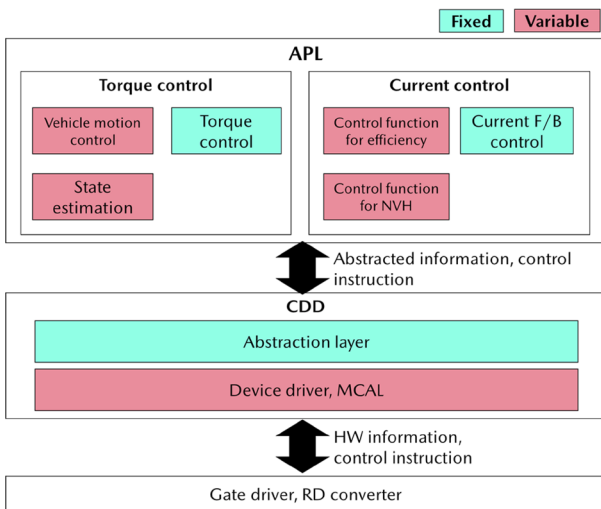


Fig. 13 Software Structure

3.4 SW のモデルベース検証 (MBD)

(1) SW の IPOCN 図

SW のロバスト性を高めるためにノイズ因子を振った

机上検証を実施した。ノイズ因子を抜けなく洗い出すことと、洗い出したノイズ因子を大きく振って検証することがポイントとなる。

ノイズ因子を洗い出すために、モーター制御特有の機能について、Input-Process-Output の関係を物理式で記述し、その物理式から考えられる制御因子 (Control)、ノイズ因子 (Noise) を洗い出した。Fig. 14 に、電流フィードバック制御を例とした IPOCN 図を示す。

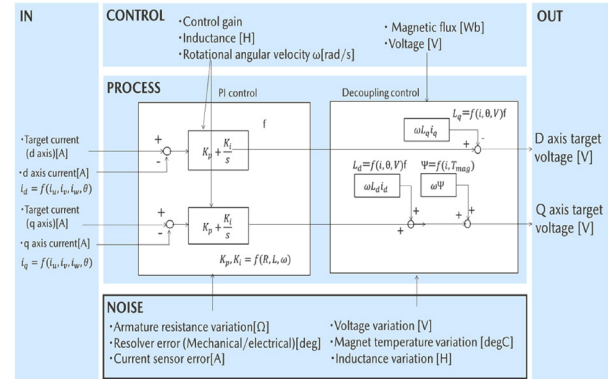


Fig. 14 IPOCN

(2) ノイズ因子系統表

マツダは INV 以外にもさまざまな ECU の SW を開発した経験がある。起動／遮断や故障判定等の汎用的な制御機能については INV でも発生し得る不具合も多く、過去の開発で経験した不具合のメカニズムを分析することで、検証すべきノイズ因子を洗い出した。過去不具合から洗い出したノイズを整理したノイズ因子系統表の抜粋を Table 1 に示す。

Table 1 Identifying Noise Factors

Category	Subcategory	Further subcategory	Examples of noises
External disturbance	External noise factors such as environment or usage	Environment	Temperature, humidity, altitude, mechanical/electrical/chemical stress
		Usage	Driving frequency usage (road surface/bump etc)
Internal disturbance	Noise factors generated by the behaviors inside the control system	Modeling error	Quantization error, sampling error
		Control response	Response delay
		Part/material degradation	Life consumption of power module, soldering
Part variation	Noise factors that change characteristics such as degradation or drift	Characteristic drift	Characteristic offset, temperature drift
		Noise, surge	Surge voltage/current/electromagnetic noise
		Design variation	Material/dimension variation
Part variation	Noise factors generated by part tolerance	Production variation	Coil/bus bar length
		Assembly variation	Resolver/motor assembly error
Part variation	Noise factors generated by assembly accuracy	Design variation	Material/dimension variation
		Production variation	Coil/bus bar length

(3) 進化版机上検証環境の活用

洗い出したノイズを注入した検証を行うにあたり、実機を用いた右バンク検証に加え、机上での左バンク検証

を重視した。そのために、実システムに近い机上検証環境として、さまざまなノイズを印加することができるHILSを構築した。HILS構成をFig. 15に示す。CAN信号やセンサ信号等、さまざまな部位に電氣的、機械的なノイズ因子を注入できるよう、プラントモデル側にノイズモデルを構築した。また、コントローラー側として従来は汎用ECUを使用していたが、量産搭載ユニットと同等の制御基板を使用する構成とした。

上記HILSでノイズ因子をあり得ないレベルまで振ることで機能が破綻する限界点を求め、この限界点を「崖」と定義した。検証の実例として、開発過程で問題となった「レゾルバ信号品質に対するトルク制御の作りこみ」を紹介する。モータープラントモデル内のレゾルバモデルから、実制御基板のRDコンバーターへの入力sin/cos信号に対し、実機を想定した不規則な電気ノイズを大きく注入した。ノイズ重畳したsin/cos信号は、マイコンを介したアプリケーションでの電気位相角や回転数演算に伝わり、最終的にFB制御するトルクに影響する。このトルク制御が破綻する状態を崖と定義し、崖に対し余裕度をもったゲイン設計や、フィルタ設計に落とし込んだ制御設計とすることで、潜在不具合に対するロバスト性が向上し、実機検証での不具合発生を抑えることができた。崖の定義をFig. 16に示す。

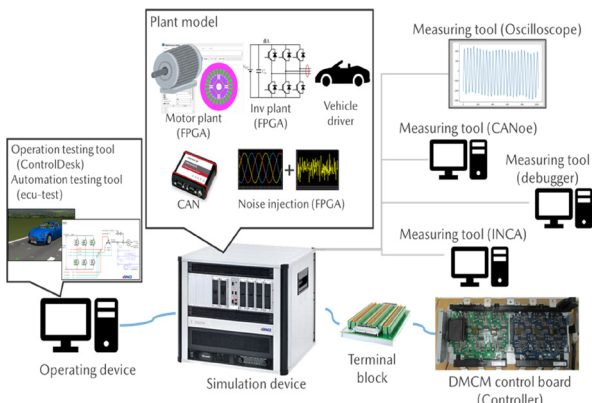


Fig. 15 HILS Configuration

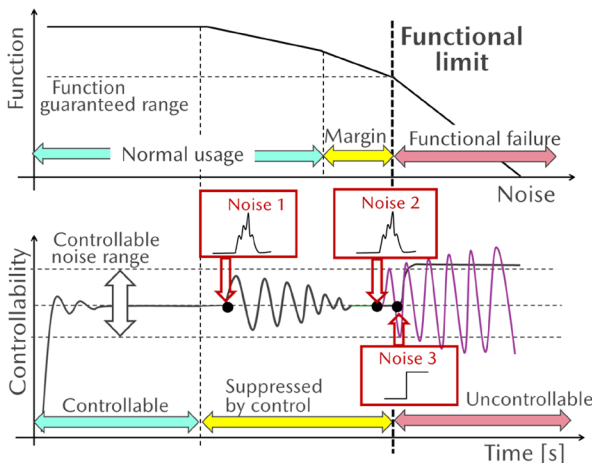


Fig. 16 Definition of Functional Limit

3.5 SW 開発成果

- (1) アプリ層だけでなく、プラットフォーム層を含めたモーター・INV制御SWを自前設計し、当社の無形固定資産として計上することができた。
- (2) SW品質のロバスト性を確保するために、機能を理論的に分析する手法、及び、不具合現象を分析する手法の両面で考えることで、検証すべきノイズ因子を漏れなく洗い出すことができた。
- (3) マツダの強みであるMBD開発を適用し、ロバストなモーター駆動システムを開発した。また、今回の開発を通じて、今後の電駆開発で活用できるMILS/HILSを主体としたMBD環境を構築することができた。

4. おわりに

筐体等の機械系部品を対象に生産／開発が一体となって仕様を造り込み、更にマツダの強みであるMBD開発を適用することで、小型かつロバストなモーター駆動システムを開発した。

おかげさまでこのe-SKYACTIV R-EVは日本自動車殿堂カーテクノロジーオブザイヤーをいただいた。その授賞理由の一つに「コンパクトな電動駆動ユニットの実現」を挙げていただいております。開発に携わった関係者の大きな励みになった。

マツダは100年に一度の大変革期を乗り越えるため、2030年までを3つのフェーズに分けて段階的に電動化していく。今回開発した小型化技術を更に熟成させることで展開性を確保し、マルチソリューション戦略に則って、お客様価値を高める車を創り続けていく。

■ 著 者 ■



野田 明裕



高旗 達也



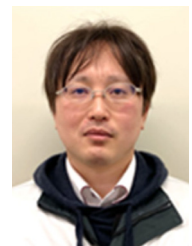
山岡 祐也



児嶋 和也



竹光 考昭



廣田 充宏