

FCXクラリティ用 PDU

PDU for FCX Clarity

荒川 慎一*
Shinichi ARAKAWA

中村 弘道* 山岸 倫也*
Hiromichi NAKAMURA Tomoya YAMAGISHI

要 旨

「ダイナミック・フルキャビン・セダン」という車体コンセプトへの適合を目指して、2009年モデルFCXクラリティ用PDU(Power Drive Unit)を開発した。

従来型ではPDUと駆動用モータを別体構造として、両者の間を外部露出した防水型高圧シールドケーブルで締結して電力授受をおこなっていたが、本開発のPDUでは、FEM解析を使った揺動対策、振動トラッキング解析によるモータ振動対策、冷却構造端子台による熱伝導対策、および制御回路とPDUきょう体間の静電結合レベル調整によるノイズ対策をそれぞれおこなうことにより、PDUと駆動用モータを一体型構造として、三相電力ラインを内部締結することができた。

また、内部部品の小型化と高密度実装化によるPDU単体での小型化を実施した。

これらにより、モータールーム内で「PDUと駆動用モータ」の高さを240mm低減することが可能となり、車体コンセプトの実現に寄与した。

ABSTRACT

A Power Drive Unit (PDU) has been developed for the 2009 model year FCX Clarity that conforms to the “Dynamic Full-cabin Sedan” concept established for the vehicle.

In previous models, the PDU and the driving motor were mounted separately and were connected by exposed, waterproof high-voltage shielded cables for the distribution of electric power. The newly developed PDU has been integrated with the driving motor, and the three-phase power lines are connected internally. The new configuration was enabled by the use of FEM simulations in order to develop measures to counteract wobbling, the use of vibration tracking analysis to counteract motor vibration, the employment of cooling terminals to reduce heat transfer, and the adjustment of the level of electrostatic coupling between the control circuits and the PDU case in order to reduce electrical noise.

In addition, the size of the PDU itself has been reduced by the miniaturization of components and the use of a high-density layout.

As a result of the measures indicated above, the height of the PDU and the driving motor in the motor room has been reduced by 240 mm. This has contributed to the realization of the body design concept of the 2009 model year FCX Clarity.

1. まえがき

今日、地球規模の環境意識の高まりから、自動車の低エミッション化と温暖化に対するCO₂低減がさらに求められている。Hondaではこれらの期待に応えるべく、環境対応の究極の自動車として燃料電池自動車Honda FCXの開発を進め、世界に先駆けて2002年に日本政府と米国ロサンゼルス市に燃料電池自動車を納車した⁽¹⁾。さらに燃料電池自動車を広く普及するために低温での性能を向上させたHonda製スタックを搭載したNew Honda FCX(以降2005

年モデルFCX)⁽²⁾を開発し、2004年にニューヨーク州、2005年に北海道に納車し、世界で初めて氷点下での使用を可能とする燃料電池自動車を実用化した⁽³⁾。

2008年7月、Honda独創の燃料電池スタック「V Flow FCスタック」技術⁽⁴⁾を核に、燃料電池車だからこそできる一目で未来を感じるアイキャッチデザインと画期的なパッケージング、そして異次元のドライブフィールを実現し、究極のクリーン性能だけでなく、クルマとしての新しい価値と魅力を提案した2009年モデルFCXクラリティ(以降FCXクラリティ)を発売した。

*四輪開発センター

FCX クラリティでは、パッケージの先進さと走りの力強さを表現した「ダイナミック・フルキャビン・セダン」という車体コンセプトを実現するために、パワープラントをすべてコンパクト化し、適所にレイアウトしている。本稿では FCX クラリティ用 PDU の開発について述べる。

2. 開発の目標

FCX クラリティでは、Honda の M/M(マン・マキシマム/メカ・ミニマム)思想に基づいた「ダイナミック・フルキャビン・セダン」というコンセプトのもとに、モータールームをコンパクト化したショートノーズデザインを採用した。このデザインを実現するためには、2005 年モデル FCX に対してモータールーム内に設置されるコンポーネントを小型化することが必要であり、特にボンネットフードの高さを抑えることはデザインの成否に関わる重要なポイントである。

そこで FCX クラリティ用 PDU は、モータールーム内で駆動用モータと合わせた高さ方向のサイズを低減して、車体コンセプトに適合することを目標として開発した。

3. モーター一体型 PDU

モータールーム内での占有体積を低減するために、PDU を駆動用モータと一体化して三相電力ラインを内部締結する構造を採用した。また、両者の一体化により、揺動時の干渉防止のために必要な空間が増加するのを抑えるため、部品の小型化と高密度実装化により PDU 自体も小型化を図っている。これらにより FCX クラリティでは、Fig. 1 に示すように 2005 年モデル FCX に対して「PDU + 駆動用モータ」のサイズを高さ方向で 240mm 小型化することが可能となり、ショートノーズスタイルの実現に寄与している。

PDU をモータと一体型の構造とすることは小型化の手法として有効であるが、この構造を実現するためには以下の

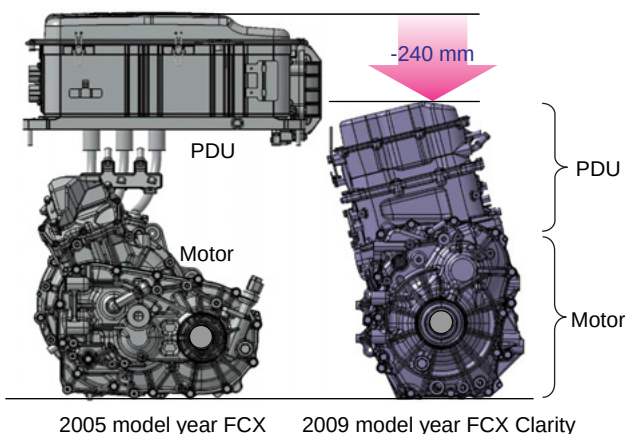


Fig. 1 Comparison of size (PDU and driving motor)

ような PDU の技術課題を対策する必要がある。

- (1) 揺動に対する PDU きょう体の変形抑制とモータきょう体との相対変位吸収
- (2) モータが発生する振動に対する PDU の振動耐久性確保
- (3) モータ側からの熱伝導による PDU 内部温度上昇の抑制
- (4) 内部部品の高密度実装やノイズ発生源との電氣的結合度が高まることに対する制御系のノイズ耐力向上

以下に、これらの技術課題を対策する技術について紹介する。

3.1. 揺動対策

モーター一体型 PDU では、PDU とモータのきょう体を直接締結して O リングでシールする構造を採用し、三相電力ラインをきょう体内部で通線することによりコンパクト化を実現している。モータ揺動時に PDU きょう体に発生する大きなモーメントによりシール面が変形して隙間が開き、シール機能が損失することがないように、PDU きょう体の剛性を確保している。

また、PDU とモータのきょう体をボルト締結することにより一体型の構造をとっている。厳密にはモータと PDU のきょう体を同一の剛体とみなすことはできないため、両者の中継する三相電力ラインの締結部には、モータと PDU の揺動による相対変位を吸収する構造が必要となる。

3.1.1. きょう体の剛性設計

実車搭載状態で PDU きょう体のシール部の変形量が最大になる走行条件を求め、この条件下でもシール部の口開き量が O リングの潰し代の設定値以内に納まるように、Fig. 2 に示すような FEM 解析による強度、振動解析を用いて、ケースおよび取り付けボスのリブの配置、壁面肉厚、締結点位置の検討をおこない、きょう体の重量増加を抑えつつ高剛性化を成立させた。

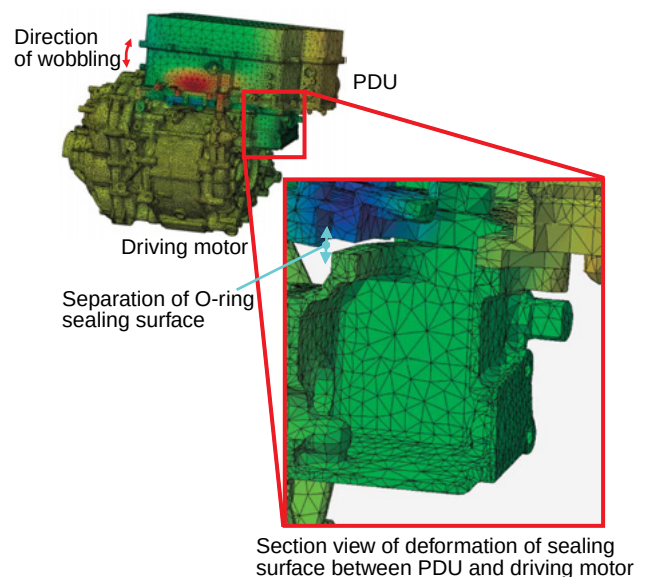


Fig. 2 Evaluation of deformation of PDU case

3.1.2. 三相電力ラインの相対変位吸収構造

揺動時には変形モードの違いや応答の位相差により、微小ながらPDUとモータの間に相対的な変位が発生する。このため、PDUに固定されているパワーモジュールとモータに固定されている巻線の間をつなぐ三相電力ラインは、揺動によるこれらの系の相対変位を吸収する機構をもつ必要がある。

そこで、Fig. 3 に示すようにパワーモジュールからのバスバーとモータ巻線をそれぞれPDUきょう体とモータきょう体に固定した端子台でいったん中継し、これらの端子台間を短い高圧ケーブルで締結する構造を採用した。この構造により、バスバーやモータ巻線に揺動による変形ストレスを与えることなく PDU とモータの相対変位を吸収することができる。

PDUとモータの一体化により、モータ側の端子台とPDU側の端子台は近接するため、両部品を接続するケーブルは省スペースでレイアウトする必要がある。しかし、従来のケーブル構造ではケーブルの耐熱温度の制限によりケーブル径が大径になるため、大きなレイアウトスペースを必要とする。そこで、以下対策をおこないケーブルの温度上昇を低減し、またケーブルの耐熱温度を向上することにより、ケーブルの線径を小径化し省スペースでのレイアウトを成立させている。

- (1) PDU 端子台、モータ端子台の積極的な冷却構造
- (2) パワーモジュール内部バスバーの積極的な冷却構造
- (3) ケーブルの高耐熱化(耐熱温度を 120℃から 150℃に上げる)

3.2. モータ振動対策

2005 年モデル FCX のように PDU を車体にマウントする場合は、PDUに印加される振動の周波数帯域は通常的車体部品と同等であり、振動耐久性についてもこれらの部品と同様の方法で検証することができる。

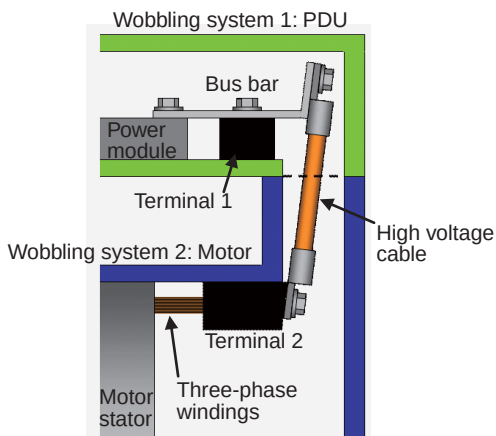


Fig. 3 Configuration of three-phase power line connection

これに対して FCX クラリティ用 PDU は駆動用モータにリジッドマウントしているため、PDUには締結部を介してモータ回転に起因して発生するモータ振動が直接印加されることになる。

3.2.1. モータ振動の特性

FCX クラリティの駆動用モータの場合、モータ振動の最も顕著な起振源は、巻線の励磁によるステータの変形である。ステータの変形にはスロット形状や極対数に依存する複数のモード(回転次数)があるが、これらはその時のモータ回転数に比例した周波数で常に同時発生しているため、モータ振動はこれらの合成振動として観測される。

また、各モードの振動加速度は、起振力(励磁によるステータ変形の大きさ)と、起振周波数におけるモータ構造体の振動応答ゲインとの積に比例するため、各モード振動の和であるモータ振動の特性は、モータの回転数と発生トルクの変化に対して複雑に変化する。

Fig. 4 に FCX クラリティの駆動用モータの最大トルク発生時における振動特性をトラッキング解析した結果を示す。

このグラフから、以下のことがわかる。

- (1) モータ振動が大きくなる特定の周波数帯域が存在する。
- (2) モータ振動が大きくなる特定の回転数域が存在する。
- (3) 特定のモード(回転次数)ラインが上記の領域にかかる
とモータ振動の大きさが顕著になる。

これらのモータ振動に関する特性をふまえた上で、PDUの設計をおこなった。

3.2.2. 振動対策設計

モータ振動の解析結果に基づいて、モータ振動が大きい周波数帯域で振動による構成部品間の相対変位が大きくならないように、各部品の拘束方法や共振特性の設定を考慮して設計をおこなった。

(1) 共振周波数調整による相対変位抑制 共振周波数をモータ振動が大きくなる周波数帯域から外すために、部品の形状や材質を設定する。

(2) 多点締結による拘束 回路基板などの面積が広い部品は、締結点間のピッチを短くして、部品の変位を抑えこむ。

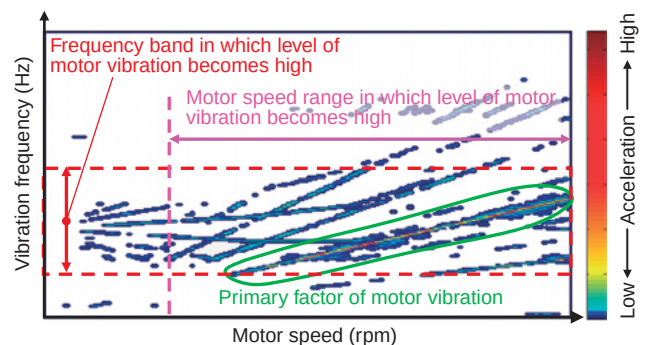


Fig. 4 Result of tracking analysis of motor vibration

(3) ゴムマウントによる振動絶縁 (1), (2)の対応では不十分な部品については、ゴムマウントによりモータ振動から絶縁する。

Fig. 5 に PDU の各部品について、振動加速度を直接測定可能な物については共振点探査を実施し、それ以外の微小部品については、材質と形状から計算によって求めた共振周波数分布を示す。

このグラフからわかるように、チップ部品などの微小部品は共振周波数が高い帯域に存在することから、モータ振動の影響を直接受けない。それ以外の部品については、共振点をモータ振動が大きくなる周波数帯域から外すことができた。

3.2.3. 振動耐久性の検証

起振力は小さいが、モータ回転数の変化に伴い各次数ラインによる共振点での振動励起を受ける部品があるため、Fig. 6 に示した手順によりこれらの部品の振動耐久性を検証した。

(1) 振動特性 サイン波基準入力振動の周波数をスイープさせて、PDU部品の振動応答特性を測定することにより、

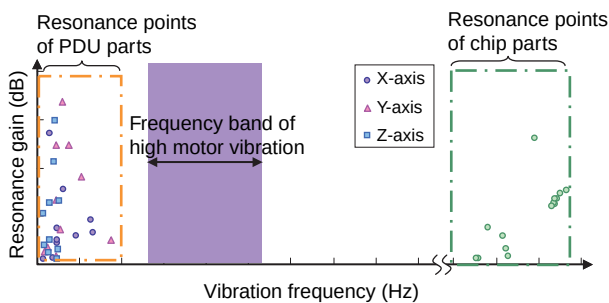


Fig. 5 Distribution of resonance frequencies of PDU parts

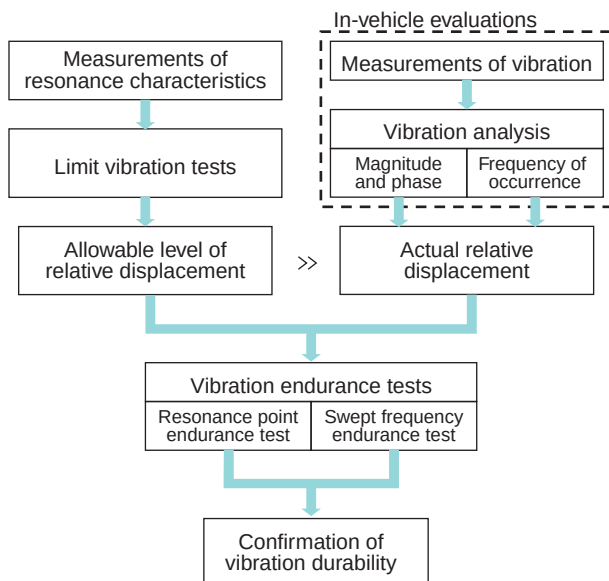


Fig. 6 Procedure for confirmation of vibration durability

各部品の共振周波数と共振倍率を特定した。また、測定結果の周波数解析により、PDUの振動印加ポイントから各部品までの振動伝達関数(ゲインと位相の周波数特性)を求めた。

(2) 許容相対変位 (1)で求めた各部品の振動特性をもとに、高い入力振動での振動耐久試験をおこない、部品が破損に至らない相対変位の許容レベルを求めた⁽⁵⁾。対象とする部品を選択的に励振するために、試験周波数は部品の共振周波数としたが、相対変位の許容レベルは周波数に依存しない(Fig. 7)。

部品の相対変位が許容レベル以下であるということは、その部品を材料の疲労限度より低い応力範囲で使用しているということを意味する。

(3) 走行時振動 完成車走行時に PDU に印加されるモータ振動の周波数解析をおこなうことにより、各部品の完成車入力振動に対する部品振動発生状況(周波数ごとの振動加速度の大きさと発生頻度)と、締結相手部品との相対変位が最大になる振動条件を求め、(2)で求めた相対変位の許容レベルに対して十分小さいことを確認した。確認結果の例を Fig. 8 に示す。

相対変位が最大になる条件はモータ振動(入力)に対する各部品振動(応答)のゲインと位相の周波数特性から決まる。ある方向の部品振動は単純化すると Fig. 9 に示すような1

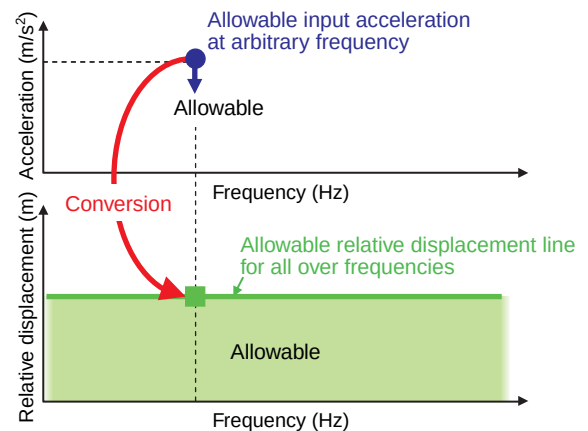


Fig. 7 Allowable relative displacement

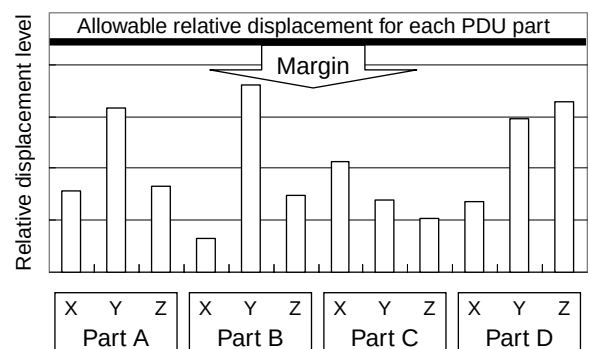


Fig. 8 Maximum relative displacement levels of PDU parts measured in vehicle

自由度の変位による強制振動と考えることができる。

土台(加振部品)が上下方向に振動する場合、土台に対する相対変位を $x(t)$ とすると、質点(被振部品)の運動方程式は、 m を質点の質量、 a を起振源(加振部品)の変位振幅、 k をばね定数、 c を減衰係数、 ω を角速度として

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ma\omega^2 \sin\omega t \quad (1)$$

となる。定常振動を

$$x = x_{\max} \sin(\omega t - \gamma) \quad (2)$$

とすると、起振源と質点の相対変位倍率と位相遅れ角は次の式により表すことができる。

$$\frac{x_{\max}}{a} = \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{\{1-(\omega/\omega_0)^2\}^2 + (2\zeta \cdot \omega/\omega_0)^2}} \quad (3)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{2\zeta \cdot \omega/\omega_0}{1-(\omega/\omega_0)^2} \quad 0 \leq \gamma \leq \pi \quad (4)$$

式(3)、(4)から、減衰比 $\zeta = 0.015$ とした場合の相対変位と位相遅れ角の周波数特性例を Fig. 10 に示す^{(6), (7)}。

入力変位に対する相対変位の倍率が最大になるのは部品の共振条件であるが、相対変位の大きさは応答ゲイン、位相

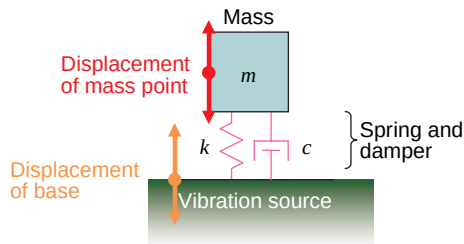


Fig. 9 Single-degree-of-freedom vibration by displacement

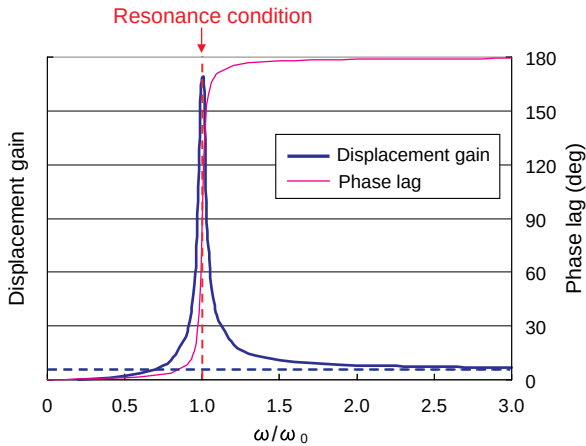


Fig. 10 Example of frequency characteristics of displacement gain and phase lag

差と入力振動の大きさから決まる。そのため、共振周波数以外で大きな入力振動が発生する場合は、相対変位が最大になる条件は必ずしも共振条件と一致するわけではないが、Fig. 11 に示した例のように、本 PDU では相対変位の測定結果からモータ振動により励振される部品の共振条件と一致している。

(4) 耐久試験 各部品の振動耐久性を実証するために、以下の耐久試験をおこない、部品に破損が発生しないことを確認した。

(a) 共振耐久試験

完成車走行時に発生する振動加速度から各部品の相対変位を解析して、締結相手部品との相対変位が最大になる振動条件(共振点における入力振動の周波数と加速度)を求めた。この結果に基づいて各部品について共振耐久試験を実施して、破損が発生しないことを確認した。

(b) スイープ振動耐久試験

完成車によるモード走行での振動発生頻度解析結果から、各部品について Fig. 12 に示すような周波数、加速度、加振時間からなる生涯走行を模したスイープ振動試験プロファイルを設定して、振動試験装置によりスイープ振動耐久試験をおこない、部品に破損が発生しないことを確認した。

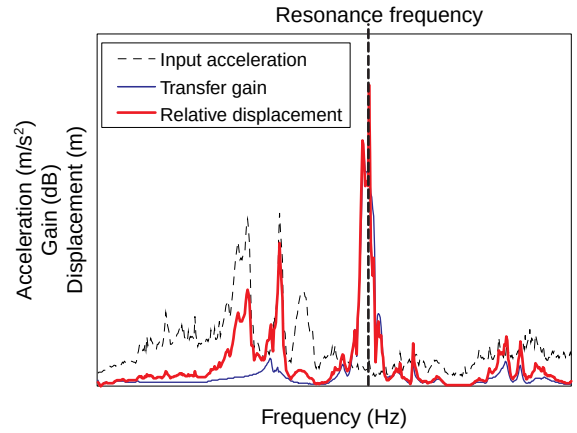


Fig. 11 Example of relative displacement characteristic

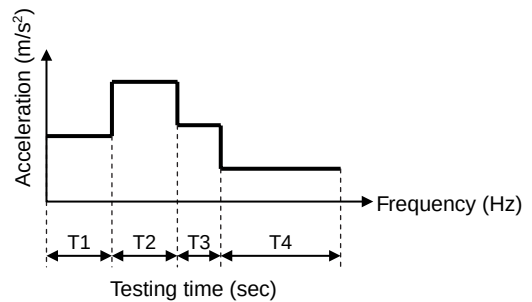


Fig. 12 Vibration profile for sweep vibration endurance test

3.3. 熱伝導対策

駆動用モータの三相巻線は PDU 内部部品に比べて高温になる。PDU と駆動用モータが別体構造の場合は、巻線の熱は両者の中継する電力ケーブルを伝導する間に外気放熱されるため、受熱による PDU 側への影響は少ない。しかし、PDU とモータを一体型構造として三相電力ラインをきょう体内で最短配線すると、巻線の熱が PDU 側に流入して PDU 内部部品の温度が上昇する。FCX クラリティではこの巻線からの伝熱を低減するため、および前述の通りケーブルを小径化するために、PDU に Fig. 13 に示すような熱伝導機構を組み込んだ中継端子台を設けた。

絶縁樹脂とアルミブロックを介して三相電力ラインの熱をヒートシンク側に逃がすことにより、Fig. 14 に示すように巻線からの受熱による端子台の端子ブロック部の温度上昇を約 11°C 低減することができた。

また、Fig. 15 に示すように、パワーモジュール内部のバスバーとモータ側の端子台にも冷却機構を設けることにより、パワー素子とモータからの熱伝導を低減している。

3.4. ノイズ対策

FCX クラリティの高電圧電源ラインはボデーから電気的にフローティングされており、PDU と外部回路とのインターフェースは、高圧電源ケーブルを除きすべて低電圧系になっている。PDU は、大電力を半導体にてスイッチングするパワー回路部と、インバータスイッチング制御と外部機器とのインターフェース機能を持つ制御回路部からなり、これらは同一金属きょう体内に存在している (Fig. 16)。

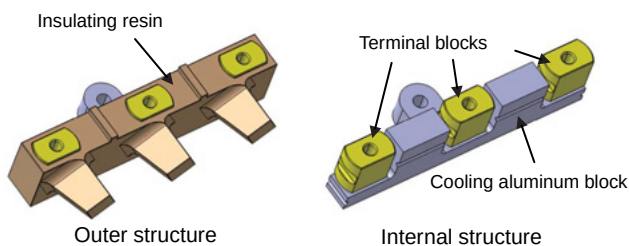


Fig. 13 Structure of cooling terminal for PDU

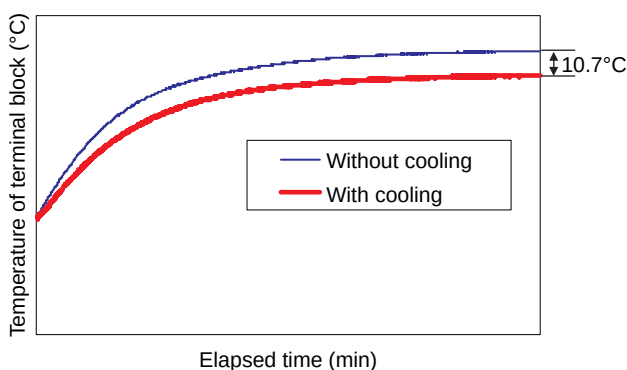


Fig. 14 Effect of cooling terminal for PDU

インバータ回路と制御回路は、ノイズによる誤動作防止、EMI 耐性強化の観点から、同一きょう体内においては高電圧回路部と低電圧回路部をできるだけ隔離するべきであるが、部品の実装密度向上とは相反する。そのため、高電圧配線部から PDU 制御基板への伝導ノイズや放射ノイズの影響を抑制し、かつ実装密度を向上させるために、高電圧配線部の形状と制御基板までの距離と配置の最適化をおこない、高密度実装化とノイズ対策を両立した。

またモータは、モータ巻線とハウジング間に浮遊インピーダンスをもつため、構造上インバータのスイッチング動作時にノイズ電流が流れる。この電流は車両全体にノイズを伝導させ、ラジオノイズや他のコンポーネントの誤動作など、車両の商品性に影響を与えることがある。このため、PDU 内にてラインバイパスコンデンサによりノイズ電流を帰還させ、車両へのノイズの影響を抑制するように最適化を図った。

さらに、この帰還電流は、PDU きょう体を流れることから、PDU きょう体内の制御基板となるプリント配線基板 (PCB) フレームと PCB 内層銅箔パターン間の浮遊容量を経由して、制御基板に対して誤動作等の影響を与えることがある。この課題を対策するための手段の一例として、Fig. 17 に示すように回路基板内の配線パターンが、基板を保持する金属フレーム辺縁部とオーバーラップしない構造とする

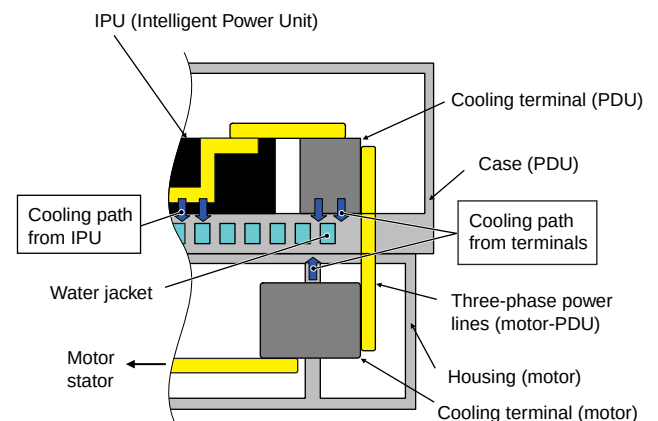


Fig. 15 Structure of cooling system for three-phase power line

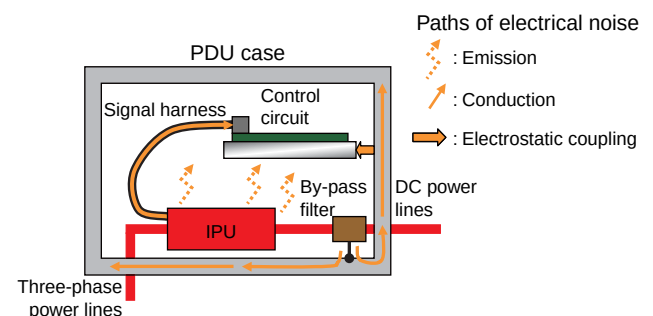


Fig. 16 Noise environment of PDU

ことにより、両者間の浮遊容量を一定値以下にすることでノイズレベルを低減した。

この対策によりノイズレベルを減少させた効果をFig. 18に示す。

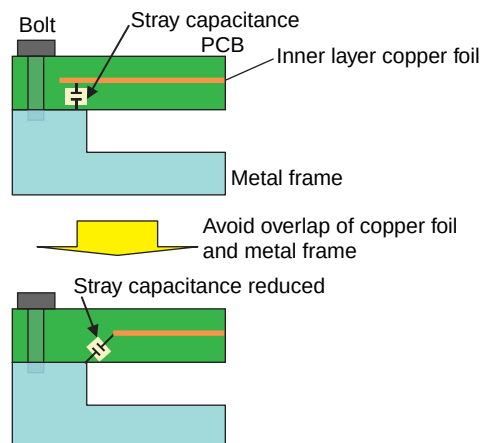


Fig. 17 Reduction of stray capacitance between inner layer copper foil and metal frame

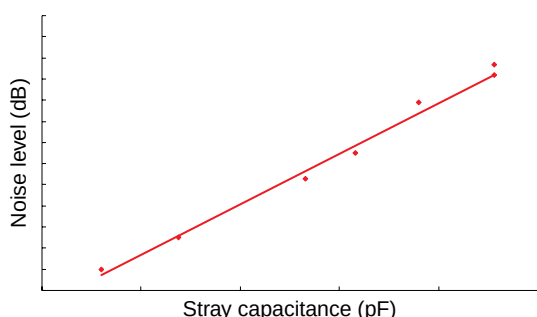


Fig. 18 Effect of reduction of stray capacitance

4. まとめ

モータールーム内での高さ方向サイズを抑えるために、駆動用モータと一体型の構造としたモーター一体型 PDU を開発した。

- (1) 高圧ケーブルを PDU きょう体内で最短締結することにより、揺動時のモータと PDU の相対変位を吸収する機構をかねたコンパクトな三相電力ライン締結構造を実現した。
- (2) モータ振動特性の解析結果に基づいた振動対策設計をおこなうことにより、PDUのモータ振動に対する耐久性を確保することができた。
- (3) 冷却構造を組み込んだ端子台で三相電力ラインの熱をヒートシンク側に逃がすことにより、モータ巻線からの受熱による PDU 内部部品の温度上昇を低減することができた。

- (4) 高電圧配線部形状、その設置位置、制御基板の配置、ラインバイパスコンデンサ容量、制御回路PCBのパターン配線とフレーム間の浮遊容量をそれぞれ最適化した。伝導、放射や静電結合により制御基板や車体が受けるノイズの影響を抑制し、高密度部品実装を実現することができた。

参考文献

- (1) 川崎聡志, 小椋正己, 小野徹, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗用車 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.1-6
- (2) 井ノ上雅次郎, 斉藤信広, 内堀憲治: Honda FCX 搭載の次世代燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.8-13
- (3) 川崎聡志, 内堀憲治, 村上義一, 清水潔, 藤本幸人: 次世代燃料電池スタックを搭載した New Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.45-50
- (4) 斉藤信広, 菊池英明, 中尾靖宏: FCX クラリティ搭載の新燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.15-22
- (5) 森山正人, 喜多見義, 向坊長嗣, 安藤敬祐, 高木善昭: 電装部品におけるハンダ接合の信頼性, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.156-166
- (6) Steinberg, D. S., 池田義雄(監訳): 最新 電子装置の振動対策実用マニュアル, 日本技術経済センター, 376p.(1983)
- (7) 前澤成一郎: 最新機械工学シリーズ 10 振動工学(改訂・SI 併記), 森北出版株式会社, p.62-78(1991)

■著 者■



荒川 慎一



中村 弘道



山岸 倫也