

# アダプティブ・フィードバック・ループを使用した負荷点での電圧レギュレーション

By Maurizio Salato Principal Engineer, V-I Chip Applications Engineering

目次	page
はじめに	1
アダプティブ・ループによるレギュレーションのコンセプト	1
PRM-AL ブロックダイアグラム	2
DC設定点の計算	4
考察	8
Half-Chip VTMによる アダプティブ・ループ	9
V-I Chip 評価ボードによる設計例	13
おわりに	17

## はじめに

ダイナミックに変動する電気的な負荷に対しては、負荷点における電圧制御が欠かせません。ここで紹介する「アダプティブ・ループ」は、PRMとVTMをベースにした絶縁型の電源システムにおいて、効率的なフィードフォワード補償によって負荷点電圧の制御を行います。ここでは、PRMとVTMの最適な負荷点電圧補償のための設定について説明しています。1つのPRMと2つの同じVTMの組合せ[a]についての検討も含まれます。なお、ここで扱う計算を行なうためのExcelファイルが以下のサイトから利用可能です。

<http://cdn.vicorpower.com/documents/calculators/dcaldesign.xls>

## アダプティブ・ループによるレギュレーションのコンセプト

PRMの出力電圧を定電圧化する負帰還に加えて、アダプティブ・ループは、負荷電流の増減に応じて生じる電圧降下を補償するために必要とされる出力電圧増加分を正帰還します。Fig.1は概念的なブロックダイアグラムを示します。

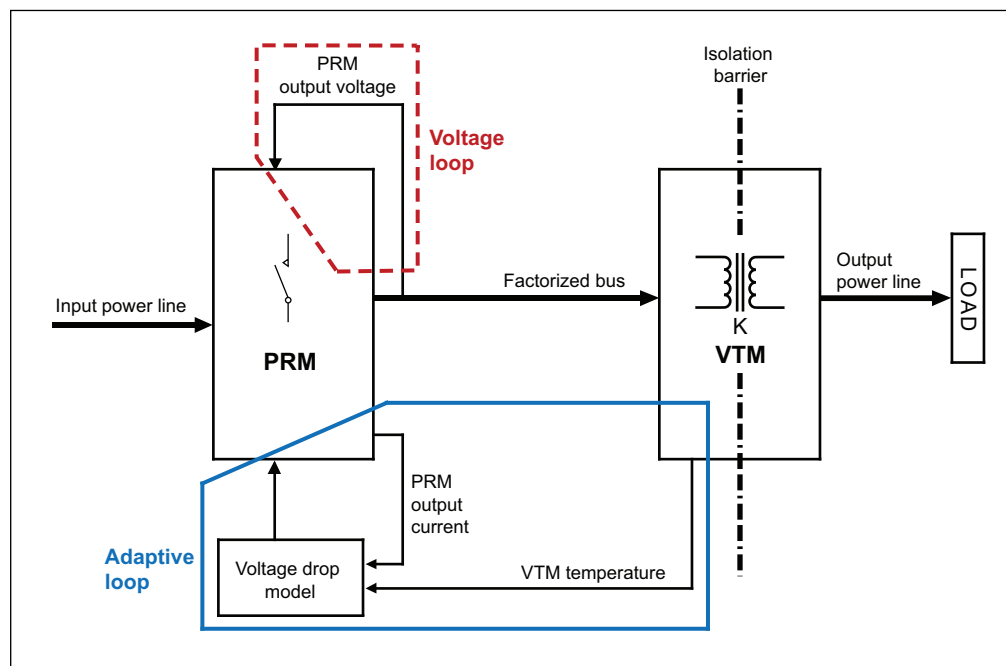


Figure 1  
アダプティブ・ループの概念的なブロックダイアグラム

PRM出力においてローカルな電圧フィードバックループがレギュレーションを維持する一方、アダプティブ・ループ (AL) はPRM出力から実際の負荷までの間で発生する電圧降下を補償します。前述のように、ALは、VTMの温度とファクトライズ・バスの電流を入力として必要とするモデルをベースにしています。VTM及びパワーライン (ファクトライズ・バスと出力ライン) の抵抗値を使用してそれらの電圧降下を正確に把握することができます。

[a] このアプリケーションノートでの計算は、24V、36V、48V入力のPRMに適用されます。28 V入力のMIL-COTS PRMにも同じ方法が適用されますが、正確な値を適用するために注意が必要です。その場合、アプリケーションエンジニアにご相談ください。

アダプティブ・ループの主な利点は：

- ・ VTMの出力側から絶縁された入力側へ信号を送る必要がない
- ・ 簡単で少ない部品点数

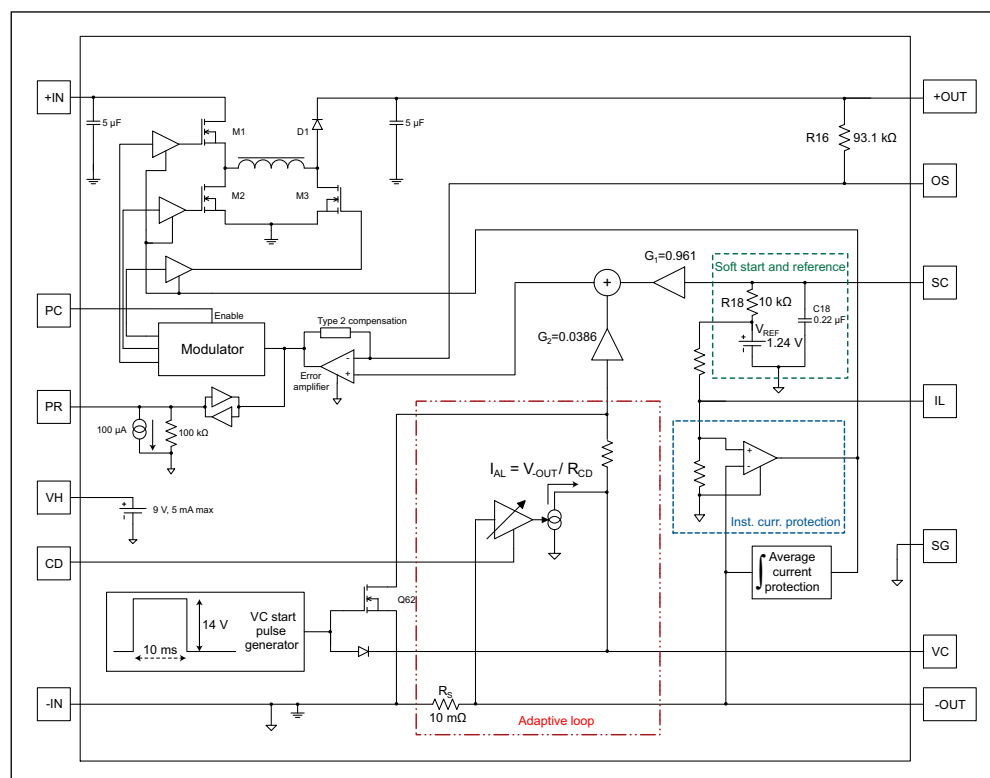
レギュレーションの精度は、このモデルの精度によって影響されます。このアプリケーションノートでは与えられたシステムに対してどのようにしてこのモデルを最適化するか、そして、どのようにして得られる精度を推定するかについて説明しています。

標準的なレギュレーションのテクニックでは、負荷点の電圧を直接モニターし、基準電圧と比較された負荷電圧の誤差分がゼロになるように動作させます。アダプティブ・ループでは負荷端までの電圧、配電系すべてを盛り込んで誤差ゼロに近づけます。

## PRM-AL ブロックダイアグラム

Fig.2は、フルチップ PRM-AL（例：PO45F048T32AL）の機能を説明するブロックダイアグラムです。OS、および、SC端子はローカルな電圧フィードバックループを提供し、VCおよびCD端子は後段に接続されるVTMの電圧降下分の補償を行います。

Figure 2  
PRM-AL ブロックダイアグラム



まとめ：

- ・ ローカルな電圧フィードバックループ
  - － R18を経由してVREFはSC端子に基準電圧を供給します。さらに増幅段G1を経由してエラーアンプの非反転入力に接続されます。
  - － ファクトライズ・バス電圧（+OUT）は、R16を介してエラーアンプの反転入力にフィードバックされます。
  - － SC、および、OS端子に外部から抵抗を接続することにより、それぞれの端子電圧が分圧されます。

- ・ アダプティブ・ループ回路
- － 電圧制御型の電流源は、CD端子とSG端子間に接続される抵抗によって制御される可変型のゲインを持っています。
- － 検出抵抗Rsの両端電圧に直接比例します。
- － 以下の関係に従って、CD端子とSG端子間に接続された抵抗に反比例します：

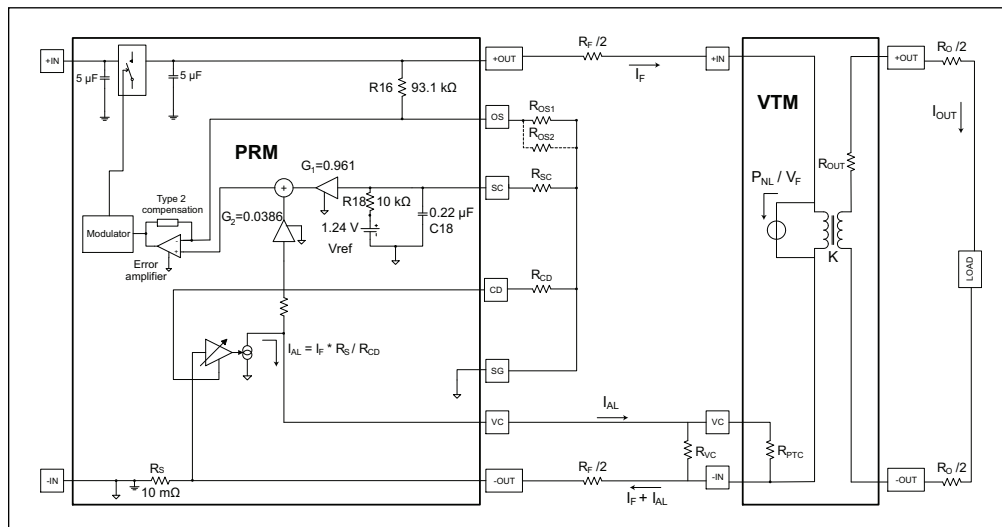
式1

$$I_{AL} = \frac{V_{-OUT}}{R_{CD}} = \frac{R_S I_F}{R_{CD}}$$

Ifはファクトライズ・バス（PRM出力）の電流、V-outはRs両端の電圧降下です。－ VC端子電圧は増幅段G2を経由して基準電圧端子SCに加算されます。

PRMとVTMを組合せたときは、Fig.3に示されるブロックダイアグラムのように考えられます。このシステムのプリント基板は、PRM出力から負荷までに更に電圧降下をもたらします：ファクトライズ・バスの抵抗Rf、出力ライン抵抗Ro、ここではプラス側とマイナス側が等しい抵抗値と仮定しています。実際にそれらの抵抗値を知るために、これらの抵抗値を推定もしくは測定する必要があります。

Figure 3  
Full-Chip VTMの  
アダプティブ・ループ制御  
ブロックダイアグラム



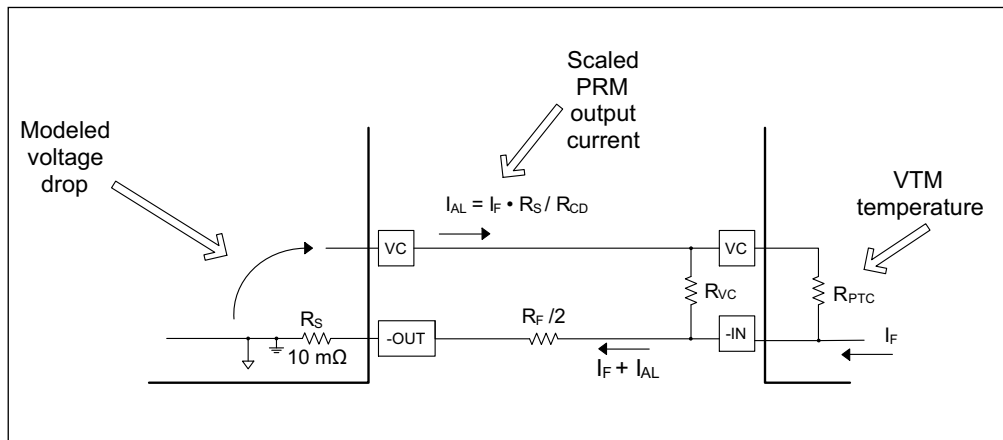
各電圧降下を把握するために、Rf,Rout,Roを正確に知る事が重要です。これらの補償モデルは抵抗性であり、温度に依存します。

以下により、このモデル化は容易です：

- ・ 抵抗RPTCがVTMの中に実装されており、VTMの温度によってその値は変化します。
- ・ 抵抗RVCは、RPTCをVTMのRoutの温度特性に一致させます。

抵抗 $R_{VC}$ と $R_{PTC}$ の並列、抵抗 $R_F/2$ と $R_S$ の直列接続は電圧降下モデルを構成します。アダプティブ・ループ回路はVCラインにPRM出力電流を縮小した電流信号 ( $I_{AL}$ ) が流れるようにし、リターンラインではファクトライズ・バス電流 $I_F$ と合流します。(Fig.4参照)

Figure 4  
電圧降下モデル



いくつかの係数によってVC端子に得られる電圧は、システム全体のトータルの電圧降下のモデルになります。

### DC設定点の計算

必要とされる数値がTable 1に示されます。

Table 1  
アダプティブ・ループの計算に必要な数値

標準的な Full-Chip VTM の特性	検討する電源システムの特性
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_{OUT\_25}</math>: 出力抵抗 (25°C)</li> <li>• <math>R_{OUT\_100}</math>: 出力抵抗 (100°C)</li> <li>• K: 入出力電圧変換比</li> <li>• <math>R_{PTC\_25}</math>: PTC 抵抗 (25°C)</li> <li>• <math>R_{PTC\_100}</math>: PTC 抵抗 (100°C)</li> <li>• <math>P_{NL}</math>: 公称入力電圧での無負荷時電力損失</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{F\_NOM}</math>: 無負荷での公称ファクトライズ・バス電圧</li> <li>• <math>I_{OUT}</math>: システム (VTM) の最大出力電流</li> <li>• <math>R_F</math>: ファクトライズ・バス (PRM から VTMまで) トータルの抵抗値</li> <li>• <math>R_O</math>: 出力バス (VTM から負荷点まで) トータルの抵抗値</li> </ul>

Table 2 は、標準的なFull-Chip VTMについてのデータをまとめたものです。PRMにおける内部抵抗の許容誤差が 1% であることに注意してください。

Table 2  
標準的な Full-chip VTM の  
データ (typical)

VTM Part Number	出力抵抗			温度センサー		
	R <sub>OUT_25</sub>	R <sub>OUT_100</sub>	許容誤差	R <sub>PTC_25</sub>	温度係数	許容誤差
	[mΩ]	[mΩ]	[%]	[Ω]	[%/°C]	[%]
V048F015T100	0.99	1.17	11	3000		
V048F020T080	1.31	1.56	10	2000		
V048F030T070	1.61	1.97	10	1000	0.39	5
V048F040T050	2.76	3.29	8			
V048F060T040	5.76	6.73	5			
V048F080T030	7.54	8.76	8	560		
V048F096T025	9.84	11.97	10			
V048F120T025	10.85	13.39	6	510		
V048F160T015	29.76	32.80	7			
V048F240T012	48.11	57.17	4			
V048F320T009	79.48	96.10	6			
V048F480T006	177.44	215.63	5			

Fig.3に関して：

A. VTM出力抵抗R<sub>OUT</sub>による最大電圧降下（25°Cおよび100°Cでの）を計算する。

$$\text{式2} \quad \Delta V_{R_{OUT\_25}} = R_{OUT\_25} \cdot I_{OUT}$$

$$\text{式3} \quad \Delta V_{R_{OUT\_100}} = R_{OUT\_100} \cdot I_{OUT}$$

B. ファクトライズ・バスに流れる最大電流を計算する。

$$\text{式4} \quad I_F = K \cdot I_{OUT} + \frac{P_{NL}}{V_{F\_NOM}}$$

VTMによって必要とされる無負荷時の電力損失（P<sub>NL</sub>）は入力電圧に依存しますが、その変化はアダプティブ・ループ補償に関してわずかな影響しかありませんので、以下のステップでは無視しています。

C. 電圧降下全てを補償するために上昇するPRMの出力電圧を計算する。

（ファクトライズ・バス抵抗、VTM出力抵抗、および、出力バス抵抗）

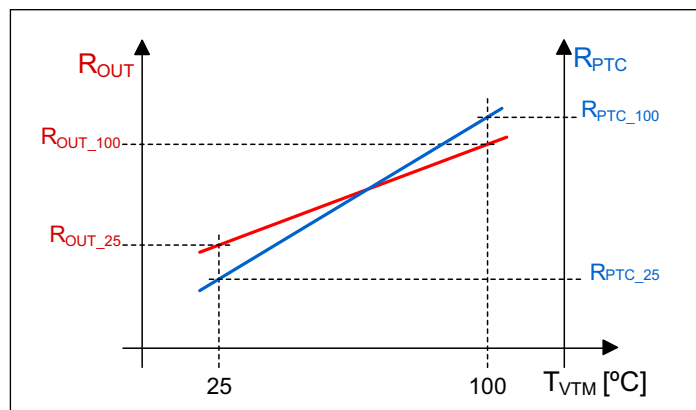
$$\text{式5} \quad \Delta V_{F\_25} = \frac{\Delta V_{R_{OUT\_25}} + R_O I_{OUT}}{K} + (R_F + R_S) \cdot I_F$$

$$\text{式6} \quad \Delta V_{F\_100} = \frac{\Delta V_{R_{OUT\_100}} + R_O I_{OUT}}{K} + (R_F + R_S) \cdot I_F$$

D. 電源システム全体の温度係数を計算し、必要とされる抵抗 $R_{VC}$ をそれに一致させる。

抵抗 $R_{PTC}$ およびVTM  $R_{OUT}$ は同じ温度にさらされますが、それらはFig.5に示すように異なる変化率を持っています。

Figure 5  
 $R_{OUT}$  および  $R_{PTC}$  vs. VTM  
内部温度



そのモデルの温度での電圧降下に正確に一致させるためには、その勾配がシステムの勾配に一致しなければなりません。 $R_{PTC}$ と並列になる抵抗 $R_{VC}$ はこの条件に合うように計算します。

$$\Delta R_{TOT} = \frac{\Delta V_{F\_100}}{\Delta V_{F\_25}} = \frac{\frac{R_{VC} \cdot R_{PTC\_100}}{R_{VC} + R_{PTC\_100}}}{\frac{R_{VC} \cdot R_{PTC\_25}}{R_{VC} + R_{PTC\_25}}} \Rightarrow$$

式7

$$R_{VC} = (1 - \Delta R_{TOT}) \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{PTC\_100}}{\Delta R_{TOT} \cdot R_{PTC\_25} - R_{PTC\_100}}$$

システムの温度

係수에合うように直列抵抗ではなく並列抵抗を選択する重要な理由があります。起動時において、VTMを同期して起動するために、PRMはVCラインに14V 10msec のパルスを出力します。直列抵抗はこの信号に無視できない振幅の変化を引き起こします。並列抵抗の配置ではこれは回避されます。しかし $R_{VC}$ の値が200Ω以下になる場合はこれを避けてください。(14V 10msec のパルスが過負荷になります)

E. 与えられたシステムについての最大VC端子電圧を25℃で計算する。(R<sub>VC</sub>の効果により、温度依存性が補正され、100℃でも同じ値になるでしょう。[7]) :

$$V_{C\_MAX\_25} = I_{AL} \cdot \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + (I_F + I_{AL}) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) =$$

式8

$$= R_S \frac{I_F}{R_{CD\_MIN}} \cdot \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + \left( I_F + R_S \frac{I_F}{R_{CD\_MIN}} \right) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right)$$

現在の製品について許容される $R_{CD}$ の最小値は20Ωです。

F. ワーストケース ( $V_{C\_MAX\_25}$  および  $\Delta V_{F\_100}$ ) での十分なアダプティブ・ループ範囲を可能にするように、必要に応じ、トリム電圧 $V_{SC}$ を計算する。

増幅段 $G_2$ を介してのVC上の電圧は、電圧降下 $\Delta V_F$ を補償するために、基準電圧 $V_{SC}$ に加算されます。VC電圧のダイナミック範囲が設定されるので、アダプティブ・ループ補償とファクトライズ・バスの関連する変化に一致するように、 $V_{SC}$ は減少されるかもしれません。

$$\text{式9} \quad \frac{\Delta V_{F\_100}}{V_{F\_NOM}} \leq \frac{G_2 \cdot V_{C\_MAX\_25}}{G_1 \cdot V_{SC}} \Rightarrow V_{SC} \leq \frac{G_2 \cdot V_{C\_MAX\_25}}{G_1 \frac{\Delta V_{F\_100}}{V_{F\_NOM}}}$$

増幅段 $G_1$  および  $G_2$  のゲインはそれぞれ 0.961 および 0.0386 です。

$V_{SC} \leq V_{ref} = 1.24$  Vの場合、SCに接続される外付け抵抗は以下のように容易に計算できます：

$$\text{式10} \quad R_{SC} = R_{18} \frac{V_{SC}}{V_{ref} - V_{SC}}$$

内部のエラーアンプの特性のために、 $V_{SC}$ についての絶対最小値は0.25 Vです。従って、 $R_{SC}$ についての最小抵抗値は、2550 Ωです。

G. 公称出力電圧を設定するのに必要とされる電圧フィードバックの分圧抵抗を計算します。

$$\text{式11} \quad V_{F\_NOM} = G_1 \cdot V_{SC} \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} \Rightarrow R_{OS} = G_1 \cdot R_{16} \frac{V_{SC}}{V_{F\_NOM} - G_1 \cdot V_{SC}}$$

選択された基準電圧 $V_{SC}$ に適應するように、 $R_{OS}$ は電圧フィードバックのゲインを定めます。 $R_{SC}$ として標準的な抵抗値によって得られた電圧 $V_{SC}$ を使用して計算することを推奨します。さらに、もしも計算された $R_{OS}$ の値に一致する (0.2%以内) ための標準的な値の抵抗がない場合、複数の抵抗を並列構成にして使用することを強く勧めます。

H. アダプティブ・ループが電圧降下を補償するのに最適な抵抗 $R_{CD}$ を計算します。(25℃も100℃も抵抗 $R_{VC}$ のために同じ結果が得られるでしょう。)

最初に、最大電流 $I_F$ でのVCライン電圧を代入（室温）：

$$\text{式12} \quad V_{C\_25} = \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} \cdot \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + \left( \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} + I_F \right) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right)$$

関連するファクトライズ・バスの増加分についての式に代入します：

$$\begin{aligned} \Delta V_{F\_25} &= G_2 \cdot V_{C\_25} \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} = \\ &= G_2 \cdot \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} \cdot \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + \left( \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} + I_F \right) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} \end{aligned}$$

そして抵抗 $R_{CD}$ を求めます：

$$\text{式13} \quad R_{CD} = \frac{G_2 \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} R_S I_F \left( \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + \frac{R_F}{2} + R_S \right)}{\Delta V_{F\_25} - G_2 \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) I_F}$$

## 考察

レギュレーション精度を改善するために、以下のガイドラインを守る必要があります：

－ モデルとシステムとの間の相違は直接レギュレーション精度に影響します。設計段階において、システムの特長についての考察は強く推奨されます。（特にファクトライズ・バス抵抗( $R_F$ )と出力ライン抵抗( $R_O$ )）

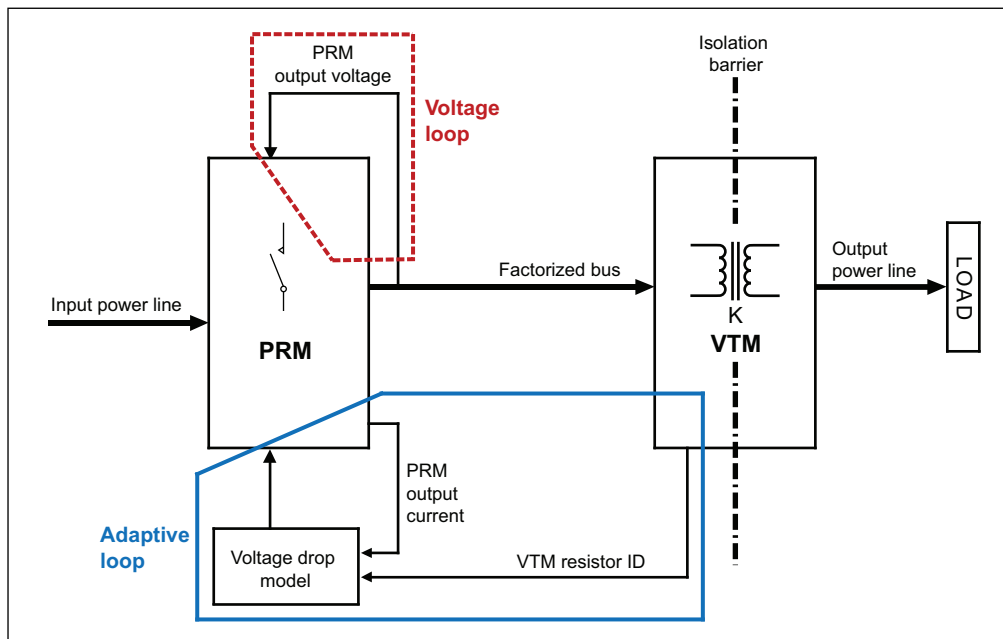
－ 部品の値（誤差）の統計的な分布は配電精度に関して主要な役割を果たします。そのために、‘モンテカルロ解析（もしくは類似したもの）’ および最適化は強く奨励されます。レギュレーションに直接影響するすべての要素（すなわち、設定する抵抗、抵抗のモデル、部品の特性）が含まれるべきです。システムで追加されるあらゆる部品（すなわち、設定するフィルタのインダクタ、コネクタ、等々）についても、その変化によって影響を受けるならば、同様にすべて含まれるべきです。

－ VC電圧における $R_S$ と $R_F$ の影響は幾つかのケースでは無視できますが、通常は配電精度に影響します。それを評価するために、双方の抵抗はこの解析に含めるべきです。

### Half-Chip VTMによるアダプティブ・ループ

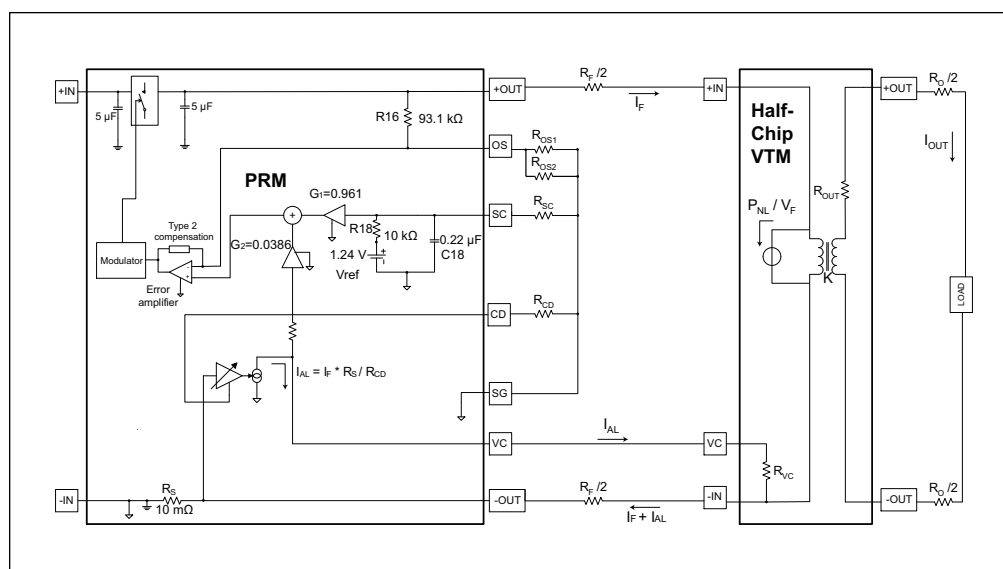
Full-chip VTM と Half-chip VTM との主な相違点は、温度フィードバックの有無です。Full-chip VTMはPTC抵抗を使用し、Half-chip VTMはFig.6に示されるようにシンプルな精密抵抗を使用しています。

Figure 6  
温度フィードバックなしの  
アダプティブ・ループ  
レギュレーションの概念



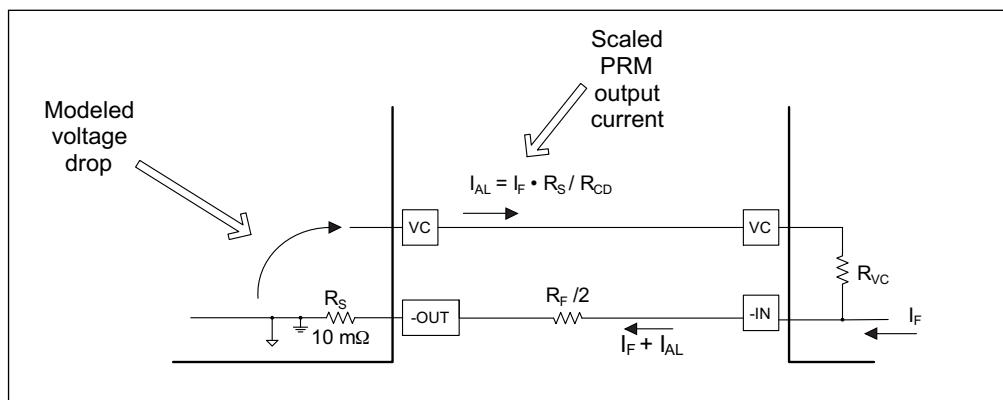
温度フィードバックがないとレギュレーション精度はわずかに劣ります。しかしながら、Half-Chipは、更に厳格なパラメータ分布を持っており、減少したモデルの精度を部分的に補います。この場合の制御構造はFig.7に示されます。

Figure 7  
Half-Chip VTMの  
アダプティブ・ループ制御



電圧降下モデルは同様にFull-chip VTM (Fig.3) についてのものと異なり、Fig.8に示されるように、より簡単なものになります。

Figure 8  
Half-chip VTMを使用したシステムにおける電圧降下モデル



相違点について説明したように、ここでこの特定のケースについての設計手順を訂正することが可能になります。Table 3 は必要とされる値を示します。

Table 3  
Half-chip VTMのためのアダプティブ・ループ計算に必要な値

Half-Chip VTM の特性	電源システム の特性
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_{OUT\_25}</math>: 出力抵抗 (25°C)</li> <li>• <math>R_{OUT\_100}</math>: 出力抵抗 (100°C)</li> <li>• K: 入出力電圧変換比</li> <li>• <math>R_{vc}</math>: VTM VC 端子の内部抵抗</li> <li>• <math>P_{NL}</math>: 無負荷時電力損失 (公称入力電圧条件)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{F\_NOM}</math>: 公称ファクトライズ・バス電圧 (無負荷条件)</li> <li>• <math>I_{OUT}</math>: 最大システム (VTM) 出力電圧</li> <li>• <math>R_f</math>: ファクトライズ・バスの合計抵抗 (PRMからVTMまで)</li> <li>• <math>R_o</math>: 出力バスの合計抵抗 (VTMから負荷点まで)</li> </ul>

Table 4は Half-chip VTMのためのデータの要約です。

Table 4  
Half-chip VTM データ (typical)

VTM Part Number	出力抵抗			ID抵抗	
	$R_{OUT\_25}$	$R_{OUT\_100}$	許容誤差	$R_{vc}$	許容誤差
	[mΩ]	[mΩ]	[%]	[Ω]	[%]
VIVO102THJ	2.72	3.22	8	1430	1.0
VIVO103THJ	3.03	3.78	11	9310	
VIVO104THJ	6.86	8.07	8	8870	
VIVO105THJ	13.80	16.24	7	4640	
VIVO101THJ	44.32	57.65	6	2050	

理解しやすいように、既に説明したFull-chip VTMの手順とは異なるステップだけを列挙します。

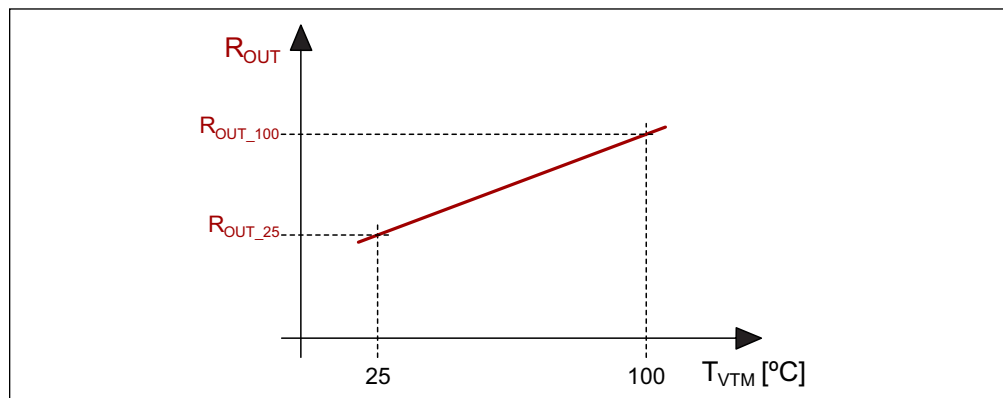
ステップ：

A., B., C.: は同じです。

D. 推定されるVTMの動作温度における電力回路のトータルの温度係数を計算します。

VTM R<sub>OUT</sub>抵抗はFig.9に示されるように温度に依存します。

Figure 9  
Half-chip VTM R<sub>OUT</sub> vs.  
製品内部温度



モデルをシステムの電圧降下によりよく一致させるために、VTMの動作温度を推測します。温度が不明の場合、慎重なアプローチとしてその温度範囲の中間（例えば75℃）で動作するとみなします：

$$\Delta V_{F_{-75}} = \Delta V_{F_{-25}} + \frac{\Delta V_{F_{-100}} - \Delta V_{F_{-25}}}{75} \cdot 50$$

式14

R<sub>OUT</sub>の温度依存性は線形なので、[14]において使用された線形補間はこのケースにも適用できます。

E. 与えられたシステムについてのVC端子の最大電圧を計算します。

$$\begin{aligned} V_{C\_MAX} &= I_{AL} \cdot R_{VC} + (I_F + I_{AL}) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) = \\ &= R_S \frac{I_F}{R_{CD\_MIN}} \cdot R_{VC} + (I_F + R_S \frac{I_F}{R_{CD\_MIN}}) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) \end{aligned}$$

式15

F., G.: は同じです。

H. 電圧降下を補償するために適切なアダプティブ・ループを行なうための抵抗 $R_{CD}$ を計算します。

最初に、最大電流 $I_F$ でのVCライン電圧を代入（雰囲気温度）：

$$\text{式16} \quad V_C = \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} \cdot R_{VC} + \left( \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} + I_F \right) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right)$$

関連するファクトライズ・バスの増加分についての式に代入します：

$$\begin{aligned} \Delta V_{F\_75} &= G_2 \cdot V_C \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} = \\ &= G_2 \cdot \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} \cdot R_{VC} + \left( \frac{R_S \cdot I_F}{R_{CD}} + I_F \right) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} \end{aligned}$$

そして、 $R_{CD}$ を求めます：

$$\text{式17} \quad R_{CD} = \frac{G_2 \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} R_S I_F \left( R_{VC} + \frac{R_F}{2} + R_S \right)}{\Delta V_{F\_75} - G_2 \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) I_F}$$

## V·I Chip 評価ボードによる設計例

システム要件:

Input: 36-75 V

Output: 5 V, 36 A, 180 W

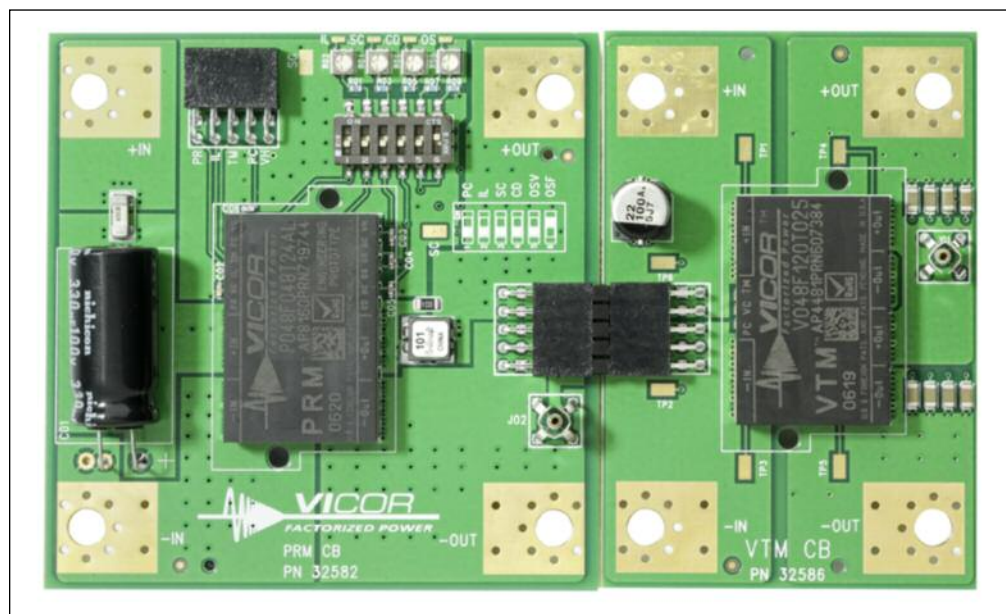
V·I Chip 選定:

PRM: P048F048T24AL (ワイドレンジ入力、電力レベルより選定).

VTM: V048F060T040 (出力電圧、電流により選定).

一致する評価ボードはP048F048T24AL-CBおよびV048F060T040-CBです。ファクトライズ・バスラインおよびVCラインの接続経路はUser Guide UG:003にて説明されています。Fig.10に2つの評価ボードを接続した図を示します。

Figure 10  
PRM and VTM評価ボード



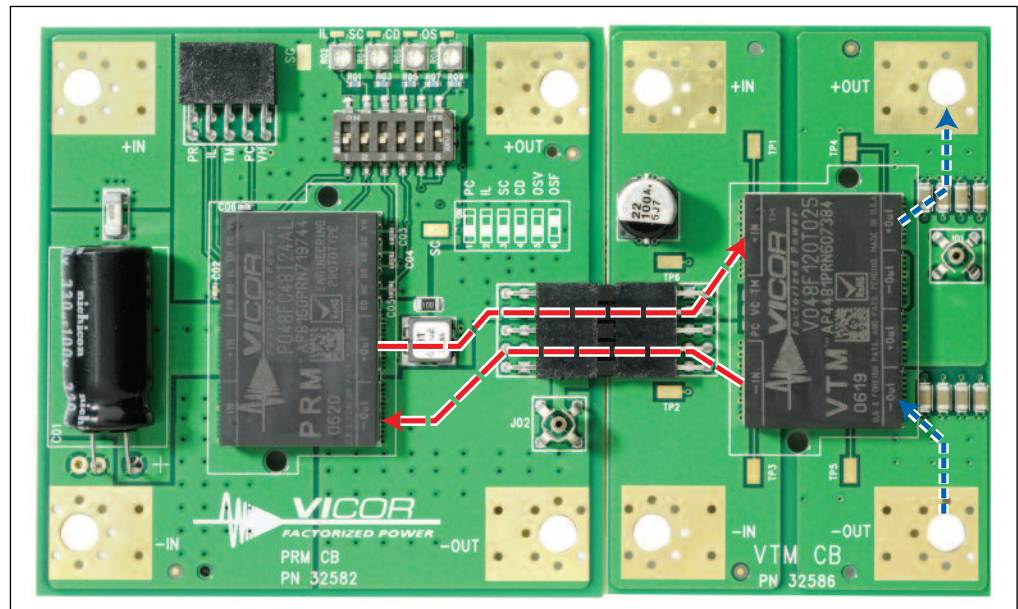
はじめに、VTMのデータシートとTable 2から下記の数値を抜き出します。

- $R_{OUT\_25}$ : 5.76 m $\Omega$
- $R_{OUT\_100}$ : 6.73 m $\Omega$
- K: 1/8
- $R_{PTC\_25}$ : 1000  $\Omega$
- $R_{PTC\_100}$ :  $1000 \cdot (1 + 0.0039 \cdot 75) = 1293 \Omega$
- $P_{NL}$ : 2.7 W

次に以下の数値を計算および測定します。

- $V_{F\_NOM}$ :  $V_{OUT}/K = 40\text{ V}$
- $I_{OUT}$ : 36 A
- $R_F$  及び  $R_O$ : これらの抵抗値は基板配線パターンおよび負荷へ接続するケーブルにより決定されます。これらの値を得る有効な方法はFig.11に示すように電流経路を確認することです。

Figure 11  
ファクトライズ・バスの電流経路  
(赤波線)  
および出力電流経路  
(青波線)



次に端子-端子間の単純な直流インピーダンス測定で $R_F$ と $R_O$ の値を得ます。特に今回の例のケースでは：

$$\rightarrow R_F = 10\text{ m}\Omega$$

$$\rightarrow R_O = 80\text{ }\mu\Omega$$

これで計算が可能になります。

A. VTM出力抵抗 $R_{OUT}$ による最大電圧降下（25℃および100℃での）を計算する。

$$\Delta V_{ROUT\_25} = R_{OUT\_25} \cdot I_{OUT} = 0.00576 \cdot 36 = 0.207\text{ V}$$

$$\Delta V_{ROUT\_100} = R_{OUT\_100} \cdot I_{OUT} = 0.00673 \cdot 36 = 0.242\text{ V}$$

B. ファクトライズ・バスに流れる最大電流を計算する。

$$I_F = K \cdot I_{OUT} + \frac{P_{NL}}{V_{F\_NOM}} = \frac{1}{8} \cdot 36 + \frac{2.7}{40} = 4.568\text{ A}$$

C. 電圧降下全てを補償するために上昇するPRMの出力電圧を計算する。

(ファクトライズ・バス抵抗、VTM出力抵抗、および、出力バス抵抗)

$$\Delta V_{F\_25} = \frac{\Delta V_{ROUT\_25} + R_O I_{OUT}}{K} + (R_F + R_S) \cdot I_F = \frac{0.207 + 80 \mu \cdot 36}{1/8} + (10 m + 10 m) \cdot 4.568 = 1.77 V$$

$$\Delta V_{F\_100} = \frac{\Delta V_{ROUT\_100} + R_O I_{OUT}}{K} + (R_F + R_S) \cdot I_F = \frac{0.242 + 80 \mu \cdot 36}{1/8} + (10 m + 10 m) \cdot 4.568 = 2.05 V$$

D. 電源システム全体の温度係数を計算し、必要とされる抵抗 $R_{VC}$ をそれに一致させる。

$$\Delta R_{TOT} = \frac{\Delta V_{F\_100}}{\Delta V_{F\_25}} = \frac{2.05}{1.77} = 1.158 \quad \Rightarrow$$

$$R_{VC} = (1 - \Delta R_{TOT}) \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{PTC\_100}}{\Delta R_{TOT} \cdot R_{PTC\_25} - R_{PTC\_100}} = (1 - 1.158) \frac{1000 \cdot 1293}{1.158 \cdot 1000 - 1293} = 1513 \Omega$$

$R_{VC}$ は200Ω以上であるので有効である。最も抵抗値に近い実際の1%精度の抵抗を選びます。

$R_{VC}$ は 1500 Ωを選びます。

E. システム温度25℃での最大VC端子電圧を計算する。

PRM-ALのデータシートより  $R_{CD\_MIN} = 20 \Omega$ :

$$\begin{aligned} V_{C\_MAX\_25} &= R_S \frac{I_F}{R_{CD\_MIN}} \cdot \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + (I_F + R_S \frac{I_F}{R_{CD\_MIN}}) \cdot \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) = \\ &= 10 m \frac{4.568}{20} \cdot \frac{1000 \cdot 1500}{1000 + 1500} + (4.568 + 10 m \frac{4.568}{20}) \cdot \left( \frac{10 m}{2} + 10 m \right) = 1.44 V \end{aligned}$$

F. ワorstケース ( $V_{C\_MAX\_25}$  および  $\Delta V_{F\_100}$ ) での十分なアダプティブ・ループ範囲を可能にするように、必要に応じ、トリム電圧 $V_{SC}$ を計算する。

$$V_{SC} \leq \frac{G_2 \cdot V_{C\_MAX\_25}}{G_1 \frac{\Delta V_{F\_100}}{V_{F\_NOM}}} = \frac{0.0386 \cdot 1.44}{0.961 \frac{2.05}{40}} = 1.12 V$$

$V_{SC} \leq V_{ref} = 1.24 V$ であるので、 $R_{SC}$ は以下のように計算されます。

$$R_{SC} = R_{18} \frac{V_{SC}}{V_{ref} - V_{SC}} = 10 k \frac{1.12}{1.24 - 1.12} = 93.3 k\Omega$$

R<sub>SC</sub>は2550 Ω以上であるため使用することができます。最も抵抗値に近い実際の1%精度の抵抗を選びます。R<sub>SC</sub> = 93.1 kΩを選びます。R<sub>SC</sub> = 93.1 kΩより得られるV<sub>SC</sub>はV<sub>SC</sub> = 1.12 Vとなります。

G. 公称出力電圧を設定するのに必要とされる電圧フィードバックの分圧抵抗を計算します。

$$R_{OS} = G_1 \cdot R_{16} \frac{V_{SC}}{V_{F\_NOM} - G_1 \cdot V_{SC}} = 0.961 \cdot 93.1 k \frac{1.12}{40 - 0.961 \cdot 1.12} = 2574 \Omega$$

実際の最も近い標準的な抵抗は2550Ωとなるでしょう、これはターゲットからほぼ1%の抵抗値です。より精度を増すためには、標準的な抵抗2610Ωを選び、さらに並列に抵抗を使い必要とされる値へと近づけます。

R<sub>OS1</sub> = 2610 Ω、R<sub>OS2</sub> = 187 kΩ

H. アダプティブ・ループが電圧降下を補償するのに最適な抵抗R<sub>CD</sub>を計算します。

$$R_{CD} = \frac{G_2 \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} R_S I_F \left( \frac{R_{PTC\_25} \cdot R_{VC}}{R_{PTC\_25} + R_{VC}} + \frac{R_F}{2} + R_S \right)}{\Delta V_{F\_25} - G_2 \frac{R_{16} + R_{OS}}{R_{OS}} \left( \frac{R_F}{2} + R_S \right) I_F} =$$

$$= \frac{0.0386 \frac{93.1 k + 2574}{2574} 10 m \cdot 4.568 \left( \frac{1 k \cdot 1.5 k}{1 k + 1.5 k} + \frac{10 m}{2} + 10 m \right)}{1.77 - 0.0386 \frac{93.1 k + 2574}{2574} \left( \frac{10 m}{2} + 10 m \right) \cdot 4.568} = 23.5 \Omega$$

最も抵抗値に近い標準的な抵抗、R<sub>CD</sub> = 23.7 Ωを選びます。

以上より抵抗値の設計計算は完了しました。

R<sub>SC</sub> = 93.1 kΩ, R<sub>OS1</sub> = 2610 Ω, R<sub>OS2</sub> = 187 kΩ, R<sub>VC</sub> = 1500 Ω, R<sub>CD</sub> = 23.7 Ω

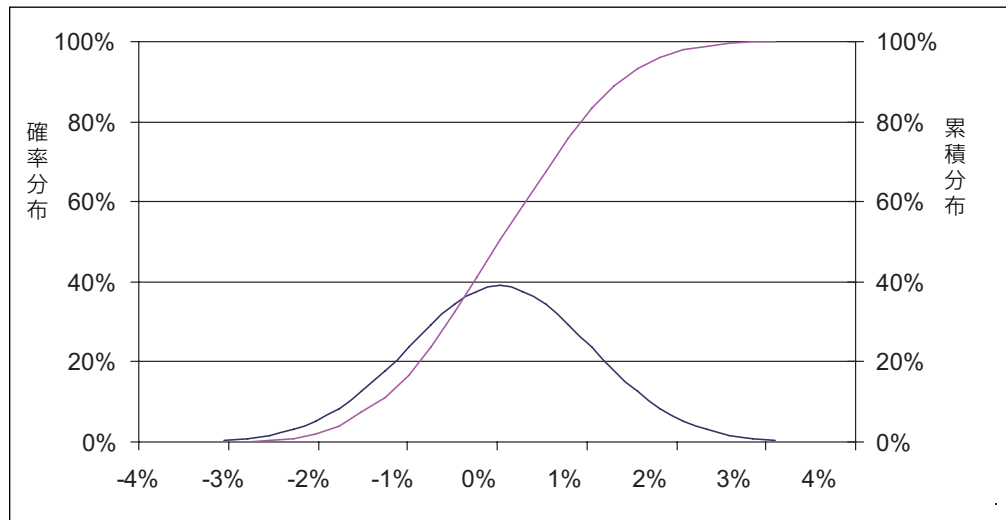
これらの抵抗値で2枚の評価ボードにて電圧レギュレーション精度を検証することができるでしょう。

## おわりに

ここではシンプルな PRM/VTM 構成においてより良い電圧レギュレーションを達成するために適用できるアダプティブ・ループの設計手法を紹介しています。

モンテカルロ解析によって、入力変動、負荷変動、及び、温度変化に関して 1%のレギュレーション精度が統計上82% (もしくは更に大きく) 達成されたことが確認されます。Fig.12 は過去の設計例の精度分布を示します。

Figure 12  
設計例での入力、負荷、温度変動による  
精度分布



適切なモデルを適用すれば、同様の設計コンセプトはV·I Chips Arrayにも適用することができます。2個以上のPRMおよび3個以上のVTMの構成をされる際は、弊社アプリケーションエンジニアへお問合せ下さい。以下のサイトから自動表計算の使用が可能です。

[www.vicorpower.com/dcaldesign](http://www.vicorpower.com/dcaldesign).

Information furnished by Vicor is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Vicor for its use. Vicor components are not designed to be used in applications, such as life support systems, wherein a failure or malfunction could result in injury or death. All sales are subject to Vicor's Terms and Conditions of Sale, which are available upon request.

**Specifications are subject to change without notice.**