

PFCテクノロジーを掘り下げる

2025年2月

岩本純一

シニアFAEマネージャー

MPSジャパン

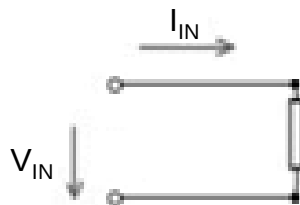
- 概要: 力率改善 (Power Factor Correction)
- 昇圧型PFC制御
- 昇圧型PFCの改善 (効率、PF、歪み)
- ブリッジレスPFC
- Q & A

力率改善 (PFC)

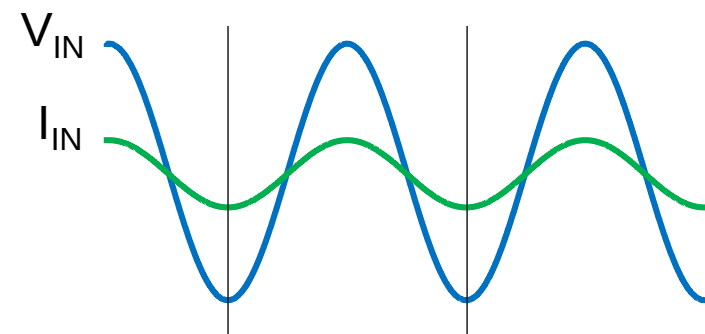
- PFCとは**power factor correction**の意味
- 力率 (PF) とは、皮相電力上のアクティブ (実際の) 電力率:

$$PF = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power}} = \frac{[W]}{[V \times A]}$$

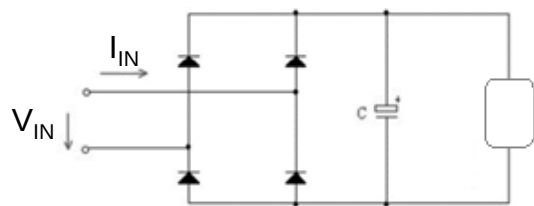
- 1の力率は純抵抗負荷に相当



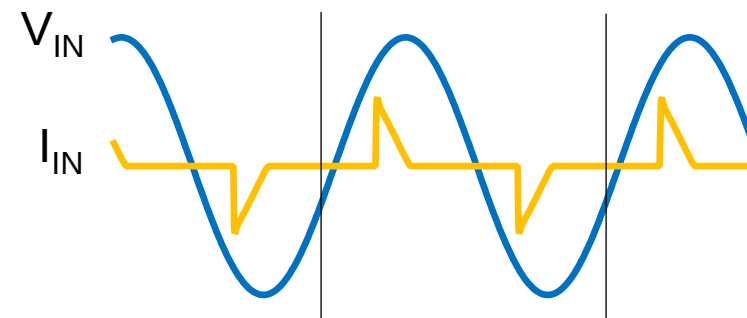
- 電流は正弦波で、 V_{IN} と同位相



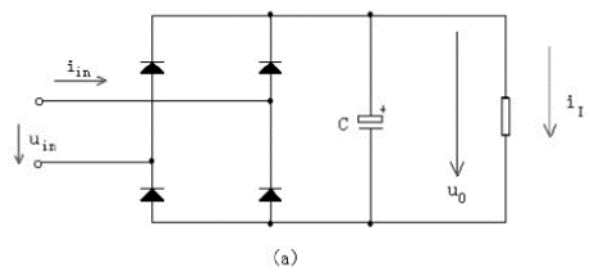
- 代表的な電源は1未満の力率があります



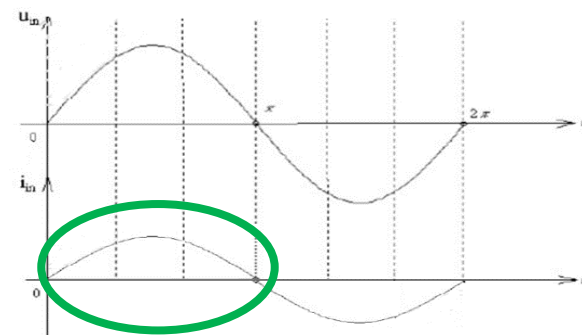
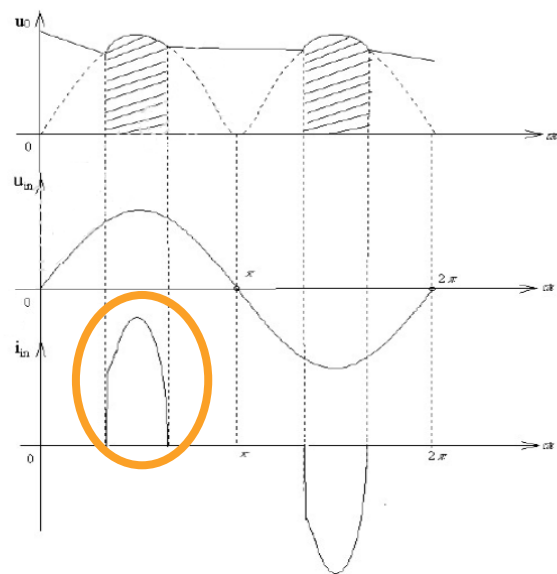
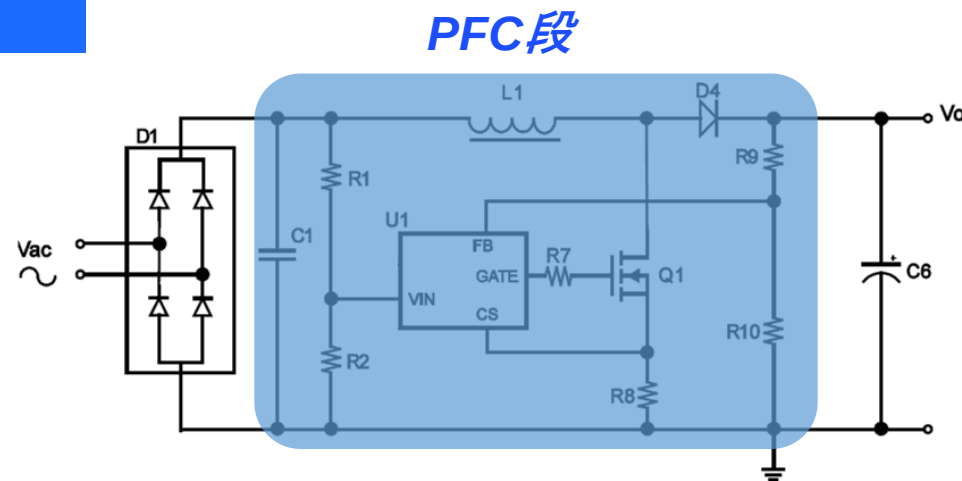
- 電流は正弦波ではなく、 V_{IN} と位相がずれている可能性があります。
- より大きな**RMS**電流が入力を循環します (より高い無効電力)。



PFCの基本概念



PFCを追加

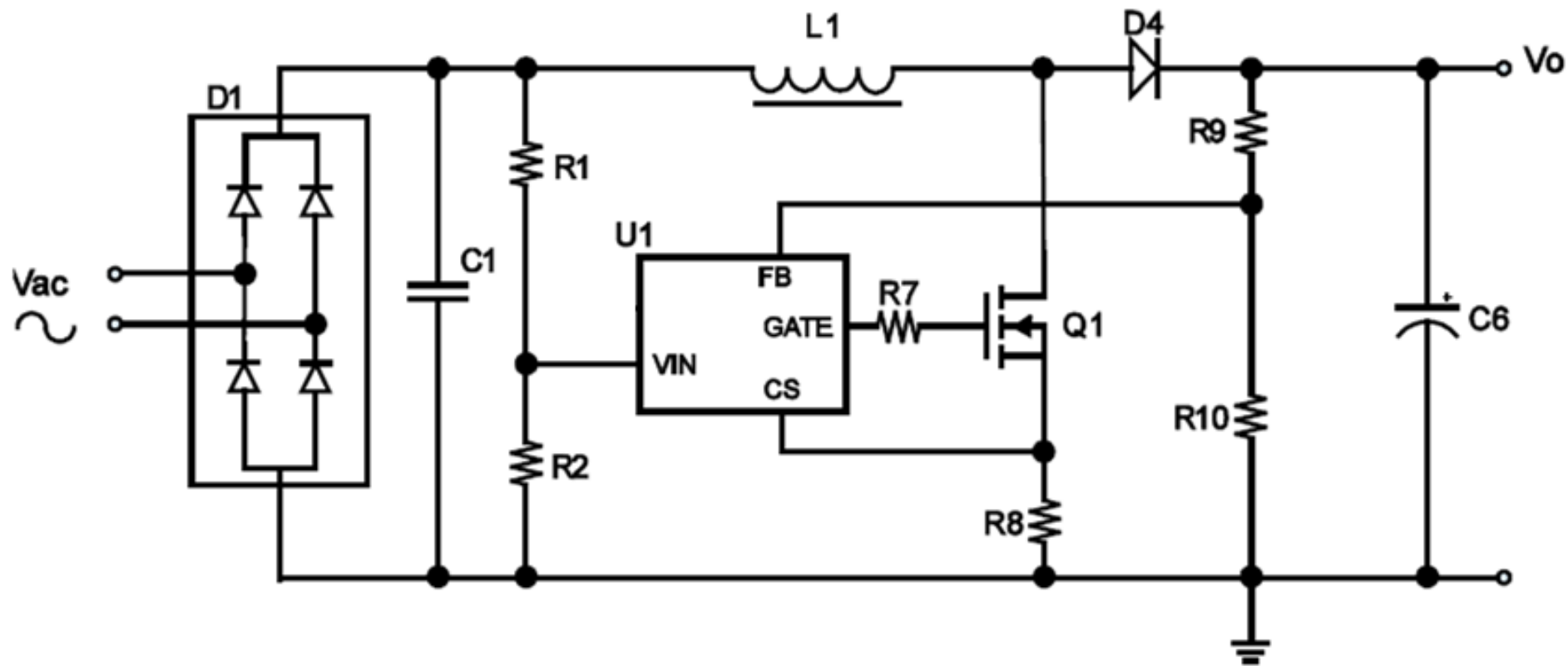


入力電流は電圧に従う (正弦波)。

PFCには、**パッシブ型** (インダクタ、バレーフィルなど) と **アクティブ型** (降圧、昇圧、フライバックなど) があります。性能、効率、サイズ、コストのトレードオフを考慮すると、昇圧型PFCが最も広く使われているトポロジーです。

- 概要: 力率改善 (Power Factor Correction)
- 昇圧型PFC制御
- 昇圧型PFCの改善 (効率、PF、歪み)
- ブリッジレスPFC
- Q & A

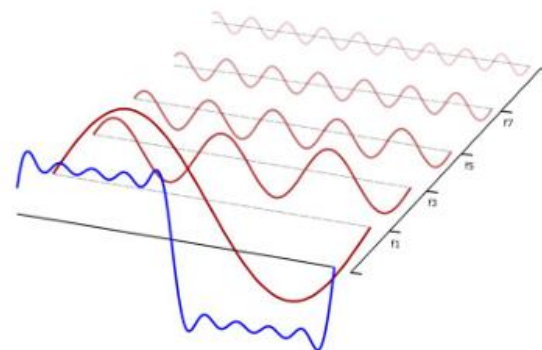
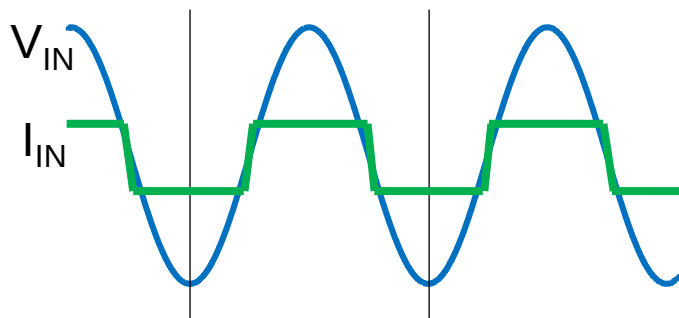
昇圧型PFC



- シンプルな実装 (インダクタ1個、スイッチ1個、ダイオード1個)
- 高効率
- 低入力電圧で動作可能
- ステップアップ

昇圧型PFC制御方法

- 市場、コンバータのタイプ、地域によって、標準的な最小力率要件は異なる場合があります、不要とされる場合や高い値が設定される場合もあります。また、異なる出力電力レベルでの歪み量や最小力率などの追加要件がある場合もあります。
さまざまなタイプの**PFC**回路とそのさまざまな制御方法は、さまざまなシナリオに対応しています。さらに、新しい規格が導入されたり、時間の経過とともに進化したりすることもあり、特定の 방법이時代遅れになることもあります。
- 例えば、アクティブ昇圧型**PFC**の最も単純な制御方法の1つは、定電流で動作させることです。

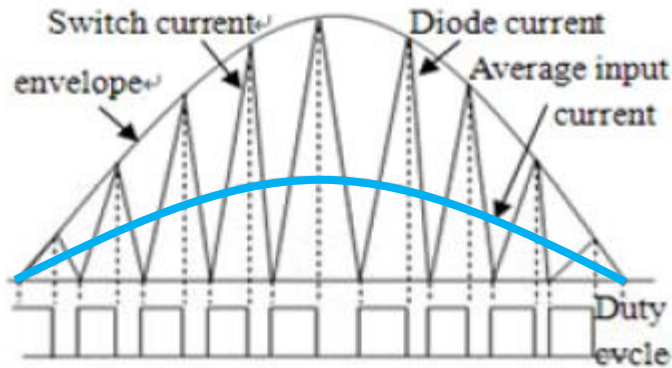


この方法は整流ブリッジの導通時間を大幅に改善しますが、平均入力電流は正弦波とは程遠い (方形波は非常に歪んだ正弦波である)。力率はあまり高くなく (約0.7)、歪みも大きいですが、場合によってはこの方法でも十分です。

- 当ウェビナーでは、最も実用的で広く使われている制御方法に焦点を当てます。

昇圧型PFC制御方法: CoT BCM

コンスタントオンタイム (COT) / 電流臨界モード (BCM) / 臨界導通モード (CrM)



- シンプルな構造 (V_{IN} 計測必要なし)
- ゼロ電流スイッチング (およびバレースイッチング)

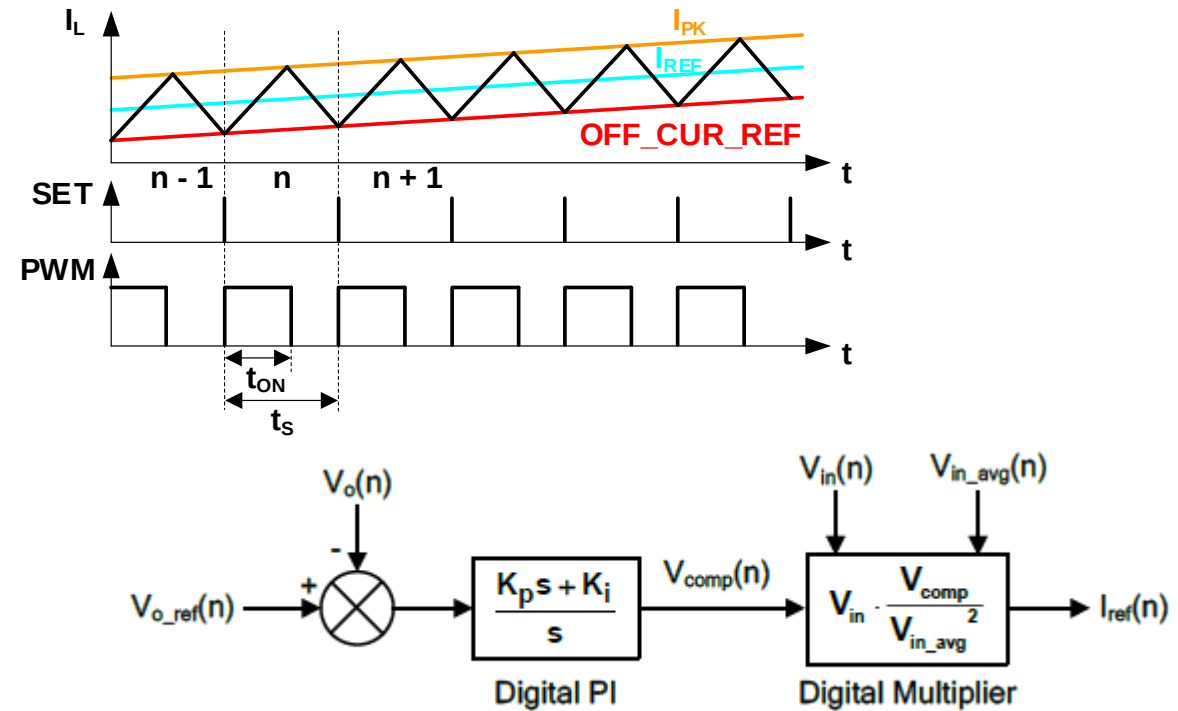
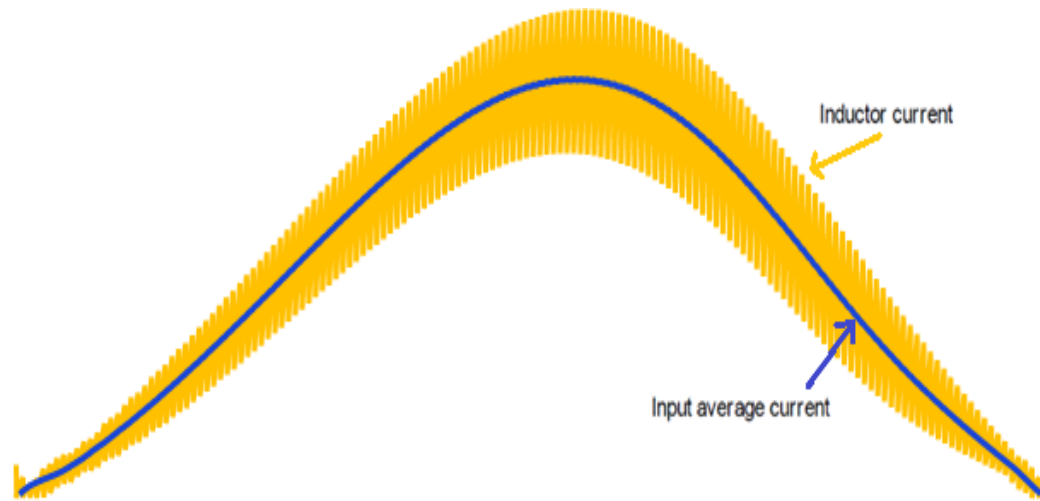
➤ 低コスト、低ノイズ

- 高いRMS電流 (I_{PK} は I_{IN} 平均値を倍にする)
➤ 300W未満 (これ以上はインタリーブと併用)

	CrM (Constant-On-Time)
動作モード	The graph shows the inductor current I_L versus time t. The current rises linearly during the on-time t_{ON} and falls linearly during the off-time t_{DM}. The peak current is I_{PK} and the average current is I_{IN}.
入力電流	$I_{IN1}(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{2 \times L} \times t_{ON}(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{R_{EQ1}}$
入力等価インピーダンス	$R_{EQ1} = \frac{2 \times L}{t_{ON}(\theta)}$
PF = 1の条件	$t_{ON}(\theta) = \text{constant}$

昇圧型PFC制御方法: CCM

連続伝導モード (CCM)



(HR12xx デジタルPFC)

- より低いRMS電流 (I_{IN} 平均値は I_{PK} にととても近い)
 - 最大1kWの高電力に使用可能 (それ以上はインタリーブを併用)
- より複雑な構造 (V_{IN} は電流の参照値を設定するために使用されます)
- ハードスイッチング
 - より高いコスト、より大きいONノイズ

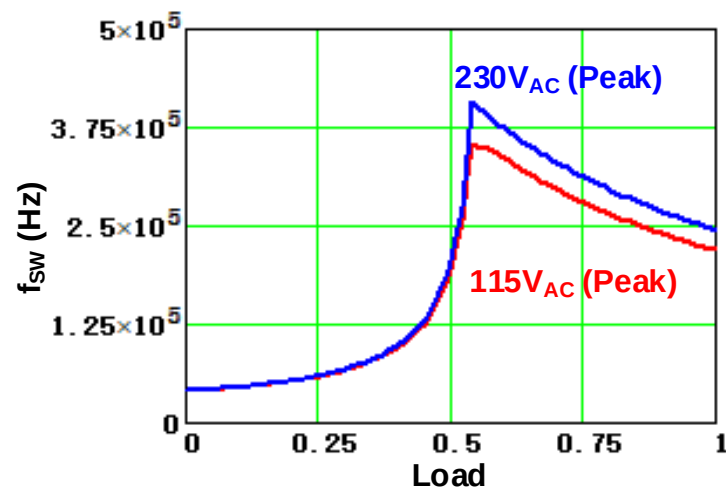
- 概要: 力率改善 (Power Factor Correction)
- 昇圧型PFC制御
- 昇圧型PFCの改善 (効率、PF、歪み)
- ブリッジレスPFC
- Q & A

効率改善 – BCM + DCM

出力電力が減退しても不連続モード (DCM) を実行し続ける

不連続モードでは、 P_{OUT} の減退時にスイッチング周波数 (f_{SW}) が上昇します。これは大きなスイッチング損失につながります。

デッドタイムを挿入して強制的にDCMにすることで、 f_{SW} が減少し、軽負荷効率が高くなります。

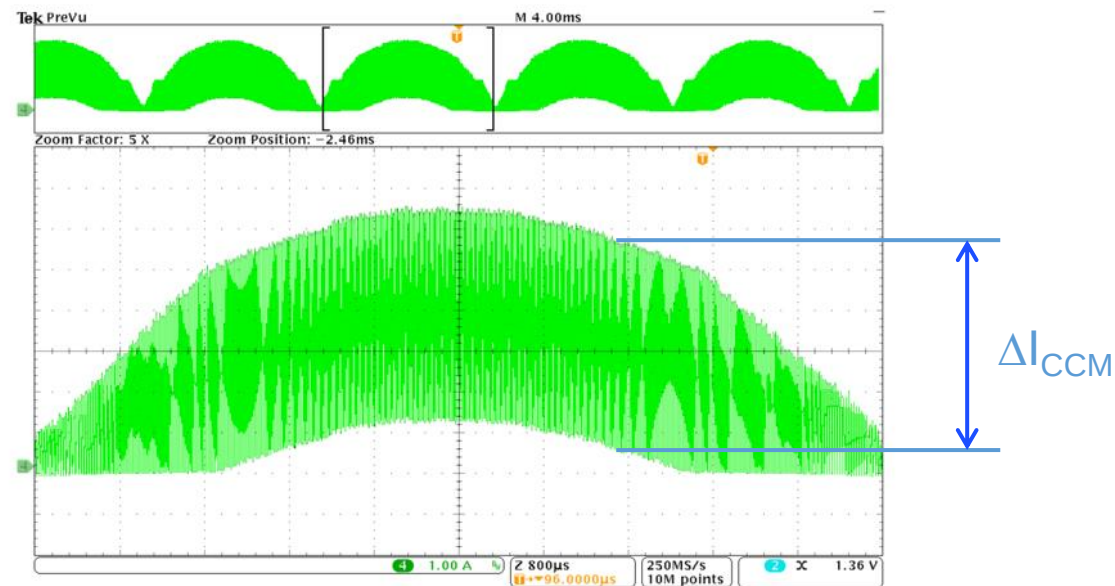


	DCM (可変オンタイム)
動作モード	
入力電流	$I_{IN2}(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{2 \times L} \times t_{ON}(\theta) \times D_C(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{R_{EQ2}}$ $D_C(\theta) = \frac{t_{ON}(\theta) + t_{DMG}(\theta)}{t_{ON}(\theta) + t_{DMG}(\theta) + t_{DT}}$
入力等価インピーダンス	$R_{EQ2} = \frac{2 \times L}{t_{ON}(\theta) \times D_C(\theta)}$
PF = 1の条件	$t_{ON}(\theta) \times D_C(\theta) = constant$

効率改善 – CCM + BCM + DCM

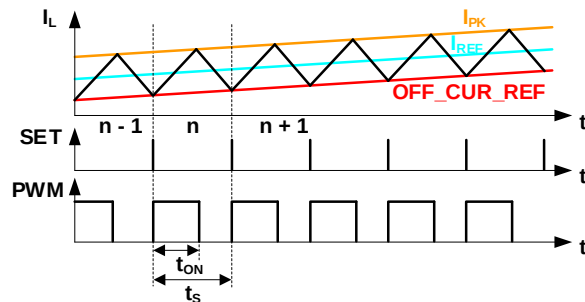
マルチモード制御: 3つのモード (CCM、BCM、DCM) はすべて、瞬時入力電圧レベルに応じて、異なる出力負荷条件下でPFCコントローラによって使用されます。

- すべての高負荷におけるCCMまたはBCM
- 効率を最適化するために、軽負荷時に異なるDCMモードを使用する



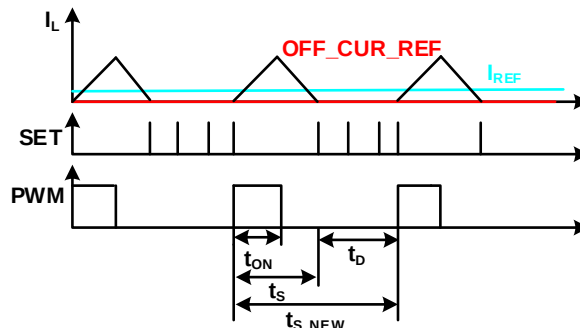
DCM.....CrM.....CCM.....CrM.....DCM

CCM



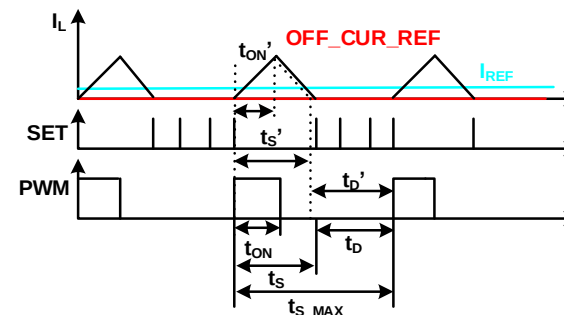
CF-DCM

一定周波数



VF-DCM

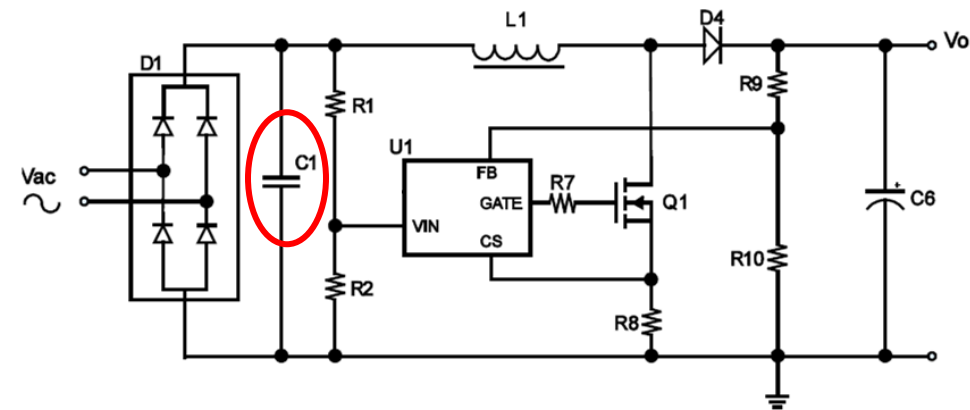
可変周波数



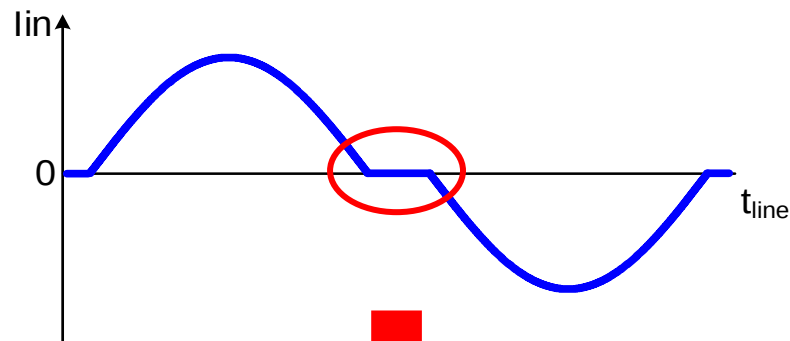
セット信号はCCMバレー電流ポイントとDCMポイントを決めます。

可変オンタイムでTHD性能を向上する

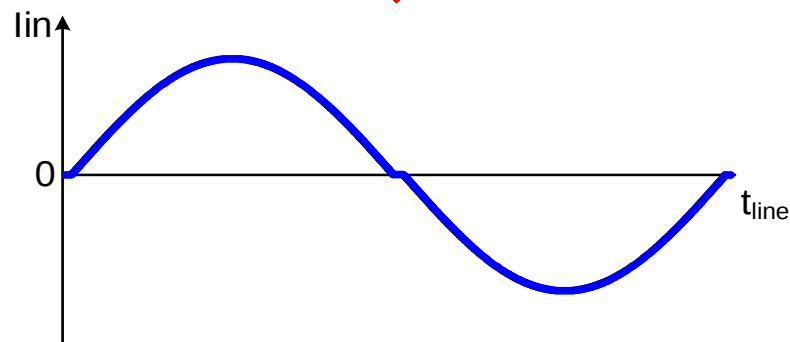
負荷時には、入力交流のゼロクロッシング付近で入力フィルタコンデンサが完全に放電しません。コンスタントオンタイム (COT) コントローラは、ゼロクロッシング付近で最大周波数の限界に達することもあります。これが高歪み (高THD) の原因です。



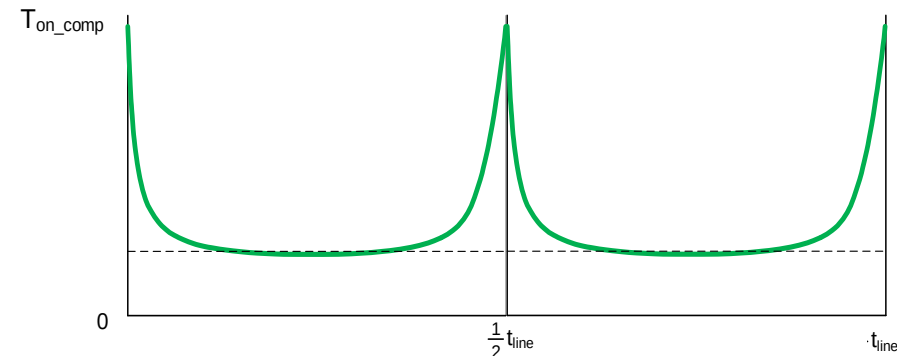
コンスタント
オンタイム



可変
オンタイム



- 可変オンタイム制御は、従来のコンスタントオンタイム制御に比べ、全高調波電流歪み (THD) を低減。



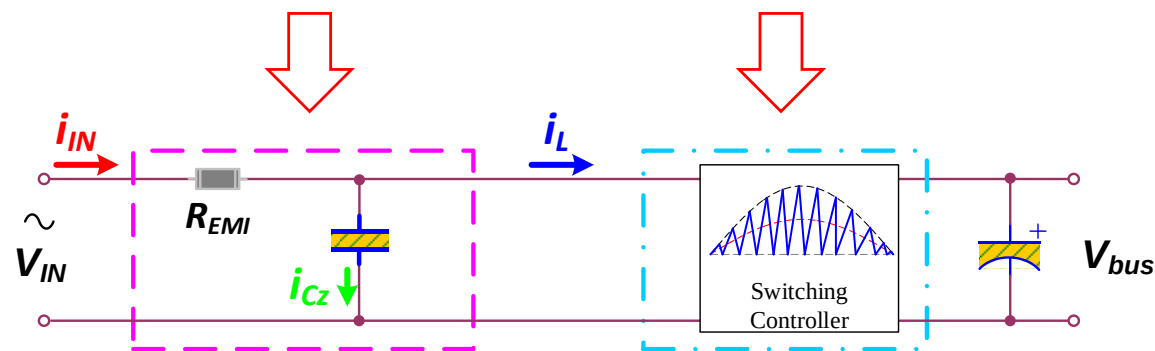
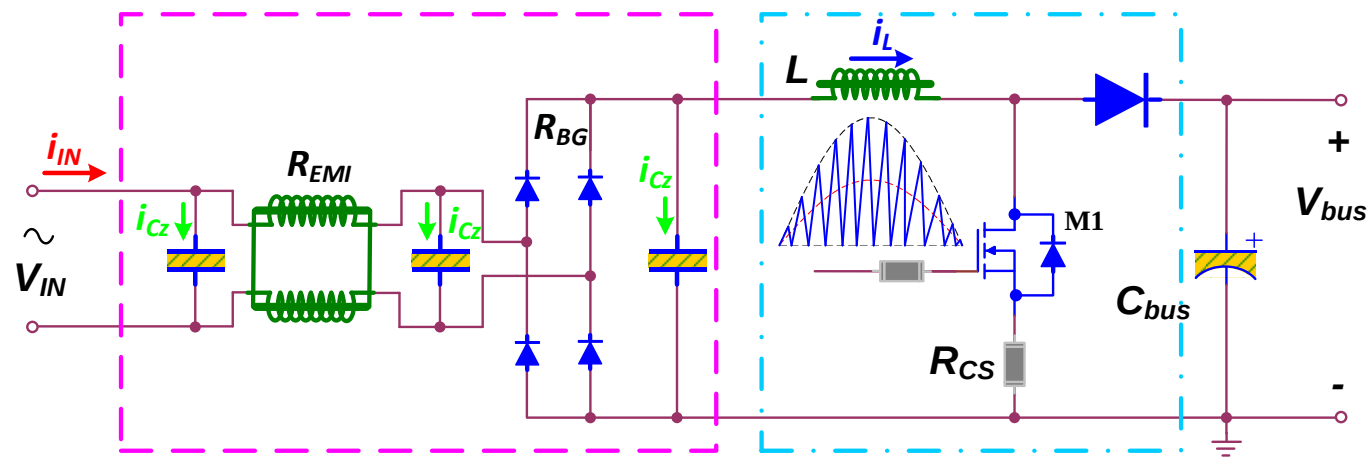
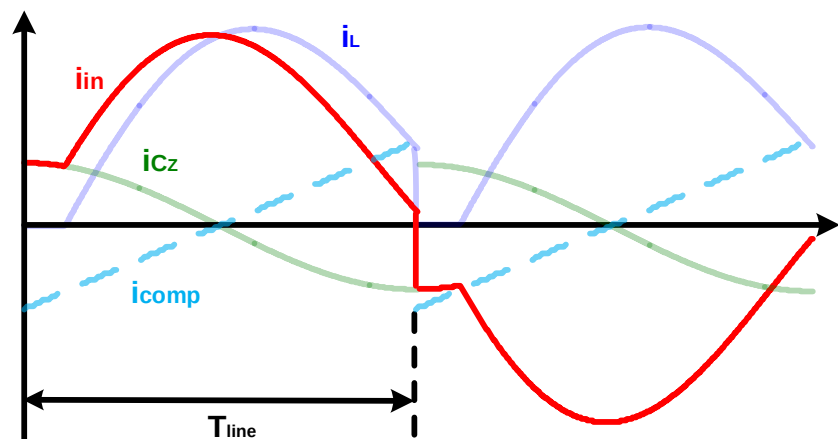
入力コンデンサ電流補償による力率向上

昇圧型PFCは入力電流を正弦波に成形しますが、PFCの前に置かれた入力フィルタは、位相シフトを導入することによって力率を劣化させる可能性があります。

- 入力コンデンサ電流を補償することで、力率を改善することができます。

補償の例:

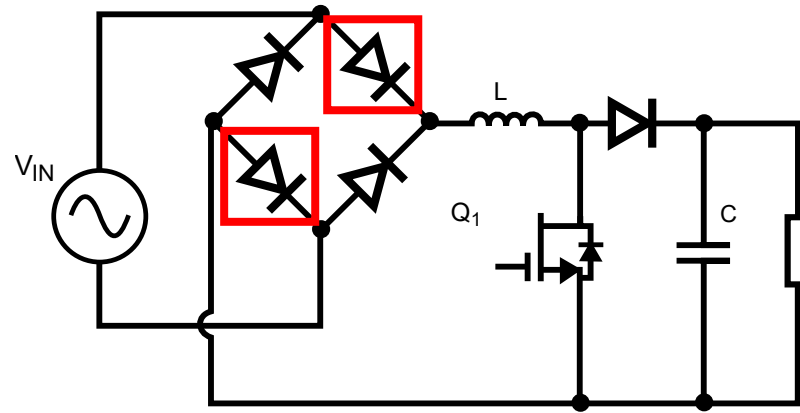
PFC制御則に三角波を加える。



- 概要: 力率改善 (Power Factor Correction)
- 昇圧型PFC制御
- 昇圧型PFCの改善 (効率、PF、歪み)
- ブリッジレスPFC
- Q & A

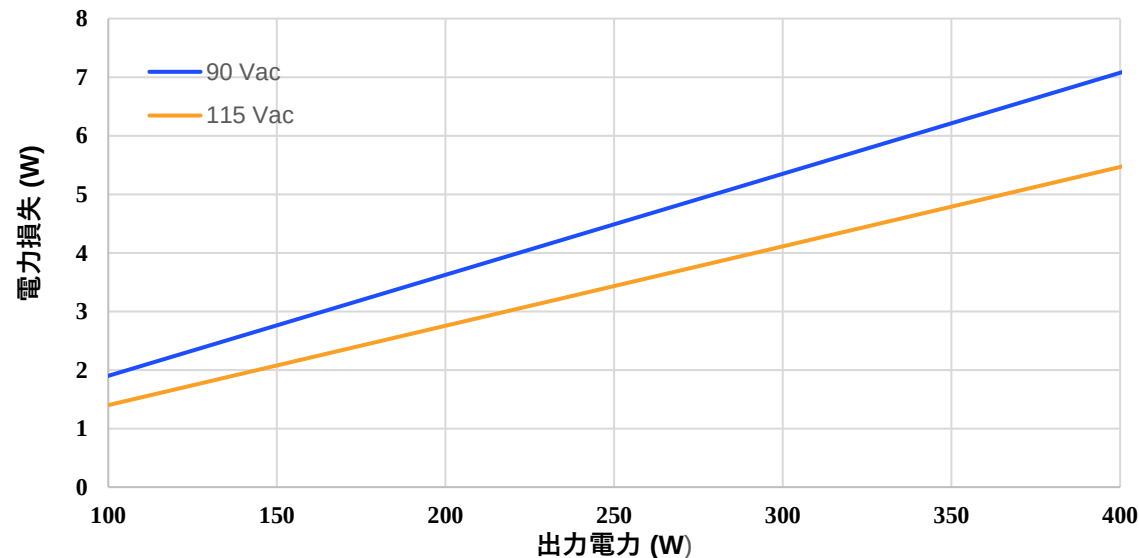
整流ブリッジ損失

ブリッジ整流器は、昇圧型PFCと直列に2つのダイオードを常時追加 => 導通損失

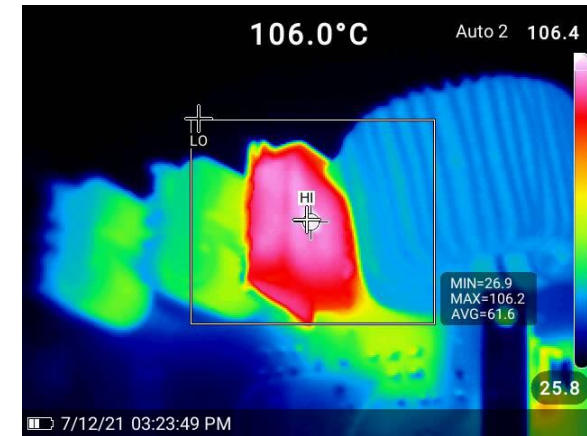


$$P_{D\ COND} = V_F \times I_{RMS}$$

GaNスイッチの使用と制御の最適化により、昇圧型PFCの効率だけが大幅に向上し、整流ブリッジは最大で数%の損失となり、効率損失の主要因となりました。



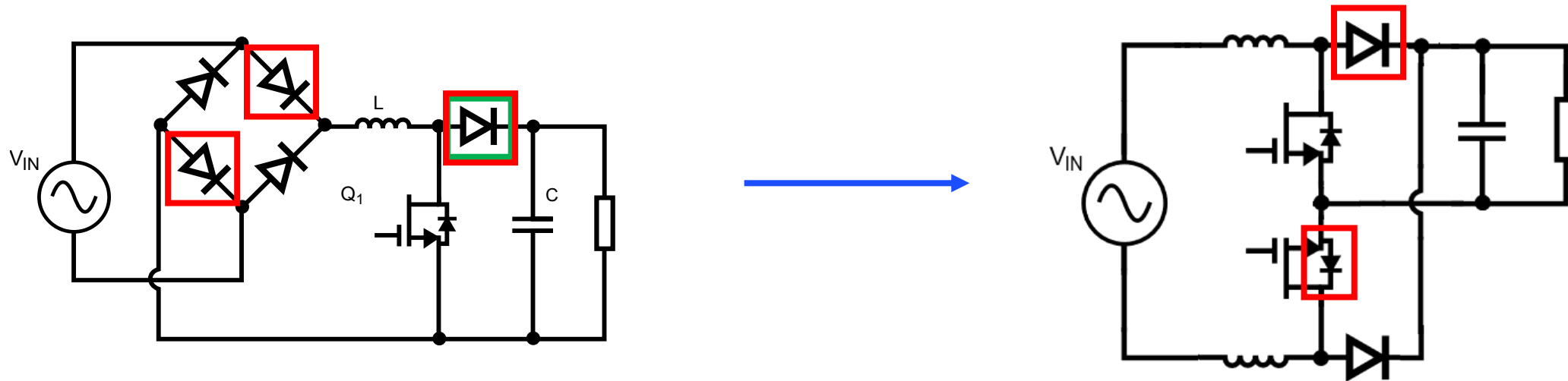
ブリッジから発生する熱が、電力密度を制限する主要因となります。



ブリッジレスPFC – 概要

従来の昇圧型PFCでは、逆導通を阻止するダイオードがすでにあります。このダイオードを利用して、ダイオード・ブリッジ整流器を取り除いたらどうなるでしょうか。

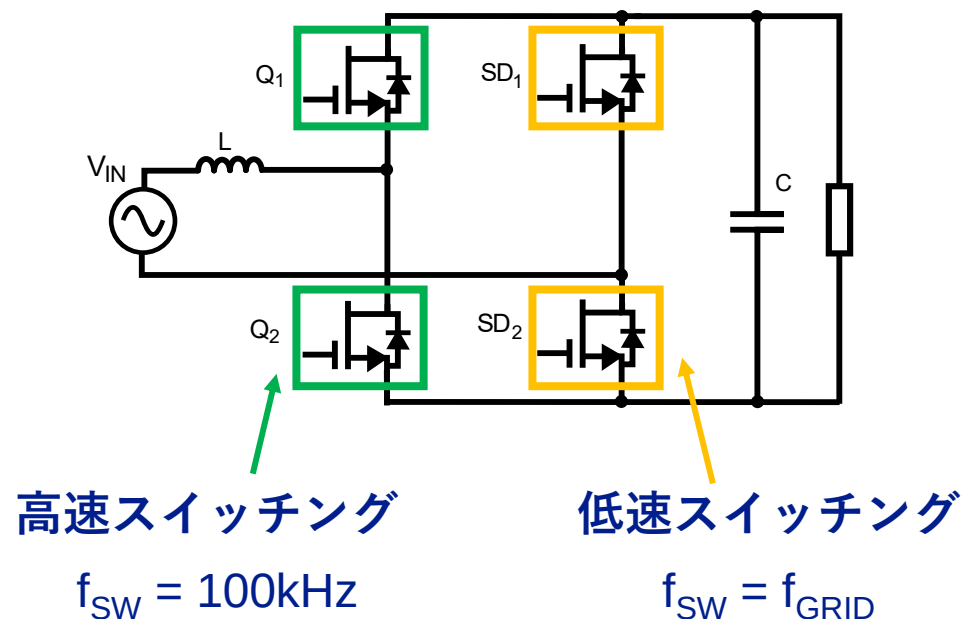
各交流ラインに1つの昇圧PFCを使用する場合、正弦波入力電圧の各交互に1つずつ、交互に動作します。



各入力ラインに1つのPFCブーストがあれば、1つの直列ダイオードを直接経路から効果的に取り除くことができ、整流損失が減少して効率が向上します。

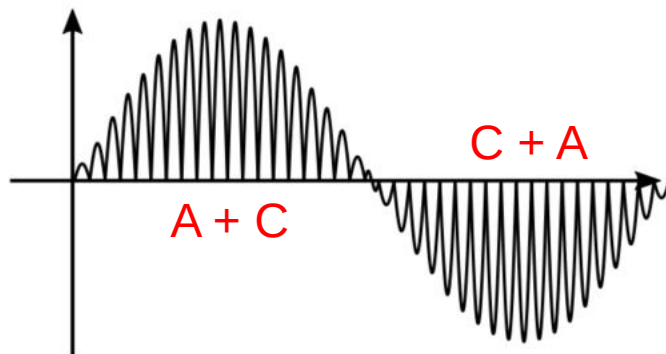
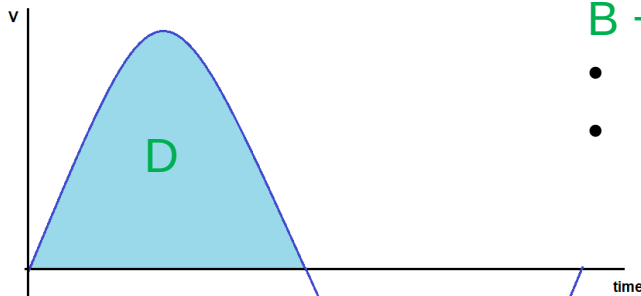
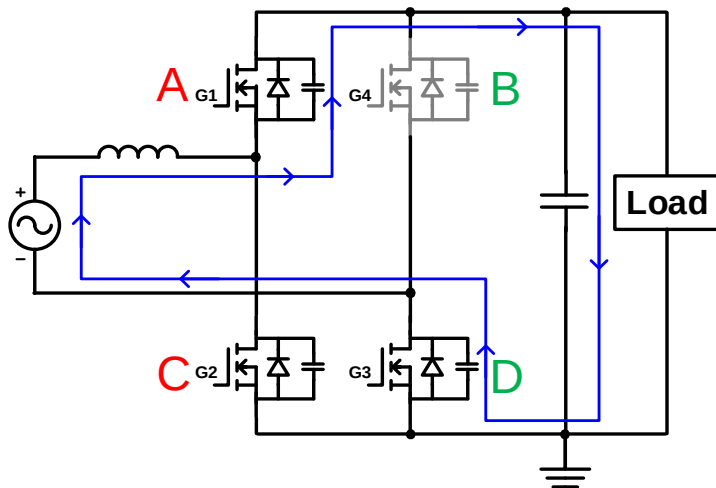
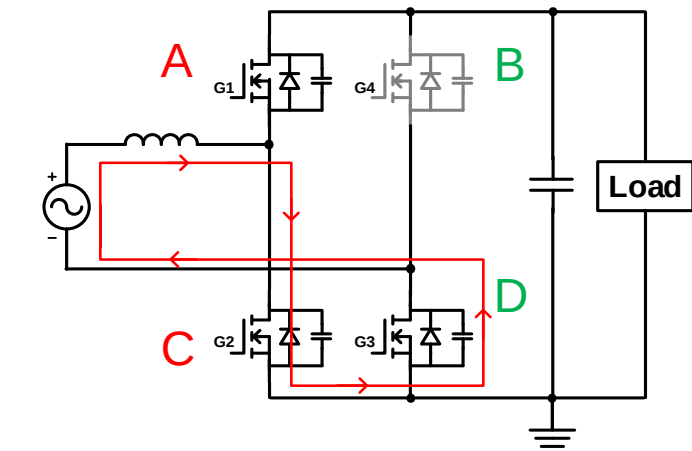
トータムポールPFC

ブリッジレス・デュアルブーストPFCの進化形がトータムポールPFCです。



- インダクタ1個に削減
- ダイオードをMOSFETに置き換え
- 極性選択スイッチ (低速スイッチングレグ) を備えた同期昇圧 (高速スイッチングレグ) として動作するように再配列

トータムポールPFC – 動作

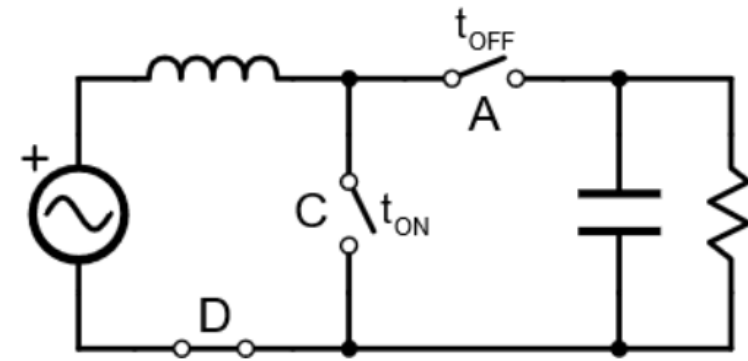


A + C

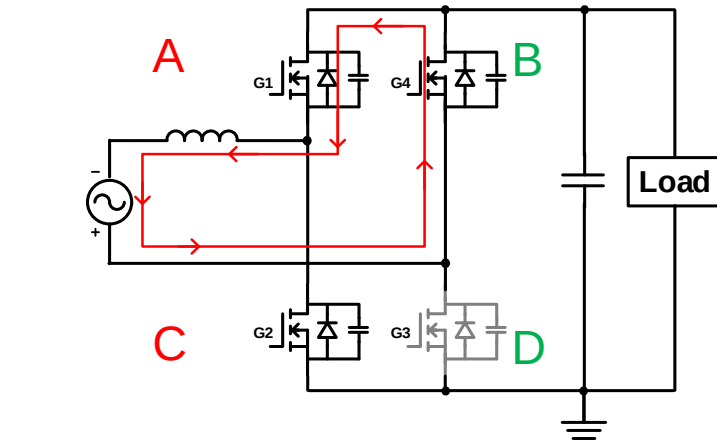
- インダクタに接続された高速スイッチ
- 同期昇圧として機能

B + D

- 低速スイッチ
- 入力極性を選択

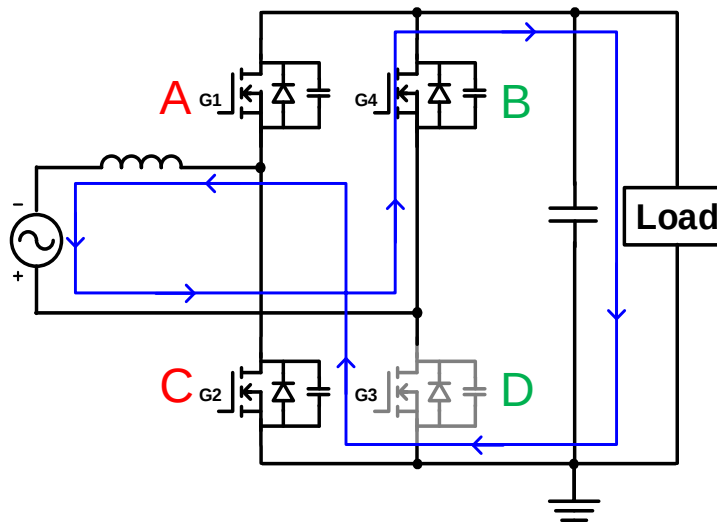


トータムポールPFC – 動作



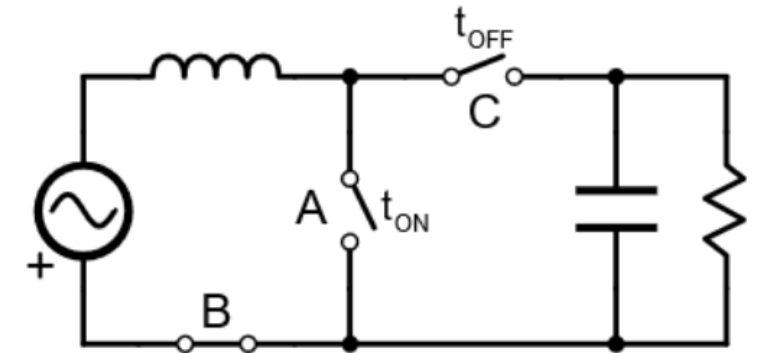
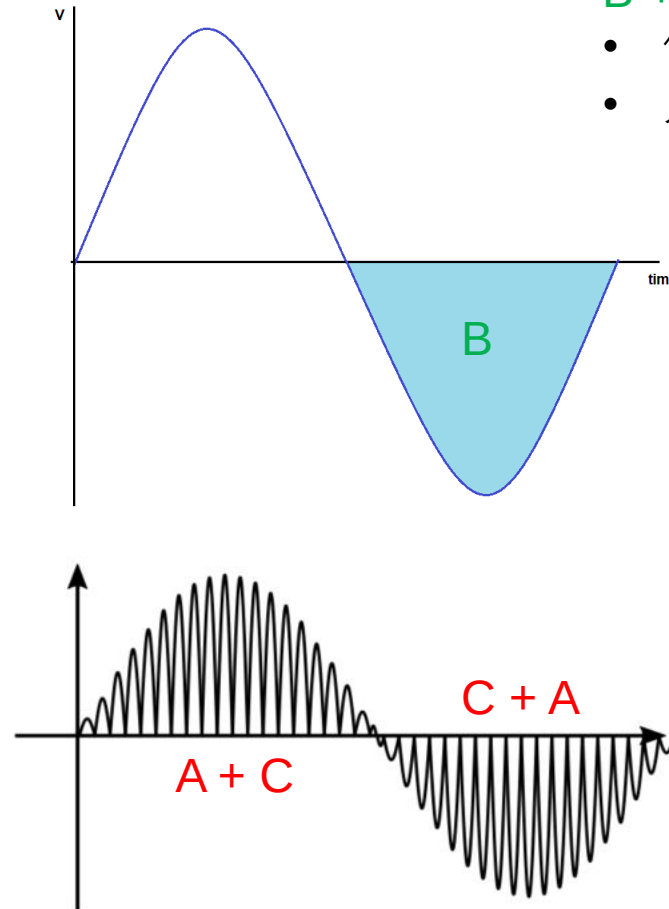
A + C

- インダクタに接続された高速スイッチ
- 同期昇圧として機能



B + D

- 低速スイッチ
- 入力極性を選択

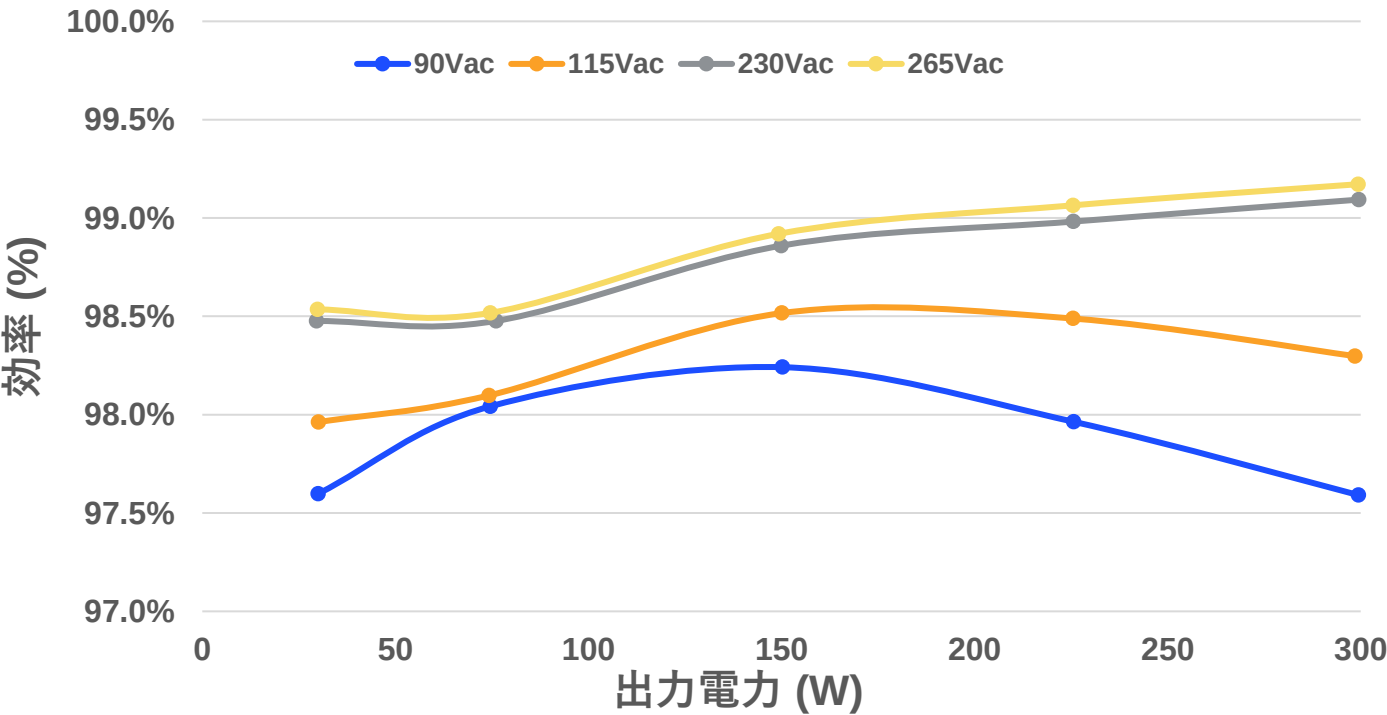


トータムポールPFC 結果

トポロジー	トータムポールPFC	ノーマルPFC
フリーホイールダイオード	-	高速リカバリ 1個
高速MOSFET / SiC MOSFET / GaN	GaN FET 2個 * 2	GaN FET 1個
整流ブリッジ	-	1個
低速MOSFET / ダイオード	Si MOSFET 2個	-
効率@90V / 300W	97.6%	95.8%

300Wで計測

2個のGaN FETと
2個のSi MOSFETを使用した
CrMトータムポールを使用
(MP45000コントローラ)



- 概要: 力率改善 (Power Factor Correction)
- 昇圧型PFC制御
- 昇圧型PFCの改善 (効率、PF、歪み)
- ブリッジレスPFC
- Q & A