

第 4 世代 LLC 電流共振 IC 「FA6C00 シリーズ」

“FA6C00 Series” 4th-Generation LLC Current Resonant ICs

小林 善則 KOBAYASHI, Yoshinori

田中 公德 TANAKA, Kiminori

森本 敏光 MORIMOTO, Toshimitsu

近年、電子機器に用いられるスイッチング電源には効率向上とシステムのコストダウンが求められている。富士電機は、軽負荷時の効率改善、電源部品削減を実現する第 4 世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6C00 シリーズ」を開発した。数 W ～数十 W の軽負荷領域に高周波バースト制御を採用し、従来から約 10% 効率が向上した。また、共振電流位相比制御の採用により、出力応答特性を向上することで位相補償部品を従来から 7 点削減した。本 IC の適用により、75 ～ 300 W 程度の LED 照明用電源や産業用の標準電源、液晶テレビなどの民生用の電源の高効率化とシステムのコストダウンが可能である。

Switching power supplies for electronic devices are being required to improve efficiency and reduce system costs. Fuji Electric has developed the “FA6C00 Series” 4th-generation LLC current resonant control ICs, which improve efficiency at light loads and help reduce the number of power supply components. This series uses high-frequency burst control at light loads, several watts to several tens of watts, thereby improving efficiency by about 10% compared with conventional products. Furthermore, it utilizes resonant current phase ratio control to improve output response characteristics, reducing seven phase compensating parts. Using these ICs allows users to improve the efficiency in 75- to 300-W equipment, such as LED lighting power supplies, standard industrial power supplies, and consumer power supplies for LCD TVs, while reducing their system costs.

① まえがき

電子機器に用いられるスイッチング電源は、コストダウンだけでなく、高い効率や低いノイズが求められる。そこで、出力電力 75 ～ 300 W クラスのスイッチング電源では、高効率化や低ノイズ化に有効な LLC 電流共振回路が広く使用されている。

これまで電源の待機時の消費電力は数百 mW 以下であった。しかし、IoT (Internet of Things) の普及によりさまざまな電子機器がインターネットに接続されるようになり、待機時の電力が軽負荷に相当する数 W ～数十 W に増加している。その結果、電源には軽負荷相当時の効率向上が求められている。

富士電機はこれまでに、LLC 電流共振制御回路向けに、AC85 ～ 264 V の幅広い入力電圧に対応し、小型の電源システムが構成できる LLC 電流共振制御 IC 「FA5760」、低待機電力の「FA6A00」、スイッチング電源の部品点数を減らすためスタンバイモードへの自動切替え機能を内蔵した「FA6B20」を製品化した。

今回、電源システムのさらなる軽負荷時の効率改善と電源部品が削減可能な第 4 世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6C00 シリーズ」を開発した (図 1)。

本稿では、FA6C00 シリーズの概要と特徴およびそれらの適用効果について述べる。

② 製品概要・特徴

本製品は、従来製品が持つ低待機電力の特徴に加え、高周波バースト制御により、軽負荷時の音鳴りを低減し、広い負荷範囲で効率を向上している。

また、新制御方式である共振電流位相比制御を採用し、出力応答特性を向上することで安定動作のために必要な位相補償部品の削減による電源システムのコストダウンが可能になる。

本製品によって、75 ～ 300 W の範囲の LED 照明用の電源をはじめ産業用の標準電源、液晶テレビなどの民生用の電源の高効率化とシステムのコストダウンが可能になる。図 1 に FA6C00 シリーズの外観を、図 2 にブロック図を、表 1 に主な仕様を示す。

FA6C00 シリーズは、LLC 電流共振回路を制御する制御回路、ハーフブリッジ回路のハイサイドのスイッチング素子である MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を直接駆動できる 780 V 耐圧のドライバ回路、ならびに低消費電力で IC を起動するための 650 V 耐圧起動素子で構成している。

パッケージは、JEDEC 準拠の 16 ピン SOP (Small Outline Package) を採用した。

ハイサイドとローサイドの両出力は 50% のデューティ比で交互に動作し、通常は最大で約 250 kHz の周波数で動作する。

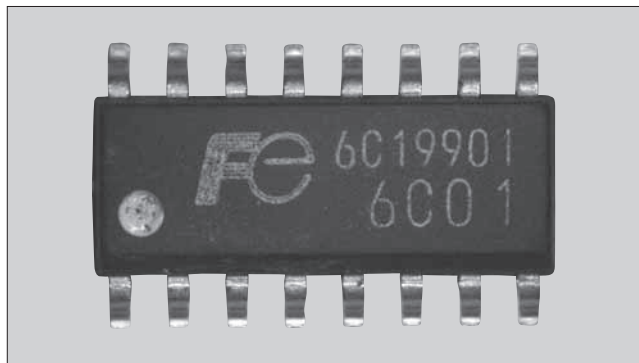


図 1 第 4 世代 LLC 電流共振制御 IC

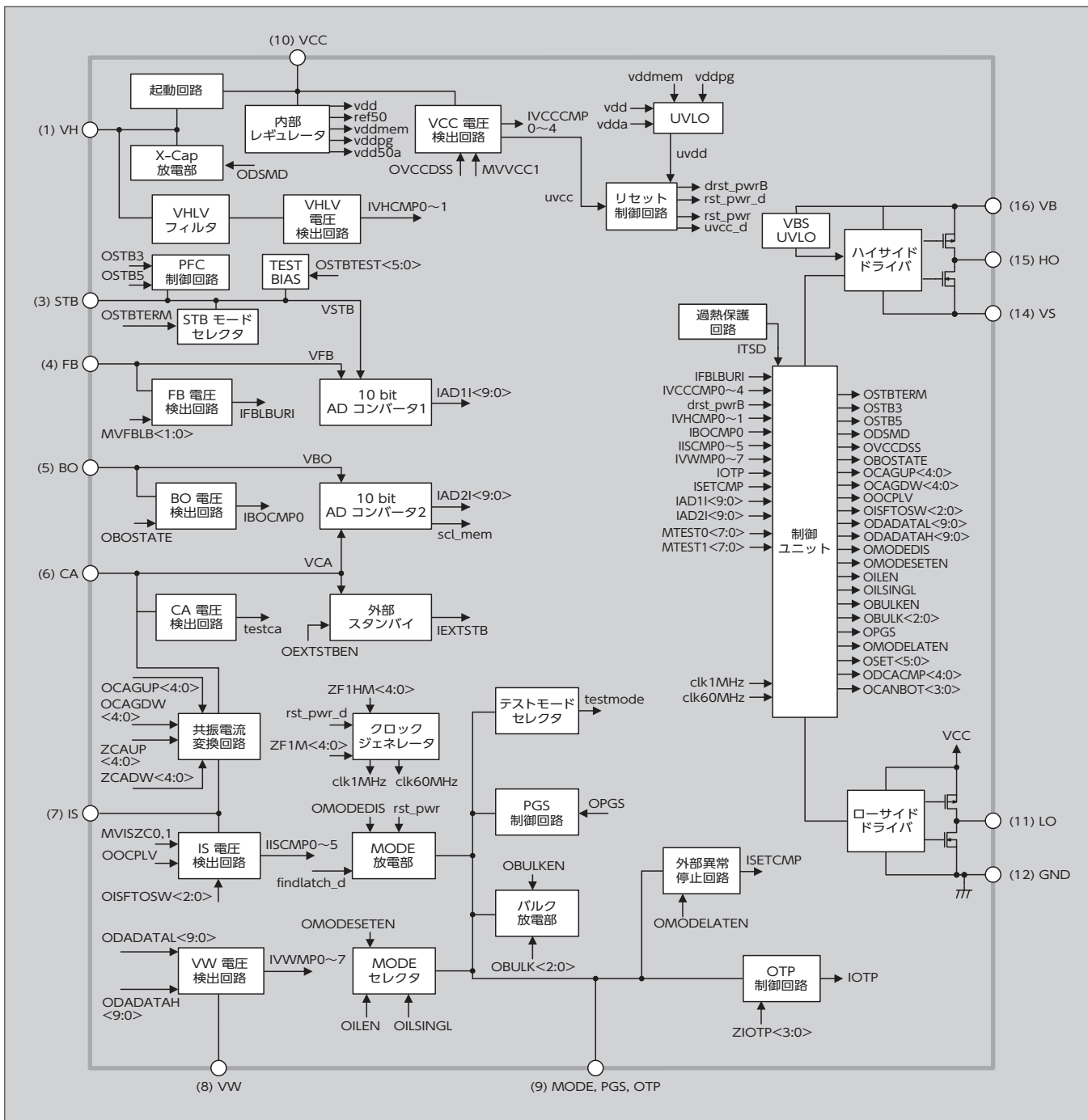


図2 「FA6C00 シリーズ」のブロック図

表1 主な仕様

項目	定格値
ハイサイド電源対地電圧	-0.3 ~ +780 V
ハイサイド電源電圧 V_{BS}	-0.3 ~ +30 V
ローサイド電源電圧 V_{CC}	-0.3 ~ +40 V
VH端子入力電圧	-0.3 ~ +650 V
軽負荷効率 ($P_o=11 W$)	78.9%
動作ジャンクション温度 (系列により異なる)	-40 ~ +150 °C
	-60 ~ +150 °C

なお、9番端子の機能は、パワーグッド信号出力 (PGS 端子)、外部信号による保護信号入力 (MODE 端子)、サーミスタ接続 (OTP 端子) から選ぶことができる。

3 主な機能と特性

3.1 高周波バースト制御

従来の動作には、連続してスイッチング制御を行うノーマル動作と、意図的にスイッチング停止期間を設けてバースト制御を行うスタンバイ動作がある。また、入力電流を監視して、この二つの動作を自動で切り替える自動スタンバイ機能を持つ。具体的には、本機能は一次側の LLC 電

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

流共振回路の共振電流を IS 端子で検出し、CA 端子の電圧をコンデンサで平滑化することで、二次側の負荷量を検出して動作を切り替えている。しかし、負荷が 5 ~ 30 W 辺りの領域において連続的にスイッチング制御を行うと、トランスの励磁電流によって効率が悪化してしまう問題があった。一方で、効率を向上するためにバースト制御を行うと、共振電流のピーク値が高くなることで出力電圧のリプルが大きくなる。その結果、負荷側の機器の誤動作が生じるという問題があった。さらに、バースト周期が速くなることで電源のトランスから音鳴りが発生する問題もあった。そこで FA6C00 シリーズでは、軽負荷領域での出力電圧リプルとトランスの音鳴りを抑制しながら高効率を実現するために、連続スイッチング制御とバースト制御（低周波バースト制御）で動作する負荷領域の間に、新たに高周波バースト制御を採用した。

図3に高周波バースト制御の動作原理を示す。本制御では、共振電圧と共振電流を監視し、ターンオフのタイミングを三つのパルスで制御している。第1パルス（LO）は第2パルス（HO）が共振できる状態を作り、共振電圧スレッシュホールド電圧 V_{Pth1} でターンオフする。第2パルス（HO）は電力を伝達し、共振電圧スレッシュホールド電圧 V_{Pth2} でターンオフする。第3パルス（LO）は、共振電流スレッシュホールド電圧 I_{Crth3} でターンオフする。

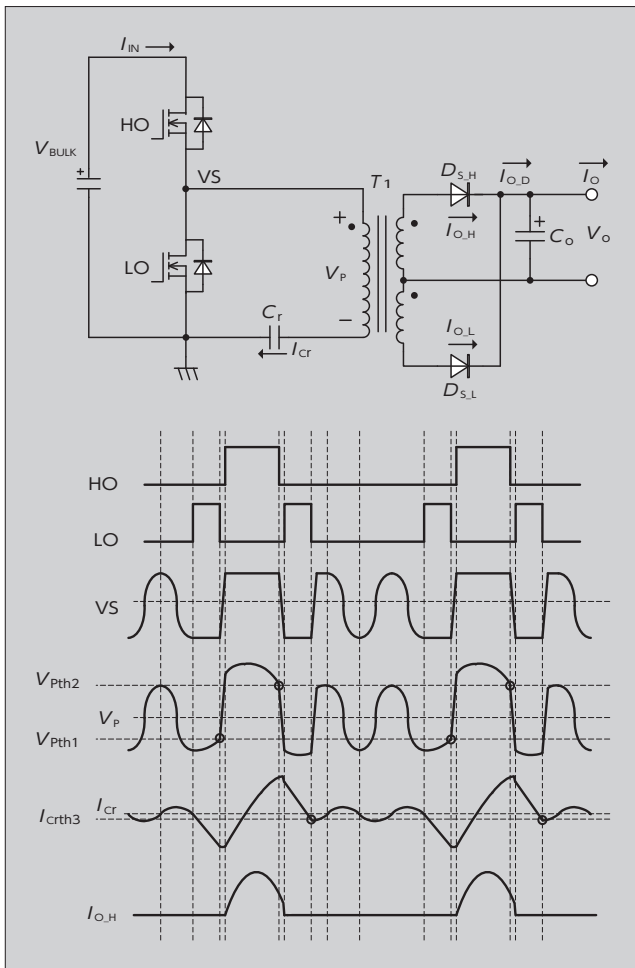


図3 高周波バースト制御の動作原理

図4に、共振電圧、共振電流を検出するための外部回路構成を示す。共振電圧は補助巻き線（VW 端子）、共振電流は分流回路（IS 端子）を使って検出する。これは強制ターンオフ機能と同じ検出方法なので、新たに外部回路を追加することなく既存回路を使用して、高周波バースト制御を行うことができる。

図5に、高周波バースト制御の動作波形を示す。第2パルスがオンしている期間のみ、二次側ダイオードに電流が流れている。

第2パルスのオン幅を制御することで、電流のピーク値が決まり、伝達される電力量が決まり、さらにバースト周波数が決まる。負荷量に応じて、このオン幅とバースト周波数を最適に制御しているので、無駄なく電力の伝達ができ、効率が向上する。また、バースト周波数を可聴周波数よりも高い 25 kHz 以上になるように制限している。これによりトランスの音鳴りを抑制し、さらに出力電圧リプルも抑制している。

図6に高周波バースト制御を採用した際の IC の動作と電源効率を示す。従来はトランスの音鳴りを低減するために連続スイッチング制御を行っていた負荷 10 ~ 22 W の領域を、25 kHz 以上でスイッチングする高周波バースト

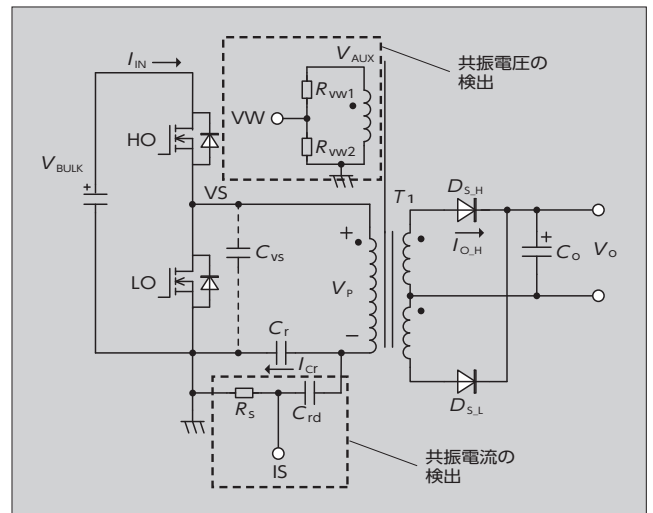


図4 外部回路の構成

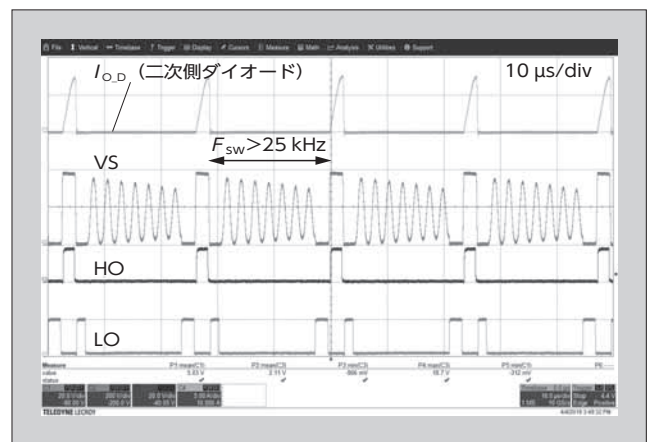


図5 高周波バースト制御の動作波形

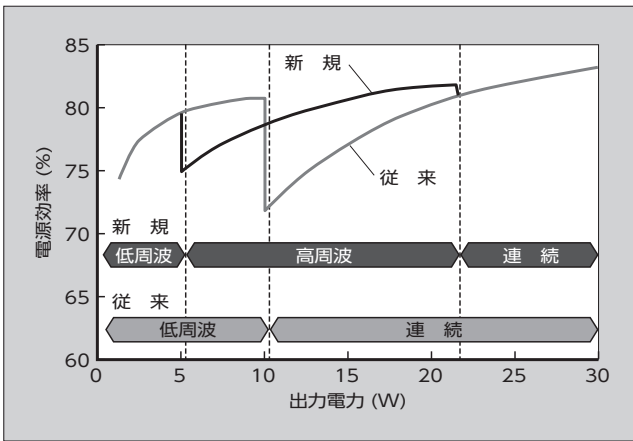


図6 電源効率と IC の制御方法

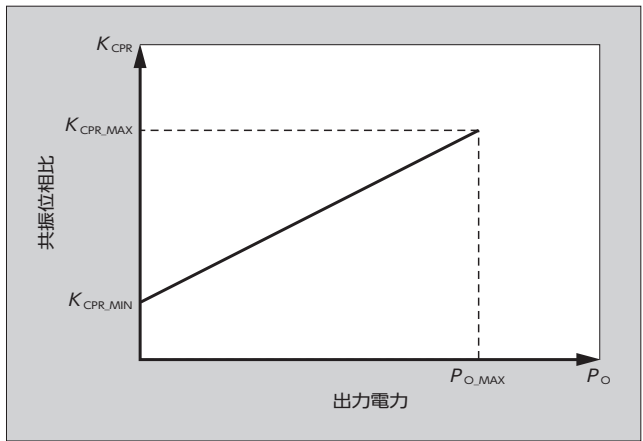


図8 共振位相比 K_{CPR} - 出力電力 P_o

制御とすることで、電源の効率の向上と両立している。

3.2 共振電流位相比制御

従来の富士電機の LLC 電流共振制御 IC は、FB 端子に電源の二次側出力電圧を入力し、この入力された電圧に基づいて通常動作時の発振周波数を変調することにより出力電圧をフィードバック制御している。

FA6C00 シリーズは、共振電流位相比制御を新たに採用した。この制御は、従来の二次側の出力電圧のフィードバック (FB) だけでなく、一次側の共振電流 I_{Cr} をも制御に用いることで位相の遅れを小さくし、高速応答が可能になり、さらに位相補償回路の部品が削減できる。

図7に共振波形を、図8に共振位相比 K_{CPR} と出力電力 P_o の関係を示す。共振電流 I_{Cr} の極性が反転する前後の時間比を共振電流位相比と定義すると、共振電流の極性が反転する共振位相比 K_{CPR} は式(1)で与えられる。

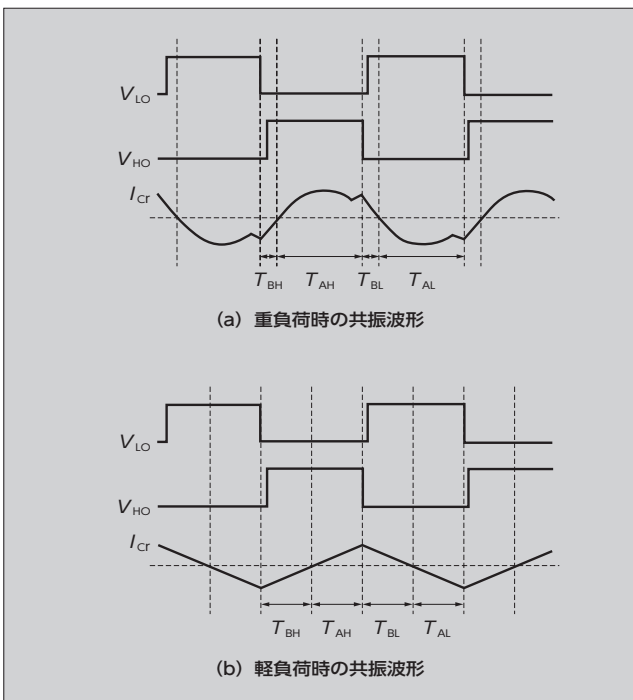


図7 共振波形

$$K_{CPR} = \frac{T_{AH}}{T_{BH}} = \frac{T_{AL}}{T_{BL}} \dots\dots\dots(1)$$

K_{CPR} : 共振位相比

T_{B^*} : ブリッジの片側の MOSFET がターンオフしてから共振電流がゼロ電流に到達するまでの時間

T_{A^*} : ブリッジの対向の MOSFET がターンオフするまでの時間

※ T_{A^*} , T_{B^*} の “*” の部分は

“H” : ハイサイド側

“L” : ローサイド側

共振位相比 K_{CPR} と出力電力 P_o との間には線形の関係がある。この関係から、共振位相比 K_{CPR} を制御することで、入力電圧、出力電圧に依存せず出力電力 P_o が制御できる。共振電流位相比制御は、フィードバック電圧 V_{FB} に応じて共振位相比を計算することで、オン幅を制御することができる。式(1)と式(2)から共振電流 I_{Cr} が極性反転後の時間 T_{A^*} は式(3)、式(4)のように求められる。共振電流 I_{Cr} の極性反転前の時間 T_{B^*} を測定すれば、その時の V_{FB} に応じた極性反転後の時間 T_{A^*} が算出できることから、ターンオフ点を決定することができる。

$$V_{FB} = \frac{K_{CPR}}{A} + B \dots\dots\dots(2)$$

V_{FB} : フィードバック電圧

K_{CPR} : 共振位相比

A, B : 定数

$$T_{AH} = (V_{FB} - B) \cdot A \cdot T_{BH} \dots\dots\dots(3)$$

$$T_{AL} = (V_{FB} - B) \cdot A \cdot T_{BL} \dots\dots\dots(4)$$

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

4 電源回路への適用効果

4.1 回路部品点数の削減と高速応答化

FA6C00 シリーズを搭載したアプリケーション回路図を図9に示す。富士電機製臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B00 シリーズ」との連係動作により、さらに高効率化が可能である。

表2 および図10に電源部品の削減効果を示す。共振電流位相比制御を採用することで、位相補償回路部品を従来から7個削減ができ、電源のシステムコストダウンにおいて有効である。さらに、PFC-LLC 間の連係信号変更により連係回路の部品点数を従来から1個削減した。

図11に負荷急変応答特性を示す。前述の共振電流位相比制御により、電源の応答性が向上し、負荷急変時の出力電圧リップル ΔV_o を5%以内としている。

表2 電源部品の削減効果

機能	部品	部品個数		削減数
		新規	従来	
位相補償回路	トランジスタ	0	1	-1
	コンデンサ	1	3	-2
	抵抗	0	4	-4
	合計	1	8	-7
PFC-LLC連係回路	トランジスタ	1	1	0
	コンデンサ	3	3	0
	抵抗	3	4	-1
	合計	7	8	-1

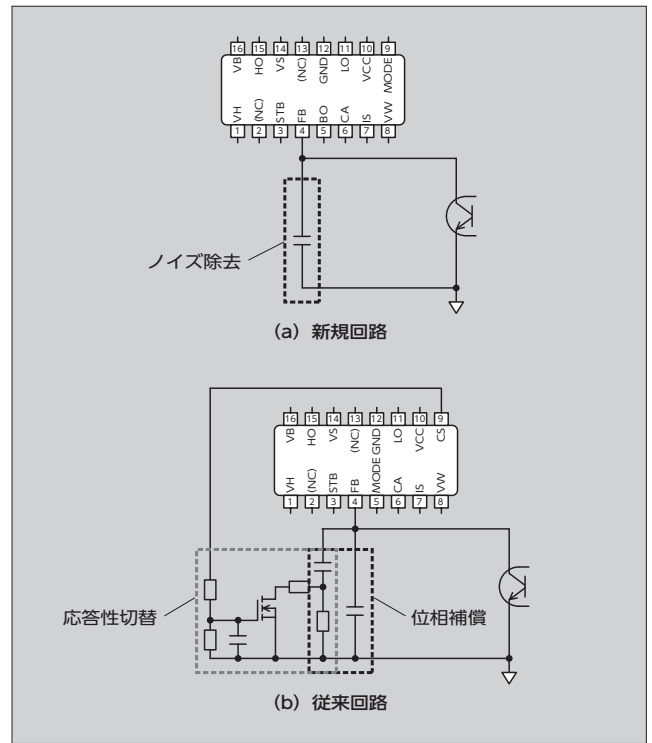


図10 位相補償回路

4.2 軽負荷効率の向上

図12に実際の電源での効率を示す。高周波バースト動作制御を新たに採用したことで、軽負荷(11W 負荷)の効率が約10% 向上した。従来の連続スイッチング制御と低周波バースト制御だけでは動作モードの切替えの負荷で効率が低下していたが、高周波バースト制御を連続スイッチング制御と低周波バースト制御の間に設けたことで、約10~約22Wの軽負荷領域での効率が向上した。また、

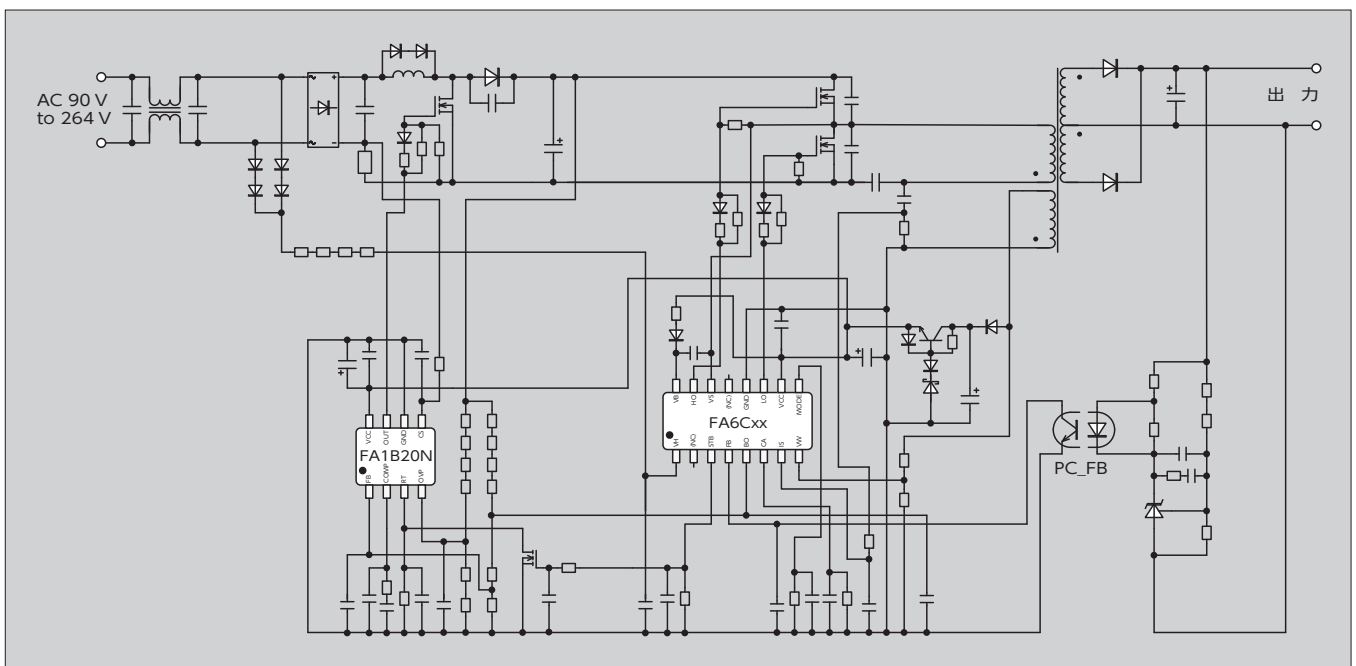


図9 アプリケーション回路例

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

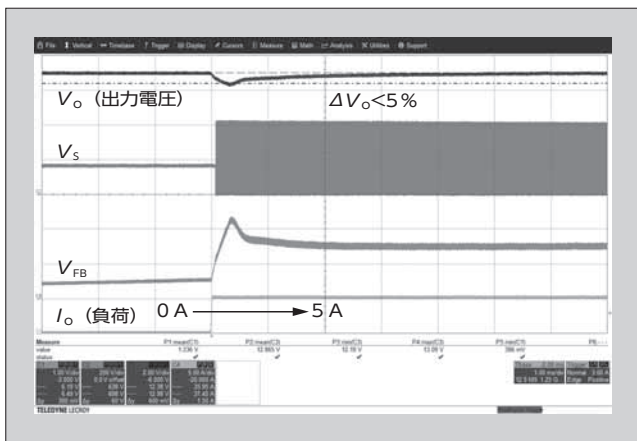


図 11 負荷急変応答特性

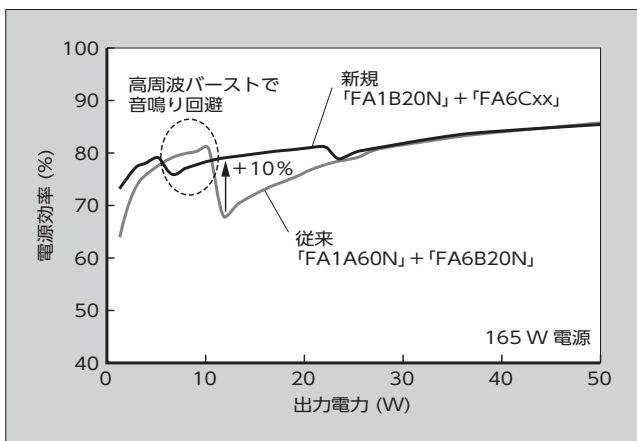


図 12 電源効率

約 6 ～ 約 10 W の領域は高周波バースト制御で動作させることで、効率は若干低下するがトランスの音鳴りを低減している。高周波バースト制御は、軽負荷効率の向上とトランスの音鳴りに対して有効である。

5 あとがき

第4世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6C00 シリーズ」に

ついて述べた。この IC を搭載して電源を構成することで、軽負荷効率の向上、電源の部品点数削減が実現可能である。

富士電機では、今後もさらなる高効率化、部品削減が可能な新技術の確立を図り、年々厳しくなる規格や市場要求に応える製品開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 山田谷政幸ほか. LLC電流共振制御 IC 「FA5760N」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.445-451.
- (2) 陳建ほか. 第2世代 LLC電流共振制御 IC 「FA6A00N シリーズ」. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.267-272.
- (3) 川村一裕ほか. LLC電流共振電源の回路技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.268-272.
- (4) 園部孝二ほか. 高効率電源用の臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」 と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.283-288.
- (5) 遠藤勇太ほか. 第4世代臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B00 シリーズ」. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.230-235.



小林 善則

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業ディスクリート部。



田中 公徳

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業ディスクリート部。



森本 敏光

パワー半導体のフィールドアプリケーションエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部営業統括部応用技術部。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。