

パワーエレクトロニクス工学論

11. EMI低減スペクトラム拡散電源

- 11-1 各種周波数変調方式によるEMI低減技術
- 11-2 クロックレス電源への適用
- 11-3 EMI低減と出力電圧リップル補償方式

★スイッチング電源の研究動向

●電源の課題：

- 1) 低コスト化：回路・部品の削減
- 2) 高機能化：低リップル・高効率化

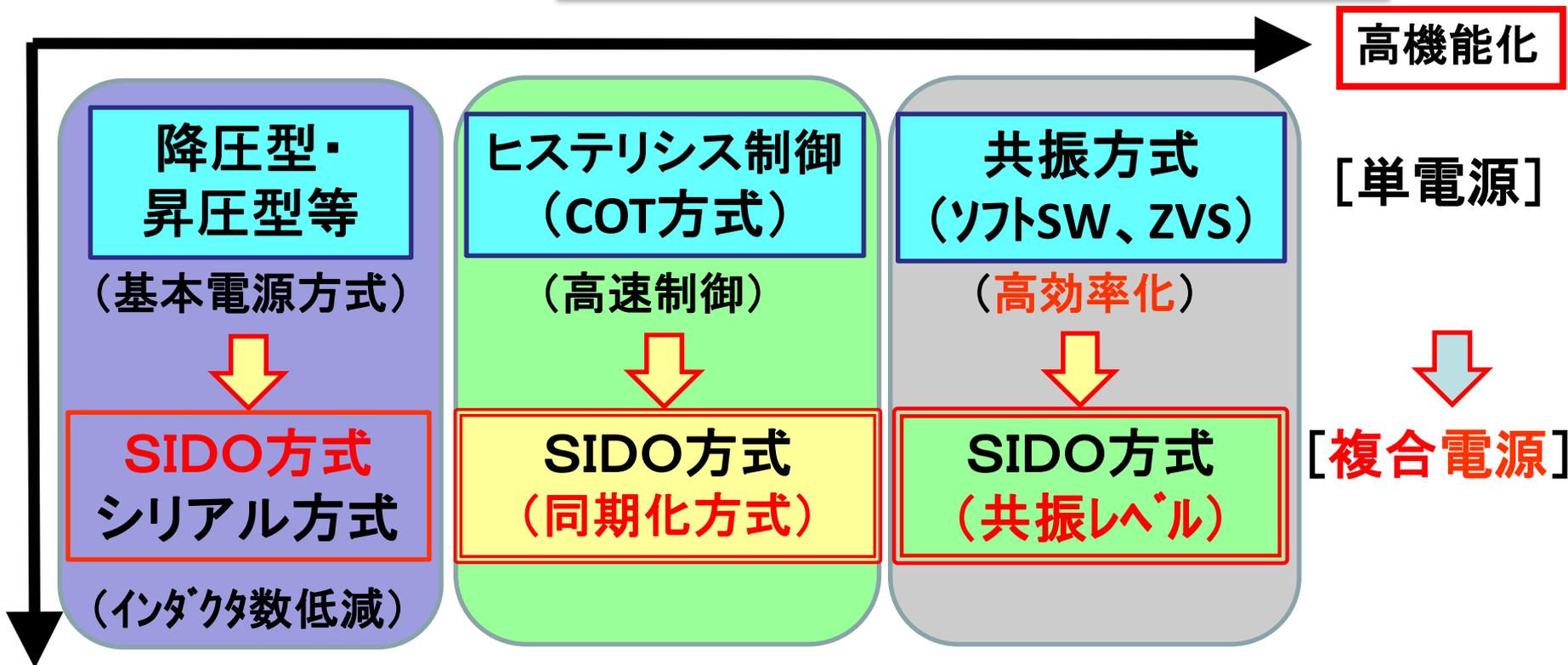


図1 スイッチング電源の開発動向

* SIDO : Single-Inductor Dual-Output
* COT : Constant ON Time

* ZVS: Zero Voltage Switching
* ZCS: Zero Current Switching

★ EMCとは

● EMC=EMI+EMS (電磁適合性=電磁妨害+電磁感受性)

電磁妨害を出さず、電磁波の影響を受けない[イミュニティ(immunity)]

● スイッチング電源とスペクトラム

* エネルギー(電圧・大電流)のスイッチング供給

⇒ 基本波(クロック周波数)と高調波に、大きいピークの線スペクトラム

⇒ EMI (電磁妨害)問題が発生: 電磁波+電源ライン

* EMI規制 ⇒ 規制値以下にスペクトラム・レベルの低減が必要

⇒ スペクトラム拡散技術(他の手法:フィルタ、シールド等)

★EMI対策: スペクトラム拡散技術

* 基本パルス(クロック、鋸歯状波、PWM信号)を、ランダムに位相(周波数)変調

* スペクトラム拡散技術

A) 従来デジタル拡散技術

・10ビット(1,024通り)以上の微小位相シフトのパルス群を発生し、
ランダムにセレクトして、電源に供給

B) アナログ・ノイズ拡散技術

・アナログノイズ(熱雑音等)により、クロック信号を変調して電源に供給

パワーエレクトロニクス工学論

11. EMI低減スペクトラム拡散電源

11-1 各種周波数変調方式によるEMI低減技術

1.1 従来デジタル拡散技術

1.2 擬似アナログノイズ・スペクトラム拡散技術

1.3 スイッチング電源への適用

1.4 (新M系列ノイズ拡張技術)

11-2 クロックレス電源への適用

11-3 他のEMI低減方式と電圧リップル低減方式

11-1 擬似アナログノイズ利用EMI 低減技術

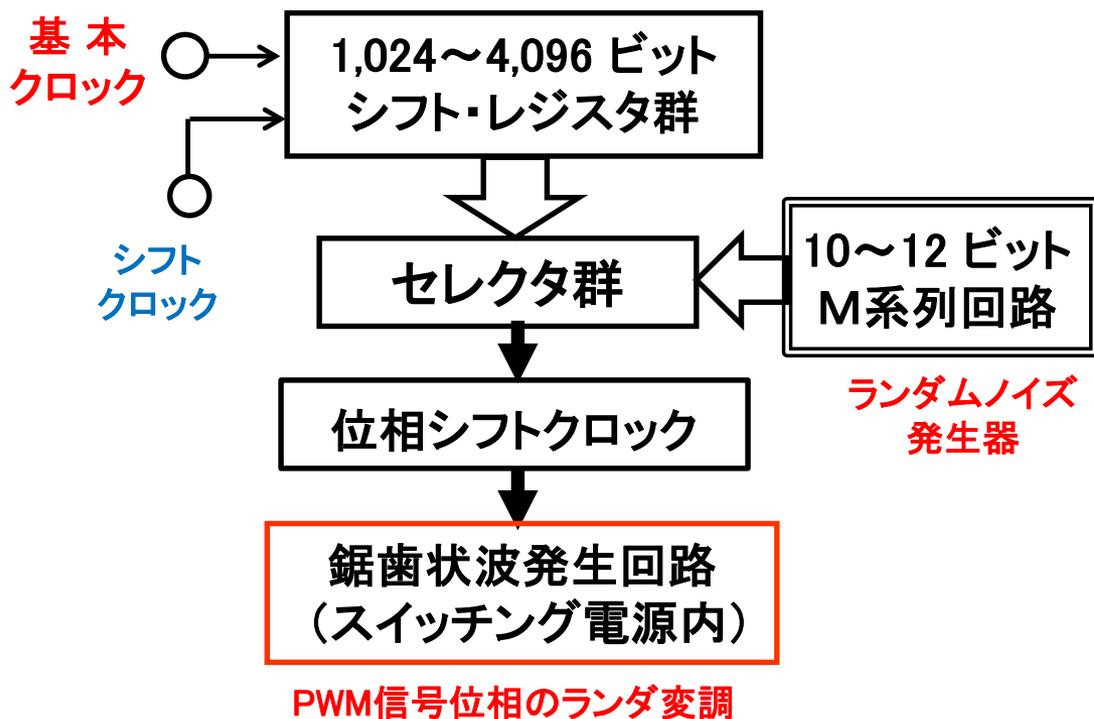
1.1 従来デジタル拡散技術

* 構成: 位相シフト回路(10~12ビット) + ランダム信号発生器 + セレクタ

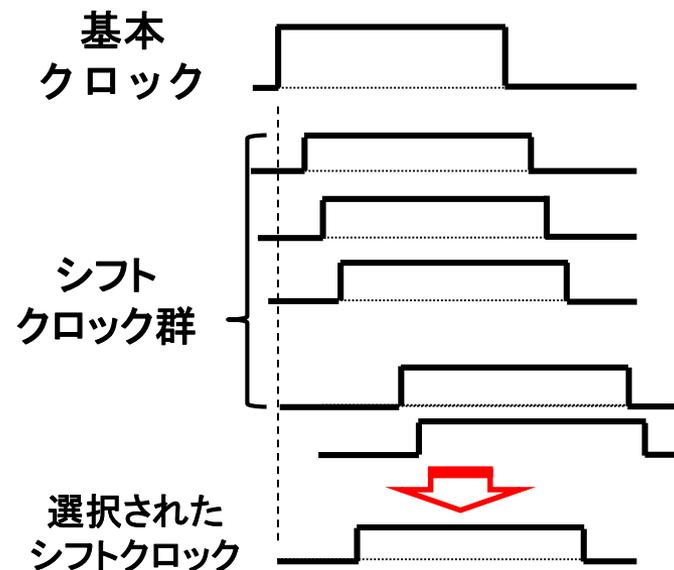
* 特徴: デジタル変調 ⇒ 拡散結果は、線スペクトラムの集合

多数の(シフトレジスタ + セレクタ): 1,000~4,000個

シフト用クロック周波数 = 電源クロック(200kHz) · 4,000 = 800 MHz (困難)



デジタル・スペクトラム拡散回路



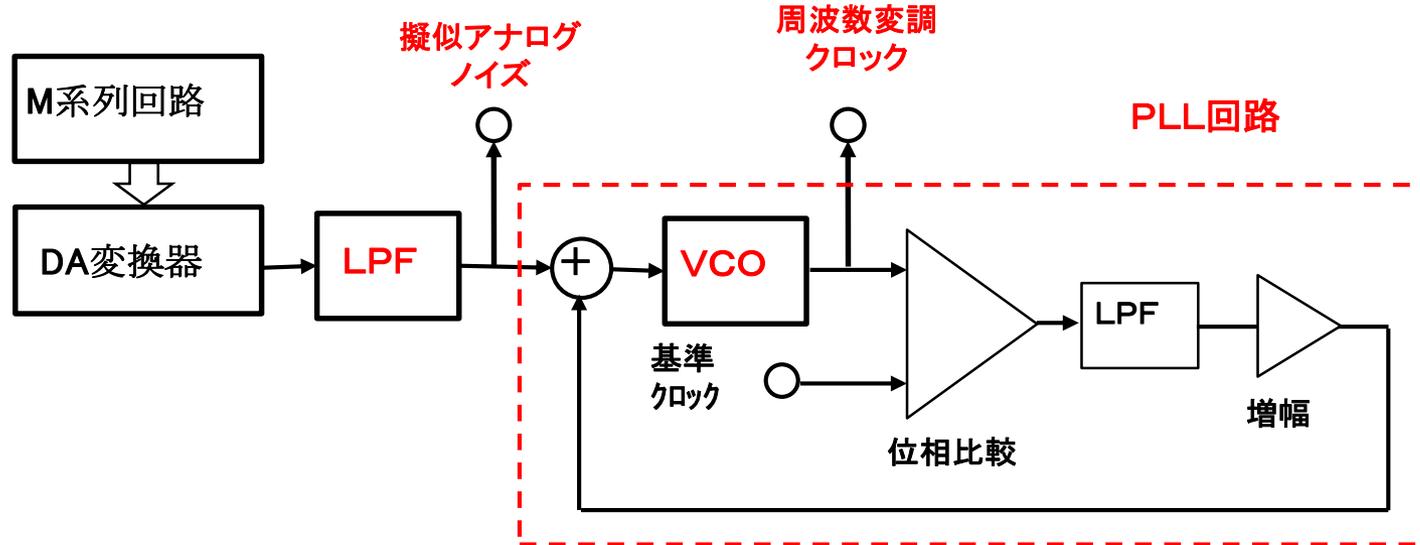
タイミング・チャート

1.2 擬似アナログノイズ・スペクトラム拡散技術

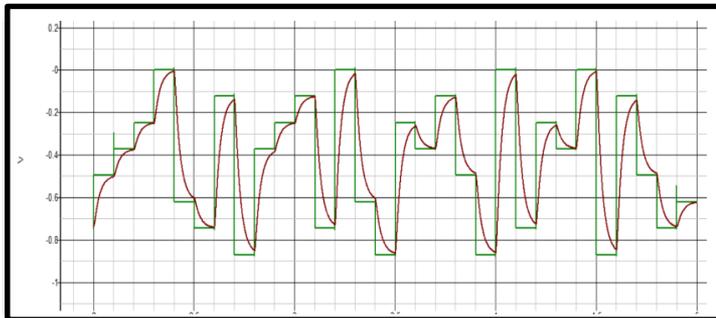
* 構成: M系列回路(ランダム信号) + (DAC+LPF) + PLL回路

* 特徴: 擬似アナログノイズ + 振動的PLL回路 ⇒ 非周期性

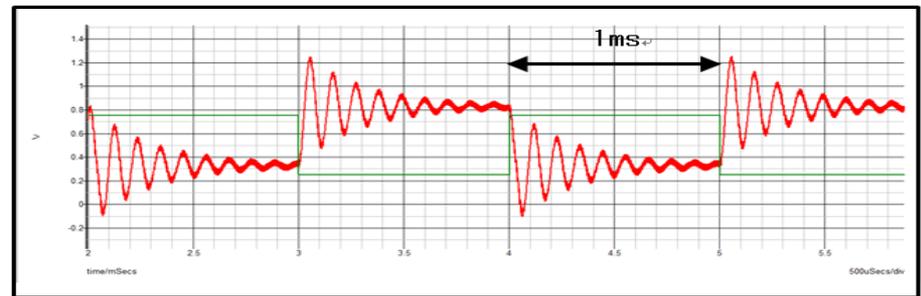
・アナログノイズ: 周期的信号 ⇒ 振動的PLL回路で **非周期的信号**へ



擬似アナログノイズ・スペクトラム拡散回路



擬似アナログノイズ波形



PLL回路応答特性

● ランダム信号発生器: M系列信号発生器

* 構成: 原始多項式に基づいた
(シフトレジスタ+ブール代数の帰還)

* 特徴: 各レベルが一度づつランダムに出現

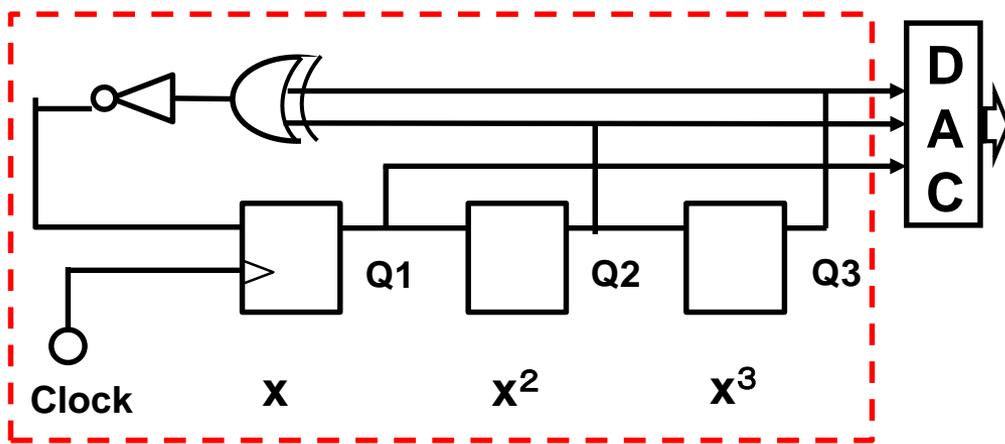
* 原始多項式(3ビット)

(a) $G(s) = x^3 + x^2 + 1$

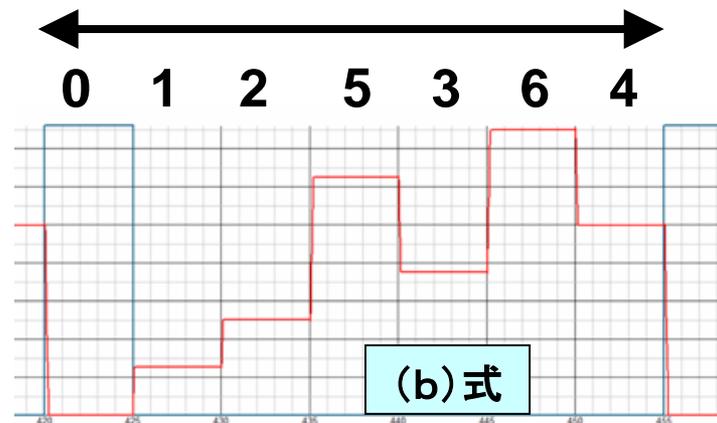
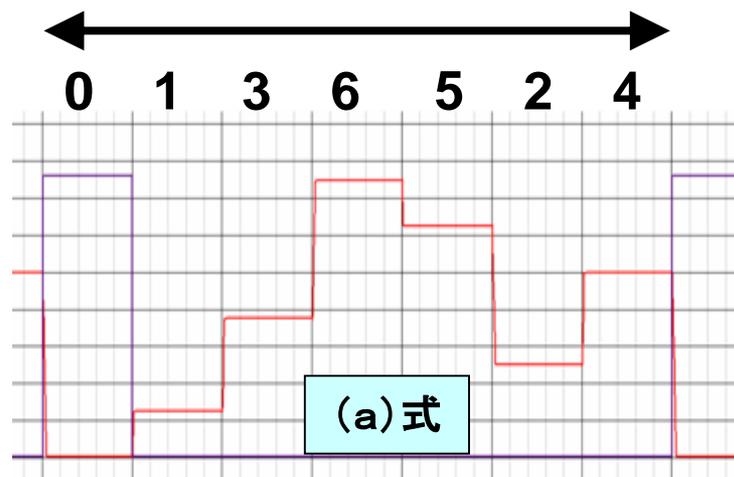
(b) $G(s) = x^3 + x + 1$

ブール代数で、+1は反転を表わす

* 出力信号: 基本7分周信号



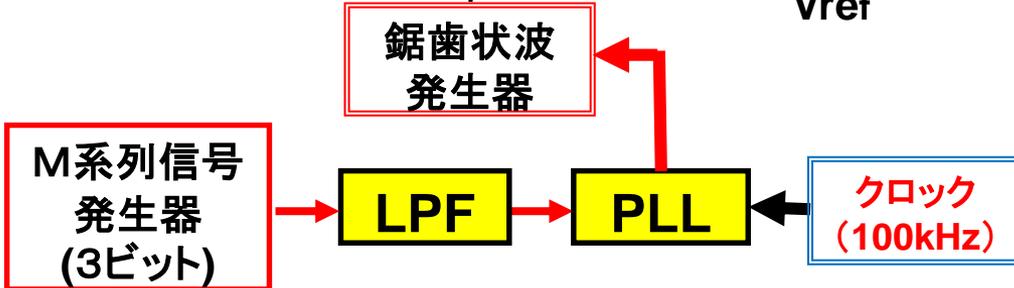
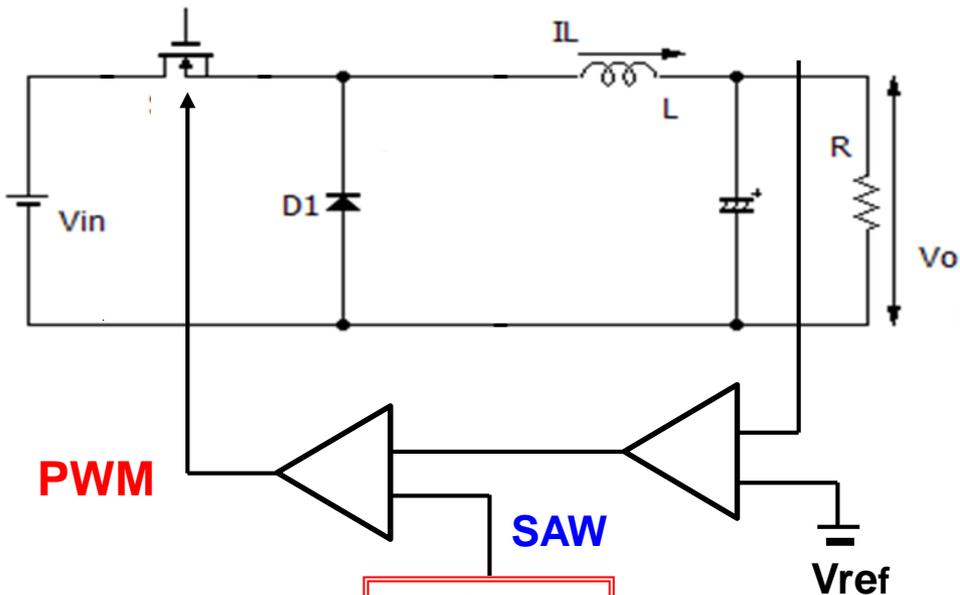
原始多項式の一例: 式 (a)



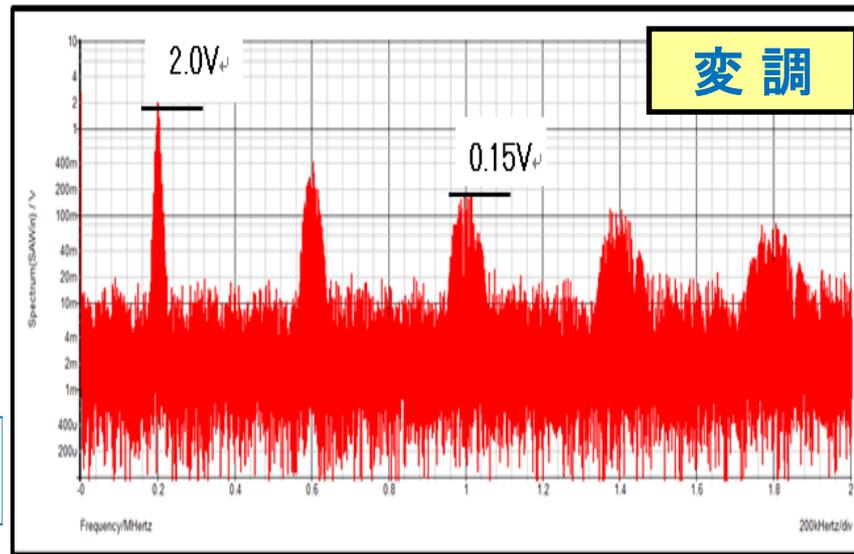
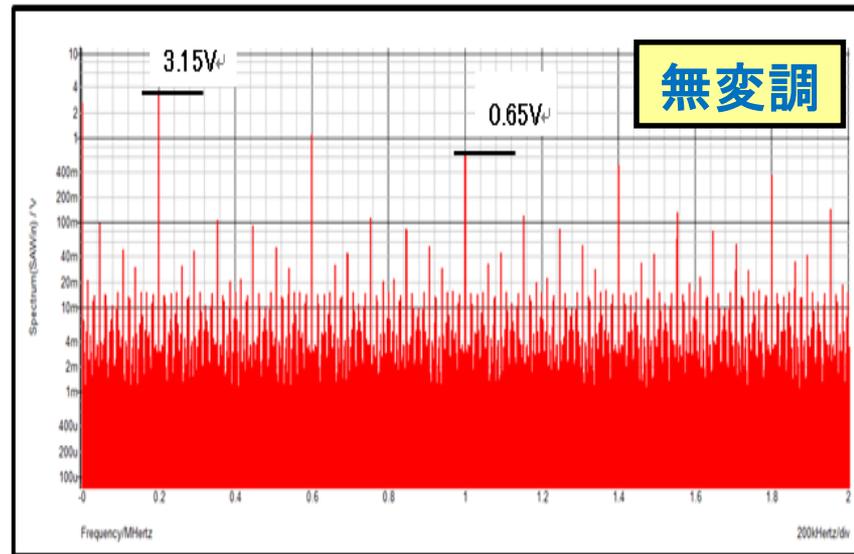
M系列回路の出力波形

1.3 スイッチング電源への適用: PWM信号のスペクトラム

- * 構成: 鋸歯状波発生器のクロックに適用
- * 変調周波数の選定 ($F=100/7=14\text{kHz}$)
- * 拡散結果: -1.15V (-2.0dB)@ 200kHz
 -0.5V (-6.4dB)@ 1.0MHz



アナログノイズを利用した降圧形電源



スペクトラム拡散結果

1.4 新M系列ノイズ拡張技術

● アナログノイズの周期性の拡大

・3ビットパターンの組合わせ:

$$N = {}_7P_3 = 5,040 \text{ 通りもある}$$

* 周期拡大手法:

(A) 原始多項式の切換え: $\times 2$

2つの原始多項式の交互入替え

(B) ビット反転手法(右表): $\times 8 \Rightarrow \times 16$ 倍

・3ビット・カウンタの出力を周期毎に反転

【ビット反転例】

0) 反転無し : 0-1-3-6-5-2-4-

1) Q1反転 : 1-0-2-7-4-3-5-

2) Q2反転 : 2-3-1-4-7-0-6-

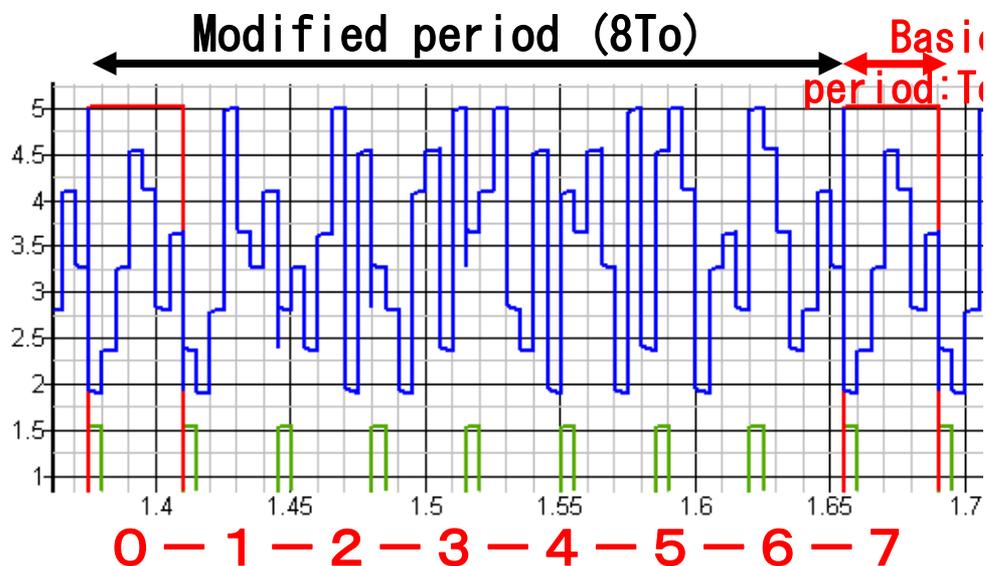
3) Q1Q2反転: 3-2-0-5-6-1-7-

4) Q3反転 : 4-5-7-2-1-6-0-

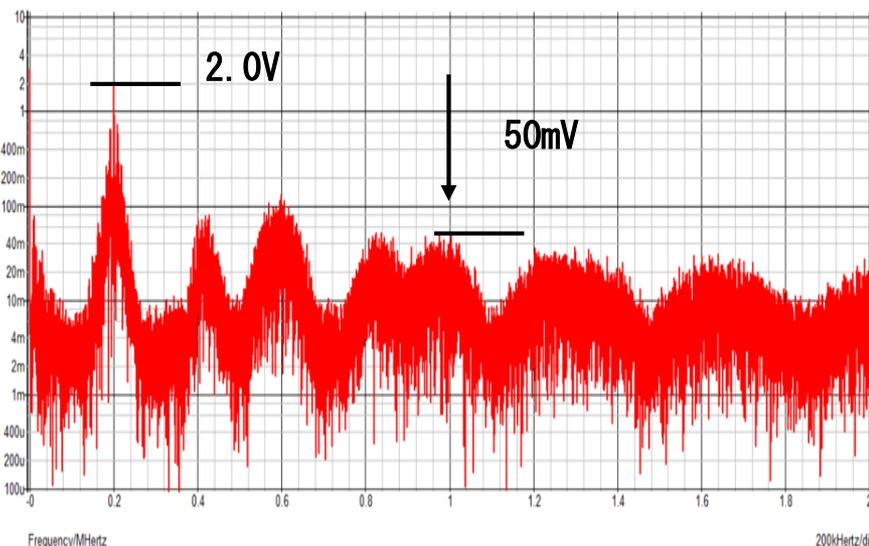
5) Q3Q1反転: 5-4-6-3-0-7-1-

6) Q2Q3反転: 6-7-5-0-3-4-2-

7) 全部反転 : 7-6-4-1-2-5-3-



新M系列によるスペクトラム拡散(ビット反転)



電源の出力電圧リップル

(C) **ビット入替手法**(右表)

×6倍:⇒ ×96倍周期= **672パターン長**

◎**スペクトラム拡散結果:**

基本波: 0.2 V [/3.15] (−12.0 dB)

高調波: 8 mV[/650mV] (−19.1 dB)

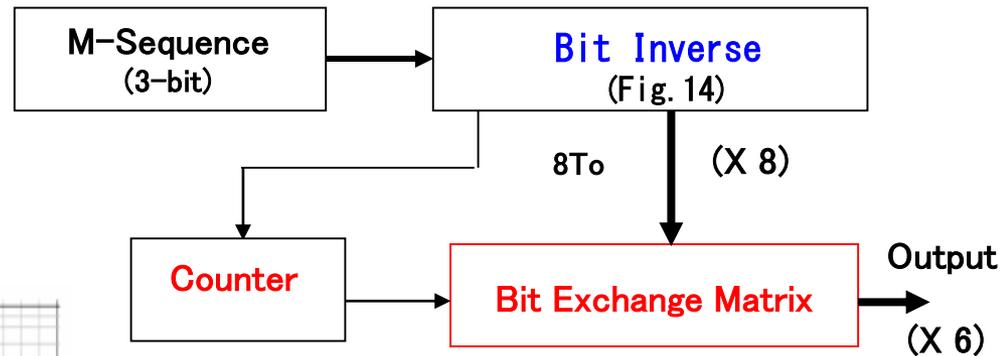
リップル: 13 mVpp

* **非周期的なリップルを確認**

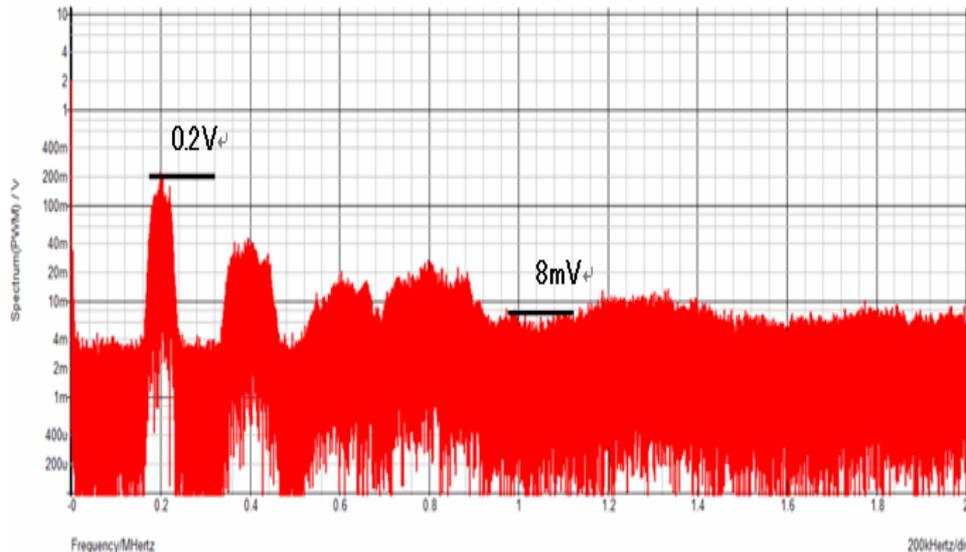
★ **変化レベル数ではなく
レベル変化数が重要**

【**ビット入替例**】

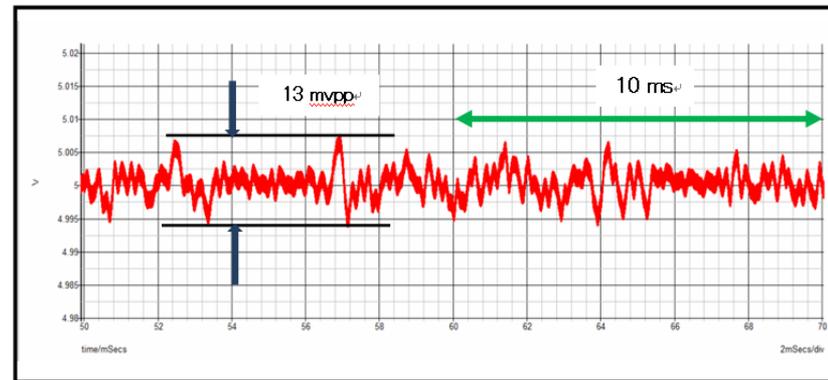
- 0) $Q_1Q_2Q_3$: 0-1-3-6-5-2-4-
- 1) $Q_1Q_3Q_2$: 0-1-5-6-3-4-2-
- 2) $Q_2Q_1Q_3$: 0-2-3-5-6-1-4-
- 3) $Q_2Q_3Q_1$: 0-4-5-3-6-1-2-
- 4) $Q_3Q_1Q_2$: 0-2-6-5-3-4-1-
- 5) $Q_3Q_2Q_1$: 0-4-6-3-5-2-1-



ビット操作回路ブロック図



新M系列によるスペクトラム拡散



出力電圧リップル

パワーエレクトロニクス工学論

11. EMI低減スペクトラム拡散電源

11-1 各種周波数変調方式によるEMI低減技術

11-2 クロックレス電源への適用

2.1 PWC方式スイッチング電源の実装

2.2 リプル制御(ヒステリシス制御)電源への適用

11-3 他のEMI低減方式と電圧リプル低減方式

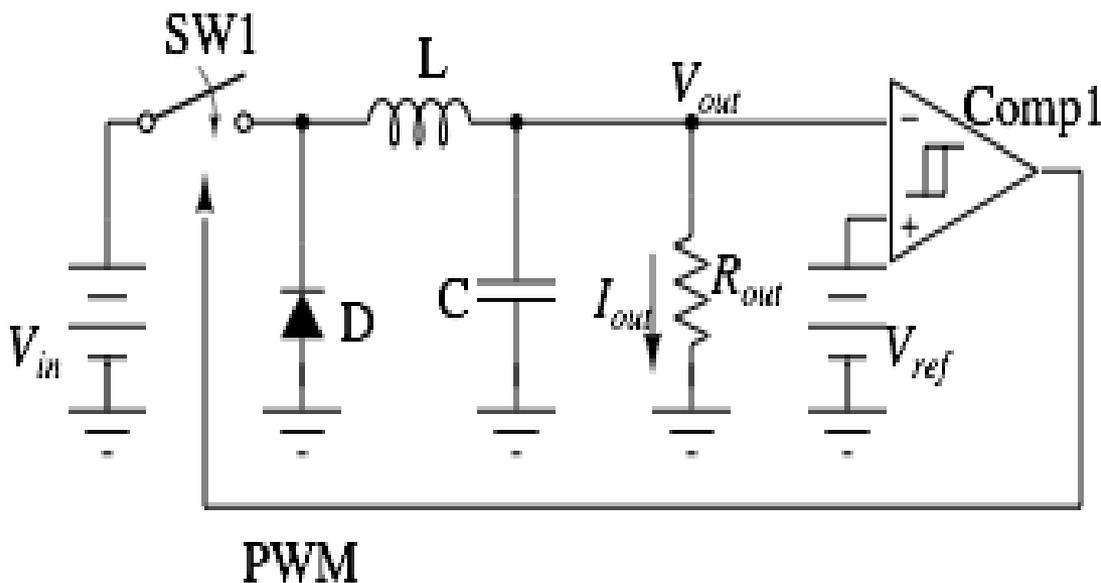
11-2 クロックレス電源への適用

2.1 リプル制御(ヒステリシス制御)電源への適用

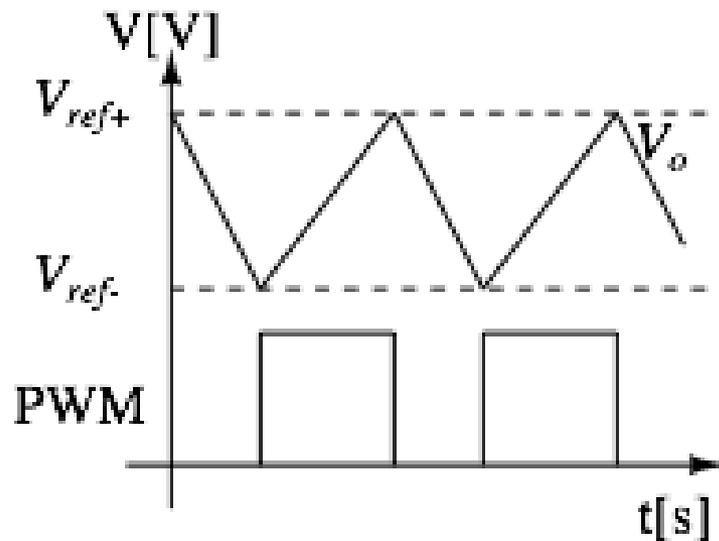
(A) 従来リプル制御電源1

- * 構成: 出力電圧を、直接 基準電圧と比較 \Rightarrow SW制御
- * 特徴: 高速制御・・・ある程度のリプル必要
- * 対策: 周波数制限にシュミットトリガ

周波数安定化に**一定ON時間方式(COT: Constant ON Time)**: 電源2



従来リプル制御電源1の構成

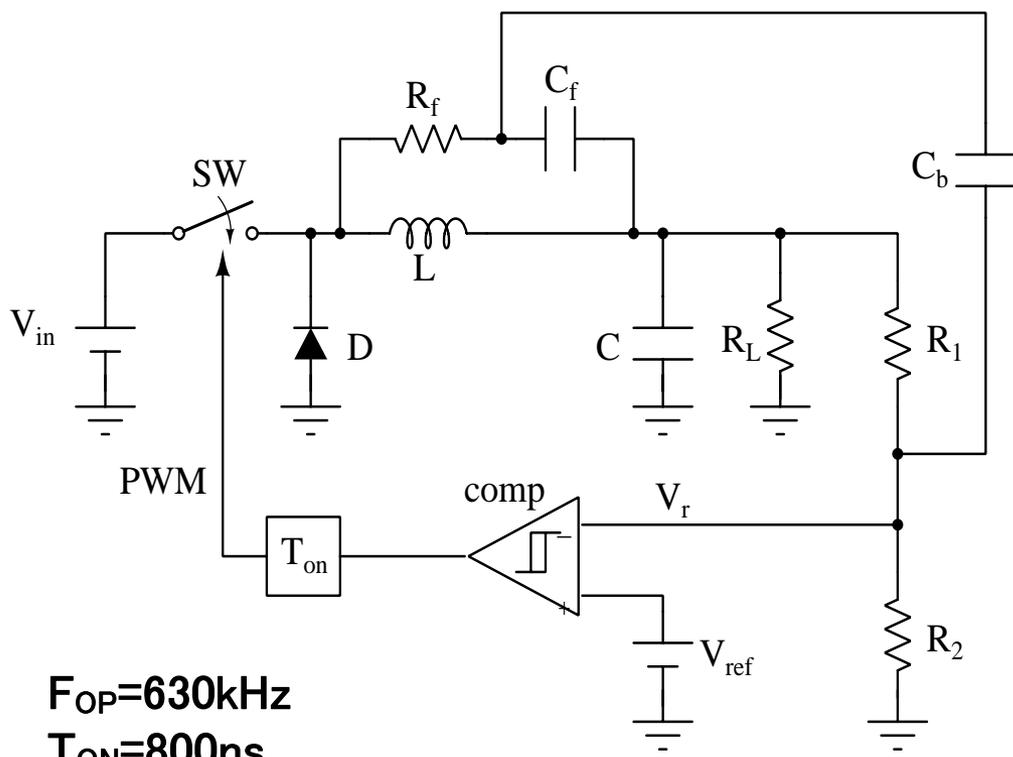


タイミング・チャート

(B) 従来リップル制御電源2

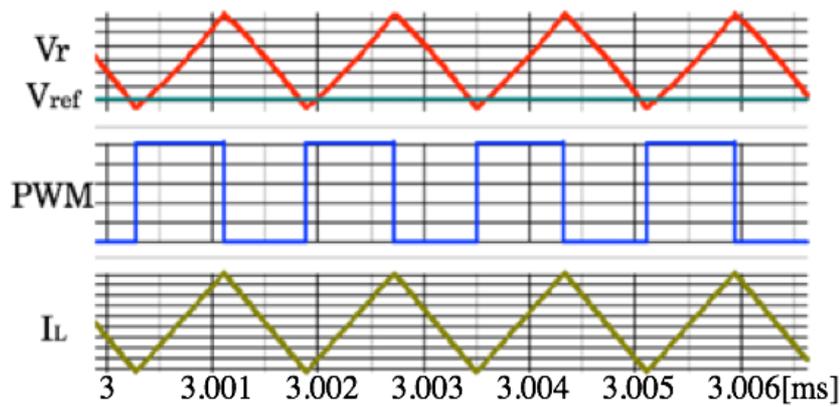
* 構成: インダクタ電圧をCR積分したリップルを、基準電圧との比較部に注入
 電流制御 ⇒ 高速応答だが周波数不定 ⇒ COT方式の導入

* 特徴: 出力リップル不要。シュミット不要
 リップル周波数 $\propto T_{ON} + \tau_{CR}$

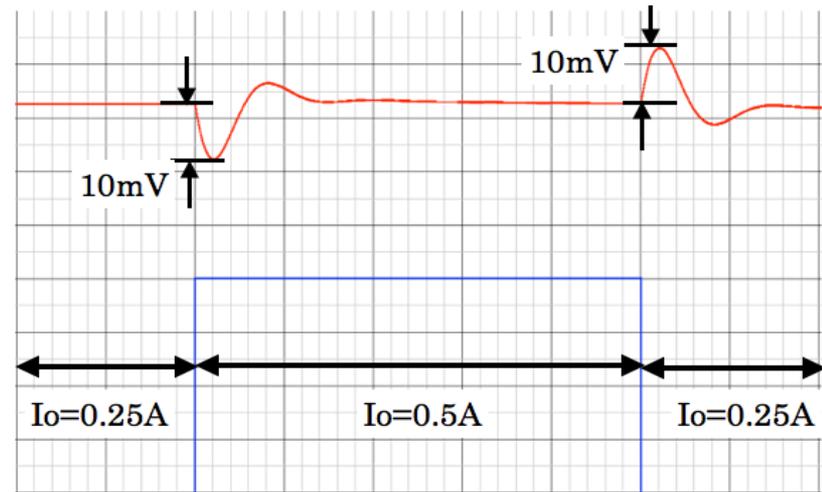


$F_{OP}=630\text{kHz}$
 $T_{ON}=800\text{ns}$

従来リップル制御電源2の構成



タイミング・チャート



出力電圧リップル

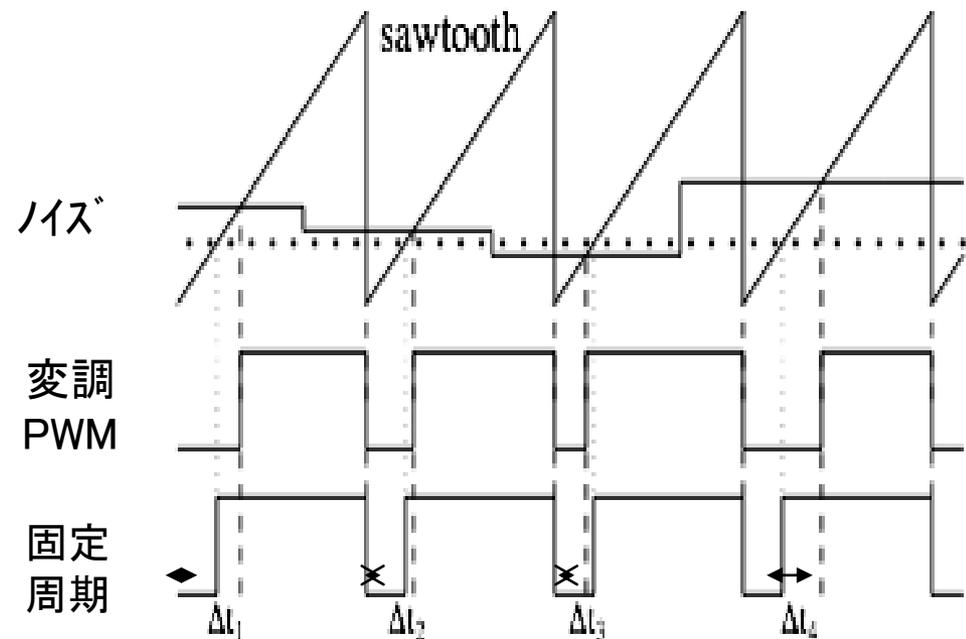
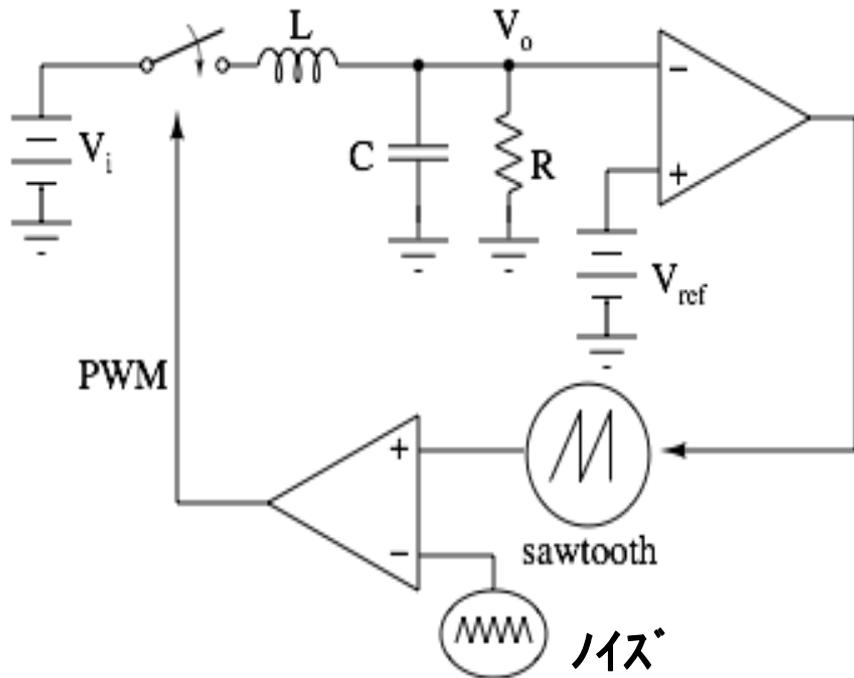
(C)EMI低減リップル制御電源1

* 構成:コンパレータ出力パルスより、鋸歯状波を発生

アナログノイズと比較し、エッジをランダムに位相変調 ⇒ 遅延発生

* 対策:シュミットレベルを削除し、シュミット相当分の遅延範囲でシフト

* 特徴:両エッジにも変調可能

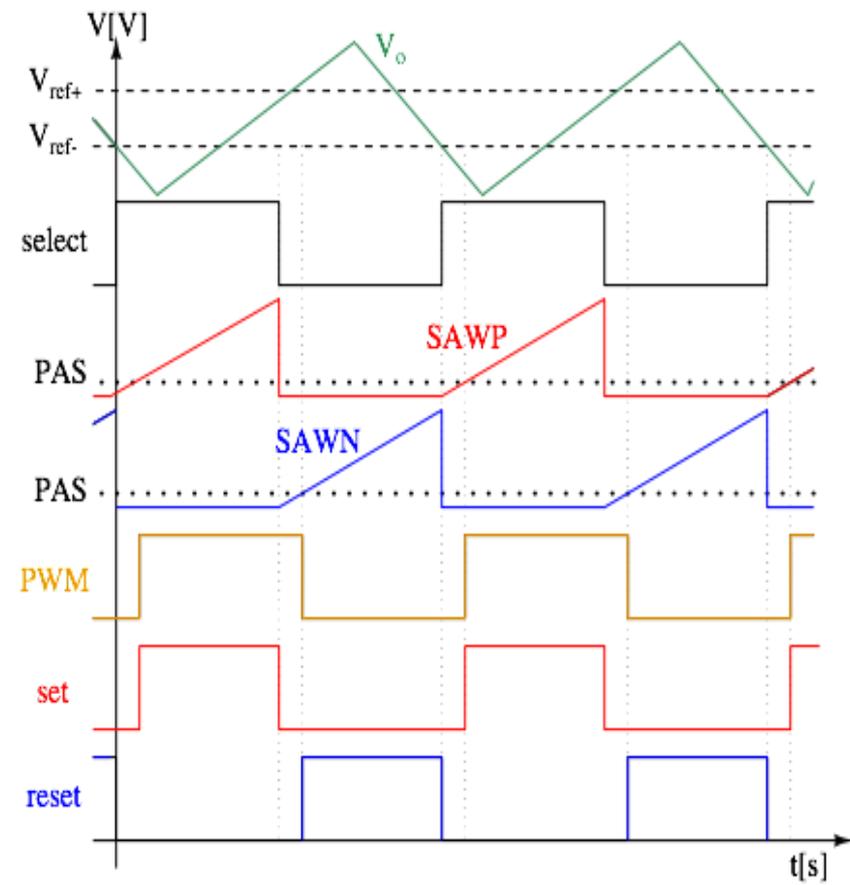
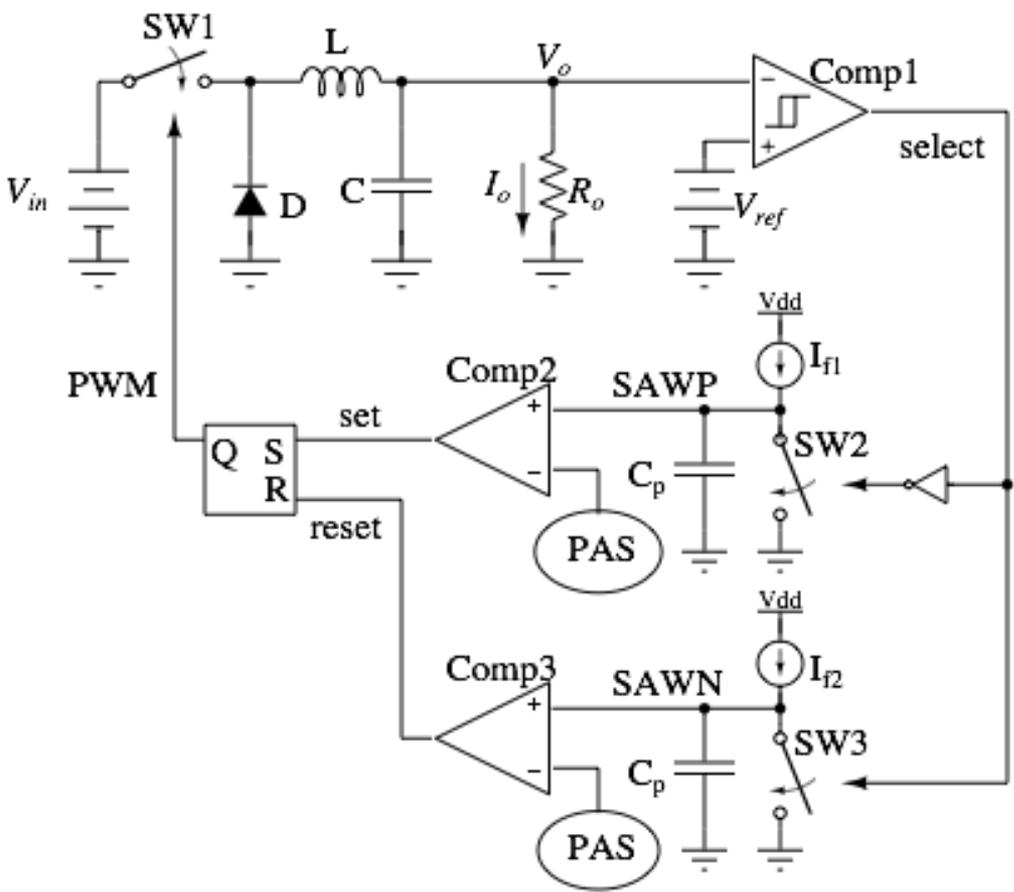


EMI低減電源の構成(単エッジ変調)

タイミング・チャート

●シミュレーション回路(ダブルエッジの位相変調方式)

* 構成: コンパレータ出力パルスの両エッジを、アナログノイズでランダム変調
 変調出力でフリップ・フロップを駆動



EMI低減電源の構成(両エッジ変調)

タイミング・チャート

● シミュレーション結果

* 回路条件:

$V_i=10V$ 、 $V_o=5.0V$ 、 $I_o=0.5A$

$L=10\mu H$ 、 $C=470\mu F$

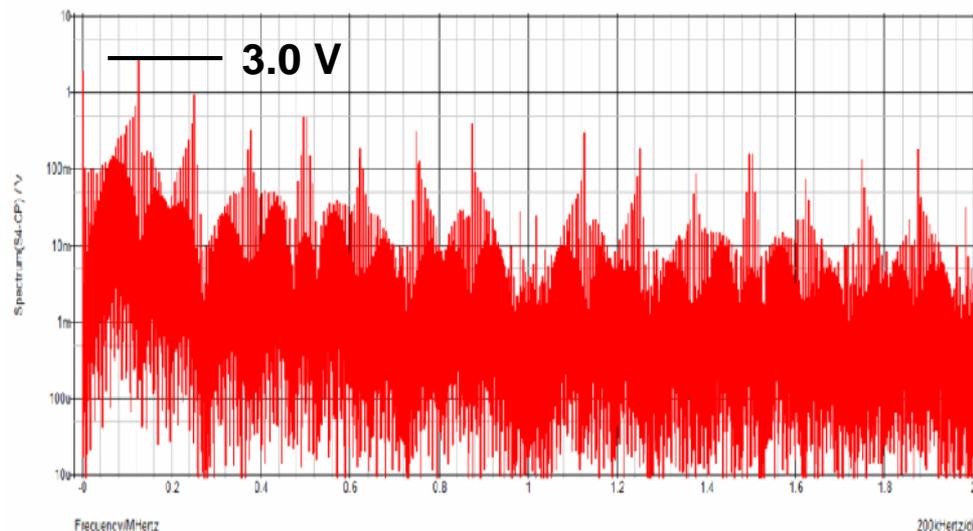
$F_{op}=185\text{ kHz}$

* スペクトラム拡散結果:

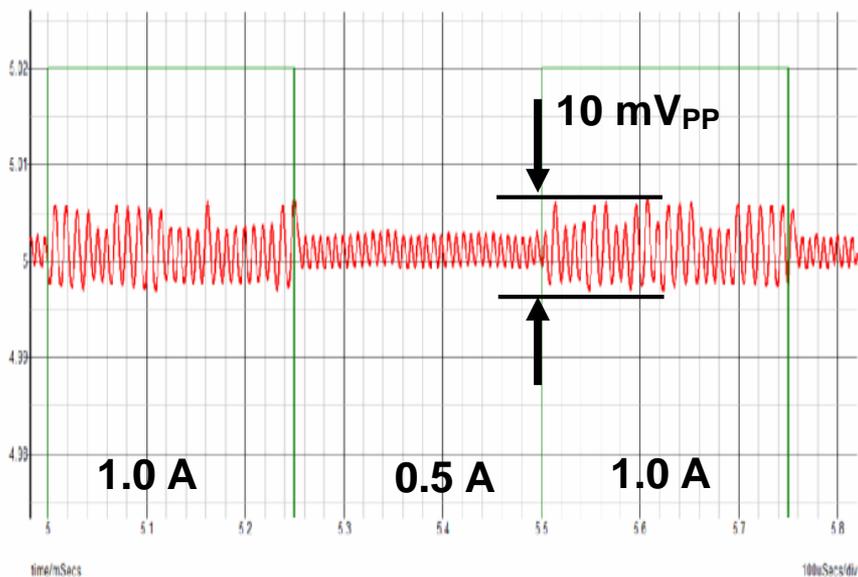
$-0.7V$ (-12 dB) @ 185 kHz

* 出力電圧リップル

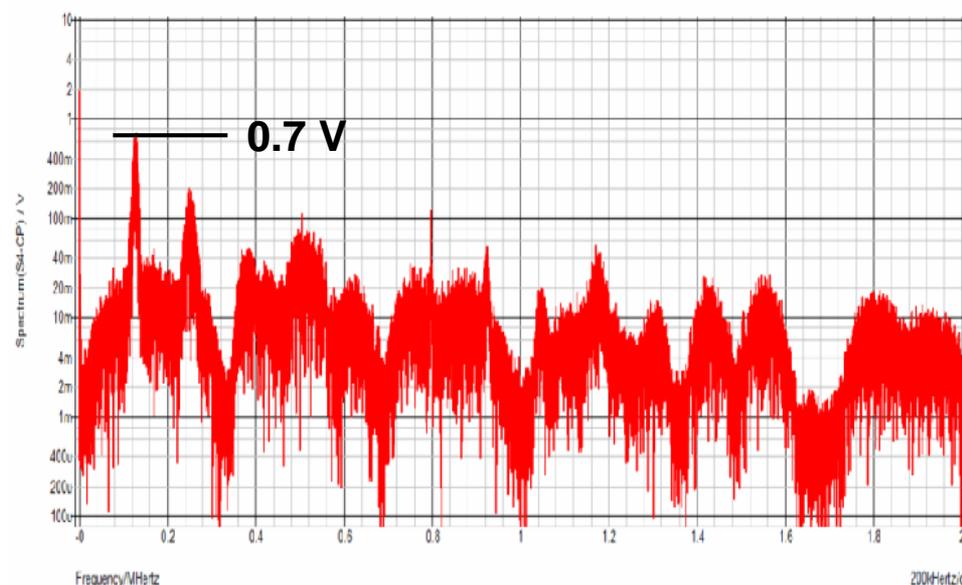
$\Delta V=10\text{ mV}_{PP}$ @ $\Delta I_o=0.5\text{ A}$



リップル制御電源のスペクトラム(従来)



リップル制御電源の出力リップル



リップル制御電源のスペクトラム(EMI拡散)

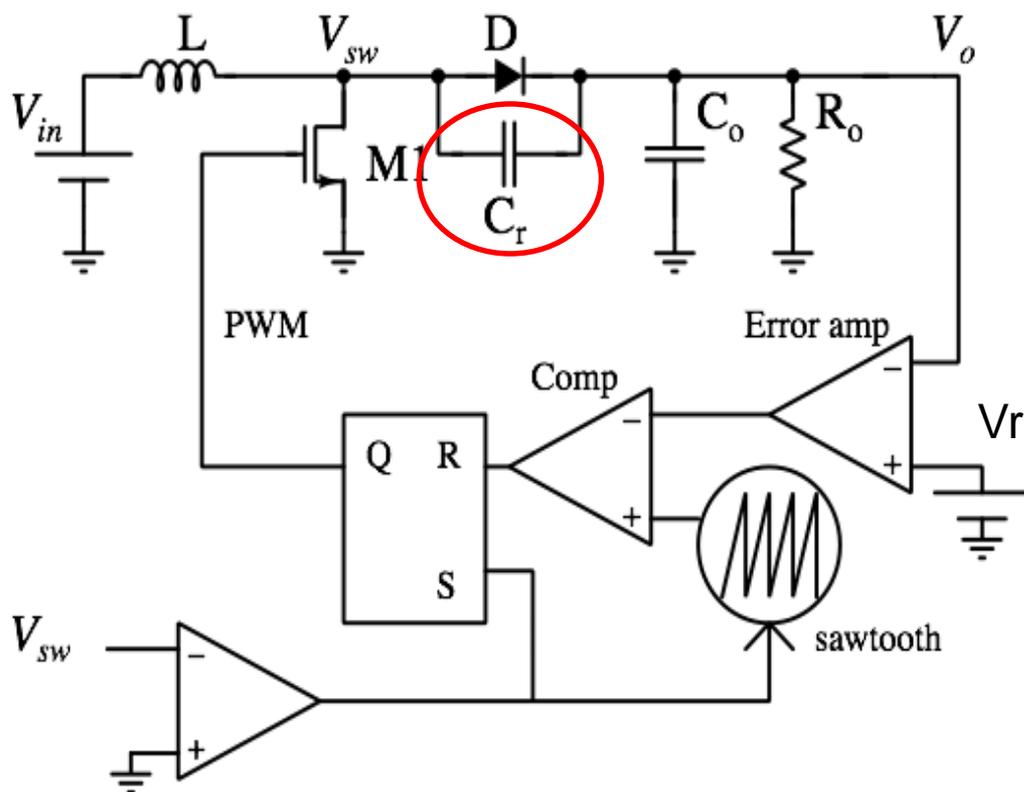
2.2 ソフトスイッチング (ZVS-PWM制御) 共振電源への適用

(A) 従来共振電源

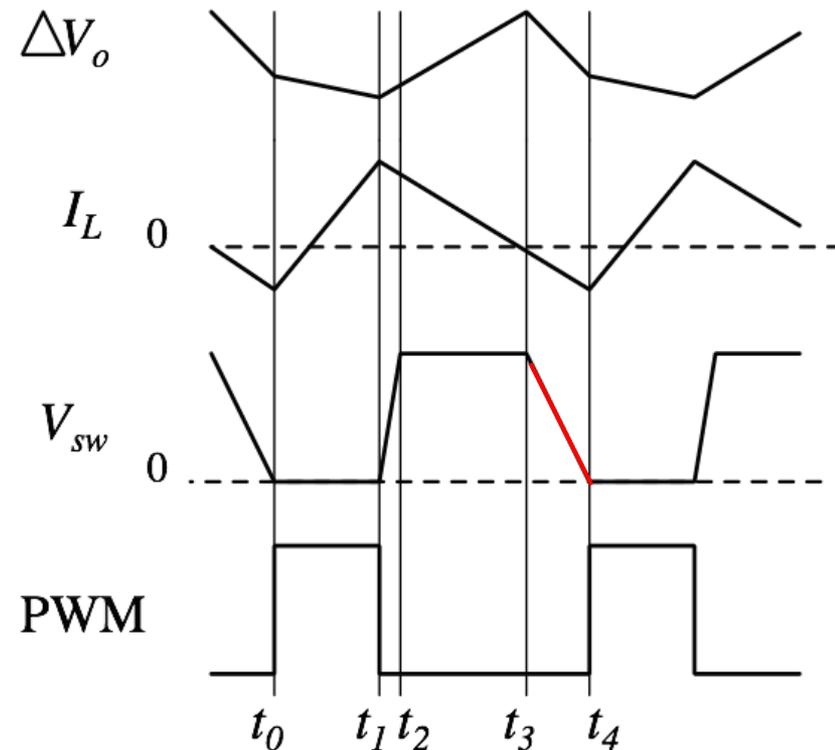
* 構成: ダイオードに並列に共振コンデンサ C_r を挿入

* 特徴: $V_{sw} = 0 \text{ V}$ で $SW = \text{ON} \Rightarrow \text{ZVS (Zero Voltage Switching)}$

ボディ・ダイオードにより、 $V_{sw} > -0.7 \text{ V}$



共振電源への適用例



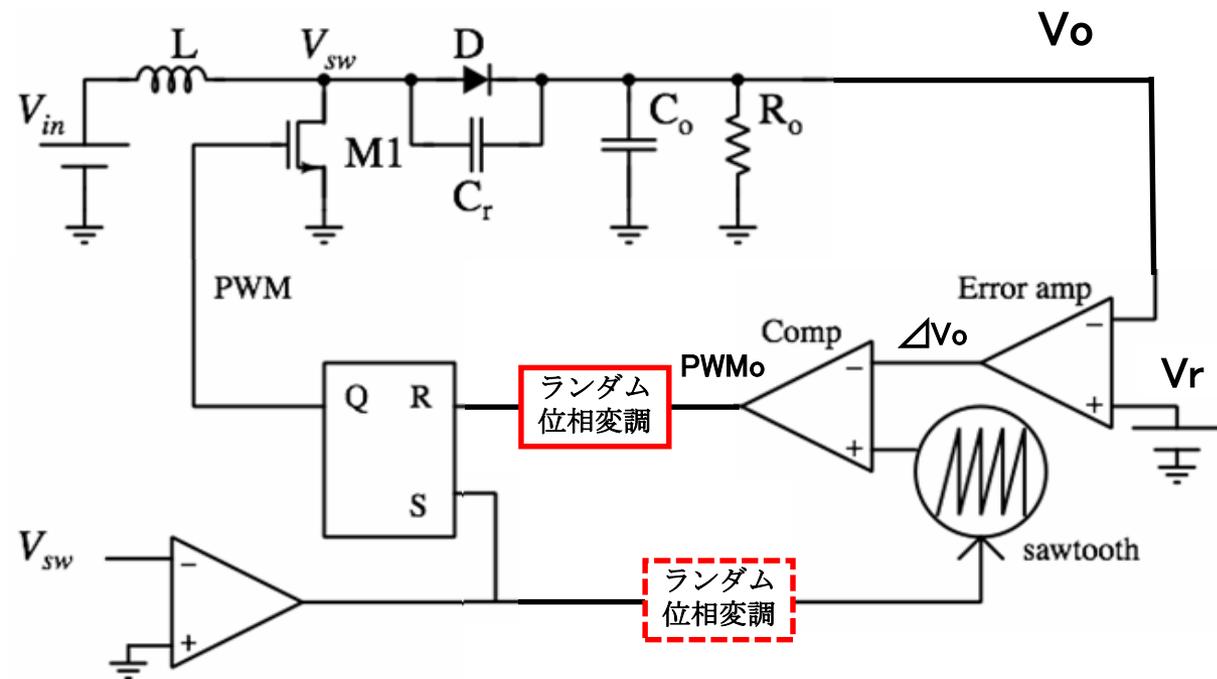
タイミング・チャート

(B) EMI低減共振電源

* 構成: SW=ON: ZVSであり遅延なくSet

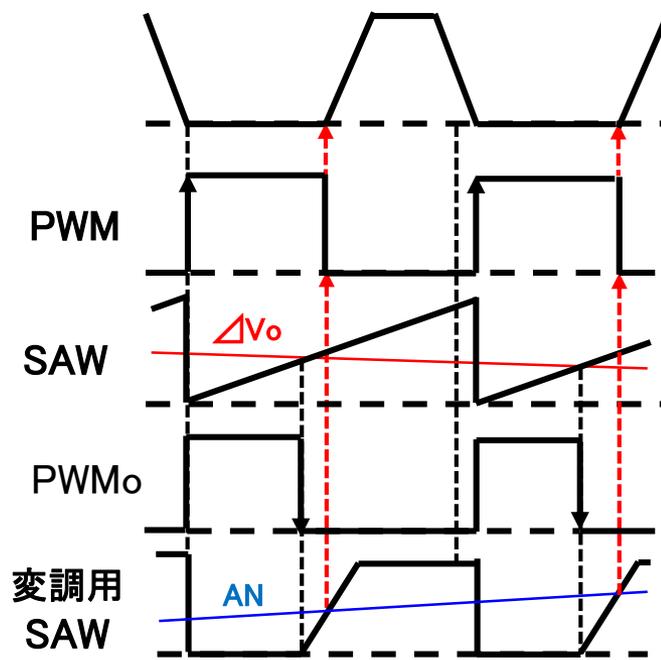
SW=OFF のタイミングをランダム位相変調(回路は上図と同様)

⇒ SAW信号の変調 or コンパレータ出力の変調



共振電源への適用例

【PWMoの位相変調例】



タイミング・チャート

パワーエレクトロニクス工学論

11. EMI低減スペクトラム拡散電源

11-1 各種周波数変調方式によるEMI低減技術

11-2 クロックレス電源への適用

11-3 他のEMI低減方式と電圧リップル低減方式

3.1 周波数ホッピング方式とリニア掃引方式

3.2 リニア掃引方式とリップル補正技術

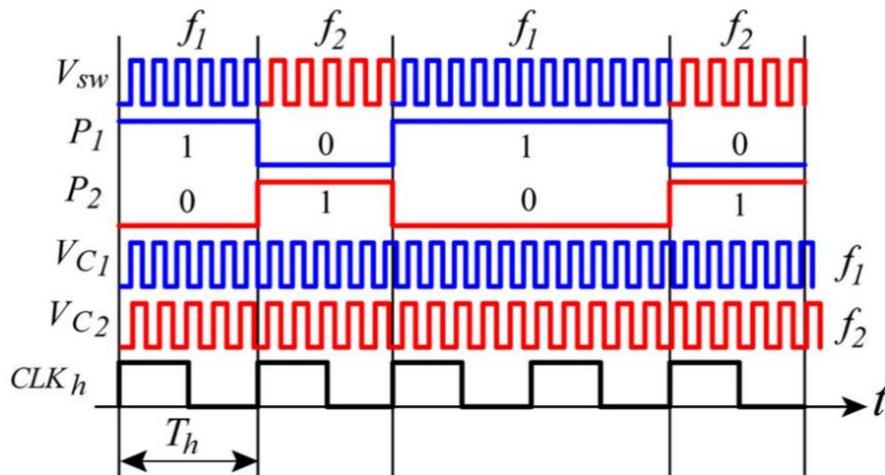
11-3 EMI低減と出力電圧リップル補償方式

3.1 周波数ホッピング方式とリニア掃引方式

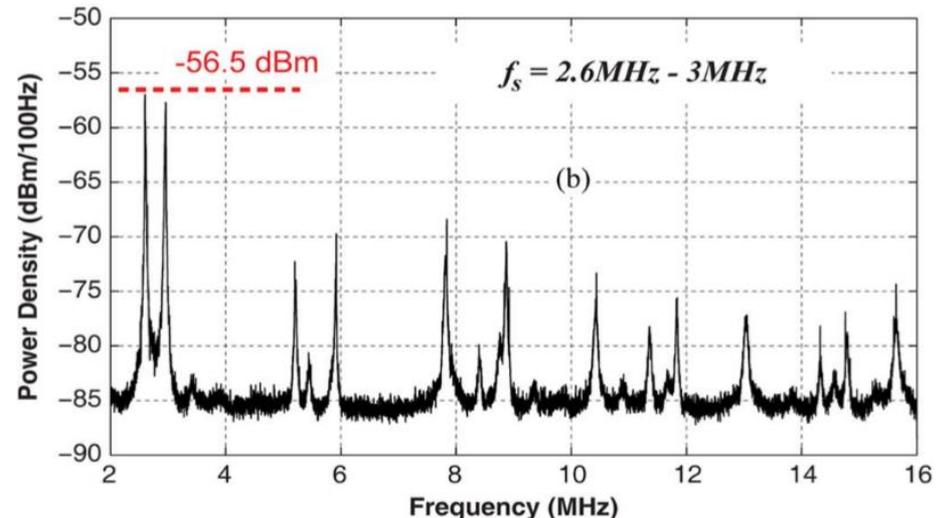
(A) 周波数ホッピング方式: 当初のEMI低減方式

- * 構成: クロック周波数を周期的に切換ええ ⇒ SW制御
- * 動作: ホッピング周波数の数に反比例的にスペクトラムが低減
- * 結果: ホッピング数 = N のとき: $\Delta\text{dB} = -20\text{Log}(N)$ [図では、 $N=1$ で -50.5dB]
- * 課題: 切り替え時の鋸歯状波の連続性 (多数クロックの同期化困難)

切換え数を多くできない (EMI低減効果にある程度の限界)



周波数ホッピング方式の波形図



拡散スペクトラム

(B) 課題の対策法

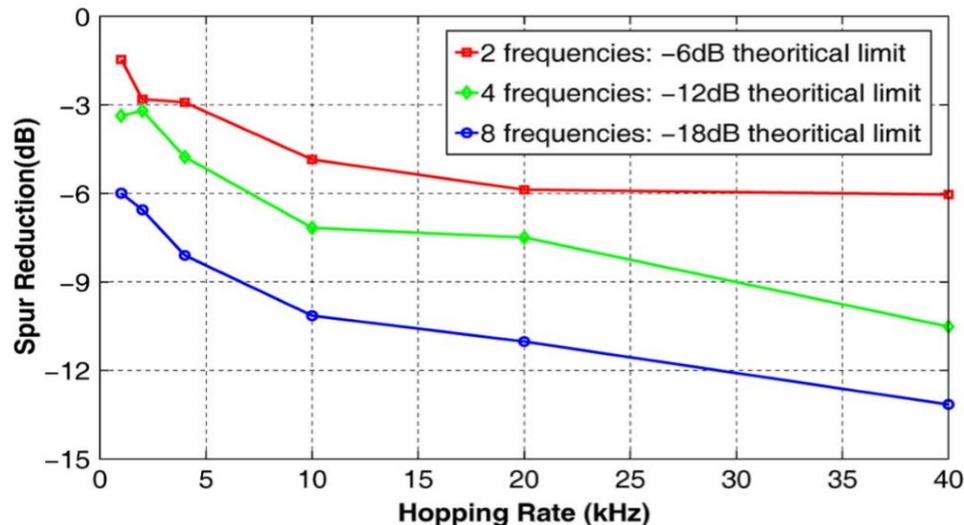
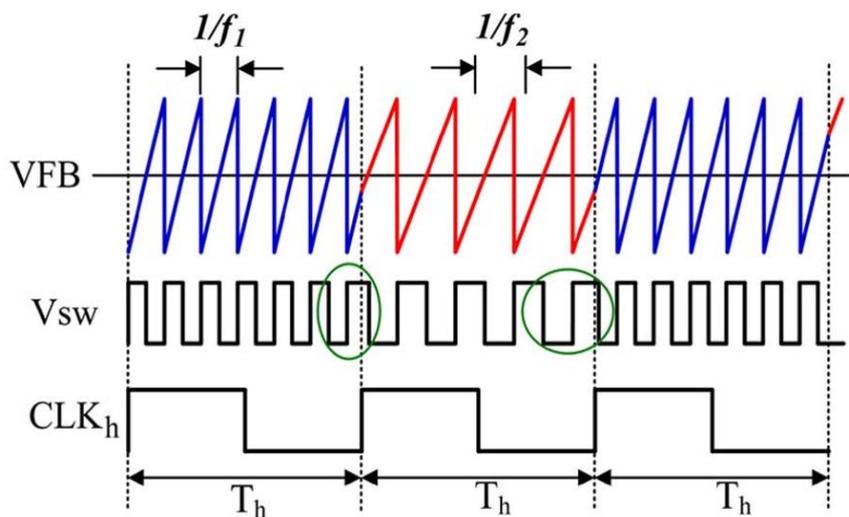
* 原理: 本来動作: クロック信号 \Rightarrow 鋸歯状波の発生

欠点: 鋸歯状波のつなぎ目にギャップ発生

対策回路: 鋸歯状波の発生を基準 \Rightarrow クロック発生

動作: SAW信号の上下電圧を制限してパルスを発生し、
SAW信号の中心レベルで電流源をSW

* 検討結果: ホッピング数を増加した場合、効果UPには周波数の増加が必要



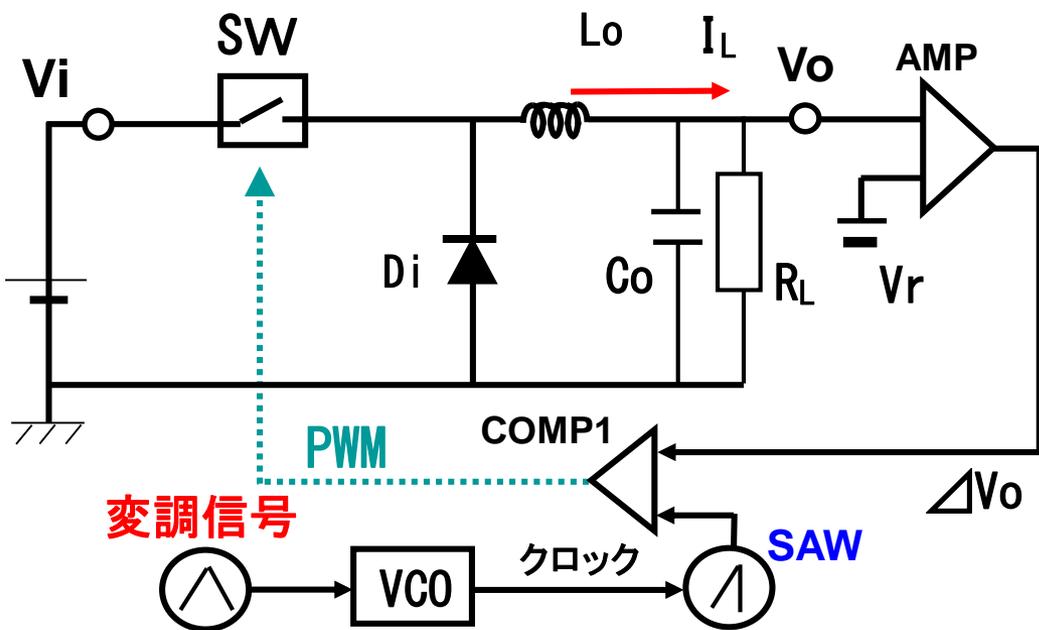
周波数ホッピング方式の詳細構成

スペクトラム拡散

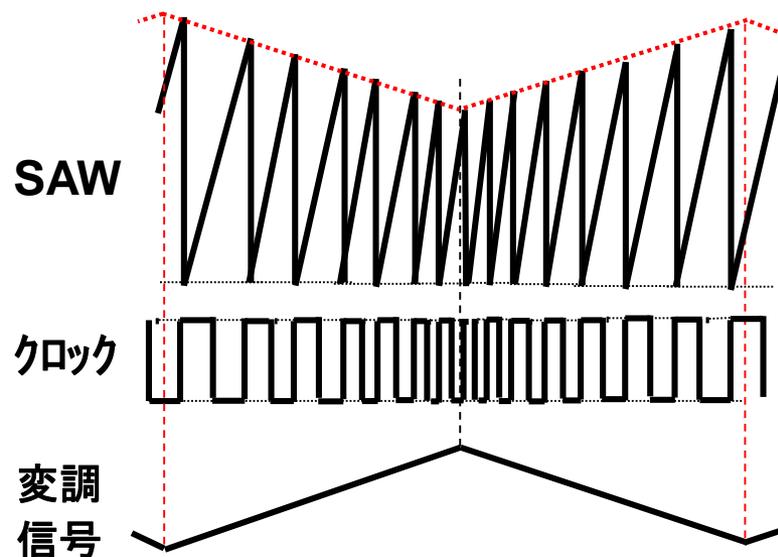
3.2 リニア掃引方式とリップル補償技術

(A) リニア掃引方式: クロック周波数を三角波で連続的に変化

- * 構成: 電圧制御発振器VCOの制御入力に、三角波信号を加算入力:
クロックはリニアに周波数変調され、鋸歯状波の包絡線は逆三角形
- * 動作: クロック・スペクトラムが平坦に分布 & 低減(次ページ)
- * 課題: 三角波発生器とVCOの回路規模が大きい



リニア掃引方式の構成



タイミング・チャート

(B) リニア掃引方式: クロック周波数を三角波で連続的に変化

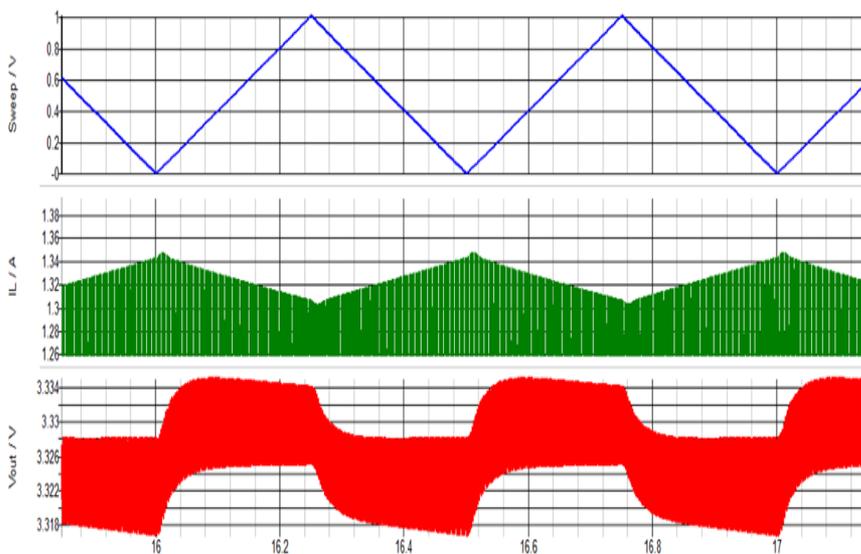
* 構成: 電圧制御発振器VCOを使用してクロック周波数を三角波状に変化

* 結果: 出力電圧リップルに、ステップ状のリップル出現

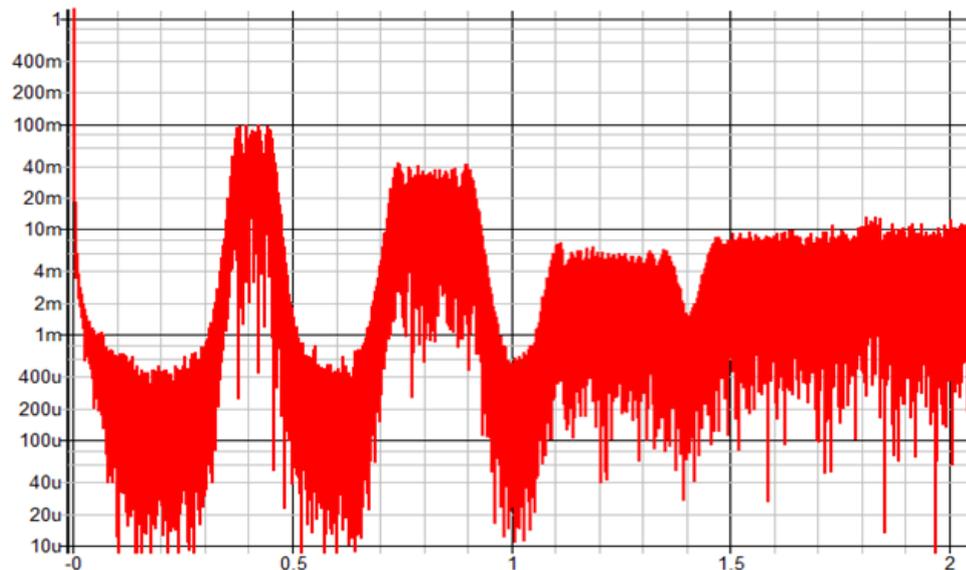
パワースペクトラムは、トップが大きく低減し平坦に分布

* 対策: 三角波に同期したリップル補正回路が必要

周波数の増加で、リップル電圧がステップ状に増加



リニア掃引方式の構成



スペクトラム拡散

(C) 三角波変調クロックによる出力電圧変化

* Sim結果: 変調三角波に同期して、リップル振幅が変化

* 変化原因: 三角波 $f(t)$ により周波数 $F_{ck}(t)$ は比例的に増減

・ V_m の増加時: PWM幅は前周期で設定。

しかし、周期終端はFM変調で変化し、+傾斜時 $T' = T_0 - \Delta T$

・デューティ変化: PWMパルス幅を W とすると

$$D' = W/T' = W/(T_0 - \Delta T) = (W/T_0)/(1 - \alpha) \quad \text{ただし } \alpha = \Delta T/T_0$$

$$\therefore D' = D_0/(1 - \alpha) \doteq D_0 \cdot (1 + \alpha)$$

● したがって、**デューティは微増し、出力電圧 V_o も微増する**

(D) 出力リップルの補償技術

* 補償方法: デューティ D の変化を補正

・三角波に同期して、鋸歯状波の傾斜を可変

⇒ 補正電流源を並列接続:

補正電流源の大きさは、現状 最大変調時に調整

★現在、補正量を理論的に解析中

以上