

フルブリッジレスPFC回路と LLC回路におけるEMI低減

群馬大学院理工学府

大岩紀行 片山翔吾 小堀康功
桑名杏奈 小林春夫



アウトライン

1. 目的・従来技術
2. 昇圧型PFC電源の改善
 - 2-1. ダイオードブリッジの効率改善法
 - 2-2. 周波数変調によるEMI低減
3. LLC共振電源のEMI低減
 - 3-1. デューティ変調による低減手法
 - 3-2. 出力リップル改善法
4. 結論

アウトライン

1. 目的・従来技術

2. 昇圧型PFC電源の改善

2-1. ダイオードブリッジの効率改善法

2-2. 周波数変調によるEMI低減

3. LLC共振電源のEMI低減

3-1. デューティ変調による低減手法

3-2. 出力リップル改善法

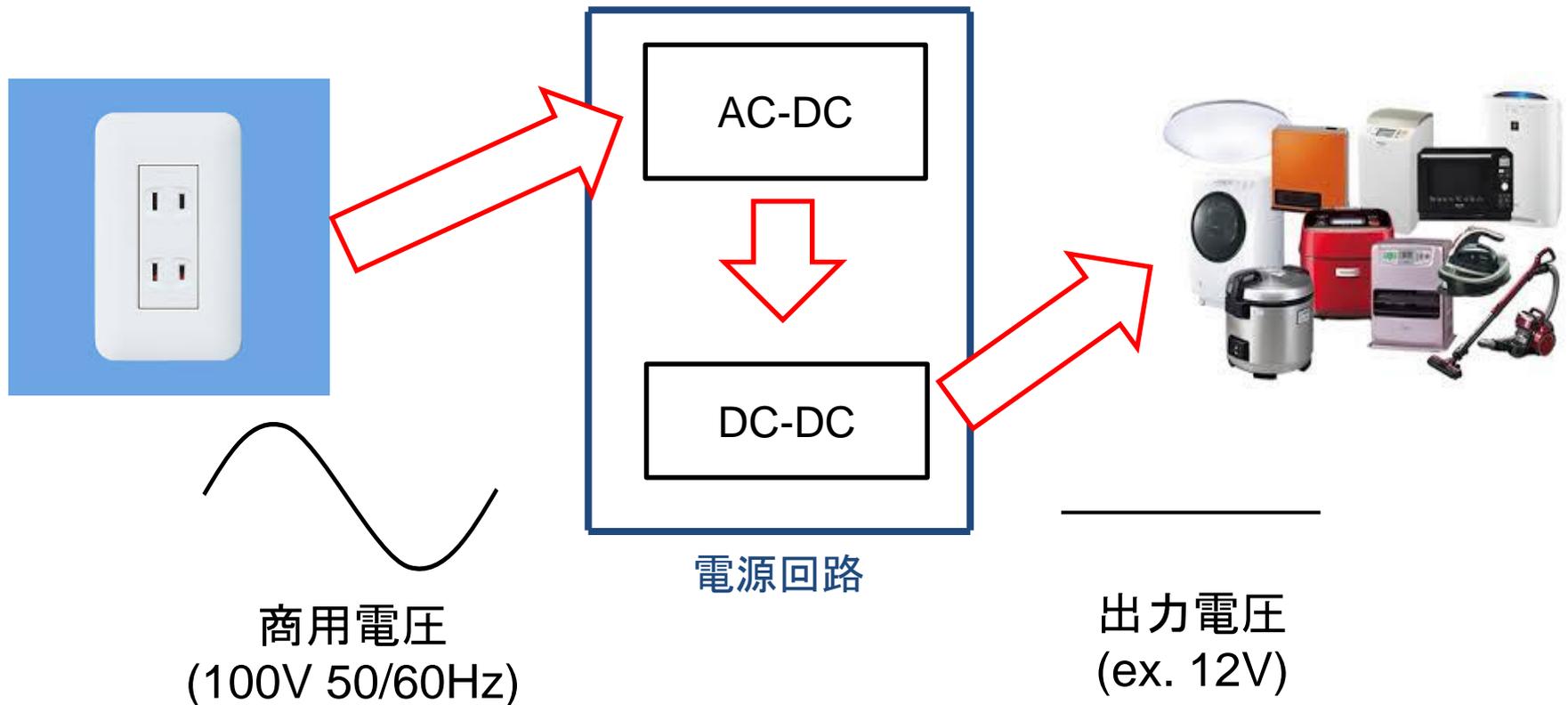
4. 結論

目的

- PFC電源回路の改善
 1. ダイオード損失削減による効率改善
→ダイオードブリッジのフル・ブリッジレス化
 2. 電磁妨害(EMI)ノイズの削減
→周波数拡散の利用
- LLC共振回路の改善
 1. 電磁妨害(EMI)ノイズ削減
→デューティ変調と出力リップル補正

1.1 電源回路について

- コンセントから家電などへ電力供給
→電圧を交流から直流へ変換必要



1.2 力率改善電源とは？

- AC入力の大電力機器
→送電機器への**負荷軽減**対策が必要



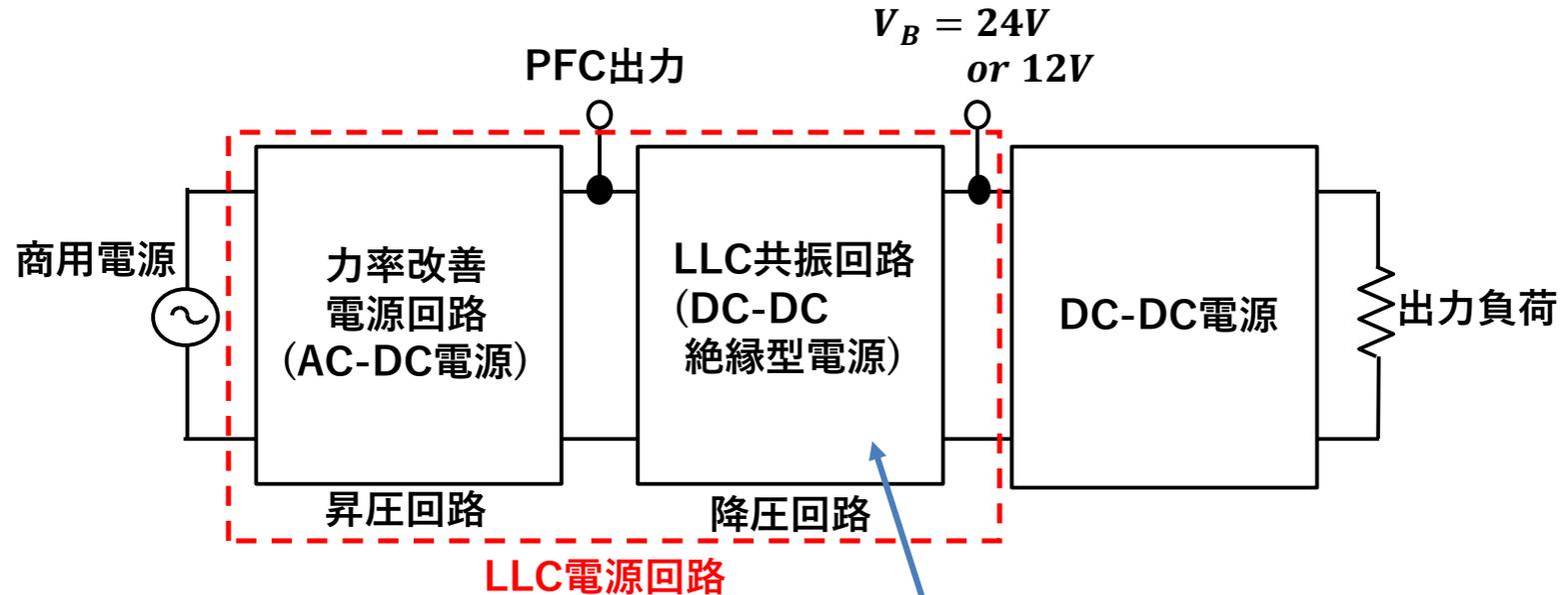
有効策: 力率改善電源

→ 力率補正 $\varphi > 90\%$



- 力率改善: **PFC** = Power Factor Correction

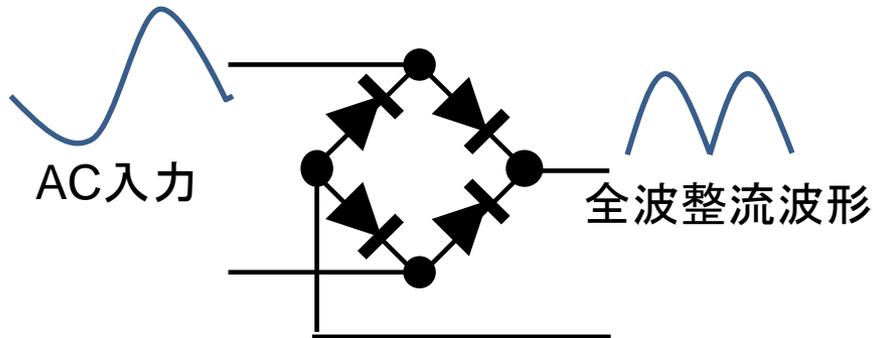
1.3 LLC電源とは？



DC-DC絶縁型電源の役割

1. PFC出力 → 低出力DCへ変換
2. 一次側の変換方式により少ないノイズへ

1.4 ダイオードブリッジの特徴



ダイオードブリッジ

- 長所**
- ・低コスト
 - ・簡易に整流可能
 - ・逆電流の防止
- 短所**
- ・**導通損失**が大きい
(しきい値電圧が大きい)

導通損失について

ダイオードの順方向電圧

- ・ PNダイオード: 約 0.8V
- ・ SiCダイオード: 約 0.4V

MOSFETの飽和電圧

$$V_{DS} \cong 0.2V$$

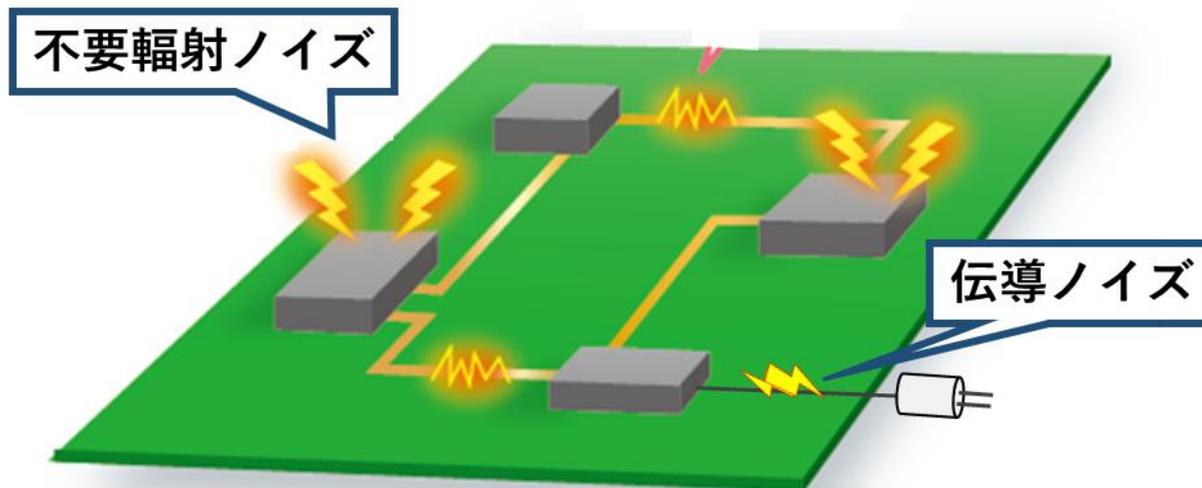
ダイオードの損失低減には、**トランジスタによるスイッチ動作**が有効

1.5 電磁妨害(EMI)ノイズ

- 回路動作で生じる全ての電磁ノイズ
- 電源では大電力・高速スイッチングにより
大きなEMIノイズ発生

→法規により製品の出荷停止

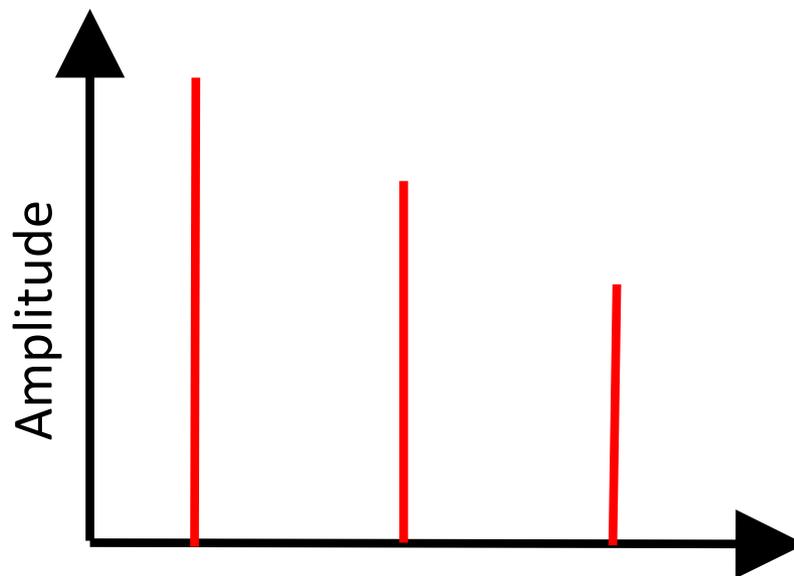
従来はシールド・ケース、
フィルタで対策



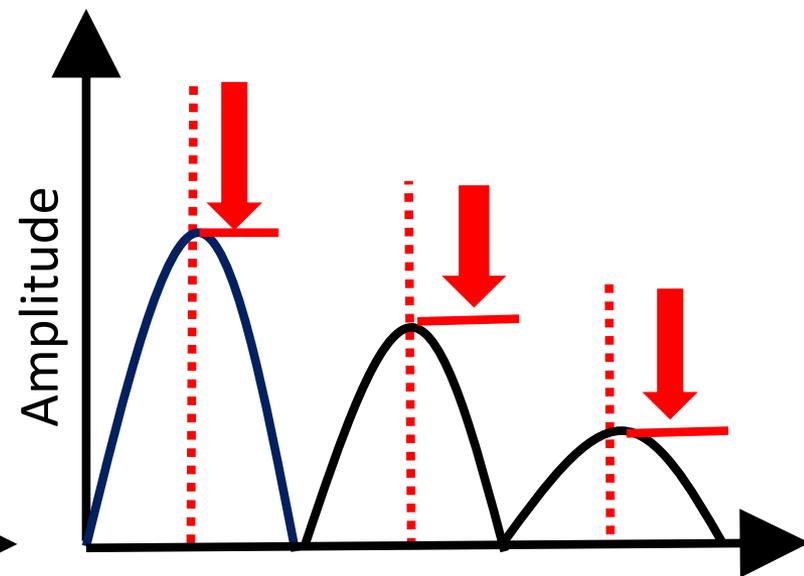
EMI: Electro-Magnetic Interference

1.6 スペクトラム拡散

- クロックの高調波ピーク値低減
 - 周波数変調で**近傍の周波数に分散**
 - エネルギー総量は同じだが、ピーク値低減



Frequency
変調なし



Frequency
変調あり

アウトライン

1. 目的・従来技術

2. 昇圧型PFC電源の改善

2-1. ダイオードブリッジの効率改善法

2-2. 周波数変調によるEMI低減

3. LLC共振電源のEMI低減

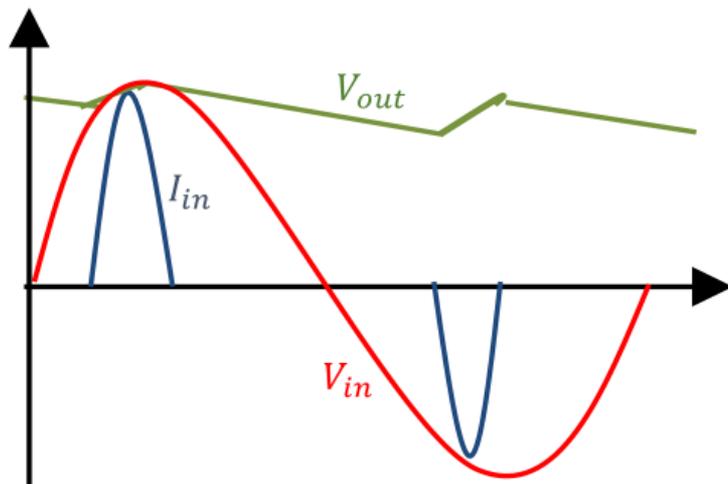
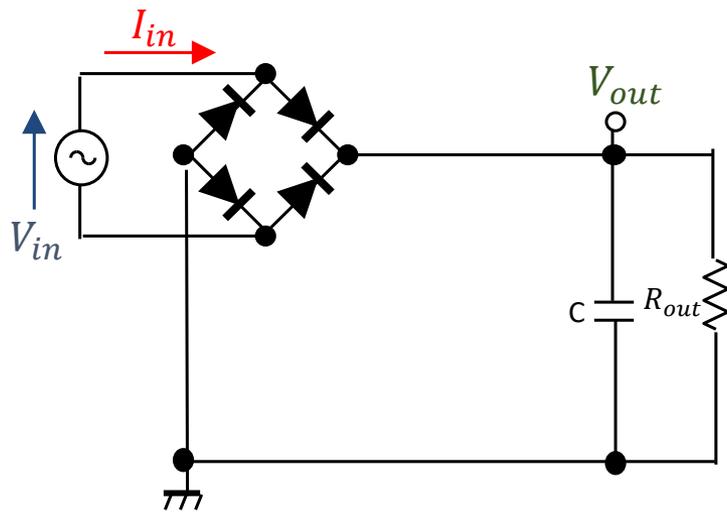
3-1. デューティ変調による低減手法

3-2. 出力リップル改善法

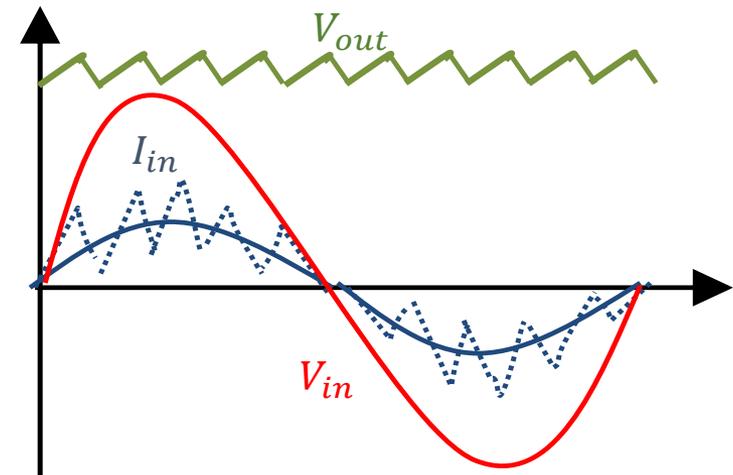
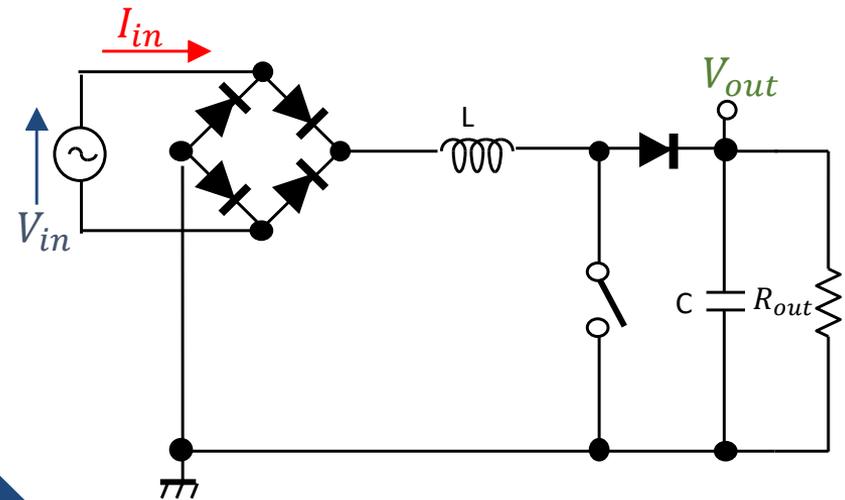
4. 結論

2-1.1 PFC動作

- 入力電流の歪み解消

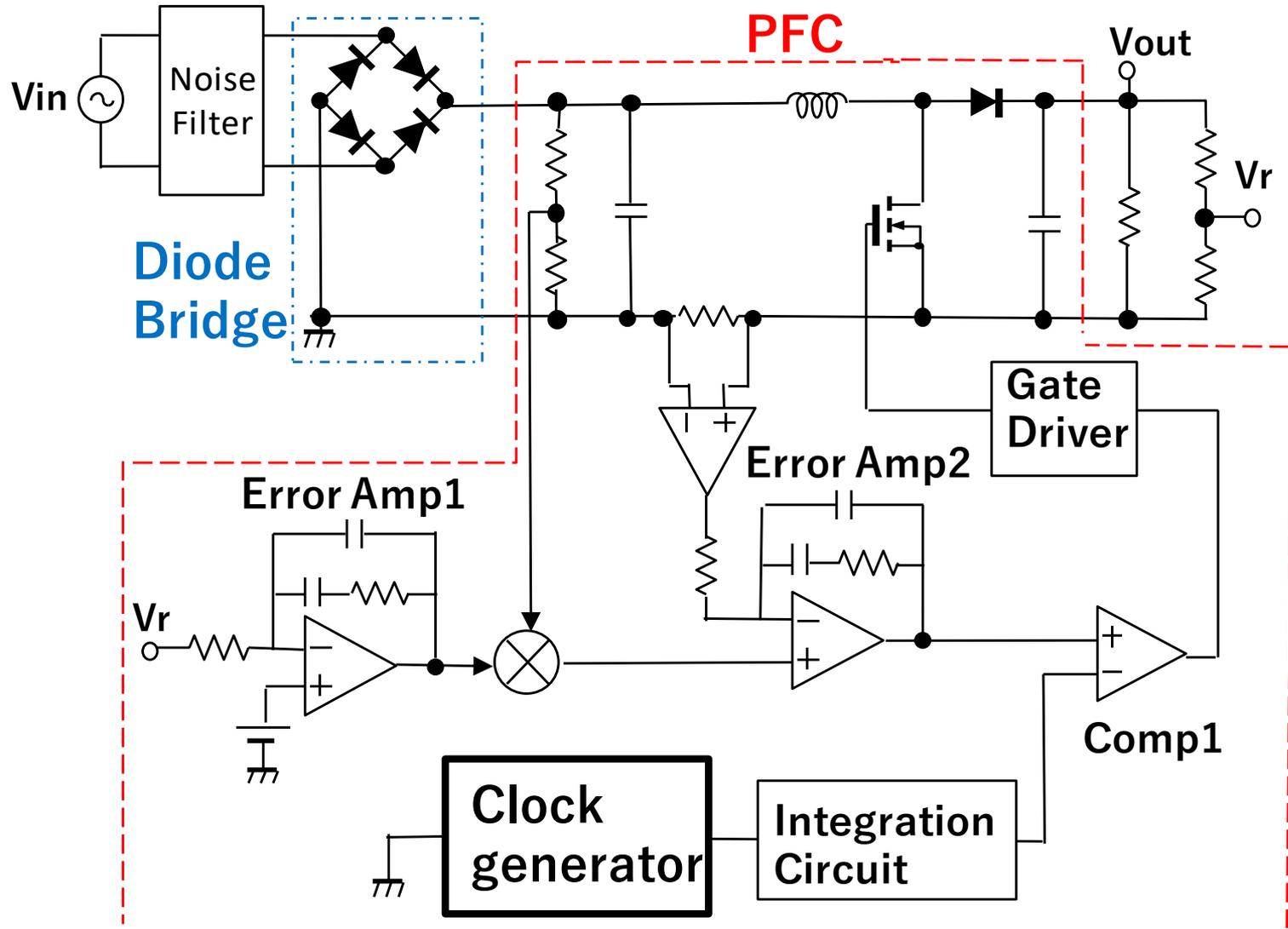


コンデンサ・インプット型電源

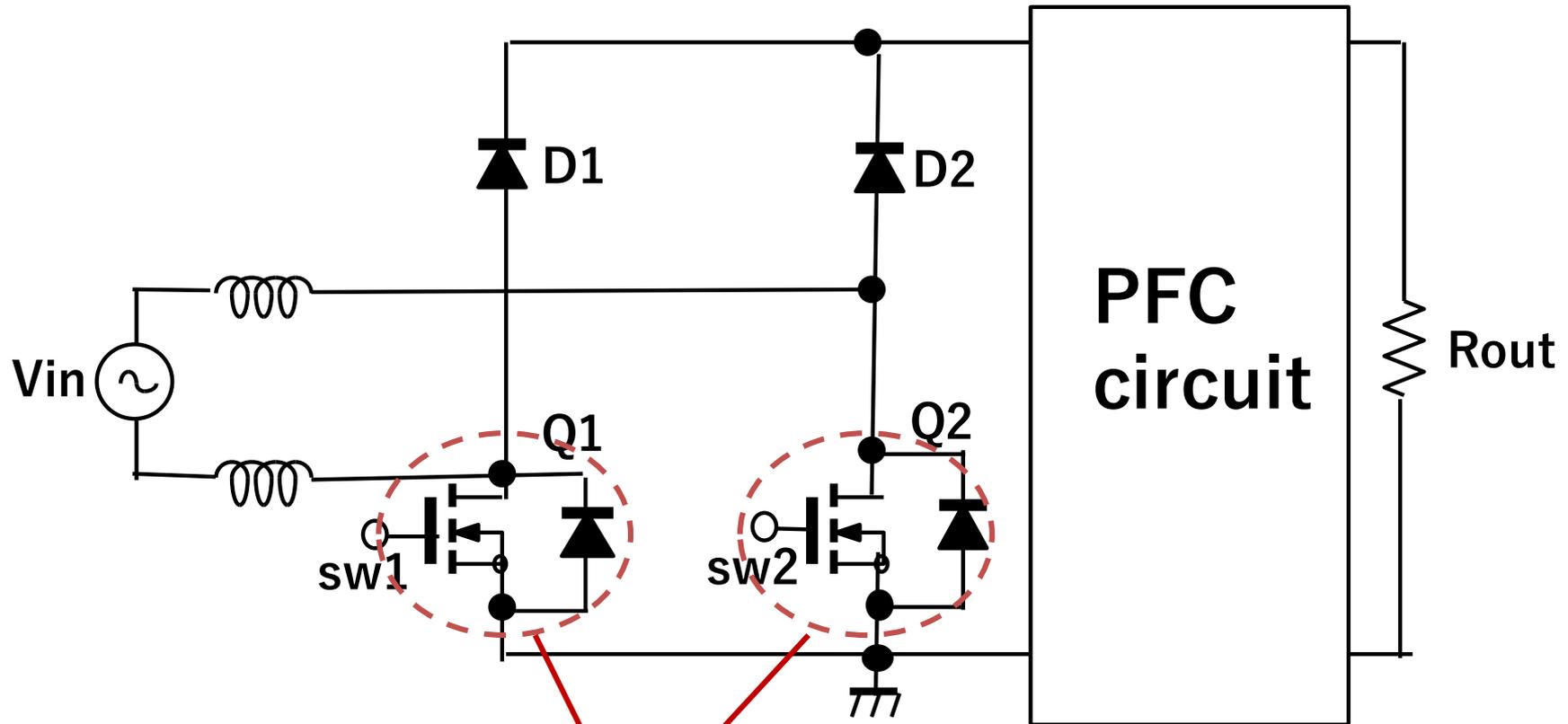


昇圧型PFC

従来方式PFC回路



2-1.2 ハーフ・ブリッジレスPFC

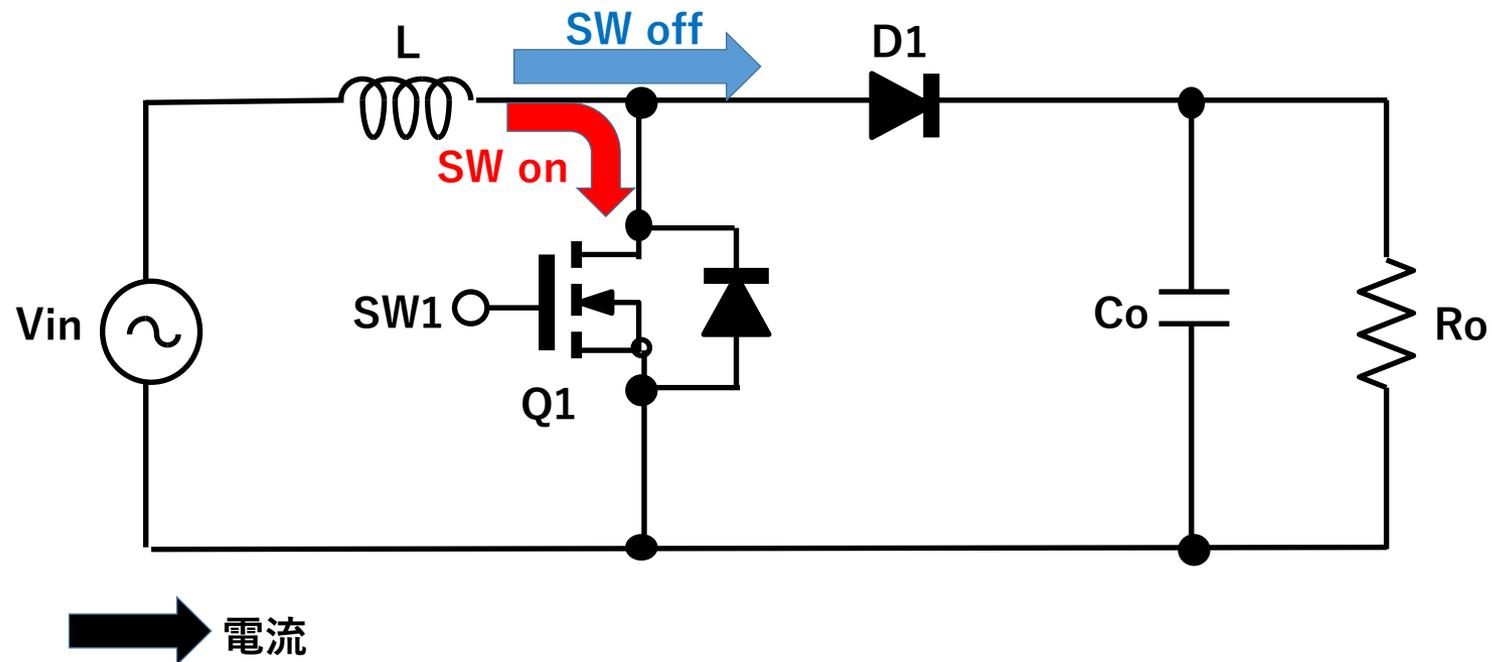


ダイオードブリッジのローサイドをMOSFETに置換
→導通損失を改善

半周期回路動作

ダイオードブリッジと昇圧機構を集約

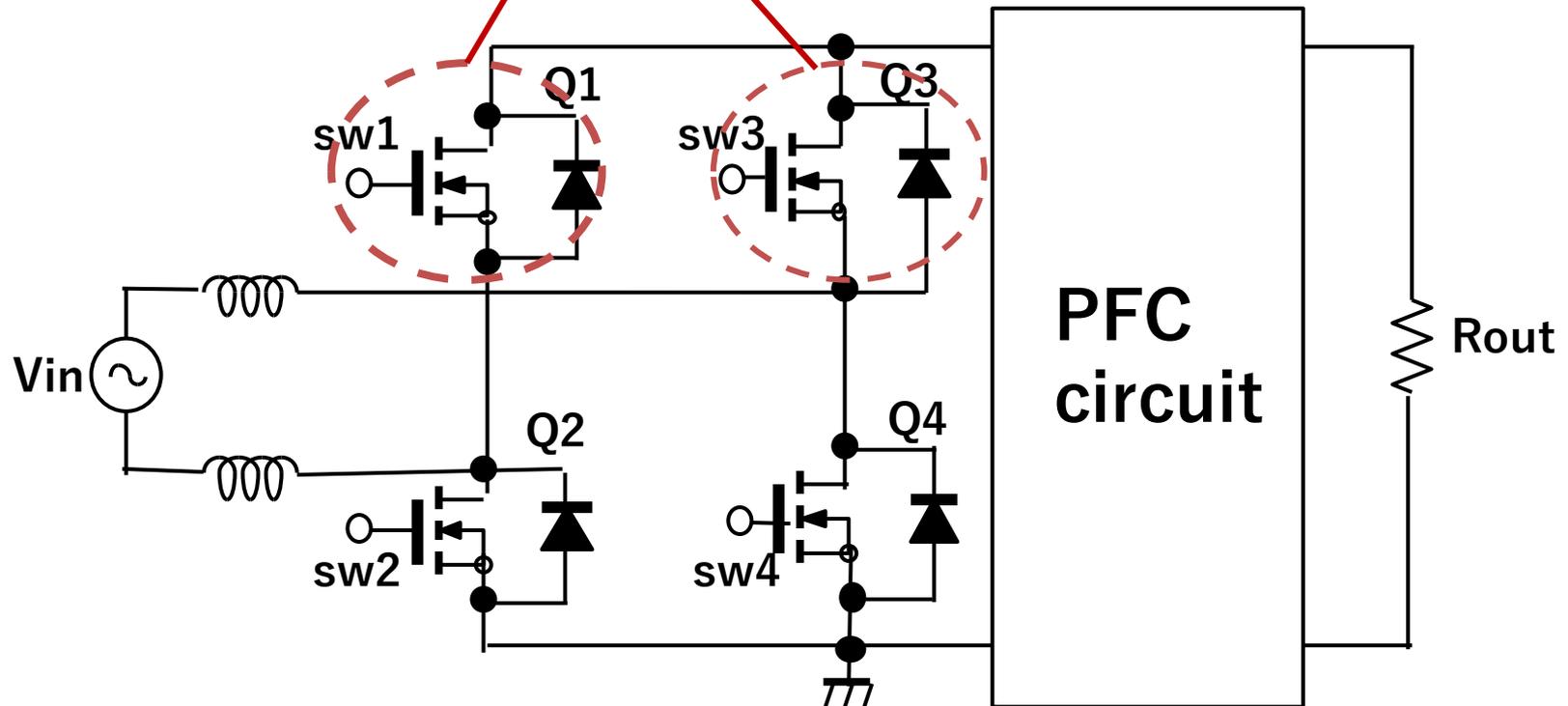
→ ダイオードブリッジによる損失と回路規模縮小



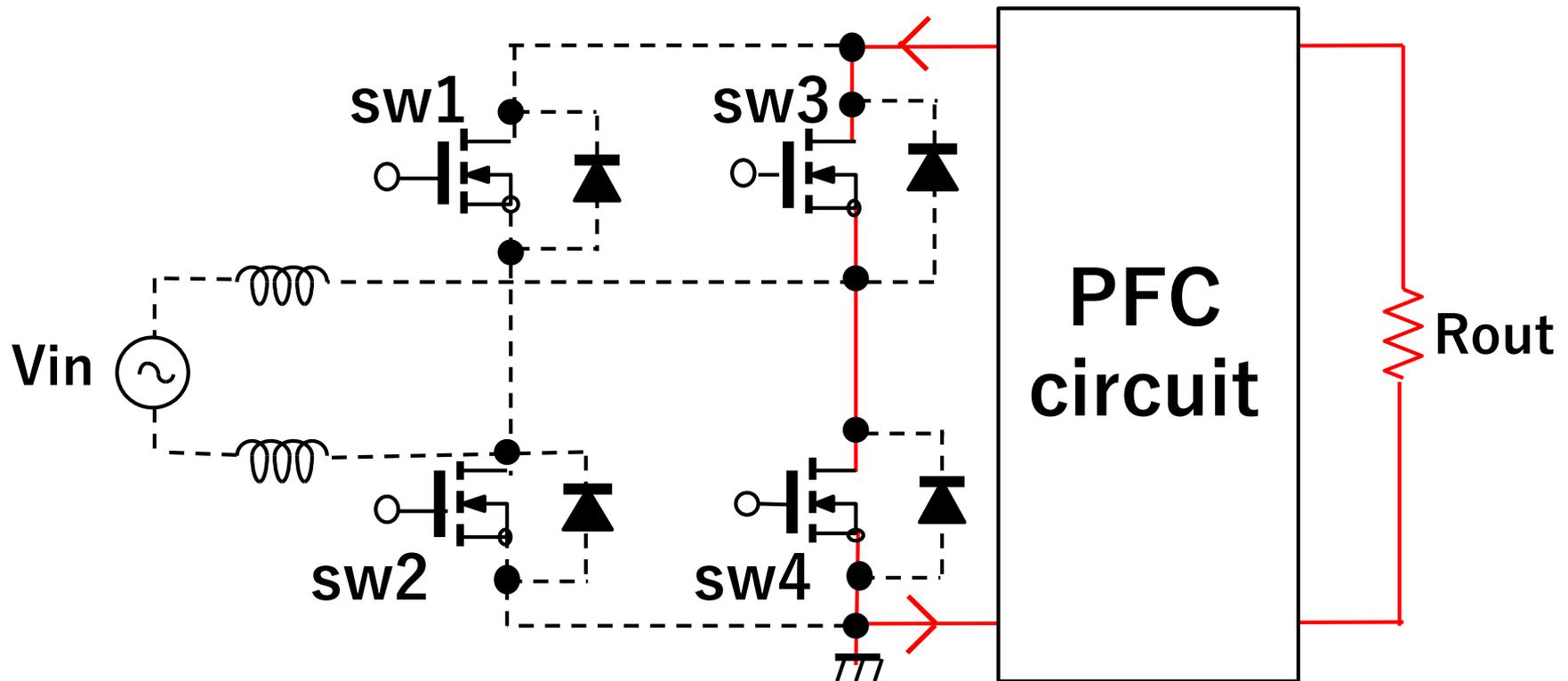
ハーフブリッジ回路の一部

2-1.3 フル・ブリッジレスPFC

全てのダイオードをMOSFETに置換
→ 更なる**効率改善**

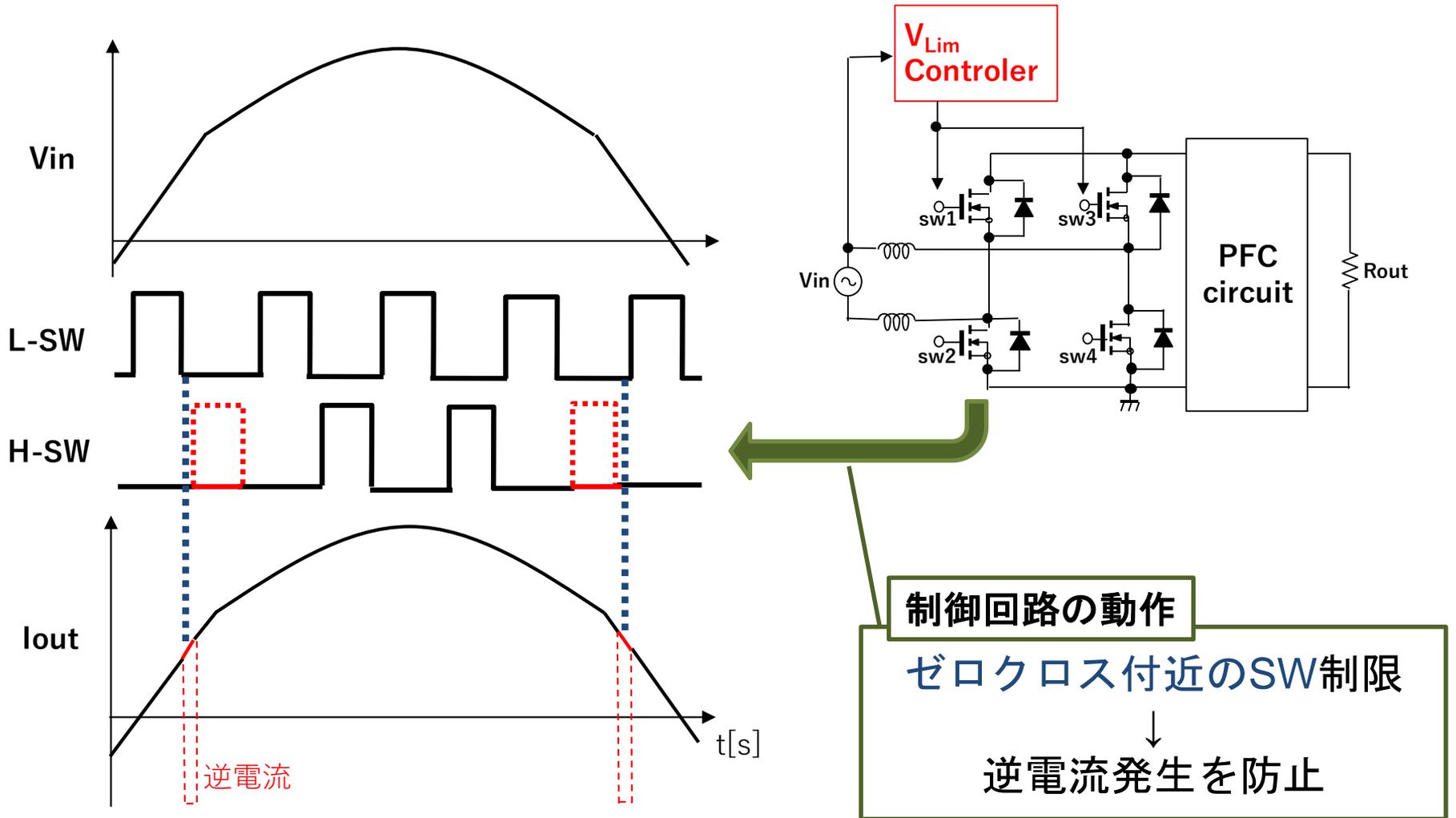


逆電流発生の問題



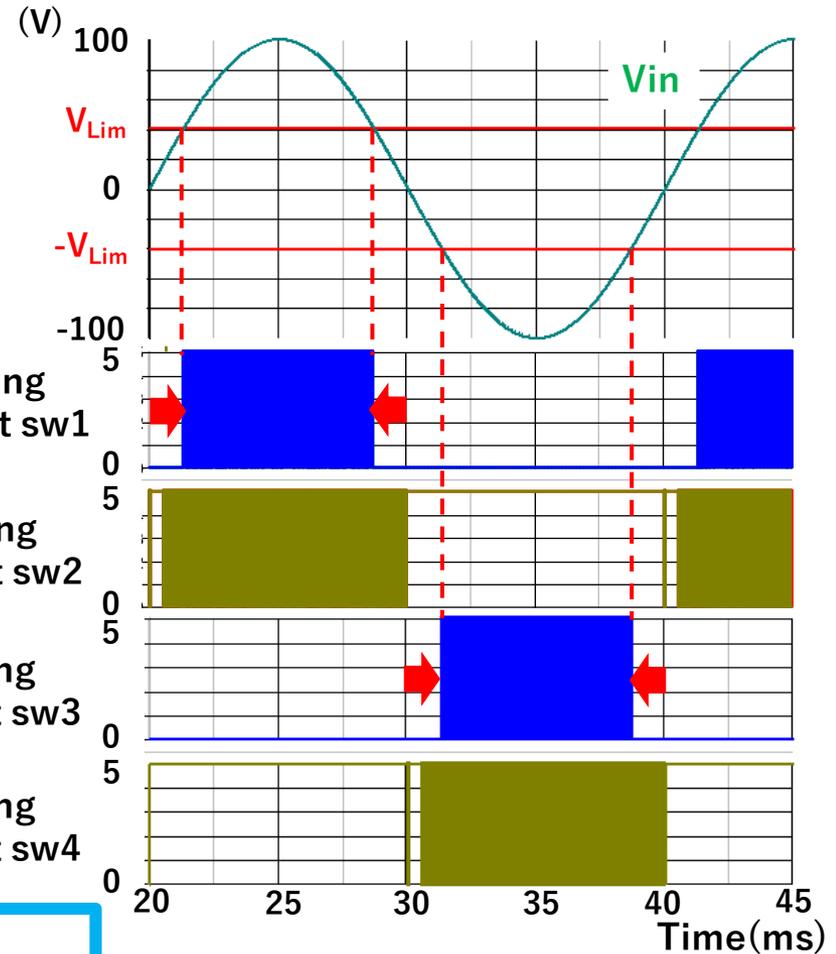
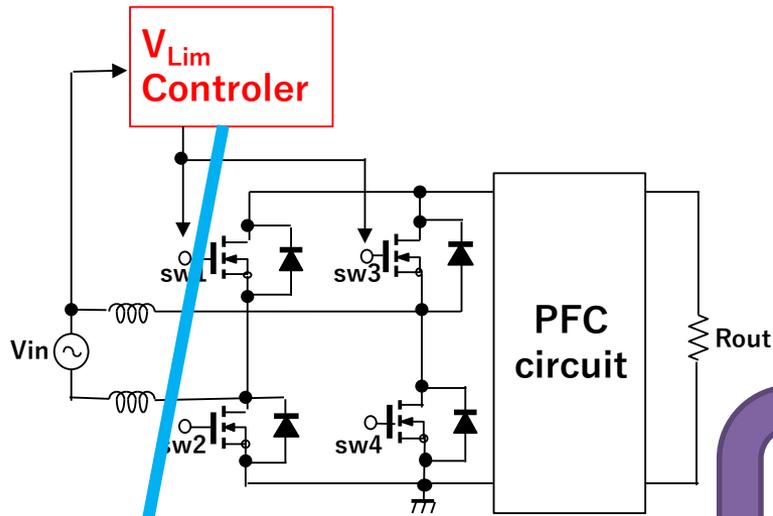
入力電圧 < 出力電圧 よりONタイミングから逆電流発生
→ 入力電圧のゼロクロス周辺で発生

逆電流防止法



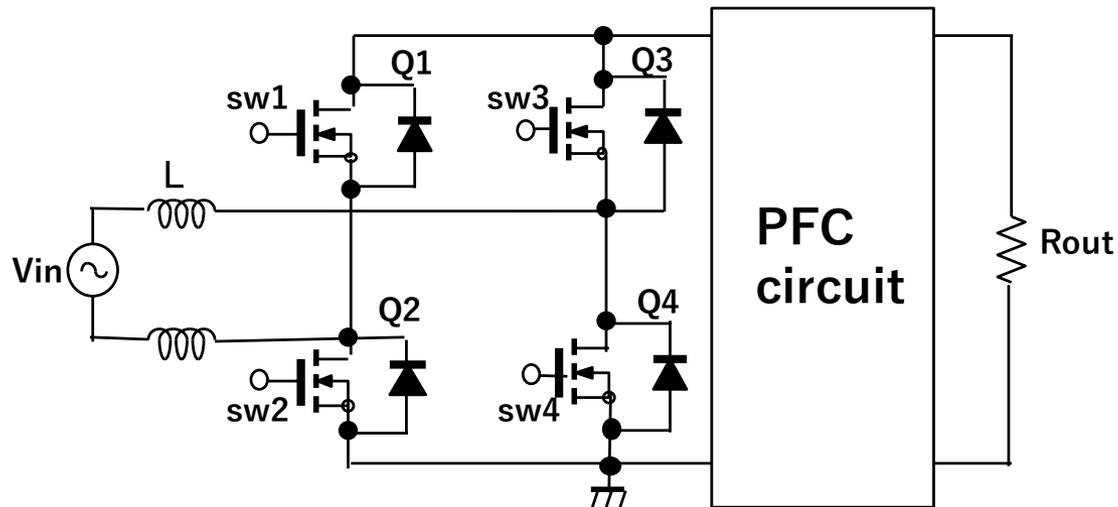
点線動作を直線に修正

スイッチング制限の導入



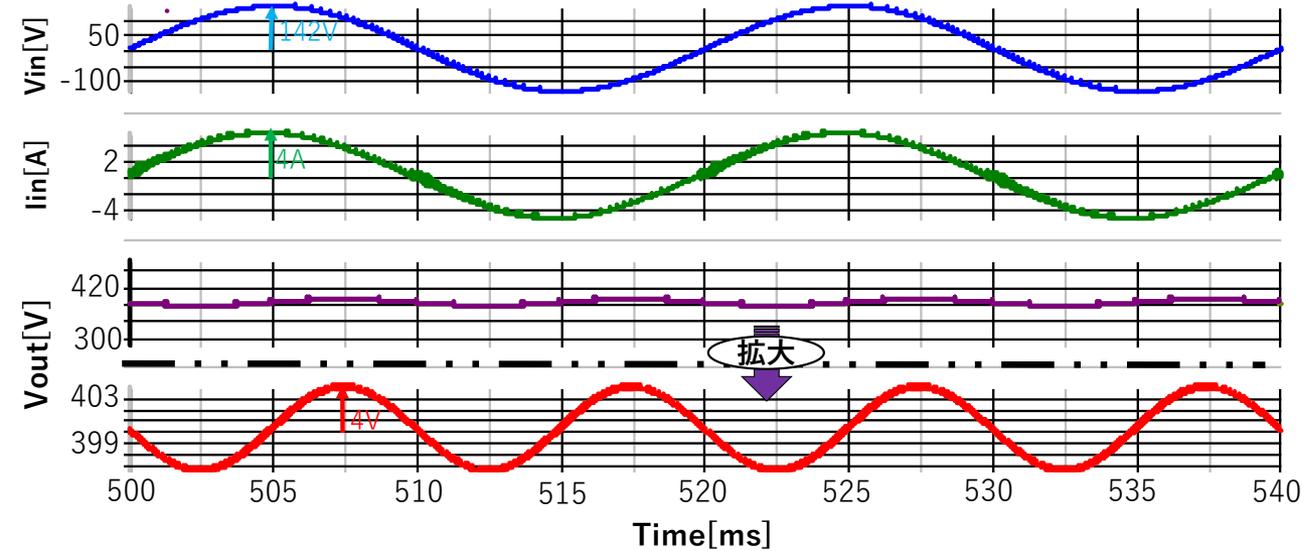
ハイサイドのスイッチング制限
 →ゼロクロス付近でのスイッチングせず、
 逆電流を防止

PFC回路仕様



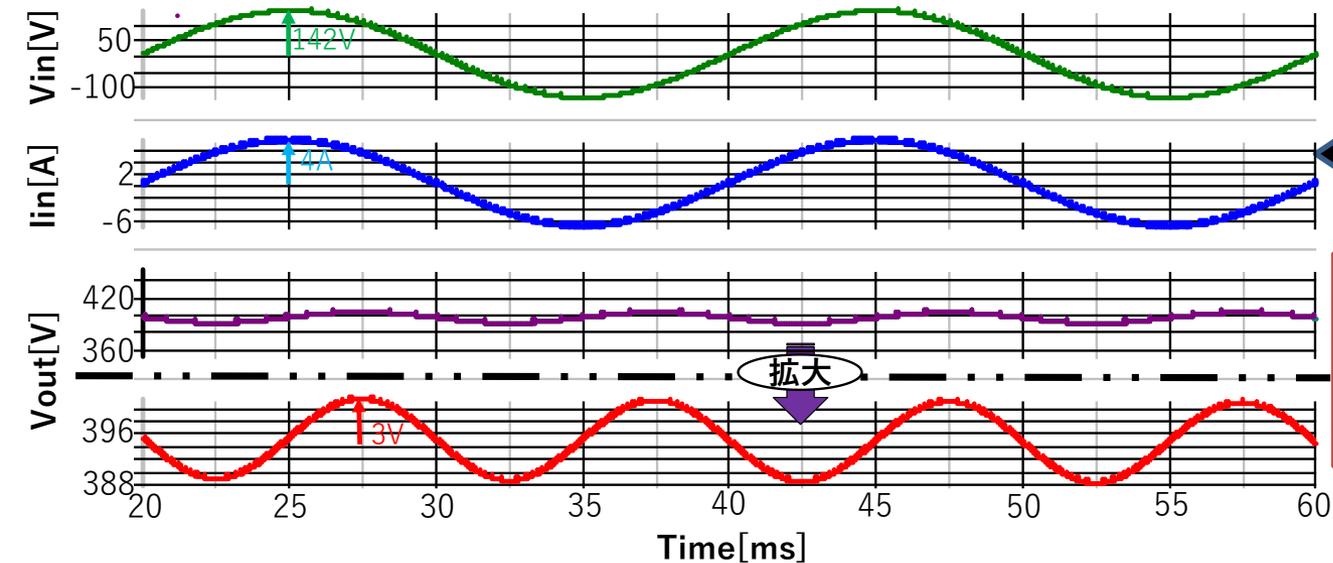
Parameters	Simulation Value
V_{in}	100 Vrms@50Hz
V_{out}	396 V
I_{out}	1.33 A
L	2.0 mH
C	330 μ H
F_{ck}	100 kHz

PFCシミュレーション比較



通常PFC(上)
 フル・ブリッジレス
 PFC(下)

↓
 効率 : 76% → 98%



基本性能は変わらず、
 損失を低減。
 効率も **22%改善**

アウトライン

1. 目的・従来技術

2. 昇圧型PFC電源の改善

2-1. ダイオードブリッジの効率改善法

2-2. 周波数変調によるEMI低減

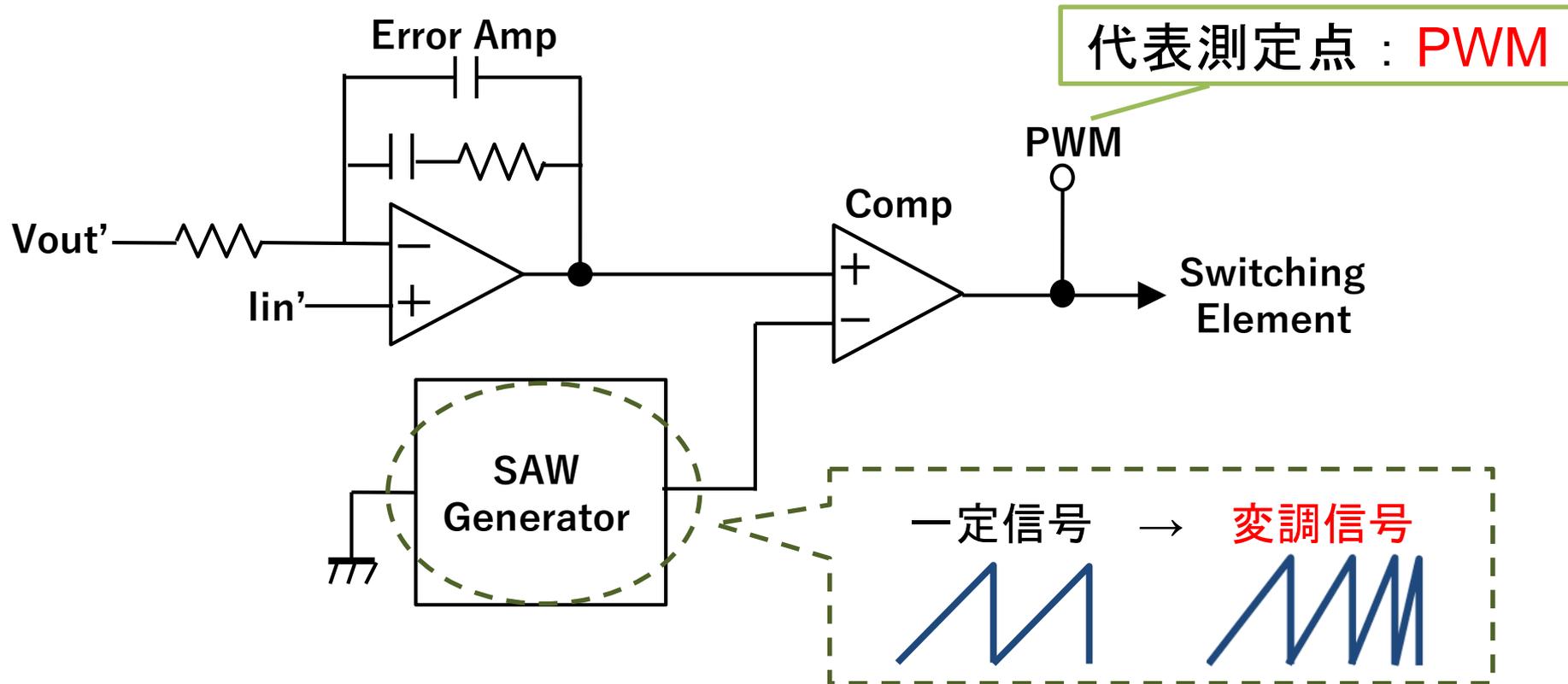
3. LLC共振電源のEMI低減

3-1. デューティ変調による低減手法

3-2. 出力リップル改善法

4. 結論

2-2 周波数変調方式



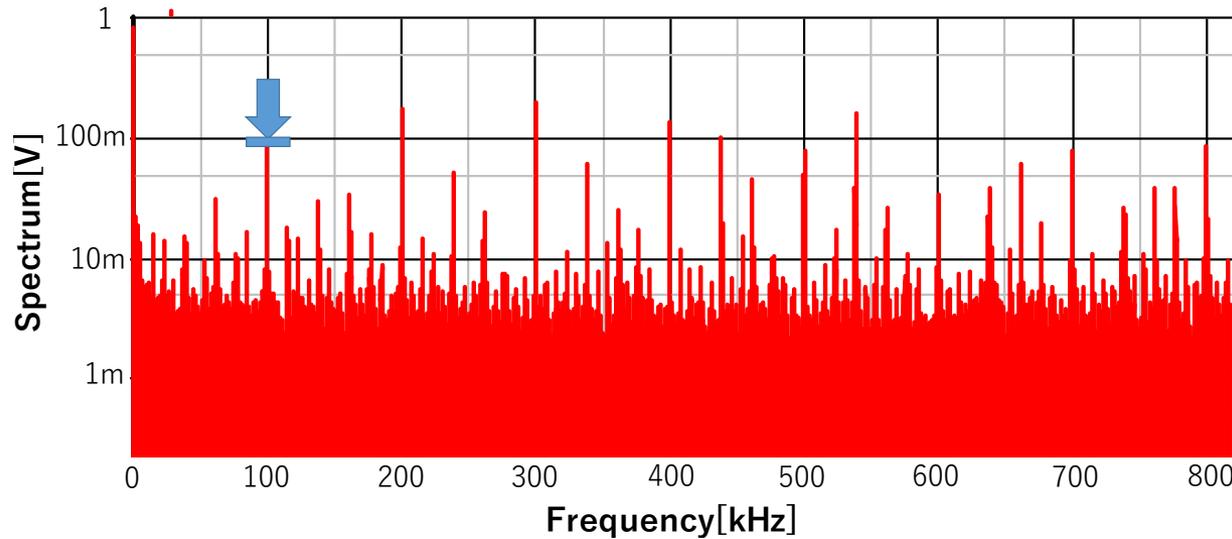
スイッチング周波数不定化



同一周波数へのスペクトラム集約を防止

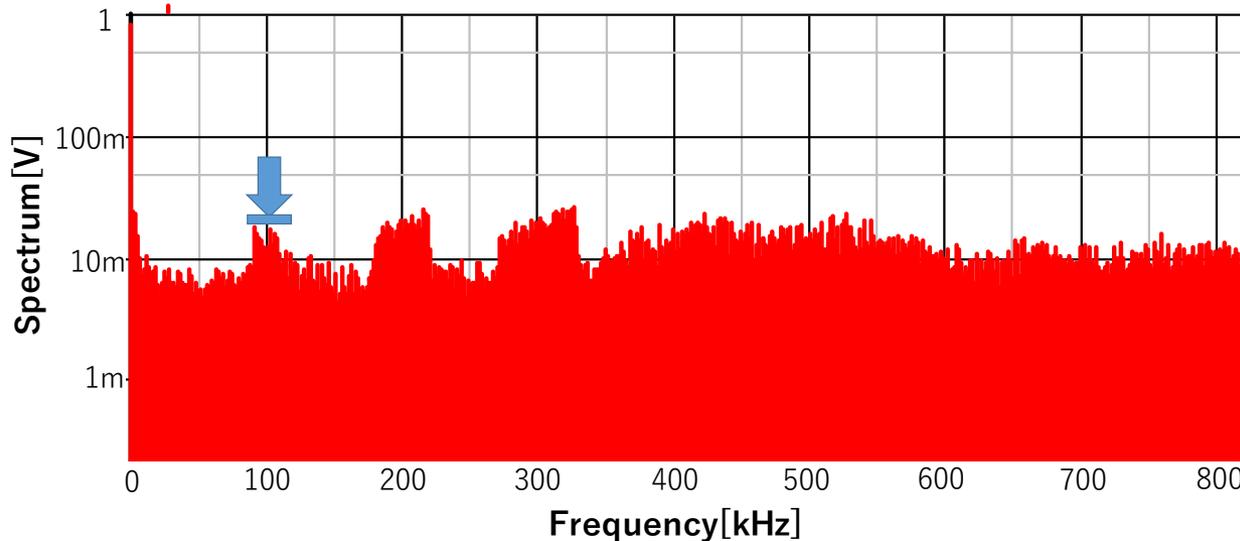
EMI低減結果

クロック周波数スペクトラム
(100kHz)



従来方式のPWM
80 mV

14.0dB 低減

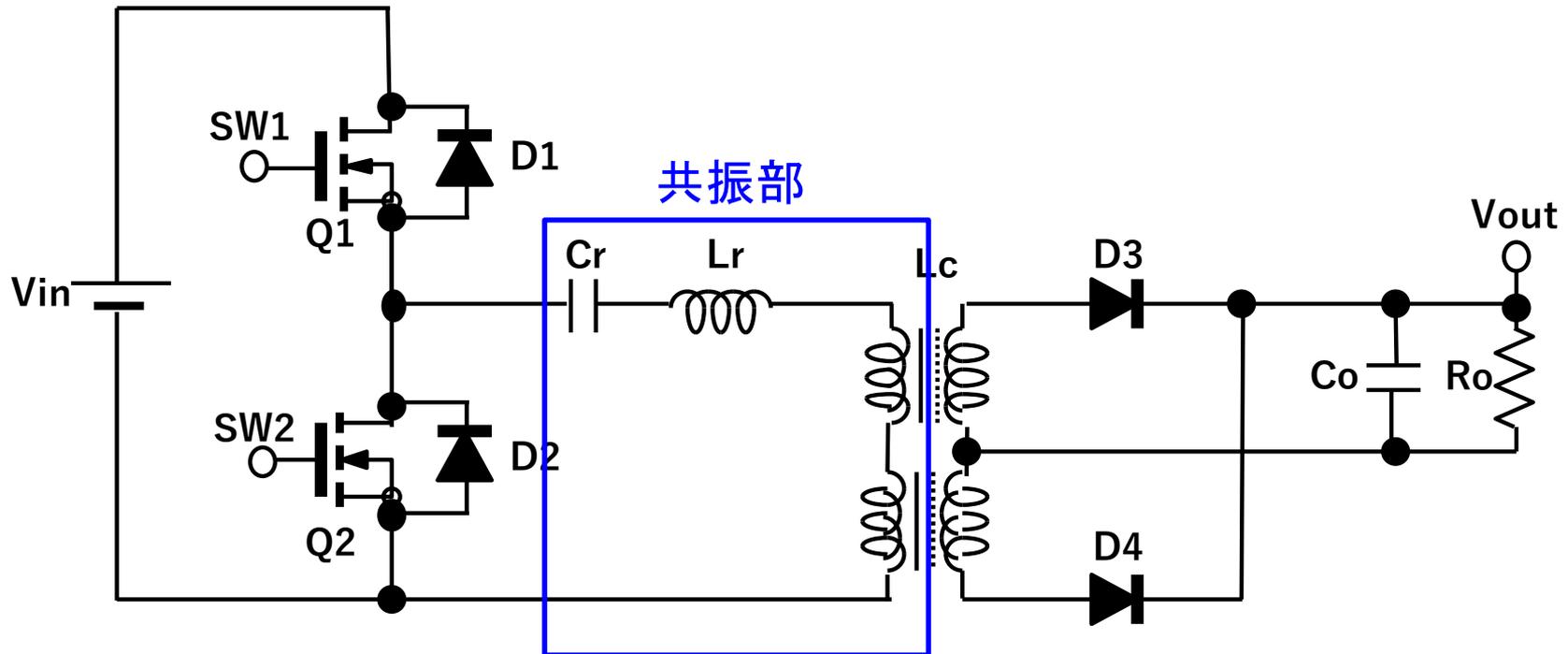


提案方式のPWM
16 mV

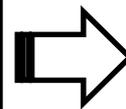
アウトライン

1. 目的・従来技術
2. 昇圧型PFC電源の改善
 - 2-1. ダイオードブリッジの効率改善法
 - 2-2. 周波数変調によるEMI低減
3. LLC共振電源のEMI低減
 - 3-1. デューティ変調による低減手法
 - 3-2. 出力リップル改善法
4. 結論

3-1 LLC共振電源の概要



共振：スイッチング損失の低減
巻き線：絶縁かつ降圧



回路長所

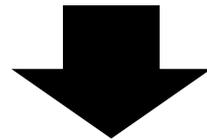
- ・高効率
- ・高降圧変換

しかし、共振のない制御部はEMIノイズ問題を内包

スペクトラム拡散手法の考案

PFC電源では、周波数拡散を利用

→ LLC電源も、**同一の手法**でEMI低減を図る。



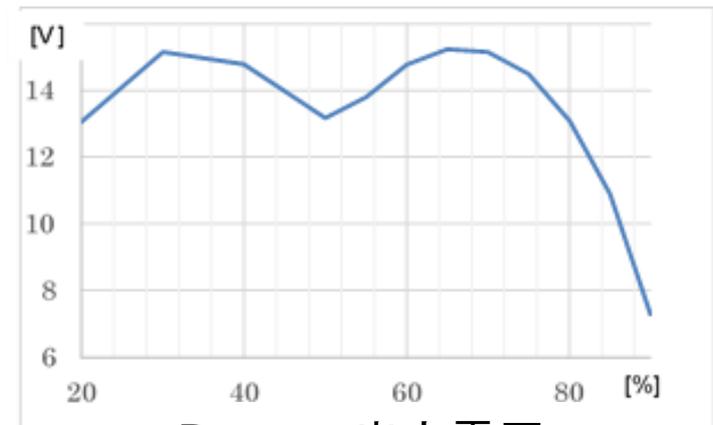
しかし...

周波数拡散では制御ループの補正により打ち消される。
よって、**他のパラメータ**で代用する必要性有り

そこで！

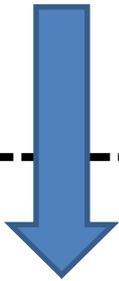
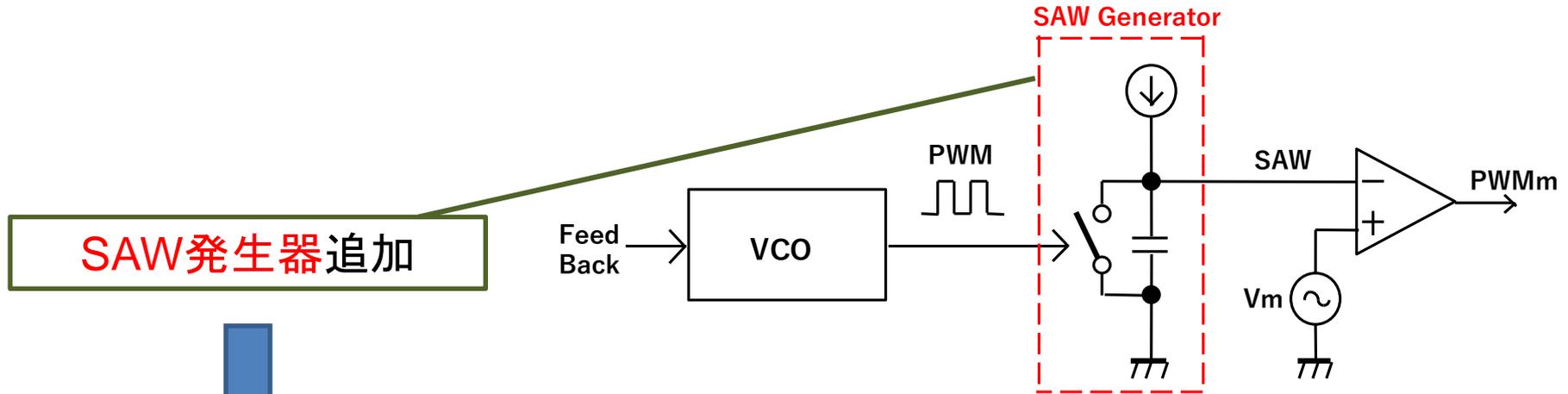
デューティ変調方式の利用

→基本のデューティ50%から変調

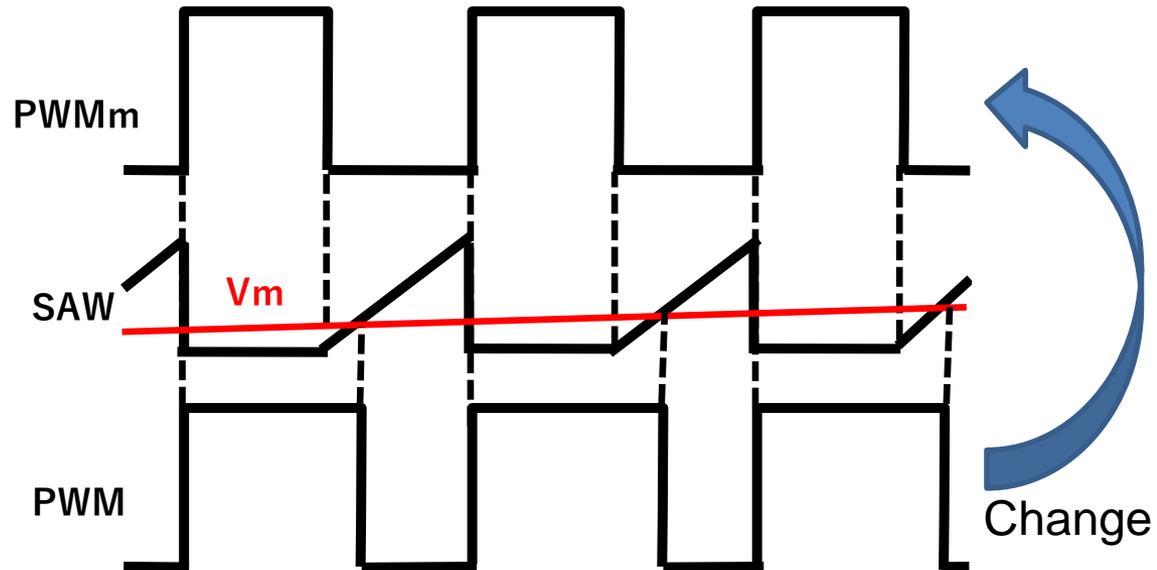


Duty vs 出力電圧

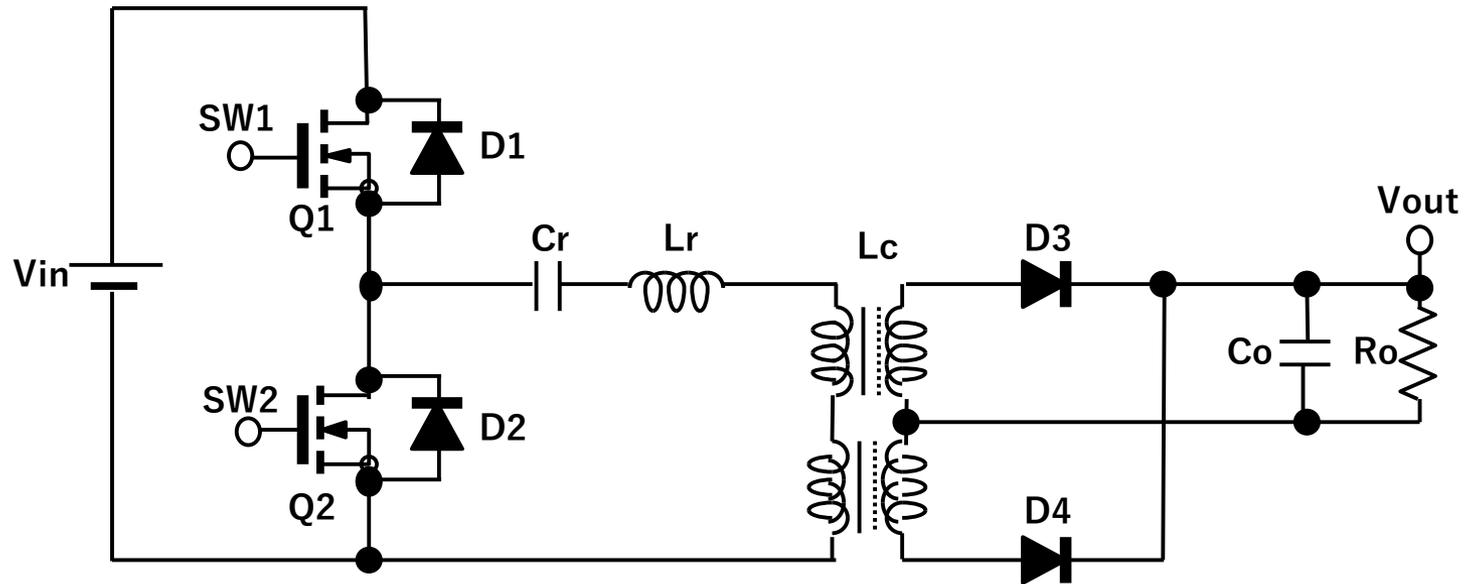
デューティ変調によるEMI低減



デューティの**変動**可能
↓
出力の変化が生まれ、
スイッチング周波数が変化



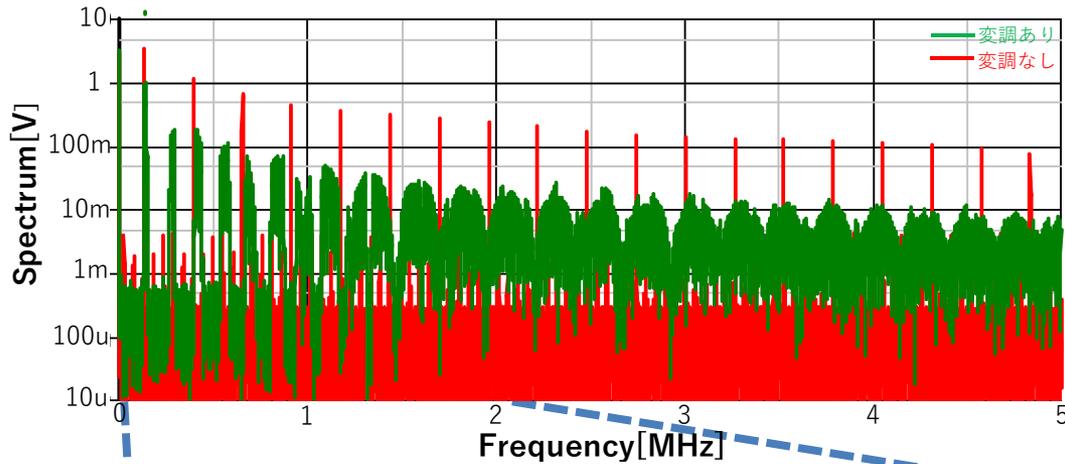
LLC共振回路仕様



Parameters	Simulation Value
V_{in}	280 V
V_{out}	12 V
I_{out}	1.0 A
Leakage L_r	50 μ H
Excitation L_c	330 μ H
C_o	500 μ F

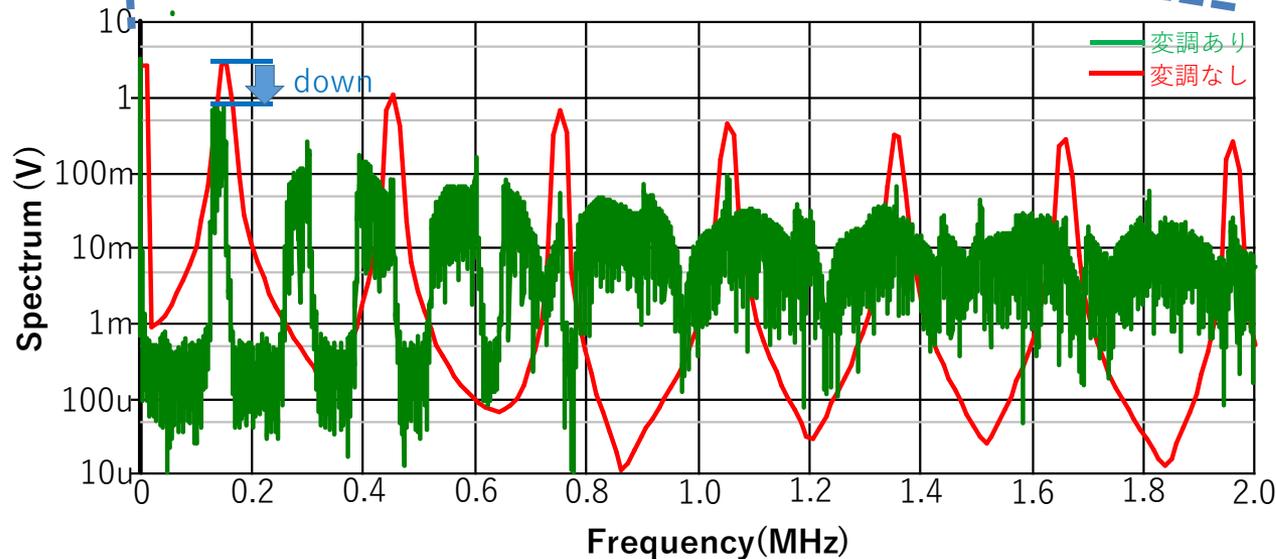
デューティ変調シミュレーション結果

・PWMスペクトラム



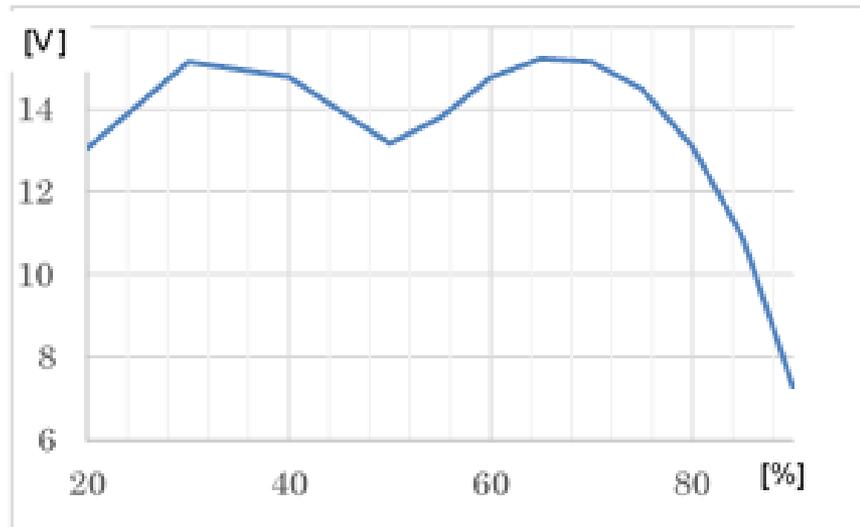
EMIの大きさ
変調前 > 変調後

1~2MHzを拡大



クロック周波数のEMI低減
-12.9 dB (130kHz)

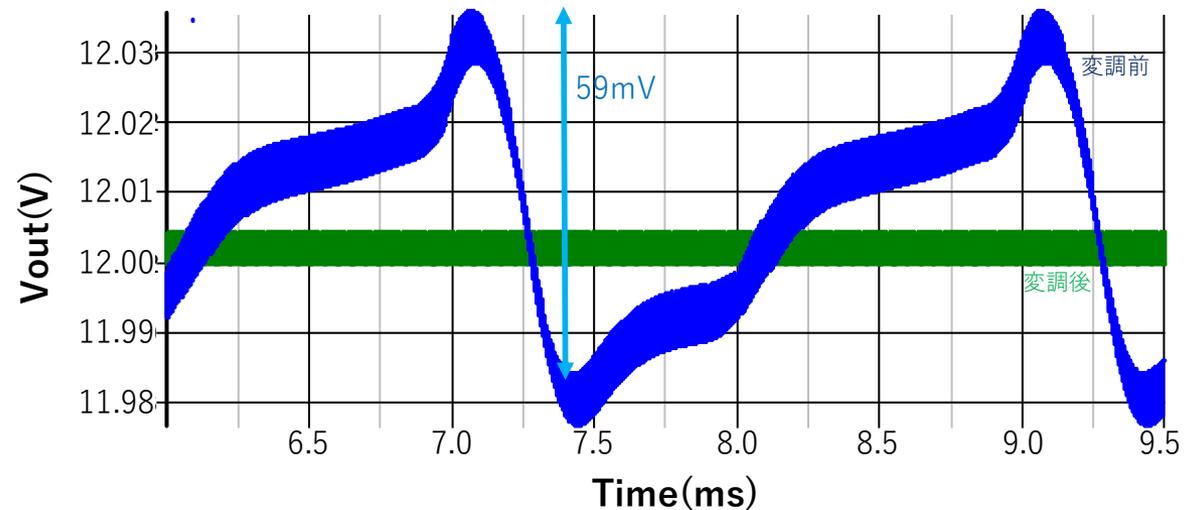
EMI低減による課題



Duty vs 出力電圧

変調リップルが出現し、
出力へ影響

デューティ変調から
出力リップル**増大**



アウトライン

1. 目的・従来技術

2. 昇圧型PFC電源の改善

2-1. ダイオードブリッジの効率改善法

2-2. 周波数変調によるEMI低減

3. LLC共振電源のEMI低減

3-1. デューティ変調による低減手法

3-2. 出力リップル改善法

4. 結論

3-2 出力リップル改善案

EMI低減の手法から出力リップルが**増大**

→出力リップル抑制のため、デューティ変調に対策必要



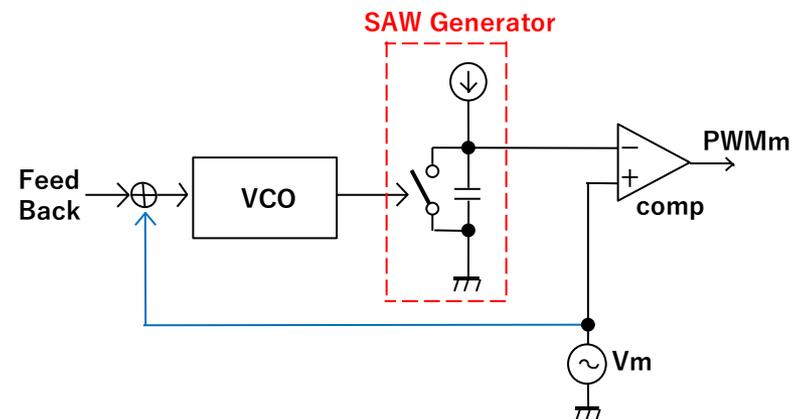
デューティ変調の補正法: VCOの**逆周波数変調方式**

改善方法

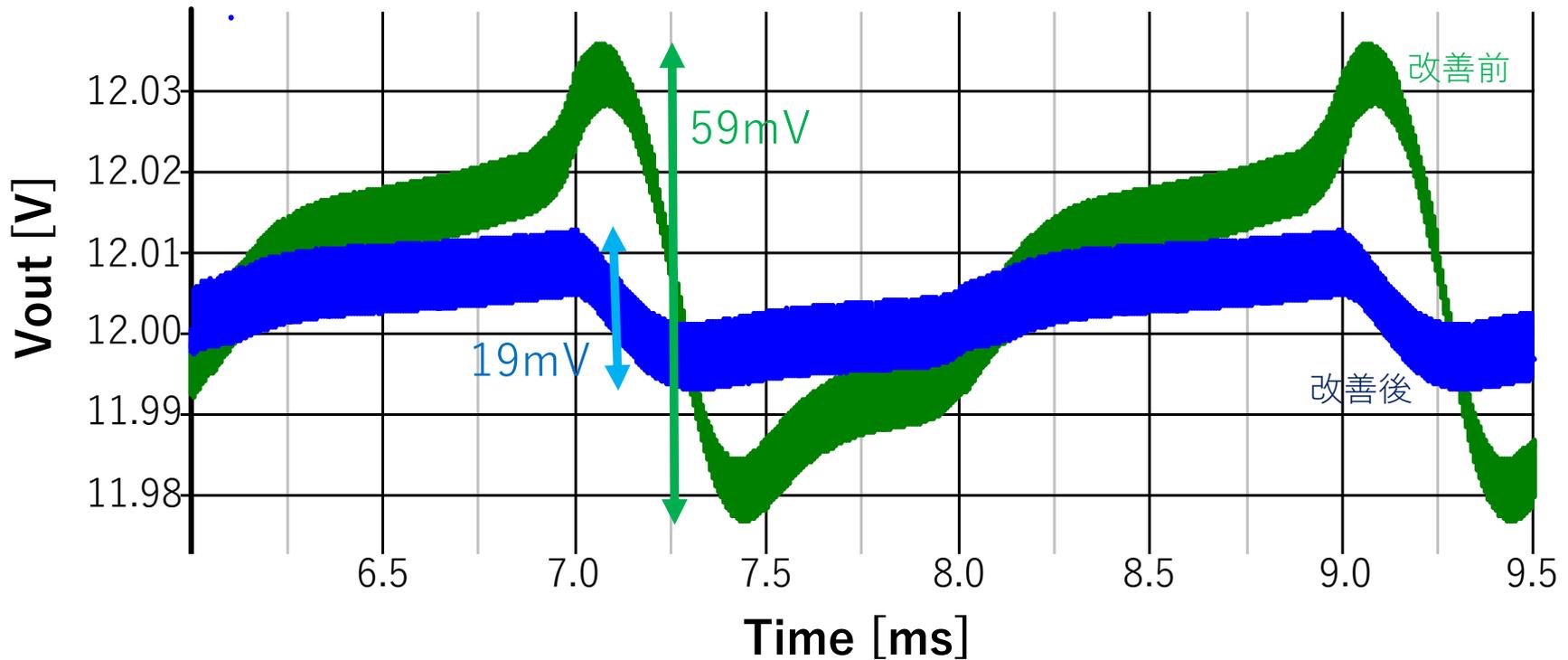
変調信号・VCO双方に入力

互いに揺れ、デューティ変化を抑制

出力変動を抑え、変調を加えられる



リップル改善結果



変調リップル $59\text{mV} \rightarrow 19\text{mV}$



40mV の低減に成功

アウトライン

1. 目的・従来技術
2. 昇圧型PFC電源の改善
 - 2-1. ダイオードブリッジの効率改善法
 - 2-2. 周波数変調によるEMI低減
3. LLC共振電源のEMI低減
 - 3-1. デューティ変調による低減手法
 - 3-2. 出力リップル改善法
4. 結論

結論

・PFC電源回路の改善

1. MOSFETによるフルブリッジレス化
→ 効率 98%(従来より **22%改善**)
2. 周波数変調によるEMI低減
→ クロック周波数 **14.0dB低減**

・LLC共振回路の改善

1. デューティ変調によるEMI低減
→ クロック周波数 **12.9dB低減**
2. 変調リップル低減法
→ 導入後 **-40mV** (59 mVから19mV)

ご清聴ありがとうございました。

追加資料1

・PFCはEMI低減に際して、出力に影響は出ないのか？

→出力電圧に影響が出ます。

今回では導入前後で1mV以下のリップルが出現する程度で、問題と捉えておりません。

・LLCは出力改善に際して、EMI低減に影響は出ないのか？

→改善前後で僅かにEMI低減に影響はあります。

しかし本改善を利用した際と、大きく変わらない効果が得られます。

(クロック周波数での改善前後EMI: 720mV→810mV)

追加資料2

・PFC電源が利用価値は力率改善のみ？

→ エネルギー効率のみならず、高調波電流の防止は、送電施設の損傷や送電ロス対策にも利用される。

・降圧型PFCはないのか？

→ 存在する。

しかし商用電源には瞬断が存在する。保護の意味も含め、高電圧と大容量コンデンサを用いる昇圧構成にする。

・後段は降圧回路であれば何でも良いのか？

→ 昇圧型PFCの高電圧を降圧させるため、絶縁回路の必要性がある。その中でも効率、高調波ノイズの関係からLLC共振回路が使用される、

追加資料3

- ・ **LLC電源の使用例は何か？**
→ 大画面テレビ、サーバ機器
- ・ **LLC共振回路に、他の難点はあるのか？**
→ 使用スイッチング周波数とトランス設計で折り返いをつける。共振周波数により使用可能なスイッチング周波数が変化するため。
- ・ **LLC共振回路には、変調リップルが未だ存在するが？**
→ デューティ変調の利用上、完全な対応には至りません。しかし起動時のオーバーシュート未満であったため、許容範囲と考えている。

質問

- ・変調前後でゲインが変わっているが、それで出力変わるのでは？
 - 本件ではデューティ比と出力電圧の関係から研究しております。
ゲインの変化に関しては、制御に支障が出ない範囲で動作させることを今回考えました。
- ・変調リップル改善前後でEMI大きく変わらないの？
 - 変わるのですが、デューティ変調を使った方が効果は大きい