

4GL-IPU : 2モータシステム用パワーユニット

石橋誠司*
福 優*
和田典之*

4GL-IPU : Power Unit for 2 Motor System

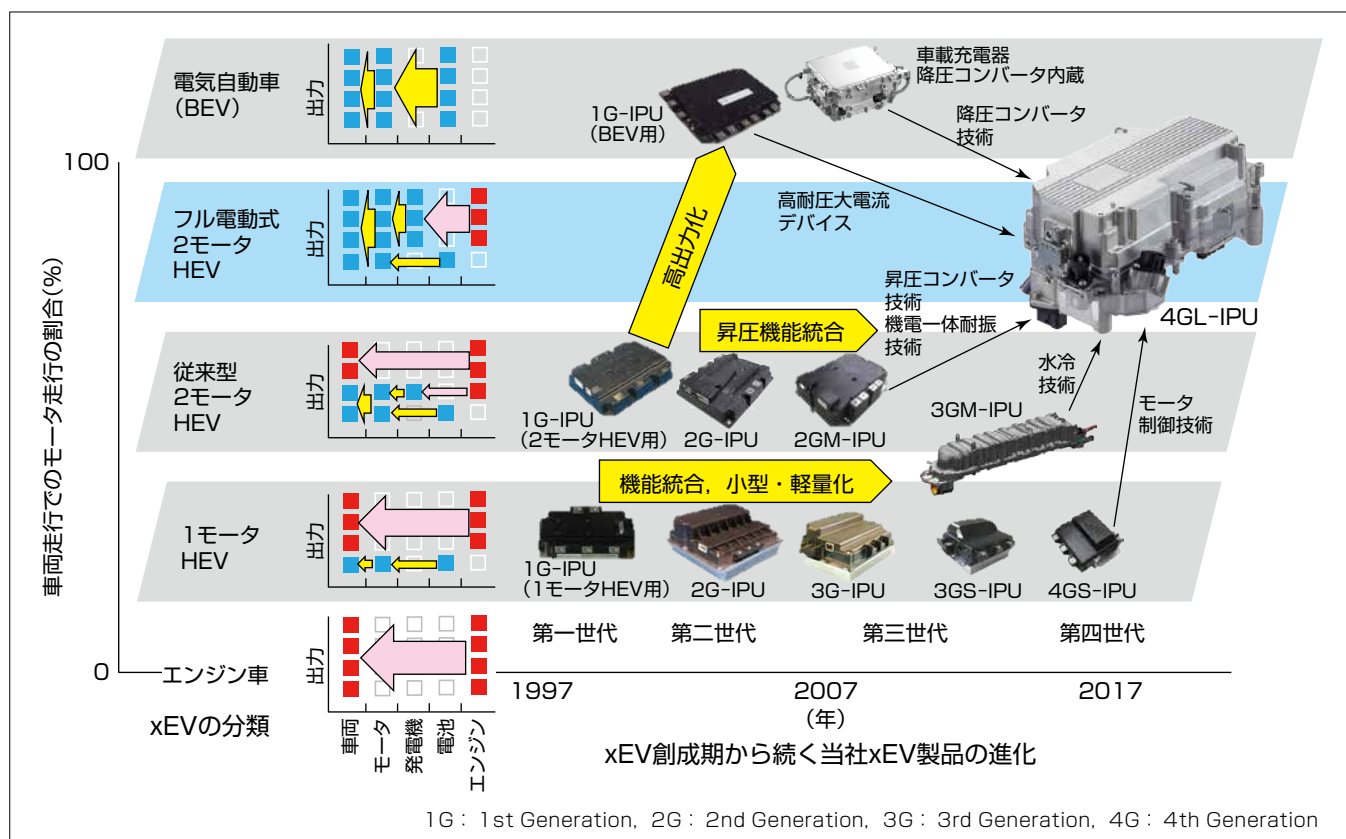
Satoshi Ishibashi, Masaru Fuku, Noriyuki Wada

要 旨

地球温暖化対策や排出ガス規制対応のため、HEV(Hybrid Electric Vehicle)やBEV(Battery Electric Vehicle)などのxEV(HEVやBEV等の電動化車両の総称)の市場投入が続いている。三菱電機は世界に先駆け、xEV創成期の1997年にHEV用IPM(Intelligent Power Module)を製品化して以来、小型・軽量・低コスト・高性能をコンセプトに周辺機能の統合を進めたIPU(Integrated intelligent Power drive Unit)の製品化を進め、トランスミッションに直接搭載可能な高耐振性を特長とする2モータHEV用IPU、並びに平滑コンデンサ及びヒートシンク内蔵を特長とする1モータHEV用IPUを量産化するなど、地球温暖化対策や排出ガス規制対応に不可欠なxEVの普及に貢献してきた。

近年、高い環境性能と走る楽しみの両立が可能な、高出力モータによる電動走行のニーズが高まっており、低速での巡航走行だけでなくフル加速や高速走行も全てモータで走行可能なフル電動式の新しい2モータHEVや、外部からの電池充電も併用可能なPHEV(Plug-in HEV)等の高出力2モータシステムが増加傾向にある。

この背景の下、フル電動式の2モータシステムに対応した第四世代IPUとして、電動走行用・発電用の二つの高出力モータを駆動するインバータと、システム電圧をモータ小型化に適した高電圧にする昇圧コンバータと、従来は車室内に搭載されていた12V電池充電用の絶縁型降圧コンバータをコンパクトに統合した4GL-IPUを開発した。



フル電動式の新しい2モータHEVに対応する4GL-IPU

xEVにはエンジンが主役の1モータHEVからモータだけで走行するBEVまで様々な種類がある。従来の2モータHEVはエンジン出力を併用するためモータ出力は車両出力より小さかった。しかし、モータだけで走行するフル電動式の新しい2モータHEVが近年増加傾向にある。フル電動式では高出力化と小型化の両立が必要であり、これに対応する高放熱パワーモジュールと当社独自の昇圧回路を採用した4GL-IPUを開発した。

1. ま え が き

当社はxEV創成期である1997年にHEV用IPMを製品化して以来、小型・軽量・低コスト・高機能をコンセプトに周辺機能の統合を進めたIPUの製品化を進め、トランスミッションに直接搭載可能なIPUや、平滑コンデンサ及びヒートシンクを内蔵したIPUを量産化するなど、地球温暖化対策や排出ガス規制対策に不可欠なxEV普及に貢献してきた。

近年、高い環境性能と走る楽しみの両立が可能な、高出力モータによる電動走行のニーズが高まっており、低速での巡航走行だけでなくフル加速や高速走行も全てモータによって走行可能なフル電動式の新しい2モータHEVや、外部からの電池充電も併用可能なPHEV等の高出力2モータシステムが増加傾向にある。

この背景の下、フル電動式の2モータシステムに対応した第四世代IPUとして、電動走行用・発電用の二つの高出力モータを駆動するインバータと、昇圧コンバータと、従来は車室内に搭載されていた絶縁型降圧コンバータをコンパクトに統合した4GL-IPUを開発した。

本稿では、4GL-IPUの特長と適用技術について述べる。

2. 4GL-IPUの特長

4GL-IPUは中型車のフル電動走行に必要な高出力と、従来は車室内に搭載されていた降圧コンバータの機能統合に加え、複数の車載要件に対応する小型化とトランスミッションに直接搭載可能な高耐振性を高次元で実現した。次に、4GL-IPUのシステム構成と部品配置について述べる。

2.1 4GL-IPUのシステム構成

4GL-IPUのシステム構成を図1に示す。4GL-IPUは電動走行用・発電用の二つのインバータ、主電池電圧を650Vに昇圧する昇圧コンバータ、補機用12V電池を充電する絶縁型の降圧コンバータ、衝突時等にIPU内部の高電圧を急速に放電する急速放電機能で構成している。

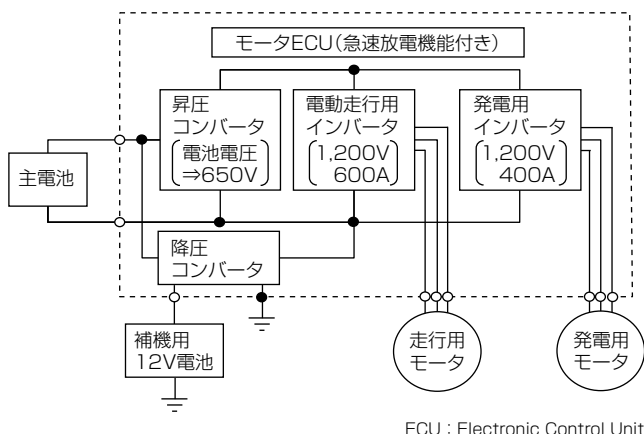


図1. 4GL-IPUのシステム構成

2.2 4GL-IPUの部品配置

4GL-IPUの部品配置を図2に示す。4GL-IPUは2.1節で述べたシステム構成要素の大半を構成するパワーサブアセンブリ(ASSY)と、パワーコネクタ、信号コネクタ等の車両とのインタフェース部品を集中配置したケースLサブアセンブリと、平滑コンデンサを持つケースUサブアセンブリの三つの筐体(きょうたい)から構成される。

パワーサブアセンブリは水冷流路となるウォータージャケット(W/J)の上下に、放熱が必要なパワーモジュール・昇圧用リアクトル・降圧コンバータ部品群を配置している。

高放熱が求められるパワーモジュール側のヒートシンク(H/S)とW/Jは摩擦攪拌(かくはん)接合(Friction Stir Welding : FSW)によって接合される。従来製品ではOリングを介してねじ締結し、水冷流路の密閉とH/Sの固定を行っていたが、FSWの採用によって流路の密閉信頼性向上とねじ締結不要による小型化(放熱有効面積率向上)、筐体部品点数削減を実現した。

Oリングでは万が一水漏れが発生した際に製品内部の水没を避ける排水構造が実現困難なため、H/SとW/Jの締結を流路中央に設けることが困難であったが、密閉信頼性の高いFSWを採用することで流路中央を強固に締結し、トランスミッション直接搭載に必要な耐振性を確保できた。

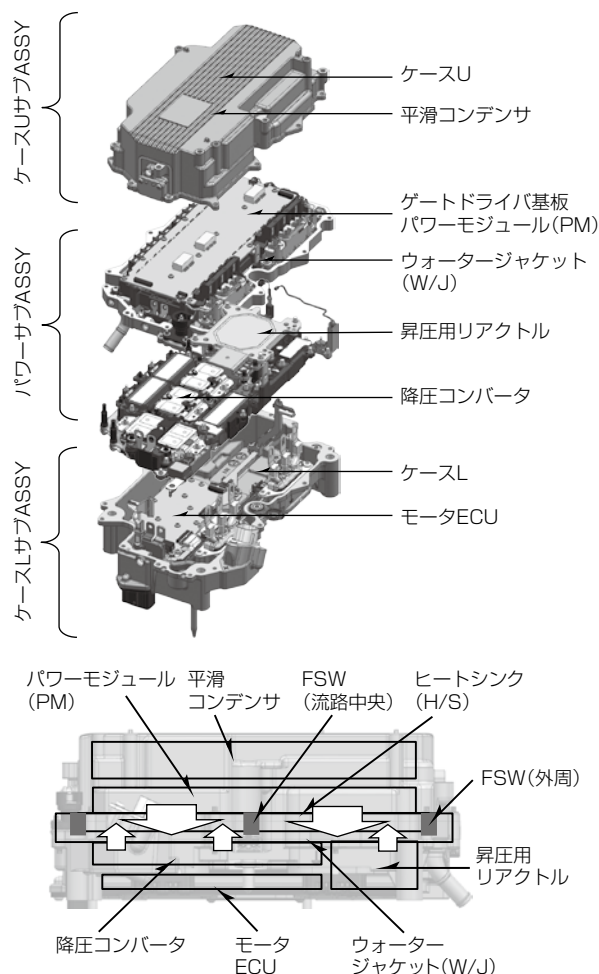


図2. 4GL-IPUの部品配置

3. 4GL-IPUの適用技術

先に述べた高出力化と小型化と機能統合を高次元で実現するため、4GL-IPUでは新型パワーモジュール、独自回路方式による昇圧コンバータ、新しい制御技術等を適用した。

3.1 新型パワーモジュール⁽¹⁾⁽²⁾

多くの機能を小さな筐体に収容するため、フル電動走行に適したパワーモジュールNdbPM(Nano sinter die-bonded Power Module)を新たに開発した。図3に4GL-IPUに採用した新開発のNdbPMと、3GM-IPU等の従来製品に採用しているT-PM(Transfer molded-Power Module)の放熱構造を示す。

T-PMはモータを短時間のトルクアシストに用いる1モータHEVや、エンジン出力を併用可能でモータ出力がフル電動式に対して比較的小さな従来型の2モータHEVや3モータHEVに採用されていた。そのため短時間出力向上を狙い、パワーデバイス直下にヒートスプレッド(熱拡散用の比較的厚い銅板)を配置して過渡熱抵抗を低減する放熱構造であった(図3(a))。

一方、今回開発したNdbPMはフル電動走行に必要な大電流の連続出力に対応するため、定常熱抵抗低減を片面放熱のシンプルな構造で実現することを目指した。すなわち、パワーモジュールと冷却器間の固定をばね押さえからはんだ接合に変更して締結部品と熱伝導性グリースを廃止した。また絶縁部材を絶縁シートからDBC(Direct Bonded Copper)基板に変更することで熱伝導率が比較的小さな部材を廃止するとともに大幅な小型化を実現した。さらにダイボンド(パワーデバイスと放熱部材間の接合)に高熱伝導かつ薄厚化が可能なAg(銀)ナノ粒子によるシンター接合(ナノ粒子によってAgの融点以下で焼結する接合方法)を採用してダイボンドのポイドレス化を実現した(図3(b))。これら放熱構造の見直しによって、パワーデバイス-冷却水間の定常熱抵抗低減とパッケージサイズの小型化、軽量化を実現した(図3(c))。

3.2 独自回路方式による昇圧コンバータ

昇圧コンバータを搭載しシステム電圧を高電圧化・低電流化することによって、モータ・インバータの小型化と高効率でモータ駆動可能な出力領域を拡大させることが可能になる。一方で昇圧コンバータにはパワーモジュール、低電圧側(C1)・高電圧側(C2)コンデンサ、リアクトル(L)が必要であり、限られた搭載スペースで昇圧機能を実現するにはこれら部品の小型・軽量化が重要である。

4GL-IPUでは一般的な昇圧チョッパ方式に対して中間コンデンサC0を設け、図4に示す四つのモードを繰り返すことによって昇圧動作を行う当社独自の昇圧回路方式を採用した。

モード1：リアクトルLに磁気エネルギーを蓄える

モード2：蓄えた磁気エネルギーをコンデンサC0へ放出
 モード3：再度リアクトルLに磁気エネルギーを蓄える
 モード4：蓄えた磁気エネルギーとモード2で蓄えたC0のエネルギーを高電圧側コンデンサC2へ放出

図5に一般的な昇圧チョッパ方式と当社独自回路方式の比較結果を示す。当社独自回路方式ではパワーデバイスの駆動周波数を増やすことなくリアクトルの駆動周波数を2倍にすることが可能であり、パワーデバイスのスイッチング

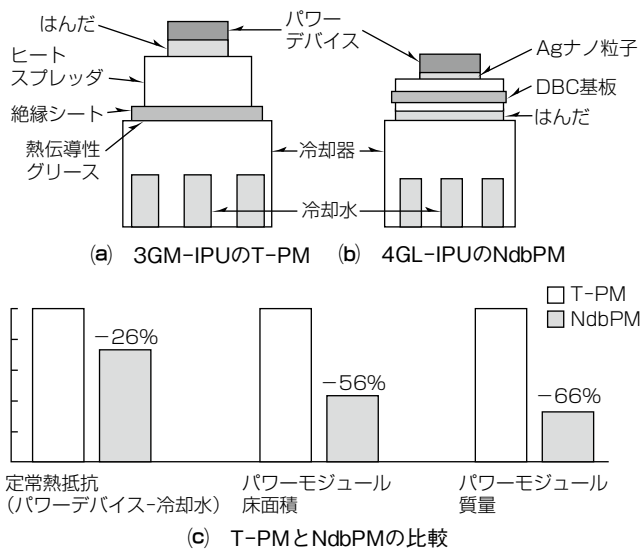


図3. パワーモジュール放熱構造

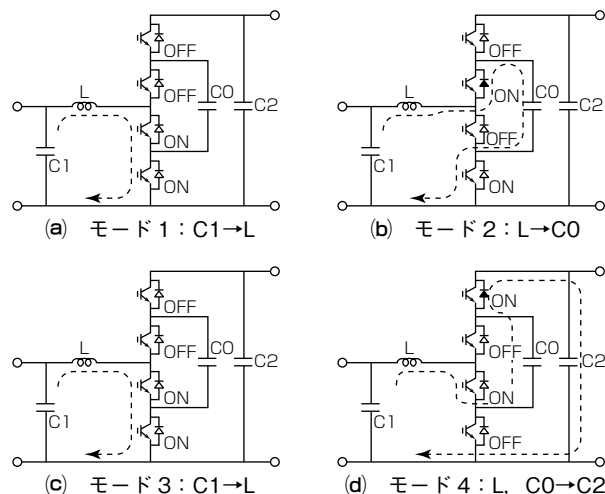


図4. 昇圧コンバータの動作モード

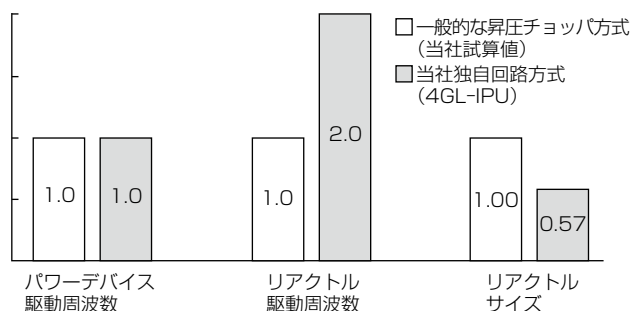


図5. 一般的な昇圧チョッパ方式と当社独自回路方式の比較

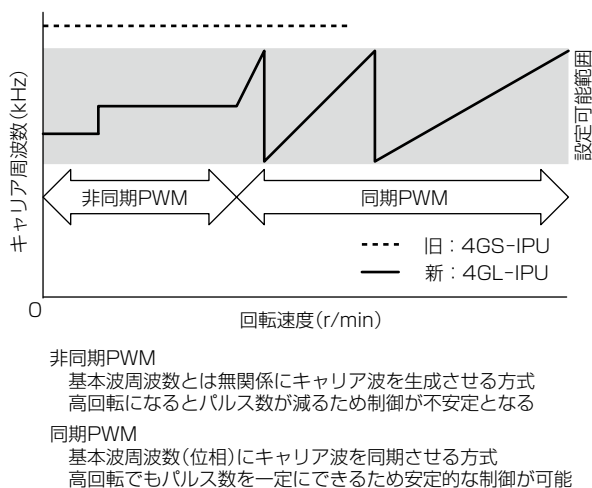


図6. PWM方式とキャリア周波数の切替え

損失を増やすことなくリアクトルサイズを約40%小型化した。この小型化によって従来車室内に搭載されていた降圧コンバータをエンジンルーム内に搭載されるIPUに統合し、その結果車室内空間の拡大を可能にした。

3.3 新しい制御技術⁽³⁾

1モータHEV用の従来製品(4GS-IPU)に比べ、走行用モータ出力が約5倍、発電機出力も含めると約10倍に高出力化が必要な4GL-IPUで、パワーデバイス損失低減は小型・高出力化に大きく寄与する。特に高出力領域では昇圧によって印加電圧が従来システムよりも高くなっており、印加電圧に比例するスイッチング損失低減(キャリア周波数低減)が必要不可欠であった。

一方でモータ回転速度(基本波周波数)も約2倍に上昇しており、これまでの非同期PWM(Pulse Width Modulation)方式ではキャリア周波数を高く設定しなければ電流制御性が悪化するという背反する課題があった。

一般的にキャリア周波数に依存する騒音及び電流制御性の観点ではキャリア周波数は高く設定し、逆にスイッチング損失に影響する効率・熱成立の観点及びキャリアごとに演算が必要なマイコン処理負荷の観点ではキャリア周波数を低く設定したいというトレードオフの関係上、キャリア周波数の設定可能範囲は非常に狭くなった。

そこで、これら制約を解決する手段としてキャリア周波数の可変化及び同期PWM方式を採用した。なお、当社で同期PWM方式はFA(Factory Automation)用モータ制御や鉄道車両駆動用モータ制御などで使用しているが、車載用として市販の汎用マイコン機能を利用した同期PWM方式は初の取組みである。

4GL-IPUでは、図6のように従来の非同期PWM方式と新方式の同期PWM方式を共存させて回転速度に応じてキャリア周波数を緻密に切り替えることで、キャリア周波数の狭い設定可能範囲で各種性能向上を実現した。

表1. 従来IPUと4GL-IPU比較

適用技術	従来IPU	4GL-IPU	効果
パワーモジュール	T-PM	NdbPM	高出力, 小型
パワーデバイス	第6世代(600V耐圧)	第7世代(1,200V耐圧)	低損失(高出力, 小型)
チップ下構造	はんだ	Agナノ粒子(シンター接合)	高放熱(高出力, 小型)
絶縁構造	絶縁シート	DBC基板	
絶縁下構造	熱伝導グリース	はんだ	小型, 高耐振
冷却器固定	ばね+ねじ		
流路密閉構造	Oリング+ねじ	FSW(摩擦攪拌接合)	小型, 高耐振
モータ制御	1モータ対応 非同期PWM (キャリア周波数一定)	2モータ対応 非同期+同期PWM (キャリア周波数可変)	低損失(高出力, 小型)
昇圧コンバータ	なし	あり(当社独自回路)	小型, 高機能
降圧コンバータ	なし	あり(低背, 耐振設計)	高機能

最終的に、この方式の採用によって従来方式では達成できなかった高回転領域の車両特有の急峻(きゅうしゅん)なトルク応答を実現可能な制御性を成立させ、同時にパワーデバイスの小型化に寄与し、スイッチング損失低減が可能になった。

4. むすび

当社はxEV創成期から小型・軽量・低コスト・高機能をコンセプトとし周辺機能の統合を進めたIPUを製品化してきた。4GL-IPUは豊富な実績のある従来IPUのコンセプト・要素技術・生産技術、他分野で実績のある制御方式と、表1に示すような新しい接合技術、当社独自の昇圧回路方式などの新技術を融合して開発した。これによって近年増加傾向にあるフル電動走行が可能な2モータシステムに対応し、高い環境性能と走る楽しみの両立、車内空間拡大を可能にした。

4GL-IPUはフル電動式の2モータHEV向けの製品であるが、今回開発したフル電動走行に対応可能な高出力化技術、パワーモジュール、制御技術、高耐振構造、生産技術等を活用し、IPUを更に小型・軽量・低コスト・高機能化することによって、更に高い環境性能と走る楽しみの両立によるxEVの普及を通じ、地球温暖化対策、排出ガス規制対応に貢献していく。

参考文献

- (1) 3GM-IPU：3モータシステム用パワーユニット，三菱電機技報，89，No.1，27（2015）
- (2) 日野泰成，ほか：高耐熱パワー半導体モジュールパッケージング要素技術，三菱電機技報，88，No.5，313～316（2014）
- (3) マイルドハイブリッド車用インバータ，三菱電機技報，91，No.1，21（2017）