

ホワイトペーパー

双方向 DC/DC コンバータの動作とその応用

ルネサスエレクトロニクス株式会社

インダストリアル・アナログ&パワーグループ 主任エンジニアリング・マネージャー、David Zhan

2018年9月

概要

近年、バッテリーやスーパーキャパシタのようなエネルギー貯蔵装置の普及に伴い、バッテリーの充放電管理方法を簡素化することが技術トレンドになっています。これらの回路を、双方向 DC/DC コンバータで実現することにより、バッテリーを健全状態に維持し動作時間を延長することができます。双方向 DC/DC コンバータは、1つのパワートレインを使用して充放電動作を行います。この資料では、ルネサスエレクトロニクスが、この双方向制御機能を最新コントローラである ISL81601 にどのように組込んで、動作中の逆方向送電とその制御をどのように実現したかについて説明します。

はじめに

私たちが日々生活を営んでいる世界は、輸入石油への依存度を減らし、再生可能エネルギーのさらなる活用へ進んでいます。バッテリー駆動のポータブル機器の利用増加も、私たちのライフスタイルの進化の大きな要因になっています。このトレンドを推進する重要な要素が、エネルギー貯蔵技術の開発とリチウムイオン (Li-ion) 電池やスーパーキャパシタといった高密度エネルギー貯蔵デバイスの幅広い利用にあります。これらのエネルギー貯蔵装置は、風力や太陽光などの再生可能エネルギーシステムに接続して、エネルギーを収集・貯蔵し、グリッド、あるいは商業用および家庭用エンドユーザーに安定した電力を供給します。携帯電話等のポータブル機器、ドローン、ロボット、さらには電気自動車なども、エネルギー貯蔵機器からの電力だけに依存して動作し、与えられた処理をこなします。

急成長するデータ経済のための情報技術は、急激に変化する世界の原動力となっています。データセンターや通信システムなどの情報システムを 24 時間稼働させることは非常に重要で、電力を失いシャットダウンするようなことはあってはなりません。そういったことから、これらの情報システムの電力バックアップには、何らかのエネルギー貯蔵装置が必要となります。

エネルギー貯蔵装置は、電源から自身を充電することによってエネルギーを収集・貯蔵し、貯蔵された電力を放電して負荷に供給します。充放電プロセスは、ストレージデバイスを安全で高信頼・長寿命に保証するために厳密に管理する必要があります。大部分のこういったシステムでは、充放電機能は、通常 2 つの独立した電力トレインによって制御されています。これにより、例えば Li-ion バッテリーの場合は、充電電流はより小さく放電電流はより大きく、異なる 2 つの制御目標を実現しています。

いくつかのアプリケーションでは、充電から放電への高速転換、あるいは放電から充電への高速転換が必要です。たとえば、データセンターサーバで使用される DC バッテリー・バックアップシステムは、シームレスな電力供給を実現するために充電から放電への高速転換が必要になります。一方、モータ駆動システムはブレーキ動作のために、放電から充電への高速転換が必要とされます。充電動作と放電動作間のシームレスかつ高速な転換を実現するために

は、これらのアプリケーションには単一パワートレインのオンザフライ双方向充放電コンバータが必要となります。つまり、動的に送電方向を転換して充電あるいは放電を行う制御機能を持ったコンバータが必要ということです。

充電用と放電用のパワートレインを1つに統合することで、コンパクトな設計を実現し、システムコストも同時に削減することができます。さらに、このデバイスは充放電間の急速転換を必要としないアプリケーションにも使用することができます。

バックブーストコントローラは、オンザフライ双方向 DC/DC 電力変換技術が必要なストレージデバイスの充放電制御アプリケーションに、簡単で高信頼のソリューションを提供します。このデバイスの独自アーキテクチャと制御アルゴリズムは、お客様が求める技術的信頼とビジネス価値を十分備えています。

双方向 DC/DC コンバータのトポロジ

絶縁トポロジと非絶縁トポロジの両方に対して、同期整流器 (SR) を備えたコンバータを使うことで、双方向動作をさせることができます。このホワイトペーパーでは、非絶縁トポロジに絞って解説しますが、この解説の応用として、絶縁トランスを追加すれば絶縁トポロジにも拡張することが可能です。

通常非絶縁双方向コンバータは、図 1 に示すように、バックコンバータ、ブーストコンバータ、および 4 スイッチ・バックブーストコンバータになります。この図から、バックコンバータは逆方向のブーストコンバータとして動作することが分かります。また、ブーストコンバータも逆方向のバックコンバータとして動作します。4 スイッチ・バックブーストコンバータは 2 スイッチバックモードまたは 2 スイッチブーストモードのいずれかで動作するため、単一のバックまたはブーストコンバータと同様に逆方向にも簡単に動作します。

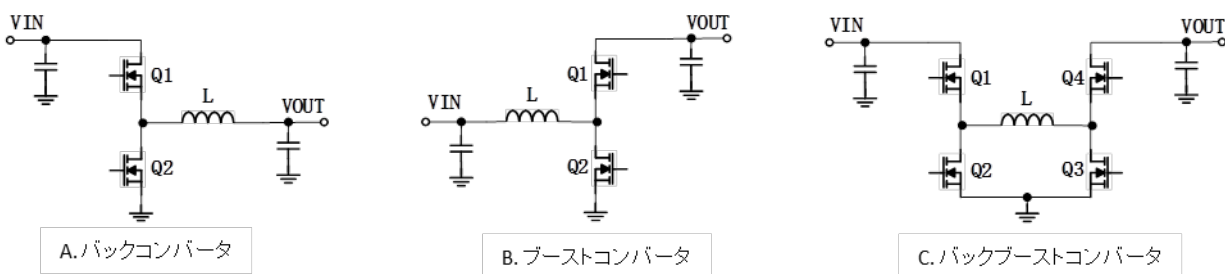


図 1. 双方向 DC/DC コンバータのトポロジ

図 2 は、2 つの異なる双方向動作システムの一般例です。図 2A は、バッテリー充電/放電双方向動作システムで、図 2B は、スーパーキャパシタ・バックアップシステムです。ここで、ISL81601 はオンザフライで双方向動作可能な 4 スイッチ・バックブーストコントローラです。

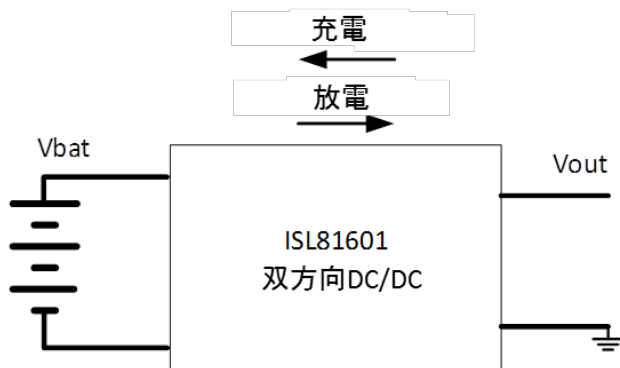


図 2A 充放電可能な双方向 DC/DC コンバータを備えたバッテリーパック

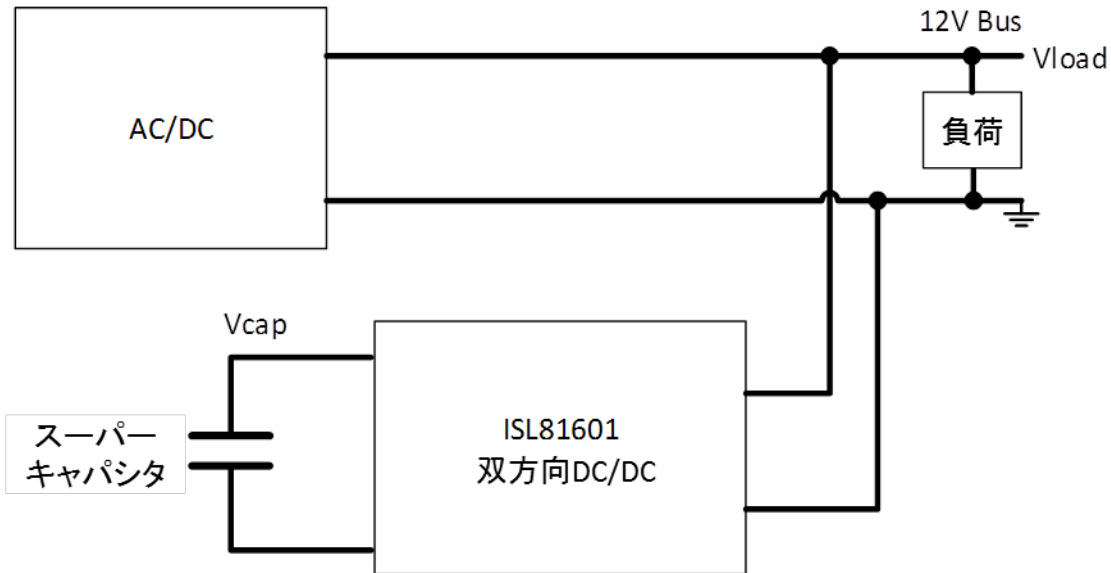


図 2B スーパーキャパシタ DC バックアップシステム

図 2. 双方向 DC/DC コンバータのアプリケーション例

バッテリー充電／放電システムにおいて、双方向 DC/DC コンバータは、 V_{out} がバッテリー動作電圧の近傍にある場合は、4 スイッチ・バックブーストコンバータとして動作します。そして、 V_{out} が常時バッテリー電圧よりも高い場合はブーストコンバータとして、そして V_{out} が常時バッテリー電圧より低い場合はバックコンバータとして動作します。4 スイッチ・バックブーストコンバータは、低耐圧のパワーデバイスを使用し低い電流で動作するため、ベストな電力効率を達成します。また、充電および放電動作の両方で完全な過電流制御と短絡保護を行っており、安全なバッテリー動作を保証することができます。

スーパーキャパシタを使った DC バックアップシステムでは、コンデンサ容量を十分活用する必要があるため、コンデンサが非常に低い電圧になるまで放電させる必要があります。そのため、双方向 DC/DC コンバータはバックブーストコンバータでなければなりません。

4 スイッチバックブースト DC/DC コンバータの双方向動作

図 3 に、4 スイッチ・バックブーストコンバータの動作モードと ISL81601 で制御される波形を示します。 V_{in} が V_{out} よりも低い場合、 V_{in} は図 3C に示すようにブーストモードで動作します。 V_{in} が V_{out} よりも高い場合、 V_{in} は図 3A に示すようにバックモードで動作します。 V_{in} が V_{out} に近くなると、図 3B に示すように、バックブースト (1 サイクルのバック、1 サイクルのブースト) モードで動作します。

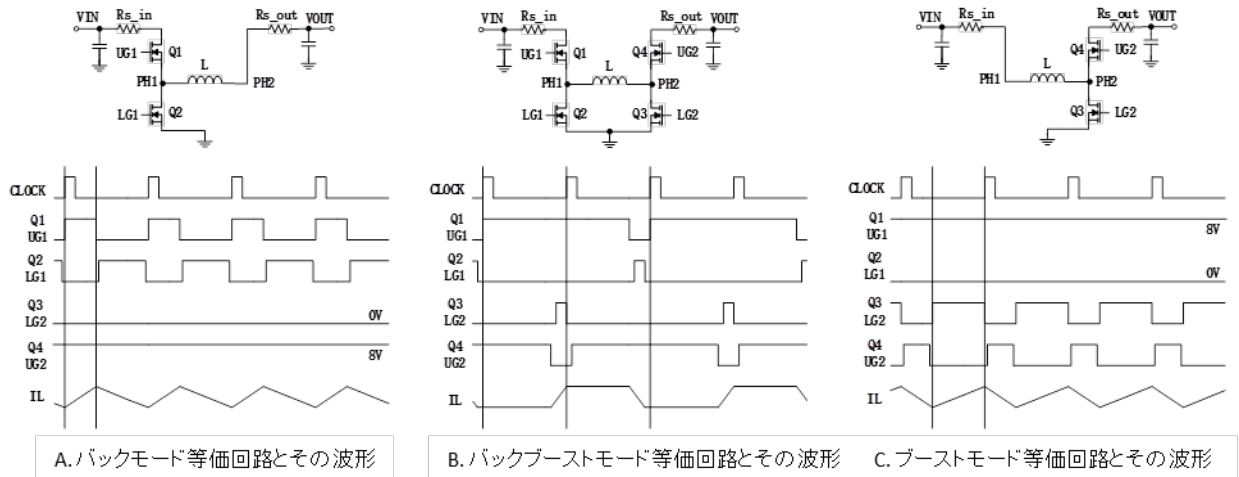


図 3.4 スイッチ・バックブーストコンバータの動作モードと波形

双方向動作機能は、3つの動作モードのすべてに導入可能です。コンバータは、順方向および逆方向制御の両方に対して同じPWM変調アルゴリズムを維持します。インダクタ電流は順方向電力変換時には正で、逆方向電力変換時には負となります。抵抗 R_{s_in} と R_{s_out} は入力電流と出力電流を検出するために使用されます。コントローラの電流検出オペアンプに適切なオフセットを加えれば、ISL81601 は入力側と出力側の両方の両端の正と負の電流をセンスして制御することができます。これは、双方向DC/DCコンバータが高信頼で動作するための重要な要件です。

双方向DC/DCコンバータでは、入力電圧・出力電圧、そしてそれらの電流をすべて制御する必要があります。ISL81601は、図4に示すように、 V_{in} 、 V_{out} 、 I_{in} 、 I_{out} をレギュレートするために、4つの制御ループ回路を内蔵しています。Gm1は V_{out} をセンスし、 V_{out} を順方向にレギュレートして定電圧(CV)出力動作を実現します。A2は R_{s_out} を介して I_{out} をセンスします。 I_{out} の平均はIMON_OUTピンの電圧に比例します。Gm4は、順方向の定電流(CC)出力動作を実現するために I_{out} の平均をレギュレートします。A1およびGm3は、順方向の平均入力電流 I_{in} をセンスしレギュレートするために使用されます。Gm2は、逆方向動作で V_{in} をセンスしてレギュレートします。

4つの平均制御ループ回路は、OR結合されています。最低電圧状態にあるGmi ($i=1,2,3, \text{ or } 4$ のどれか1つ)の出力が制御を行います。定電圧・定電流動作間の転換と逆方向転換は、このOR結合ループ制御アーキテクチャによって動的に実行されます。

図2Bに示すスーパーキャパシタDCバックアップシステムでは、図4に示すDC/DCコンバータ入力VINは12Vバスに接続され、出力VOUTはスーパーキャパシタパックに接続されています。順方向電力変換方向では、コンバータはACラインと12Vバスが使用可能ときにスーパーキャパシタを充電します。コンデンサは定電流モードで充電され、VOUTがGm1電圧ループの設定値よりも低い場合は図4に示すA2/Gm4ループによって制御されます。コンデンサVOUTがGm1電圧ループの設定値まで充電されると、VOUTはレギュレートされ、設定値に維持されます。コンバータは定電圧モードで動作し、コンデンサを完全充電状態に保ちます。順方向では、ISL81601はパルスごとのピーク・インダクタ電流制限保護機能により、過渡状態および短絡状態で確実な動作を保証します。また、2次ピーク電流保護機能により出力デッドショート状態でコンバータをシャットダウンします。

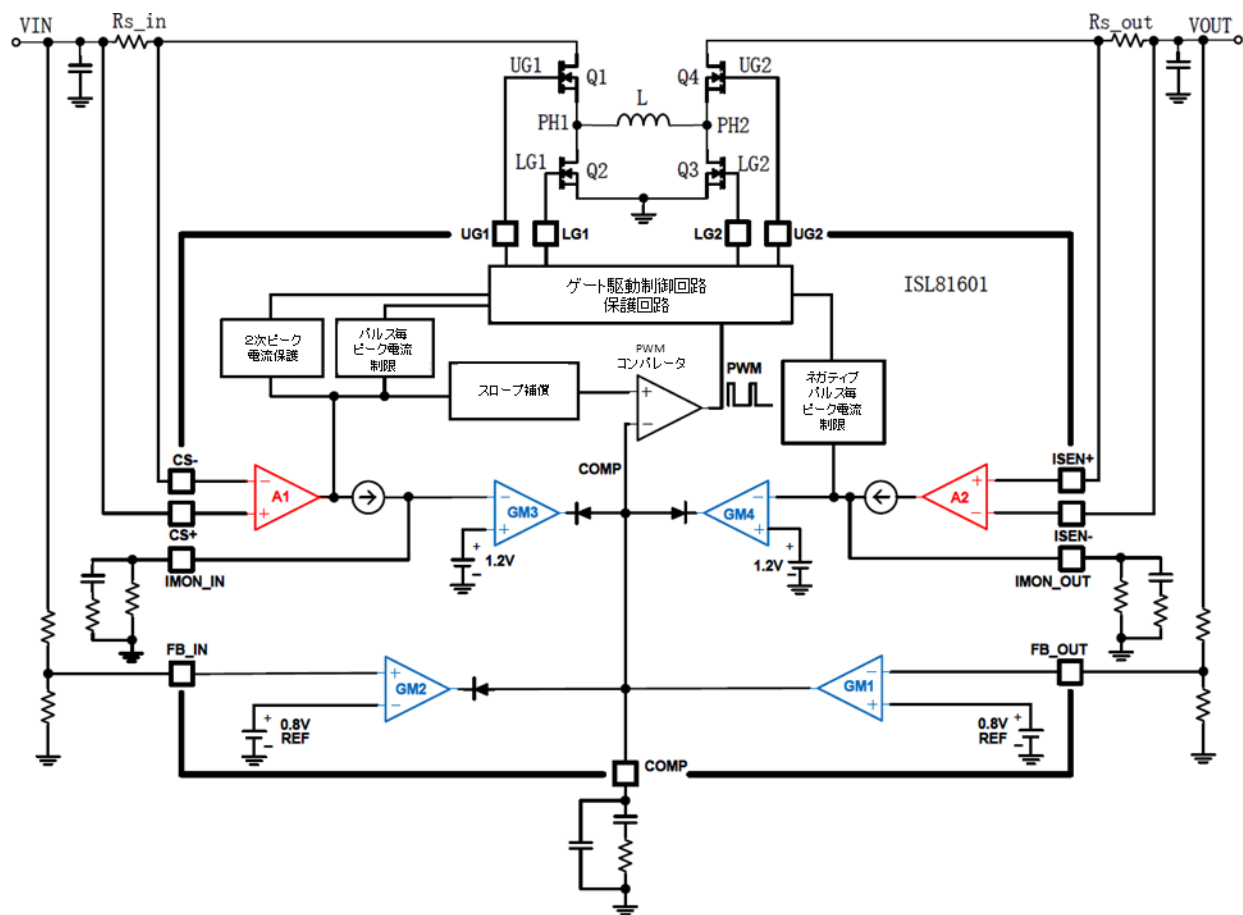


図 4. 入力電圧、入力電流、出力電圧および出力電流の制御ループ回路

図 2B の AC ラインが電力を失うと、AC/DC コンバータは 12V バスへの電力供給を停止し、負荷によって 12V バス電圧 (VIN) が低下します。VIN が FB_IN = 0.8V で設定された設定値を下回ると、Gm2 は COMP ピンを引き下げるように動作します。これにより、PWM デューティサイクルが減少し、インダクタ電流が正領域から負領域に低下します。コンバータは、オンザフライで電力変換方向を逆転させ、スーパーキャパシタを放電し、12V バス上の負荷に電流を供給します。その結果、VIN 電圧は設定値にレギュレートされます。

オンザフライ逆方向動作とバックブーストモードへの転換を図 5 で示す波形に示します。動作詳細を示すため、VIN の初期電圧は 18V に設定され、VIN の Gm3 のレギュレーションは 9V に設定され、VOUT の Gm1 レギュレーションは 12V に設定されています。VIN ソースが除去されると (図 2B の AC ライン喪失)、VIN 上のコンデンサは順方向電力変換で放電を続けて、スーパーキャパシタを充電します。VIN は 18V から 9V に低下しますが、コンバータは順方向のバック、バックブースト、およびブーストモードで動作し、VOUT を安定化します。ISL81601 の内部ロジックにより、バックモード、ブーストモードおよびバックブーストモードの移行を正負両方向にスムーズかつ自動的に行います。

VIN が 9V に低下すると、Gm2 ループが起動して VIN を 9V にレギュレートします。インダクタ電流は負領域に移動し、電力変換方向を反転させます。スーパーキャパシタは放電して、VIN の負荷に電力を供給します。逆方向転換は、動的・自動で実行されます。VIN 降下を制限するために、Gm2 ループの反応速度は、バックアップ電源が迅速に起動するように十分高速でなければなりません。これは、VIN 帰還抵抗分割器の上側の抵抗と並列にコンデンサを追加することによって実現できます。

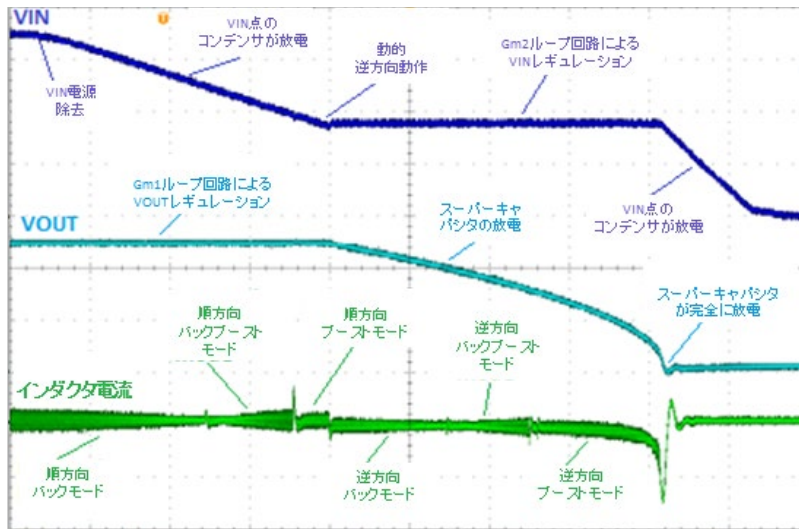


図 5. 動的逆方向動作

逆方向動作の間、スーパーキャパシタは放電して VOUT を低下させます。VOUT の降下中、コンバータは逆方向のバック、バックブースト、およびブーストモードで動作し、VOUT が 0V に近づくまで継続してレギュレーションを維持します。そして、スーパーキャパシタに蓄積された電荷はすべて利用されます。

ISL81601 を使用すると、逆負方向の安全動作を保証するために、ピークネガティブインダクタ電流をパルスごとに制限することができます。

バッテリーパック充放電双方向動作システムにおける定電流・定電圧制御

バッテリーパック充放電双方向 DC/DC コンバータでは、図 2A に示すように、両方向に定電流・定電圧(CC/CV)制御が必要です。図 6 にバッテリーパックの DC/DC コンバータのブロック図を示します。バッテリーパックは、DC/DC コンバータの VIN 側に接続されています。順方向のバッテリー放電方向では、VOUT の定電圧制御は Gm1 によって実行され、Iout の定電流制御は A2 および Gm4 によって実行されます。

逆方向のバッテリー充電動作では、定電流および定電圧の充電制御は、ISL81601 コントローラに 2 つのオペアンプ A3 および A4 回路を追加することによっても実現できます。図 6 を参照してください。

バッテリーを充電するには、DC 電源を VOUT 端子に接続します。DC 電源電圧が 0.8V リファレンスで規定された Gm1 ループの VOUT レギュレーション設定点より高く、抵抗分割器が FB_OUT ピンに設定されている場合、バックブーストコンバータは自動的に DC 電源から電流を引き出し、VIN 側のバッテリーを充電します。これは制御ルーブによって実現され、COMP ピンの電圧、つまり PWM デューティサイクルを低減します。インダクタ電流は負領域に減少し、コンバータは電力変換方向を反転させます。

Rs_in に負の電流が流れると、IMON_IN ピンの電圧は、式 EQ.1 で定義されているオフセット・ポイント Vimon_in_offset よりも低下します。

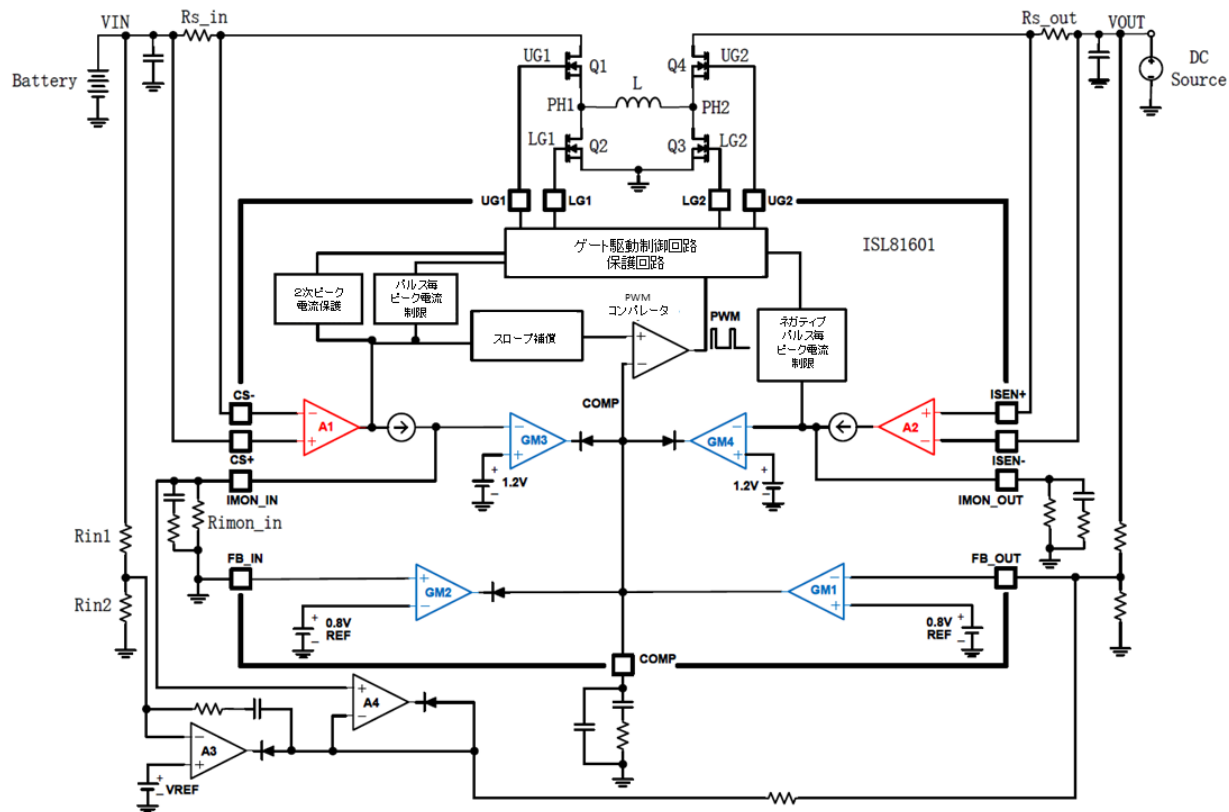


図 6. バッテリの充放電の定電流・定電圧制御

$$V_{imon_in_offset} = I_{cs_offset} \times R_{imon_in} \quad \text{EQ.1}$$

ここで、

I_{cs_offset} は、電流センスアンプ A1 のオフセット電流です。標準 $20 \mu A$ は、ISL81601 のデータシートに示されています。 R_{imon_in} は IMON_IN ピンに接続された抵抗です。

図 6 に示すように、IMON_IN ピンの電圧が 0.8V の Gm1 基準電圧を下回ると、A4 は FB_OUT を引き下げ始めます。そして、COMP ピンの電圧が上昇し、PWM デューティサイクルが増加します。結果、インダクタの負電流は減少します。負のバッテリー充電電流は、定電流での充電を実現するように調整されます。定充電電流設定点 I_{cc_in} は、式 EQ2 によって定義されます。

$$I_{cc_in} = (I_{cs_offset} - 0.8/R_{imon_in})/G_{m_a1}/R_{s_in} \quad \text{EQ.2}$$

ここで、

G_{m_a1} は電流センスアンプ A1 のゲイン、標準 $200 \mu S$ は、ISL81601 のデータシートに示されています。 R_{s_in} は入力センス抵抗です。

バッテリーが VIN 分圧器の Rin1 / Rin2 出力が VREF より高いポイントまで充電されると、A3 は FB_OUT を引き下げます。定電流制御と同様に、COMP ピンの電圧が上昇し、PWM デューティサイクルが増加します。インダクタの負電流、すなわちバッテリー充電電流は、0A または正の放電領域に減少します。そして、バッテリー電圧は、定電圧充電を実現するようにレギュレートされます。定電圧設定点 V_{cv_in} は、式 EQ3 によって定義されています。

$$V_{cv_in} = (R_{in1} + R_{in2}) \times V_{REF} / R_{in2}$$

EQ.3

バッテリーが完全に充電されると、DC電源が取り外されます。バッテリーパックは、Gm4 または Gm1 によって制御される定電流モードまたは定電圧モードで、負荷に電力供給する状態になります。

自動車やその他のモータ駆動アプリケーションにおいて、ISL81601 双方向 DC/DC コントローラは、常時変化するモータブレーキ制動中にバッテリーへのエネルギーフィードバックを刻々と自動的に実行します。ピークサージ制動電流は、Rs_out および電流センスアンプ A2 によって構成された ISL81601 のパルス毎ピーク負電流制限機能によって制限されます。長時間ブレーキ電流は、定常バッテリー充電電流ループの設定値 Icc_in によって制限されます。高速ピーク電流制限、正確な定電流制限と、バッテリー定電圧制御ループとバッテリーの最大充電電圧限界値の組み合わせにより、安全なシステム操作を確保します。

図 6 では、FB_IN は Gm2 機能を無効にするために接地されています。抵抗分圧器を介して VIN 信号を FB_IN ピンに供給することにより、実際にこういったバッテリーパックアプリケーションで Gm2 を使用してバッテリー過放電を保護することができます。バッテリーが過放電状態になると、Gm2 は COMP ピンの電圧を下げ、バッテリーのそれ以上の過放電を停止します。

図 7 は、バッテリーの充電および放電の動作波形を示しています。DC 電源が T1 点で取り外されると、バッテリーは放電を開始して即時に負荷に電力を出力します。DC 電源が T2 点で再び印加されると、DC/DC コンバータは即座にその方向を変えてバッテリーを充電します。バッテリーは、電圧が VIN レギュレーション設定点より低いときは定電流モードで充電され、電圧が設定値に達すると定電圧モードで充電されます。

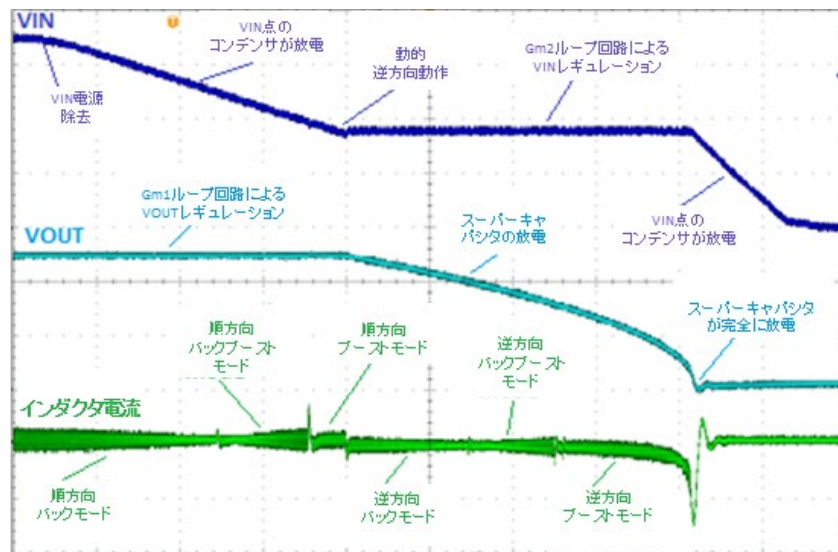


図 7. バッテリーの充放電動作時の波形

結論

ルネサス社が提供する ISL81601 は、高集積・汎用的な双方向バックブースト PWM コントローラです。このデバイスの独自アーキテクチャにより、4 スイッチ・バックブースト DC/DC コンバータにより順方向および逆方向の入出力端の電圧および電流を簡単に制御できます。この機能により、シンプルで高信頼なオンザフライベースの双方向 DC/DC 電力変換ソリューションを提供します。また、エネルギー貯蔵装置の多様なアプリケーションへのソリューションを必要とする顧客に高い柔軟性を提供します。

©2018 ルネサス エレクトロニクスアメリカ社 (REA) が全著作権を所有。すべての商標および商号は、それぞれの所有者のもです。REA は、ここに記載されている情報は、与えられたときに正確であったと考えていますが、その品質や使用に関してはリスクはないと考えています。すべての情報は、商品性、特定の目的への適合性、非侵害性などを問わず、明示的、黙示的、法的、または取引、使用方法、または貿易実務から生じるいかなる保証もなく、現状のまま提供されます。REA は、たとえそのような損害の可能性について知らされていたとしても、ここに記載された情報の使用または信頼に起因する直接的、間接的、特別、派生的、付随的、またはその他の損害について一切の責任を負うものではありません。REA は、予告なしに製品を中止したり、製品の設計または仕様またはその他の情報を変更する権利を留保します。すべてのコンテンツは、米国および国際著作権法によって保護されています。ルネサスエレクトロニクス社の事前の書面による許可なく、本資料のいかなる部分も複製、転載することはできません。お客様またはユーザーは、この資料のいずれかの公的または商業目的での修正、配布、公開、送信、または派生物の作成を許可されていません。