

リニアレギュレータシリーズ

リニアレギュレータの電源 オン/オフ 特性

リニアレギュレータ IC に電源を投入すると、出力コンデンサへ電荷が蓄積され出力電圧が設定値まで上昇します。この時、突入電流が IC の入力から出力へ流れます。また入力電源を遮断すると出力電圧が降下します。このアプリケーションノートでは、電源オン/オフ時の一連の動作について説明して行きます。

評価回路

リニアレギュレータの一般的な回路に、起動特性を評価するための回路を付加したものを Figure 1 に示します。突入電流はパワーオン時の電圧上昇中に、リニアレギュレータの入力から出力へ流れる電流として定義されています。突入電流は主に出力コンデンサへの充電電流と負荷電流の合計になります。その他の外部要因として入力コンデンサへの充電電流も同時に観測されるため波形の切り分けが困難です。Figure 1 のようにイネーブル制御が付いている IC では、予め入力電圧を印加し、入力コンデンサに電荷を充電しておくことができます。あとはイネーブル端子の電圧で出力をオンできるため測定が容易です。イネーブル制御がない IC では、入力コンデンサの値を正常動作可能な最小容量に変更するか、ESR 値が高い電解コンデンサに変えることで、入力コンデンサへの突入電流を小さくする工夫が必要です。

波形のモニタ位置は、イネーブル制御電圧を電圧プローブ 1 で、出力電圧を電圧プローブ 2 で測定します。出力電流は、入力側を電流プローブで測定します。そしてオシロスコプの電圧プローブ 1 のチャンネルをトリガーにして波形を観測します。イネーブル制御がない IC では、イネーブル制御電圧の代わりに入力電圧を電圧プローブ 1 で測定します。

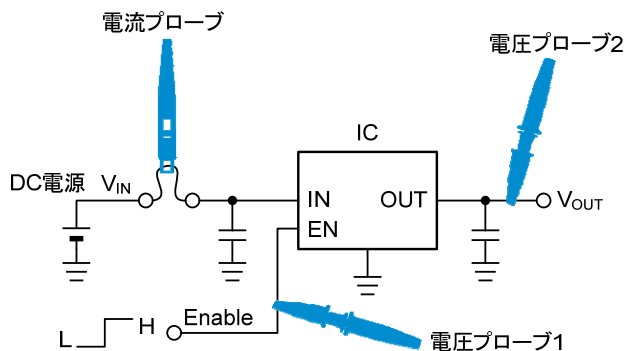


Figure 1. 起動特性評価回路

電流を Figure 2 のように IC の出力端子と出力コンデンサ（位相補償コンデンサ）の間で測定すると、電流プローブでモニタするための配線が長くなるため、インダクタ成分が付加されます。この状態で過電流保護が動作し出力が停止すると、インダクタに蓄積されたエネルギーを放出するため共振を起こし、まれに発振のような波形が観測されます (Figure.3)。

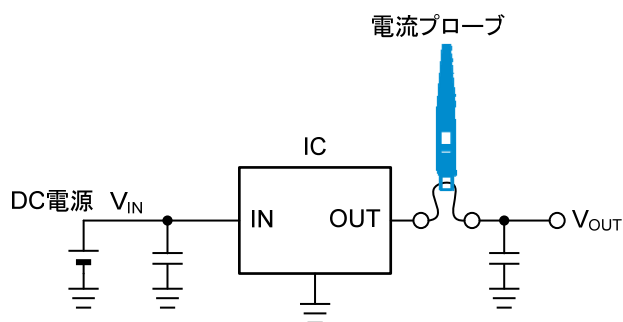
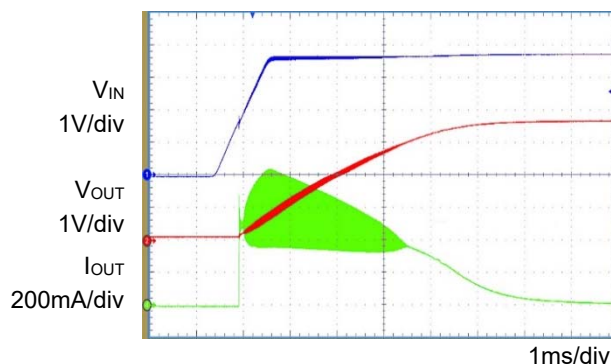


Figure 2. 出力側で電流モニタを行った評価回路

Figure 3. 測定系による共振波形
 $C_{OUT}=700\text{pF}$

電源 ON 特性

過電流保護回路にフの字特性を持ったリニアレギュレータ IC の起動特性を Figure 4 に示します。波形は上からイネーブル端子電圧、出力電圧、出力電流の順で、イネーブル電圧でトリガーをかけています。これは出力容量が 100 μ F 時の特性です。Figure 5 は同リニアレギュレータ IC の過電流保護特性でフの字（フォールドバック）カーブを描いています。

IC が起動開始直前の④点では出力電圧、電流ともにゼロで、フの字カーブでは左下からスタートします。イネーブル端子を Low から High へ移行すると IC が起動します。すると IC の出力コンデンサへ充電しようとするため突入電流が流れます。この時 IC の過電流保護回路が動作し、電流を 900mA 程度に制限します。

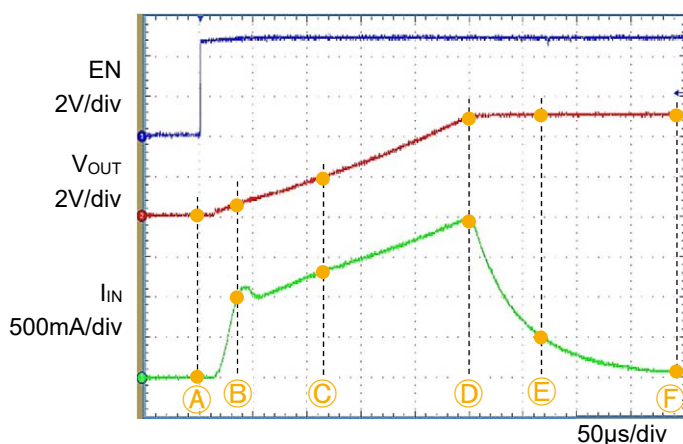


Figure 4. 起動特性

$V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=100\mu F$

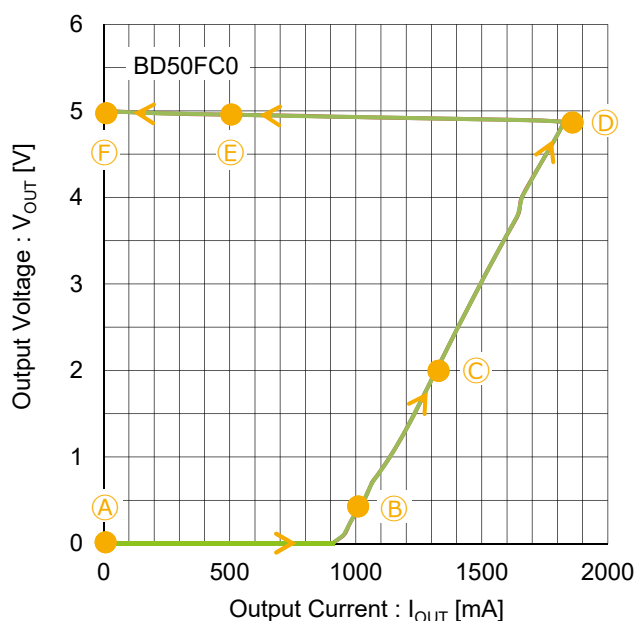


Figure 5. 過電流保護特性と突入電流の軌跡

$V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=100\mu F$

その後、出力電圧が上昇し⑧点へ移行します。これに伴いフの字カーブに沿って突入電流も増加します。さらにフの字カーブに沿って出力電圧の上昇と突入電流の増加が進み④点⑤点へと移行します。⑤点では通常動作時の電流制限値になります。出力電圧が設定電圧に近くなると、出力コンデンサへの充電電流は小さくなり⑥点⑦点へと移行します。

このように過電流保護回路にフの字特性を持ったリニアレギュレータ IC の起動特性は、ゼロ点からスタートしてフの字カーブに沿うように出力電流を制限しながら起動します。

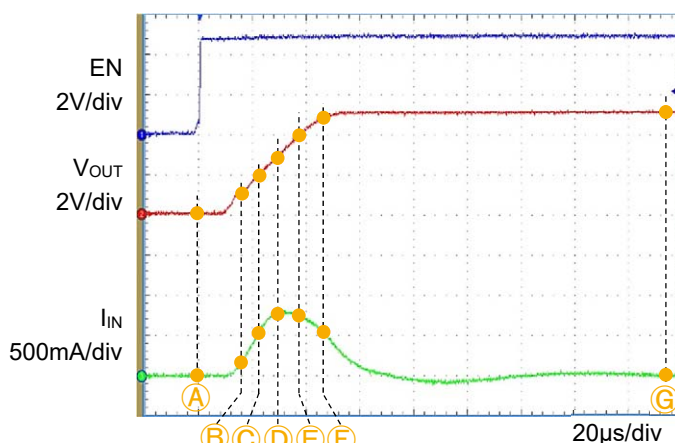


Figure 6. 起動特性

$V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=4.7\mu F$

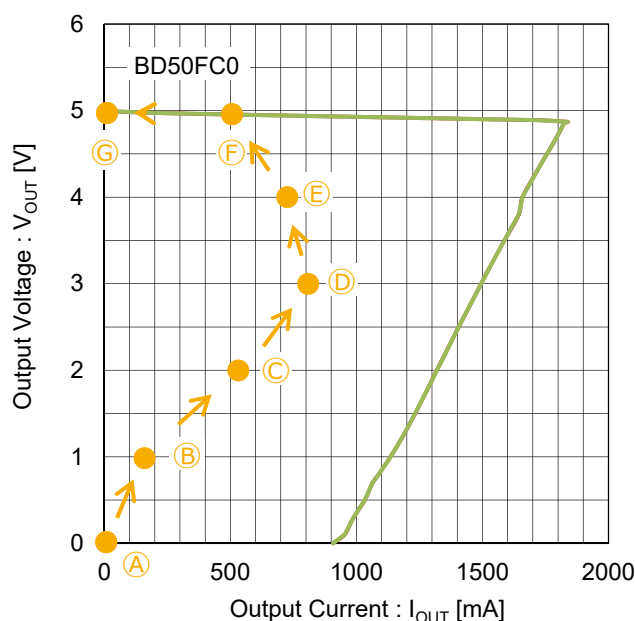


Figure 7. 過電流保護特性と突入電流の軌跡

$V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=4.7\mu F$

出力容量を 100 μ F から 4.7 μ F へ減少した時の起動特性を Figure 6 に示します。過電流保護特性と突入電流の軌跡を重ねてみると、Figure 7 のように、出力容量が小さい場合は過電流保護回路による電流制限を受けることなく起動していることが判ります。

次に起動時間について見て行きます。Figure 8 から Figure 13 に出力コンデンサの値を 1 μ F から 1000 μ F まで変化させたときの起動波形を示します。出力コンデンサの値が 1 μ F から 10 μ F では起動時の突入電流は過電流保護回路が動作する値を下回っているため電流制限を受けていません。このため出力電圧は IC 内部の基準電圧の立ち上がり時間で上昇します。起動時間が同じなので出力容量の値によって突入電流の値が違ふことが判ります。出力コンデンサの値が 47 μ F から 1000 μ F では、突入電流が過電流保護回路により電流制限を受けています。過電流保護回路が動作すると前述の Figure 5 のようにフの字カーブに沿った電流制限を受けるため、コンデンサへの充電電流が制限され、起動時間が長くなります。このように、起動時の突入電流が過電流保護回路を動作する電流値以下では、出力コンデンサの容量値に関係なく、起動時間は IC 内部の基準電圧の立ち上がり時間で決まります。起動時の突入電流が過電流保護回路を動作する電流値以上では、出力コンデンサの容量値が大きくなるほど起動時間が長くなります。

これまではイネーブル端子を制御したときの起動特性を見てきましたが、イネーブル制御機能がないときは起動時に入力の電源が立ち上がることとなります。この場合は入力コンデンサへも突入電流が流れます。電源投入時コンデンサを 0V から設定電圧まで充電する瞬間にコンデンサはショート状態となるため、ピーク電流は [入力電圧/コンデンサの ESR] となり、低 ESR コンデンサでは大きな電流になります (Figure 14)。

Figure 15 は入力にセラミックコンデンサを使用したときの起動波形を示します。実験に使用した 10 μ F セラミックコンデンサの ESR は約 3m Ω なので、12V の電源電圧が印加されると 4000A のピーク電流が流れる計算になり、電源とグラウンド間がショート状態になります。実際の波形では、電源電圧が 5V 時に電流のピーク値 12A に達し、急激に降下しています。ピーク電流は供給側電源能力の最大値で決まり、入力コンデンサへの充電が完了すると急激に電流が無くなるため大きなリングングが発生しています。その後は出力コンデンサの突入電流へと続きます。このように低 ESR コンデンサが付いている電源ラインを高速に立ち上げると大きな突入電流が流れるため、供給側電源が破損したり、過電流保護回路が動作して供給を停止したりする場合があります。突入電流のピーク値を下げるには、電源の立ち上がり速度を遅くする設計が必要です。

Figure 16 は入力にアルミ電解コンデンサを使用した起動波形を示します。実験に使用した 10 μ F アルミ電解コンデンサの ESR は約 1 Ω なので、12V 印加時は 12A のピーク電流が流れる計算になります。実

際の波形では、電源電圧が 9V 時に 9A のピーク電流となりコンデンサへの充電が終了しています。その後の波形は出力コンデンサへの突入電流と続きます。このようにセラミックコンデンサ使用時よりはピーク電流が抑えられますが、供給側に電流能力がないと前述と同じ問題が起こるため、電源立ち上げ速度に関する問題を考慮した設計をする必要があります。

いずれにしてもイネーブル制御がない IC では入力コンデンサと出力コンデンサへの充電電流が同時に観測できるため切り分けが困難です。入力コンデンサの値を IC が正常動作する最小値へ変更することや、出力側で電流モニタ (Figure 2) するなどの工夫が必要です。

ソフトスタート機能を持った電源 ON 特性

ソフトスタート機能は、出力電圧をゆっくり上昇させることにより、出力コンデンサへの充電電流のピーク値を抑える効果があります。また、ソフトスタート時間を IC 内部で固定している IC (BDxxGC0、BDxxGA5、BDxxGA3、BDxxHC5、BDxxHC0、BDxxHA5、BDxxHA3、BDxxIC0、BDxxIA5 など) は、出力コンデンサの値が大きくなると充電電流が増えるため、過電流保護回路により電流制限を受け、ソフトスタート時間内に充電が完了しなくなります。これらの起動特性について見て行きます。

Figure 17 から Figure 22 に出力コンデンサを 10 μ F から 1000 μ F まで変化させたときの起動波形を示します。

まず出力コンデンサが 10 μ F の Figure 17 で起動シーケンスを説明します。イネーブル制御により出力電圧が一定の傾きを持ってゆっくり上昇を始めます。この傾きはソフトスタート制御によるもので、立ち上がり時間はこの IC の場合 800 μ s (設定電圧が 95%になるまでの時間) で設計されています。出力電圧が 0.1V 立ち上がった所で、出力電流に 116mA の突入電流が観測されていますが、これはソフトスタート回路の動作遅延によるもので、出力が制御可能な状態になると電流は減少します (A 区間)。その後は出力電圧が時間と共に一定の傾きで上昇するため、出力電流は一定で推移します (B 区間)。つまりピーク電流は 42mA に抑制されています。出力が設定電圧に近づくとソフトスタート回路の上昇速度が遅くなるため出力電流が減少に転じます (C 区間)。

Figure 18 は出力コンデンサを 100 μ F に増やしたときの波形です。10 μ F 時にくらべて充電に必要な電荷量が増えたため出力電流が増えています。ピーク電流は 350mA に抑制されています。Figure 17 のイネーブル制御直後に見られた突入電流は見られませんが、これはその後に流れるピーク電流がそれより大きいため、マスキングされて見えなくなっているためです。

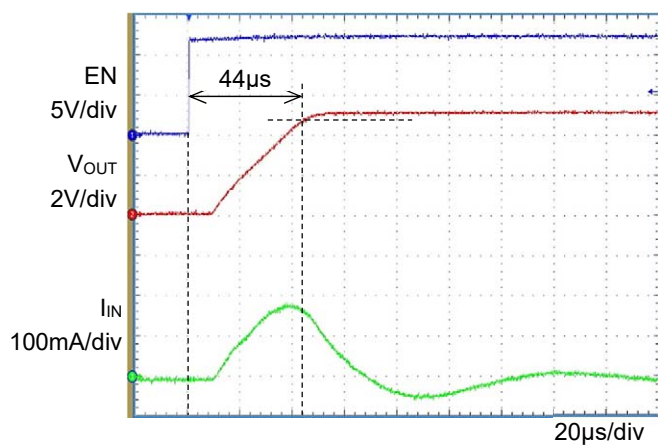


Figure 8. 起動波形
 $V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=1\mu F$

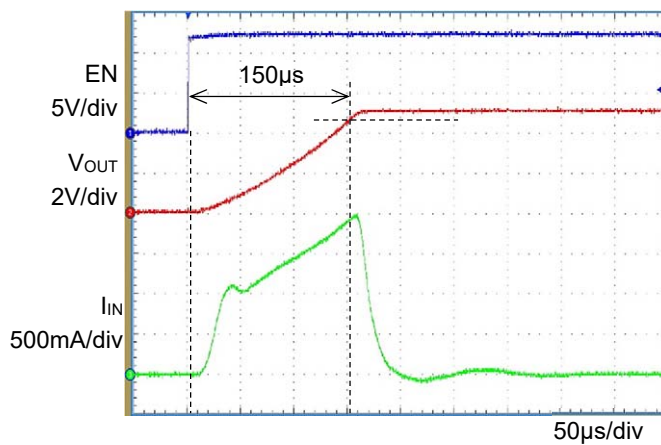


Figure 11. 起動波形
 $V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=47\mu F$

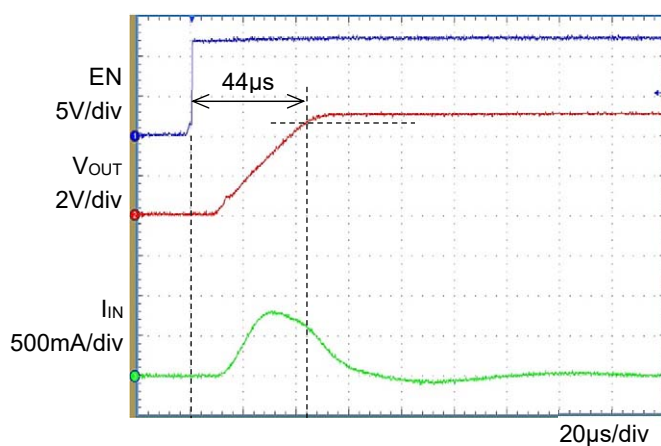


Figure 9. 起動波形
 $V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=4.7\mu F$

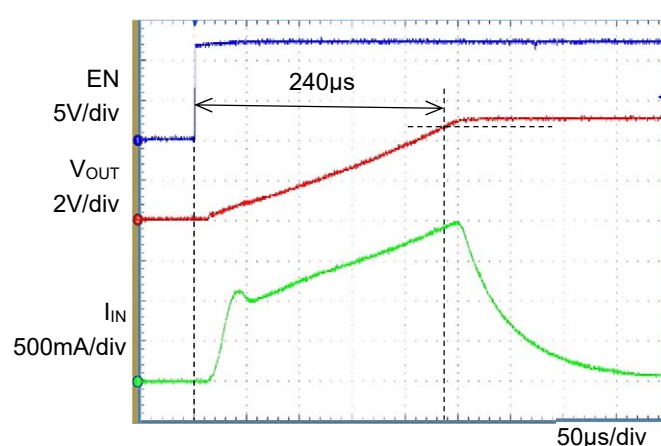


Figure 12. 起動波形
 $V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=100\mu F$

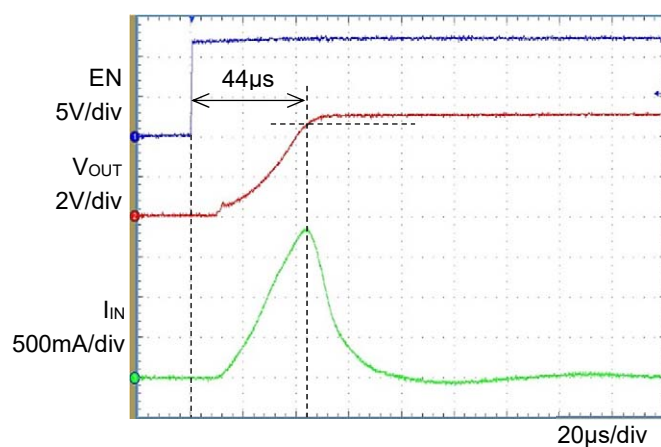


Figure 10. 起動波形
 $V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=10\mu F$

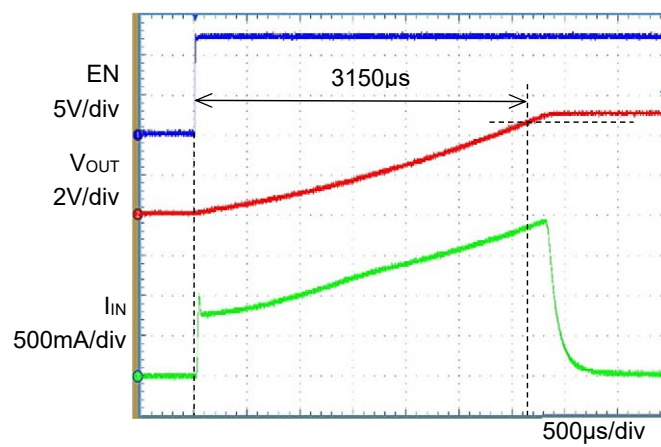


Figure 13. 起動波形
 $V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{OUT}=1000\mu F$

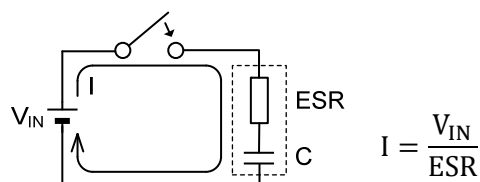


Figure 14. コンデンサへの突入電流

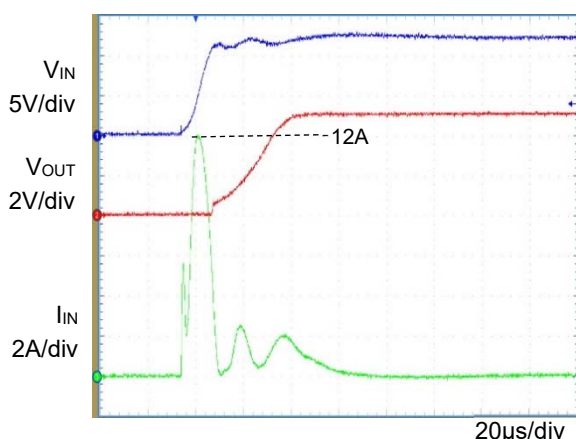


Figure 15. 入力にセラミックコンデンサを使用したときの
起動波形

$V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{IN}=10\mu F$, $C_{OUT}=10\mu F$

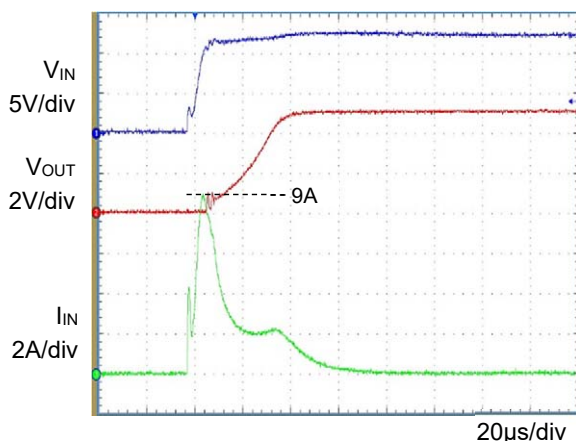


Figure 16. 入力にアルミ電解コンデンサを使用したとき
の起動波形

$V_{IN}=12V$, $V_{OUT}=5V$, $C_{IN}=10\mu F$, $C_{OUT}=10\mu F$

Figure 19 は出力コンデンサを 220 μF に増やしたときの波形です。100 μF 時にくらべて充電に必要な電荷量が増えたため出力電流が増えています、ピーク電流は 840mA に抑制されています。

Figure 17 から Figure 19 の条件で、過電流保護特性と突入電流の軌跡を重ねてみると、Figure 23 のように過電流保護回路による電流制限を受けることなく起動していることが判ります。また電流制限を受けていないため、ソフトスタート時間は設計値である約 800 μs で立

ち上がっています。

Figure 20 は出力コンデンサを 330 μF に増やしたときの起動波形です。220 μF 時にくらべて充電に必要な電荷量が増えたため出力電流がさらに増えています。その結果、過電流保護回路が動作し出力電流を制限しながら出力電圧が上昇しています(㉔区間)。出力が設定電圧に近づいた時点で、まだソフトスタート立ち上がり時間(800 μs)内にあるためソフトスタート回路の動作が継続され、出力電流が減少に転じます(㉕区間)。

Figure 20 の条件で、過電流保護特性と突入電流の軌跡を重ねてみると Figure 24 になります。Figure 20 の㉔区間は、フの字カーブに沿って電流制限を受けながら立ち上がり、㉕区間は電流制限から外れソフトスタート動作の終わりの段階へ移行していることが判ります。

Figure 21 と Figure 22 は出力コンデンサをそれぞれ 470 μF および 1000 μF 時の起動波形です。330 μF 時よりもさらに充電電流が増えるため、両者ともに終始過電流保護回路の電流制限を受けながら起動しています。この状態は、前述のソフトスタート機能がない場合の動作と同じで、コンデンサ値が大きくなるに従って起動時間が長くなります (Figure 5, Figure 11~13)。

今まではイネーブル制御によるソフトスタート特性を見てきましたが、次に入力電源(V_{IN})の立ち上がり時間がソフトスタート立ち上がり時間(800 μs)よりも長い場合の起動波形を Figure 25、Figure 26 に示します。測定条件は IC のイネーブル端子を入力電圧に接続しています。この IC のイネーブル閾値電圧は約 1.6V のため、入力電圧が 1.6V 以下では出力がオフ状態になります。㉔区間は入力電圧が立ち上がり始めていますが、電圧が 1.6V 以下のため出力はまだゼロです。また入力コンデンサへの突入電流が観測されています。㉕区間は入力電圧が 1.6V を超えたため出力がオン状態になり急速に立ち上がるため、出力コンデンサへ 680mA の突入電流が観測されています。出力電圧の上昇が緩やかになると電流は減少します。㉖区間は入力電圧に追従する形で出力電圧が緩やかに立ち上がるため、出力コンデンサへの突入電流は 10mA~30mA と小さくなっています。このように入力電源の立ち上がり時間がソフトスタート立ち上がり時間(800 μs)よりも長い場合は、入力電源の立ち上がり時間で出力の立ち上がり時間が決まります。

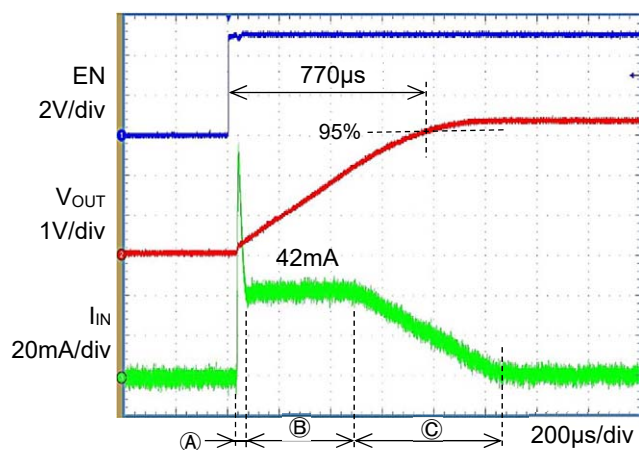


Figure 17. 起動波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=10\mu F$
(BD33IC0WEFJ)

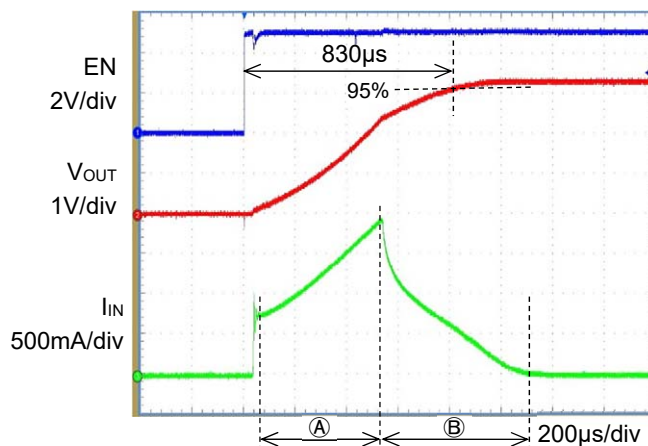


Figure 20. 起動波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=330\mu F$
(BD33IC0WEFJ)

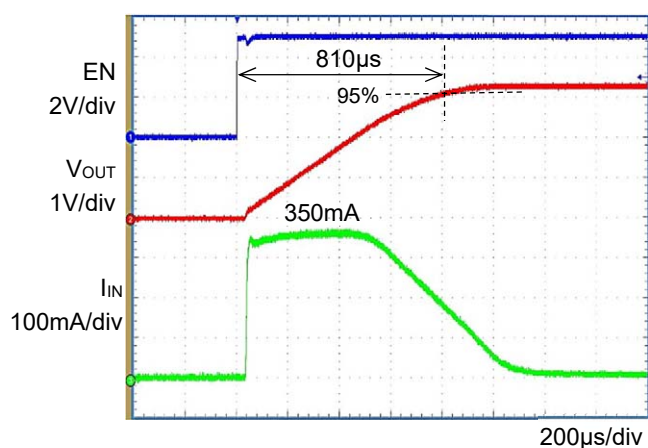


Figure 18. 起動波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=100\mu F$
(BD33IC0WEFJ)

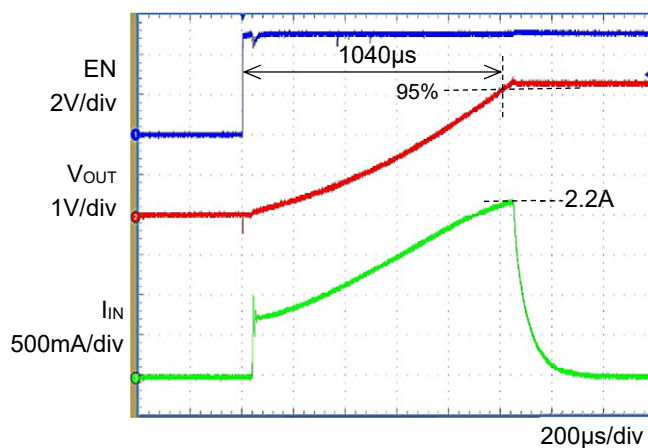


Figure 21. 起動波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=470\mu F$
(BD33IC0WEFJ)

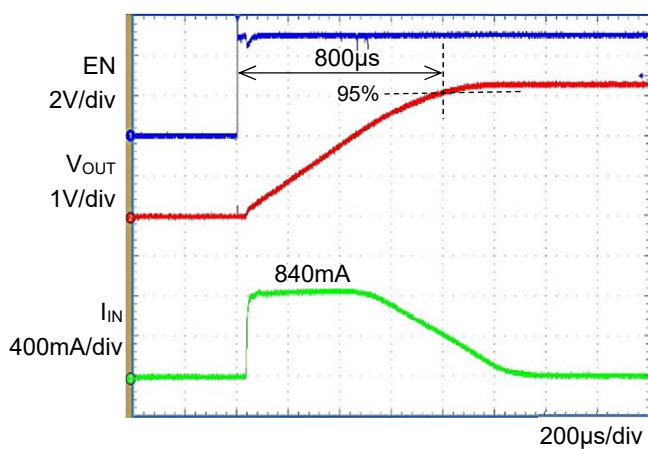


Figure 19. 起動波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$
(BD33IC0WEFJ)

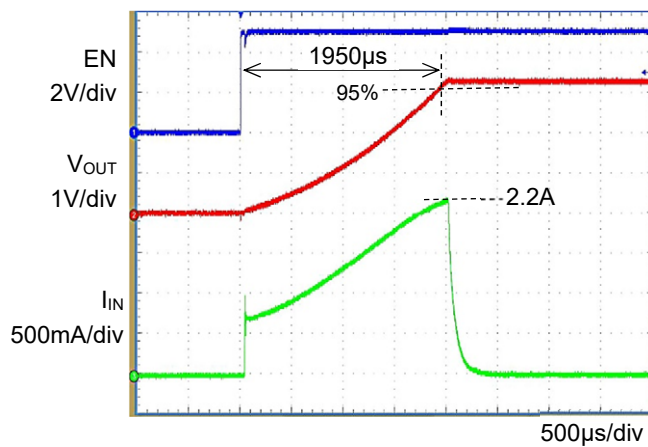


Figure 22. 起動波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=1000\mu F$
(BD33IC0WEFJ)

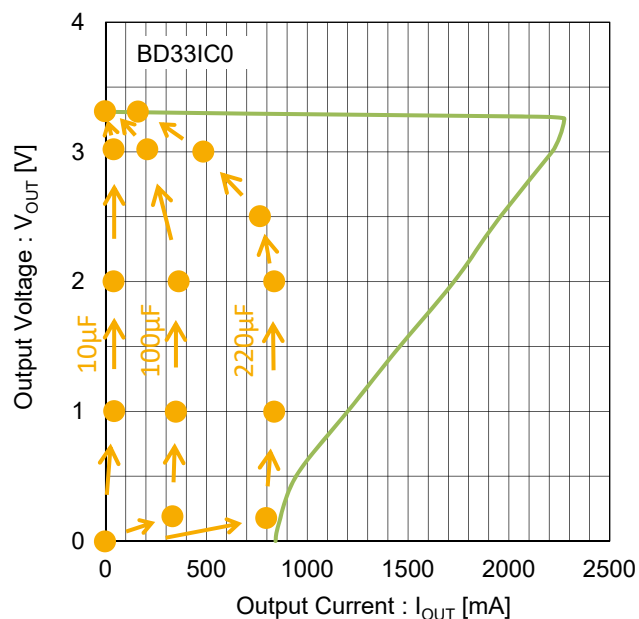


Figure 23. 過電流保護特性と突入電流の軌跡
 $V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=10\mu F, 100\mu F, 220\mu F$
 (BD33IC0WEFJ)

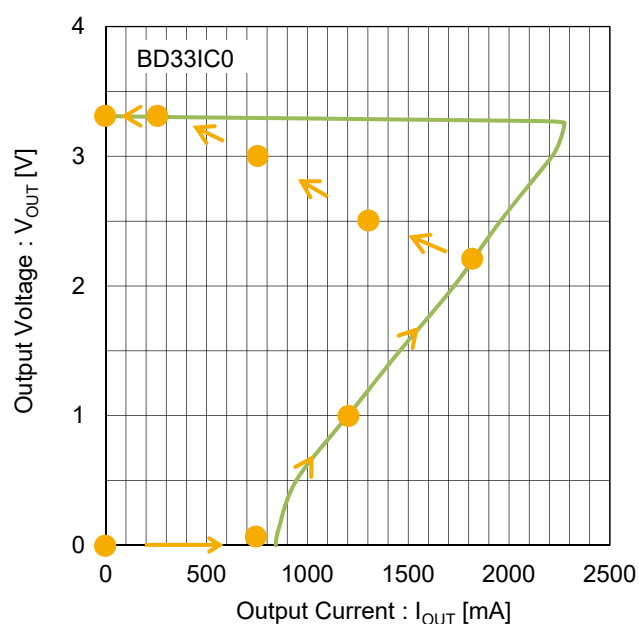


Figure 24. 過電流保護特性と突入電流の軌跡
 $V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=330\mu F$
 (BD33IC0WEFJ)

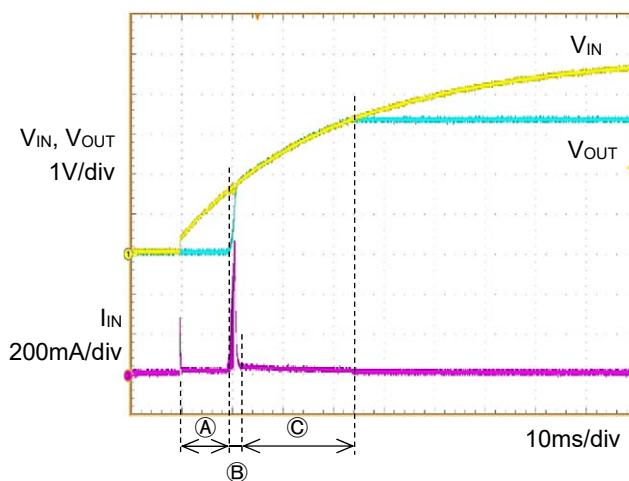


Figure 25. 起動波形
 $V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$
 (BD33IC0WEFJ, $EN=V_{IN}$)

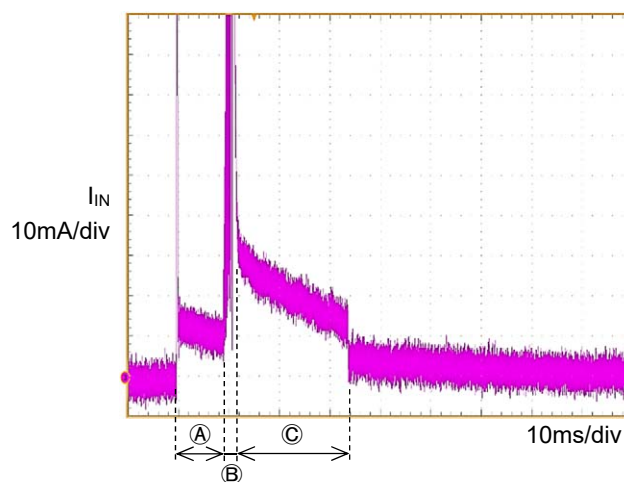


Figure 26. 起動波形 I_{OUT} 縦軸拡大
 $V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$
 (BD33IC0WEFJ, $EN=V_{IN}$)

電源オフ特性

Figure 27 にイネーブル制御で出力をオフしたときの波形を示します。これは無負荷の状態なので、出力コンデンサの電荷は出力端子とグラウンド間にある帰還抵抗を経由して放電されます。負荷がある場合は負荷抵抗に応じて放電時間が短くなります。放電時間は単純な抵抗の場合は次式で求めることができます。

$$t = -CR \times \ln \frac{V_C}{V_O} \quad [\text{sec}] \quad (1)$$

C : 出力コンデンサ容量 [F]

R : 負荷抵抗 [Ω]

V_O : 出力電圧 [V]

V_C : 放電後電圧 [V]

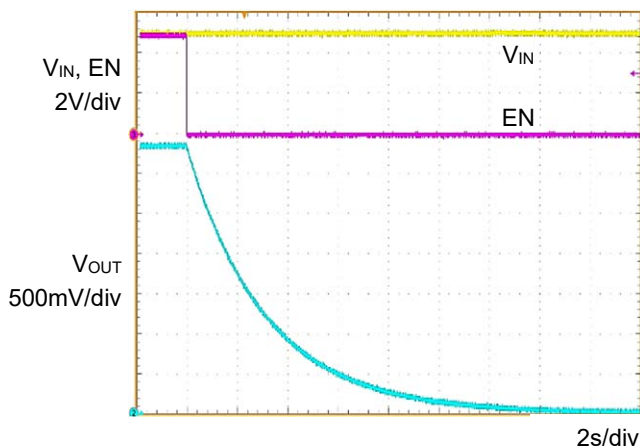


Figure 27. EN 制御による電源オフ波形
 $V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$, 無負荷
 (BD33IC0WEFJ)

Figure 28 は入力電圧が急峻に低下したときの出力波形を示します。この例で使用した LDO は出力 Tr が MOS 型で、 Tr に並列に寄生ダイオードが存在します。ダイオードの極性は出力側がアノード、入力側がカソードになるため、入力電圧が低下すると出力電圧は入力電圧に追従する形で低下します。入力電圧が 0V まで低下すると出力は寄生ダイオードの順方向電圧を残した電圧で降下が緩やかになります。その後は負荷抵抗の時定数で電圧が降下して行きます。

Figure 29 は入力電圧が緩やかに低下したときの出力波形を示します。入力電圧が出力電圧と同じ電圧まで低下すると出力 Tr が飽和するため、出力電圧は入力電圧に追従して低下します。入力電圧が 1.6V の地点で一旦出力電圧の降下がかなり緩やかになりますが、これはこの例で使用した LDO のイネーブル閾値電圧が 1.6V にあり、この地点で LDO の出力がハイインピーダンスになるためです。その後は Figure 28 と同じで、出力 Tr の寄生ダイオードにより、入力電圧が低下すると出力電圧は入力電圧に追従する形で低下します。入力電

圧が 0V まで低下すると出力は寄生ダイオードの順方向電圧を残した電圧で降下がさらに緩やかになります。その後は負荷抵抗の時定数で電圧が降下して行きます。

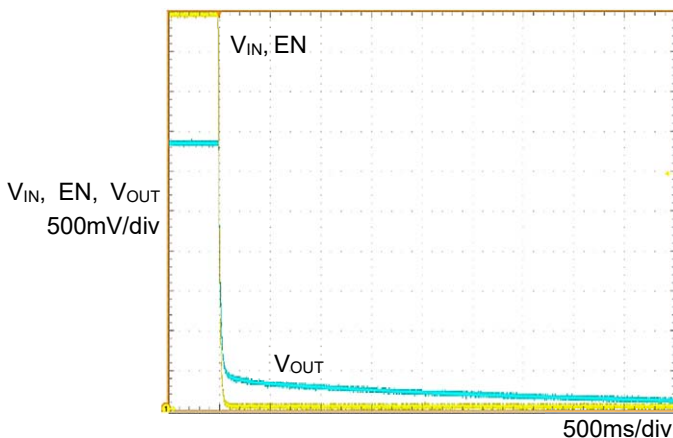


Figure 28. 入力が急峻に低下したときの
 電源オフ波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$, 無負荷
 (BD33IC0WEFJ, $EN=V_{IN}$)

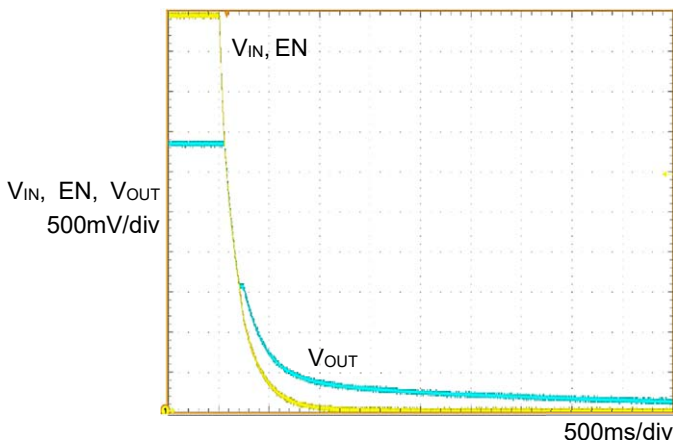


Figure 29. 入力が緩やかに低下したときの
 電源オフ波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$, 無負荷
 (BD33IC0WEFJ, $EN=V_{IN}$)

Figure 30 は入力オープンとなった状態で電源からの供給が停止したときの電源オフ波形を示します。入力コンデンサの電荷は IC の動作電流で消費されるため入力電圧が低下します。入力電圧が出力電圧と同じ電圧まで低下すると出力 Tr が飽和するため、出力電圧は入力電圧に追従して低下します。入力電圧が 1.6V の地点でイネーブルの閾値電圧に達し IC の消費電流がゼロになるため入力電圧の低下は緩やかになり、その後入力コンデンサの電荷は自然放電されます。出力電圧は、無負荷状態なので出力コンデンサの電荷は出力端子とグラウンド間にある帰還抵抗を経由して放電されます。

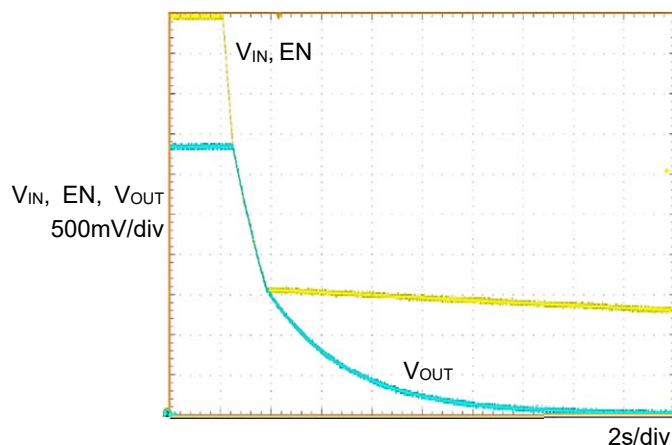


Figure 30. 入力オープンになったときの電源オフ波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=220\mu F$, 無負荷
(BD33IC0WEFJ, $EN=V_{IN}$)

出力ディスチャージ機能を持った電源オフ特性

Figure 31 は出力ディスチャージ機能を搭載した LDO の電源オフ波形を示します。イネーブルがオフになると、出力 Tr がオフになると同時に出力端子とグラウンド間にある低抵抗がオンし、出力コンデンサの電荷を急速に放電します (Figure 32)。放電時間は前述の式 1 で計算できます。出力ディスチャージ回路は、IC へ電源（入力電圧）が供給されている状態で、イネーブル制御した場合に動作します。入力電圧が降下する場合は出力ディスチャージ回路が動作しないため、Figure 28 や Figure 29 のように通常の電源オフ特性になります。

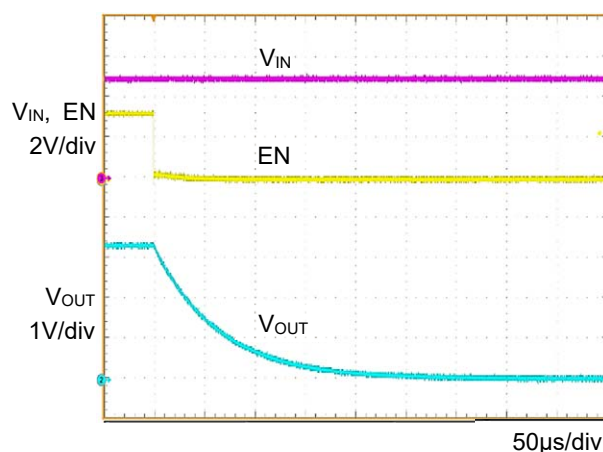


Figure 31. 出力ディスチャージ機能付き LDO の電源オフ波形

$V_{IN}=5V$, $V_{OUT}=3.3V$, $C_{OUT}=2.2\mu F$, 無負荷
(BU33TD3WG)

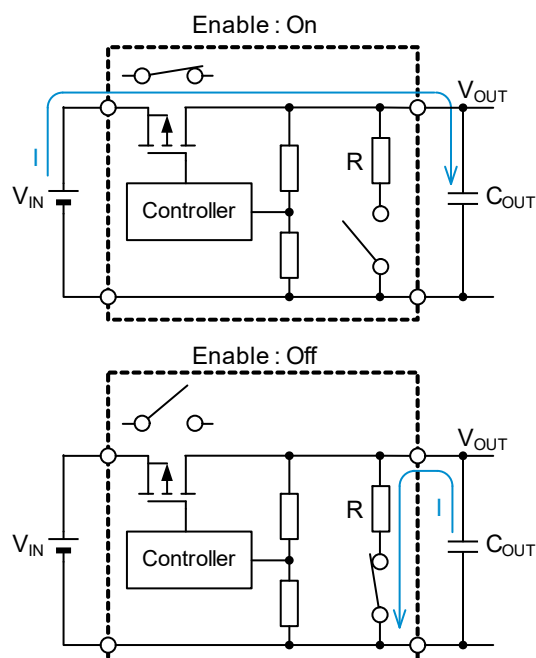


Figure 32. 出力ディスチャージ機能

ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上でご使用ください。
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>