

# DC/DC コンバーターの仕様決定時に考慮すべきパラメータ

De-Xiang Huang, Chief Engineer, Calex Mfg. Co., Inc.

## 目次

概要 (Abstract)	2
I. 紹介 (Introduction)	2
II. 高い電気性能 (High Electrical Performance)	2
精密な出力電圧 (Accurate Output Voltage)	2
優れた負荷とライン調整 (Excellent Load and Line Regulation)	3
大変小さな負荷過渡オーバシュートと高速過渡応答	3
大変低いターンオン・オーバシュート (Very Low Turn on Overshoot)	4
高い効率 (High Efficiency)	4
超低ノイズ (Ultra Low Noise)	4
低反射入力リップル電流 (Low Reflected Input Ripple Current)	5
ループ安定性 (Loop Stability)	5
III. 故障保護 (Fault Protection)	6
短絡電流をフルスケール電流比率まで低下	6
熱による停止 (Thermal Shutdown)	6
過電圧保護 (Over-Voltage Protection)	6
低電圧時のロックアウト (Under-Voltage Lockout)	7
高い信頼性 (High Reliability)	7
IV. 役に立つ機能 (Useful Functions)	8
遠隔オンオフ制御 (Remote On/Off Control)	8
出力電圧トリム (Output Voltage Trim)	8
-40 °C でのコールドスタート (Cold Start at -40 °C)	8
入力と出力の分離 (Isolation between Input and output)	8
感謝 (Acknowledgement)	8
出典 (Reference)	8

# DC/DC コンバーターの仕様決定時に考慮すべきパラメータ

De-Xiang Huang, Chief Engineer, Calex Mfg. Co., Inc.

## 概要 (Abstract)

通信用、産業用および民生用のアプリケーションには高性能の電圧切替可能な電源 (switching power supplies) が必要です。この書類では商業的に入手可能な高性能のDC/DC コンバーターの性能について説明します。この書類では主にハーフブリックタイプのコンバーターが例として使用されます。

## I. 紹介 (Introduction)

DC/DC コンバーターの性能はここ数年間で著しく進歩しました。DC/DC コンバーターはさまざまなアプリケーションのための新しいエレクトロニクスの設計で使用が増えています。通信産業やその他の産業では彼らのアプリケーションで使用される電源に対する技術要求は大変厳しいです。例えば、正確な安定した出力電圧 (output voltage)、優れた負荷レギュレーション (load regulation)、高速過渡応答 (fast transient response)、有限短絡電流 (limited short circuit current)、大変低いノイズ (very low noise)、および大変低いEMI (very low EMI) などの要求事項などがあります。Calex HEシリーズ単一出力・ハーフブリックDC/DC コンバーター (Calex HE Series single output Half Brick DC/DC converters) の性能はこれらの要求事項を議論するためのベースとなります。

## II. 高い電気性能 (High Electrical Performance)

### 精密な出力電圧 (Accurate Output Voltage)

電気装置の性能はその装置の中で使用される DC 電源電圧によって変化するものです。電源電圧は性能の変動を少なくするために、正確にかつ一定に保持する必要があります。HE シリーズの初期設定最大電圧誤差は室温で 1% です。通常は 0.5% 以下です。

DC/DC コンバーターの中には出力電圧調整のために電位計が広く使われます。多くの商業的トリム電位計 (trim potentiometers) の温度係数 (temperature coefficient (T.C.)) は明確には特定されていません。メーカーは通常、抵抗器用には温度係数 (T.C) を持ちますが、電位計の摺動子部分 (wiper portion) に対しては温度係数 (T.C) を持ちません。摺動子の温度係数は低い場合があります。あるいは、20 または 100 ppm/°C になる電位計の抵抗器と比較して、数百 ppm/°C の高さの場合もあります。電位計の温度係数は主に電位計の機械的構造 (mechanical structure) とその線熱膨張 (thermal linear expansion [1]) に依存します。抵抗器の温度係数は追加の誤差原因です。電位計の温度係数は電圧分配器 (voltage divider) の中に使用される他の固定抵抗器の温度係数とも異なります。出力電圧調整のための電位計はCalexの大抵の新しい設計で既に使われていません。このため、高い信頼性、低温度係数、および長期間安定性の達成が可能です。稼働中に調整する必要がありません。出力電圧の温度係数は通常、20 ppm/°C で、最大、50 ~ 100 ppm/°C [2] です。競合会社のコンバーターの中には数パーセントの初期設定電圧誤差と 500 ppm/°C の温度係数を持つものがあります。これは操作プロファイル (operational profile) 中に数パーセントの出力電圧ドリフトを発生する原因となります。

## 優れた負荷とライン調整 (Excellent Load and Line Regulation)

出力電圧はさまざまな入力ライン電圧と出力負荷電流を一定に保たねばなりません。Calex HE シリーズの場合、最小入力電圧 (例えば36 V) から最大入力電圧 (例えば75 V) までの典型的なラインレギュレーションは、最大と最小の負荷電流で 0.002% です。最小出力電流 (例えば 0.75 A) から最大出力電流 (例えば 15 A) までの典型的な負荷電圧レギュレーションは 0.01% です。これは可変負荷アプリケーション (variable load applications) の場合には大変重要です。

強電流 (heavy current) により、リード抵抗 (lead resistance)、および/または接触抵抗 (contact resistance) は比較的大きな電圧降下 (voltage drop) の原因になります。従って、ユーザの選択するポイントで一定電圧を維持するために、Calex HE Seriesには遠隔センシング機能 (remote sensing function) が利用できます。遠隔センシング設計が正しくないと、ラインと負荷のレギュレーションが著しく低下します。遠隔センシングが貴方のアプリケーションで使用される場合、遠隔センシング条件でラインと負荷のレギュレーションのテストを行うことが必要です。通常の最大ライン電圧レギュレーションと最大負荷電圧レギュレーションが表1に示されています。2個の出力リード (output leads) の0.5 V の電圧降下が遠隔センシングテストに適用されます。

表 1. HE シリーズのラインレギュレーションと負荷レギュレーション  
(Line & Load Regulations of HE Series)

	通常	最大
Line Regulation ラインレギュレーション (36 V ~ 75 V)	0.002%	0.1%
Line Regulation under Remote Sensing 遠隔センシング条件でのラインレギュレーション (36 V ~ 75 V)	0.002%	0.1%
Load Voltage Regulation 負荷電圧レギュレーション (5% ~ 100% Load 負荷)	0.01%	0.2%
Load Voltage Regulation under Remote Sensing 遠隔センシング条件での負荷電圧レギュレーション (5% ~ 100% Load)	0.015%	0.2%

競合会社の DC/DC コンバーターの中には数パーセントのラインレギュレーションと負荷電圧レギュレーションを持つものがあります。さらに、彼らの中には遠隔センシング条件でラインレギュレーション、および/または負荷レギュレーションを持たないものもあります。これは電圧感度アプリケーション (voltage sensitive applications) に問題を起こす原因になります。

## 大変小さな負荷過渡オーバシュートと高速過渡応答

### (Very Small Load Transient Overshoot and Fast Transient Response)

現実のアプリケーションで、大きな出力電圧変動を起こす原因となりうる突発的な大きな負荷電流変化はまれではありません。大きな出力電圧の変化は論理回路 (logic circuits) をトリガするか、アナログ回路に干渉する場合があります。従って、ピーク間の電圧変化とそれらの持続時間を減らす必要があります。

出力負荷電流が50 % から 75%にまたは 25%に変化するとき、HE シリーズの通常出力電圧オーバーシュートは、（これは負荷過渡オーバーシュート（load transient overshoot）または動的負荷レギュレーション（dynamic load regulation）と呼ばれますが）、たったの2%だけです。負荷過渡復帰時間（load transient recovery time）は約100  $\mu$ Sです。双方は優れた性能の例です。このレベルの性能は最も論理的でアナログ回路問題のない操作を行います。負荷過渡波形（load transient waveform）は図1に示されています。

いくつかの競合会社のコンバーターの付加過渡オーバーシュート（load transient overshoot）は10%を超えるものもあり、アプリケーションによっては混信（干渉）問題を起こすことがあります。

例えば、出力電圧が24 Vである場合、負荷過渡オーバーシュート電圧（load transient overshoot voltage）が2.4 Vに達します。これは多くのアプリケーションに受け入れられません。いくつかの商業的コンバーターの負荷過渡復帰時間（load transient recovery time）の中は10ミリ秒（ten milliseconds）またはそれ以上のものがあります。

### 大変低いターンオン・オーバーシュート（Very Low Turn on Overshoot）

HE シリーズの場合のターンオン・オーバーシュート電圧は、ソフトスタート技術（Soft start technology）とフィードバック・ループ（feedback loop）中の正しいコントロールを使ってゼロに維持されます。いくつかの競合会社の製品には出力電圧が10%を超えるものがあります。この仕様はこれらの競合製品には恐らく表示されていません。

### 高い効率（High Efficiency）

5 V ~ 24 V の出力電圧に対するHE シリーズの効率は全負荷で87 ~ 89 %です。これは、ゼロ電圧スイッチング（zero voltage switching）、ゼロ電流スイッチング（zero current switching）または低ノイズに対する同期整流（synchronous rectification for lower noise）、より低いEMI とより高い信頼性の機能を使わないで達成されます。同様のトポロジー（topology）を持つ多くの商業的ハーフブリックタイプの効率は数パーセント低く、同じヒートシンクを使用するときの温度上昇はたびたび高くなります。金属ヒートシンクを使用しない75 W出力でのハーフブリックDC/DC コンバーター（Half Brick DC/DC converter）の5%の効率の差は、35  $^{\circ}$ Cの温度差を生じる可能性があります。HE シリーズの負荷無しの入力電流はたったの12 mAです。いくつかの競合会社のコンバーターには負荷無しの入力電流の場合、20または40 mA以上のものがあります。

### 超低ノイズ（Ultra Low Noise）

線形レギュレータ（linear regulators）に比べて、DC/DC コンバーターはより高い効率を持ちます。然しながら、DC/DC コンバーターも過去にそれらの使用を制限したことがある、より高いピークツーピーク・ノイズを持ちます。低ノイズレベルは通信と精密制御アプリケーションには重要です。周期的確率差異（periodic and random deviation (PAR)）は、規定のバンド幅で測定されたすべてのリップル成分とノイズ成分の合計で、特に別記がなければ、ピークツーピークの数値（peak to peak values [3]）で規定されます。48 V input, 5 V 15 A output におけるHE コンバーターに対する周期的確率差異は、たったの16 mVです。これは設計考察（design considerations）と慎重なプリント基板のレイアウト（printed circuit board layout）によるものです。Calex は、同じテスト条件で100 mV ノイズ以上ある5 V出力の商用ハーフブリックタイプをいくつか測定したことがあります。HE シリーズに対するノイズ測定は図1でも参照できます。

ノイズを測定するとき、納入されるプローブのアース線 (ground lead) によるピックアップノイズ (pick-up noise) を減らすことが重要です。プローブケーブルにコモンモード・チョーク (common mode choke) に加えるとコモンモード・ノイズを減らすことができます。ケーブルインピーダンス (例えば、50 ohm) をテスト機器の入力に合わせても、移送ライン効果 (transmission line effect [4]) により、高周波ノイズ電圧の測定誤差を減らすことができます。二乗平均平方根 (RMS) のノイズ数値が必要な場合、ワイドバンドのマルチメータまたはオシロスコープを使って下さい。これを使わないと、読取は実際のノイズ電圧より低くなる場合があります。

出力パスの中のACリップル電流 (ripple current) の放射によるEMI問題を減らすために、さらに環境からのノイズピックアップを減らすために、アプリケーションにおける出力パスのループエリアは最小化しなければなりません。

### 低反射入力リップル電流 (Low Reflected Input Ripple Current)

入力反射 (誘導とも呼ばれる) リップル電流はバッテリーまたはDC電源を行き来するパスの中を流れるAC電流部分です。このパスのループエリアが大きい場合、反射リップル電流はEMI問題を生じる可能性のある磁界を生成します。このパスのループエリアを減らし、より低い反射リップル電流とより低いEMIのDC/DCコンバーターを選択することが必要です。HEシリーズの反射リップル電流は通常、たったの10 mAです。Calexは同じテスト条件で100 mAリップル電流以上を持つ他社の商用ハーフトリックタイプを測定したことがあります。EMIはFCC Class AとBを満足すべきアプリケーションにとって重要な問題です。その場合、EMIをさらに減らすために、微分フィルタ (differential filters) とコモンモード・フィルタ (common mode filters) を追加することが必要です。

DC電源からの入力リップルはHEシリーズコンバーターによって60 dB (120Hz) 拒否されます。

### ループ安定性 (Loop Stability)

フィードバック・ループ応答 (feedback loop response) を変更する出力に追加のコンデンサ (capacitors) またはLC filtersを加えることはユーザにとって極めて一般的です。コンバーターが十分な設計余裕 (design margin) を持たない場合、振動 (oscillation) を起こす場合があります。コンバーターの設計技術者にとっては、フィードバック・ループ (feedback loop) の整合性を確認するためにボード線図 (Bode plots) を使って、DC/DCコンバーターの位相マージン (phase margin) とゲインマージン (gain margin) をテストすることが必要です。

HEシリーズコンバーターの位相マージンとゲインマージンは次の異なるアプリケーションの条件で次のテストを行いました。;遠隔センシングのある無し条件と追加コンデンサのある無し条件でテスト実施。例えば、48S5.15HE (出力5 V, 15 Aコンバーター) の位相マージンは73度です。並列のいくつかのLitz wiresで接続された並列の00  $\mu$  Fタンタルコンデンサ (tantalum capacitors) 50個で作られた外部の5,000  $\mu$  Fコンデンサによる遠隔センシング条件で、ゲインマージンは20dBです。

### III. 故障保護 (Fault Protection)

#### 短絡電流をフルスケール電流比率まで低下

##### (Lower Short Circuit Current to Full Scale Current Ratio)

多くの DC/DC コンバーターのユーザは故障状態での保護のための有限短絡電流 (limited short circuit current) を必要とします。短絡保護の性能は設計の違いにより大きく変わります。商業的に入手可能なパルス幅変調コントローラ (Pulse Width Modulation (PWM) controller) は過負荷状態における電流制限で組立てられています。しかし、完全短絡条件で (under a dead short circuit condition) 定格電流の150% または 180%以下に電流を制限することは大変難しいことです。短絡条件では、多くの設計が定格出力電流より何倍も高い短絡電流を起こします。このタイプの設計はコンバーターのオーバヒートまたは完全短絡による故障を起こす場合があります、UL 要求 (製品認証サービス) を満たしません。

Calex HE シリーズコンバーターはいくつかの短絡保護技術を使っています。例えば、パルス幅変調電流制限 (PWM current limits)、ボルト秒クランプ (volt-seconds clamps)、周波数フォールドバック (frequency fold-back) 及び完全短絡 (dead short) 状態のシャットダウンがあります。2個の出力ピンの間の距離は1.4"です。HE シリーズコンバーターの出力が1.4" または 1.5" の銅線によって数時間短絡する場合、コンバーターは復帰します。そして、熱遮断回路 (thermal shutdown circuit) は作動しないでそのままクールです。コンバーターは短絡したワイヤが除去されると直ぐに回復します。短絡回路電流を数量化するために、特別、下方出力電圧と上方出力電流のために完全短絡回路電流をテストするため、電流プローブまたはマイナス電圧をプルダウンしたエレクトロニクスのロードが使用できます。例えば、48S5.15HE の最大短絡回路電流は22.5 A以下で、定格電流の150 % です。代表的な曲線が図2に示されています。出力電流が一定の電流レベル (図の中では19.5A) に到達するとき、コンバーターはしゃっくりモード (hiccup mode) で作動します。最大ピーク電流はそれでも、19.5 A以下です。Calex Quarter brick 48S5.15QH の場合の短絡電流のもう一つの代表的な曲線は図3に示されています。出力電圧が10 mV以下でも、短絡回路電流は23.5 A以下で、定格電流の 157 % です。

電源が図4の表示通り、電流フォールドバック特徴 (current fold-back characteristics) を持つ場合、ある条件によっては、出力電圧はターンオンしない場合があります。なぜならば、電圧が同じ出力電流に対して高く、または低くなることからです。

#### 熱による停止 (Thermal Shutdown)

故障状態のために、DC/DC コンバーターの温度は100 °C以上の高さに到達することがあります。短絡回路保護に追加して、Calex HE シリーズとQH シリーズには熱による停止機能 (thermal shutdown function) があります。コンバーターのメタルベース・プレートの温度が112 °Cより高い場合、コンバーターはシャットダウンし、温度が低下すれば自動的に復帰します。

#### 過電圧保護 (Over-Voltage Protection)

HE シリーズは出力過電圧時のシャットダウン (output over-voltage shutdown) と過電圧状況が解除されたときに自動スタートするように作られています。コンバーター内部の2個のフィードバックループ (two feedback loops) が両方故障した場合、HE シリーズのボルト秒クランプ機能 (volt-second clamp function) が出力電圧を制限します。

### 低電圧時のロックアウト (Under-Voltage Lockout)

入力電圧が低いとき、入力電流が高くなり、負荷サイクルが高くなります。これは磁気コアリセット問題 (magnetic core reset problems) を作る可能性があります。従って、入力電圧が作動レンジより低いときに過度な入力電流または内部電圧ストレスを避けるためにコンバーターをシャットダウンさせるため、Calex HE シリーズとQH シリーズには低電圧時のロックアウト回路があります。コンバーターのスイッチが入力、切断されるときに入力ラインの電圧変化による反発 (bouncing) を避けるためにヒステシスが組み込まれています。

### 高い信頼性 (High Reliability)

平均無故障時間 (MTBF=Mean Times Between Failures) を計算するときは、Bell Labs' Bellcore Methods を使用するのが一般的です。多くの会社は計算時間をセーブするために、単純化された MTBF calculation method、Bellcore method 1, Case 1 を使用しているかもしれません。異なる DC/DCのメーカーの使用上にある MTBF number を見れば、同じように見えるかもしれませんが、実際の信頼性は大変違います。

長期間の信頼性にとって、MOSFET (=metal-oxide semiconductor field-effect transistor : 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ、モス電界効果トランジスタ)、整流器 (rectifiers)、磁気コンポーネントとその他のコンポーネントに対する安定状態 (steady state) と一時的な (transient) 電圧や電流ストレスを減らすために最適化回路 (optimized circuit) を持ち、磁気設計を行うことが大変重要です。さらに、寄生インダクタンス (parasitic inductance) と抵抗 (resistance)、好ましくない分布容量 (unwanted distributed capacitance)、および電磁カップリング (electromagnetic coupling) を減らすために優れたプリント回路板のレイアウトを持つことが大変重要です。高い信頼性のためにはコンポーネントの軽減も大変重要です。短絡回路テストを含む広い温度レンジとさまざまな条件に対する設計確認試験 (Design verification testing) は新製品設計にとって必須です。

いくつかの最も高温のコンポーネントが通常、一番高い故障率を持ちます。従って、電気設計と熱設計によってこれらの最も高温のコンポーネントの温度上昇を低下させることが重要な意味を持ちます。アルミニウムベースのプリント回路板はコストがより高くなるけれども、アルミニウムプレートはヒートシンクまたは金属筐体に適切な圧力で簡単に取付けることができます。金属ベースプレートの無いコンバーターに比べるとはるかに速く熱を奪うことができます。DC/DC コンバーターを高い熱伝導性の低機械的ストレス材料でカプセルに入れることは (ソフト埋め込み)、埋め込みのコストも追加されますが、オープンフレーム構造に比べると、一番高温のコンポーネントの温度上昇を低下させる好ましい方法です。カプセルに入れることは温度変化と衝撃、コンポーネントの機械的振動と衝撃を和らげることができます。さらに湿度の障壁にもなります。

すべてのコンポーネントに対する電圧ストレス、電流ストレス、熱ストレスおよび機械的ストレスをへらすことが大切です。高い信頼性の設計、コンポーネントの軽減と厳しい製造工程による結果として、Calex Mfg. Co., Inc. は当社の全てのDC/DC コンバーターに5年間の保証を提供できます。

## IV. 役に立つ機能 (Useful Functions)

### 遠隔オンオフ制御 (Remote On/Off Control)

HE シリーズには正または負の論理レベル・オンオフ制御機能 (positive or gative logic level ON/Off control function) のオプションがあります。コンバーターがオフのとき、電力節約のために、アイドル入力電流はたったの1 ~ 2 mA です。スタートアップから出力電圧の1% 誤差までのターンオン時間は通常、20 mSです。いくつかの競合会社のコンバーターにはアイドル入力電流が10 mA以上あるかもしれません。

### 出力電圧トリム (Output Voltage Trim)

HE シリーズの出力電圧は簡単に +/-10% にトリムできます。トリムピンと出力ピンとの間にただ、1個だけの抵抗器が必要です。出力電圧がトリムされる時、出力電圧の温度係数 (T.C) は、なお通常、+/- 20ppmです。

### -40 °Cでのコールドスタート (Cold Start at -40 °C)

多くのビルの屋根上に設定されるマイクロエーブのワイヤレス通信システムの屋外ユニットは、冬季の間 -40 °Cで作動をスタートし、稼動継続しなければならないことがあります。従って、DC/DC コンバーターが-40 °Cでスイッチが入るように保証する必要があります。広い作動温度レンジで稼動するために、集積回路 (ICs=Integrated Circuits) のコンポーネントと個別半導体 (discrete semiconductor) のコンポーネントの温度係数に耐えるために充分な設計余裕のマージンが必要です。Calex は低温度で完全操作の正当性を立証しています。これはユーザが低温度でシステム問題を持たないことを保証します。

### 入力と出力の分離 (Isolation between Input and output)

通信アプリケーションやその他の産業アプリケーションは入力と出力の分離を必要とします。HE シリーズには48 V入力に対する1544 V の分離電圧 (isolation voltage) と 24 V入力に対する700 V 分離電圧があります。分離抵抗 (Isolation resistance) は通常、100 Mohmより高いです。入力と出力の電気容量 (Input to output capacitance) は通常、1700 pFです。

### 感謝 (Acknowledgement)

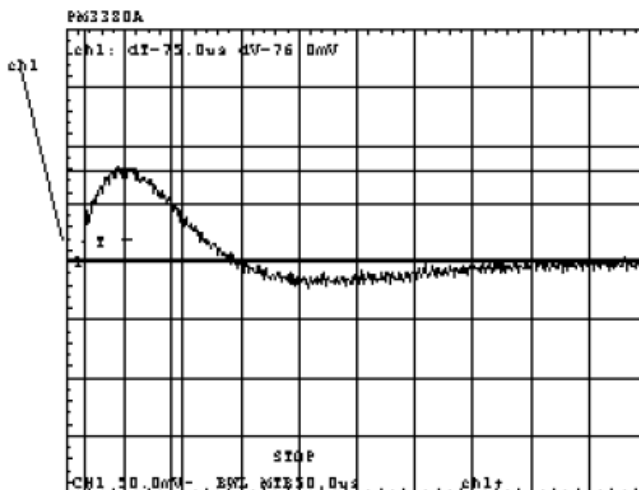
設計技術者のMichael McNally of Calex MFG. Co., Inc. には磁気設計と製造過程における協力に対して感謝します。また、主任技術者のBruce Lindsay of Calex MFG. Co., Inc. には彼の継続的なHE シリーズの開発と設計に対して感謝します。また主任技術者の Steve Mathias of Calex MFG. Co., Inc. にはこの書類上の彼の入力作業に対して感謝します。

### 出典 (Reference)

- [1] "Performance of Wiper of Potentiometer", De-Xiang Huang, Calex Technical Note, July 1997.
- [2] Calex Catalog at [www.calex.com](http://www.calex.com).
- [3] IEEE Recommended Practice for Electronic Power Subsystems: Parameter Definitions, Test Conditions, and Test Methods", IEEE Std 1515-2000.
- [4] De-Xiang Huang, Joseph R. Kinard and Greg Rebuldela, "RF-DC Differences of Thermal Voltage Converters Arising from Input Connectors," IEEE Trans. Instrumentation & Measurement, Vol. 40, Apr. 1991, pp.360-365.



Figure 1



48S5.15HE: Load transient overshoot is 1.5% when output current changes from 11.25 A to 7.5 A, load transient recovery time to 1 % error band is 75  $\mu$ s.

Figure 2

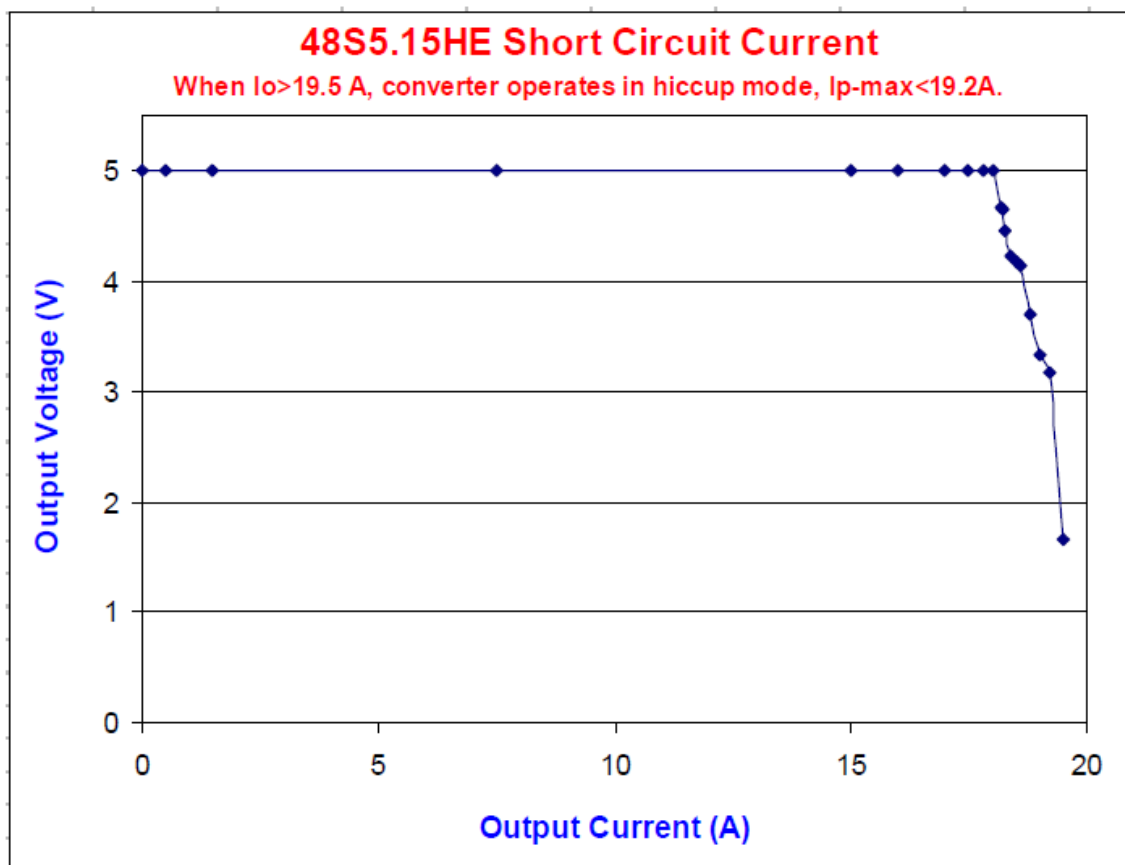


Figure 3

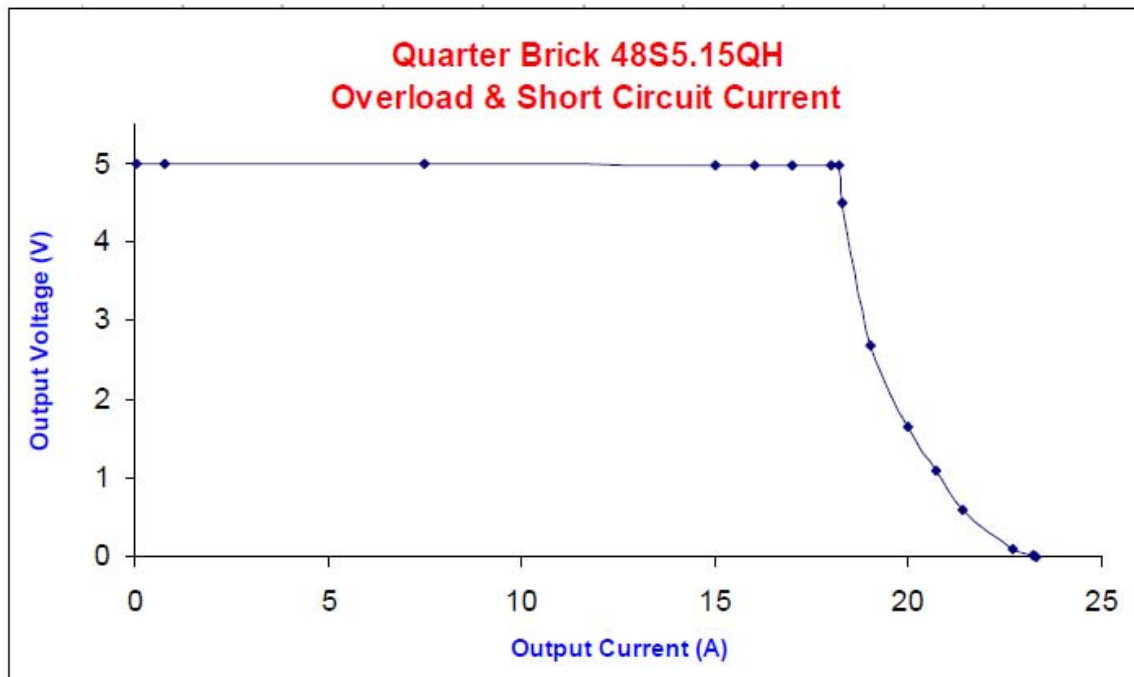


Figure 4

