

3相AC-DC変換回路とPFC回路の 高性能化の検討

○小野澤昌徳 小堀康功 村上和貴

ケイ林 高虹 小林春夫 高井伸和(群馬大学)

小田口貴宏 山口哲二 上田公大(AKM テクノロジ)

松田順一(旭化成パワーデバイス)

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- AC-DCコンバータ
- 高調波対策とPFC回路
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- シミュレーション結果
- まとめ

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- AC-DCコンバータ
- 高調波対策とPFC回路
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- シミュレーション結果
- まとめ

研究背景

産業向けの3相電源に着目

環境に配慮した電源の要求

高調波に対応した高力率制御が必要



3相入力用の高力率AC-DC電源の検討

研究目的

設計指針

3相入力電源
+
降圧コンバータ + PFC回路

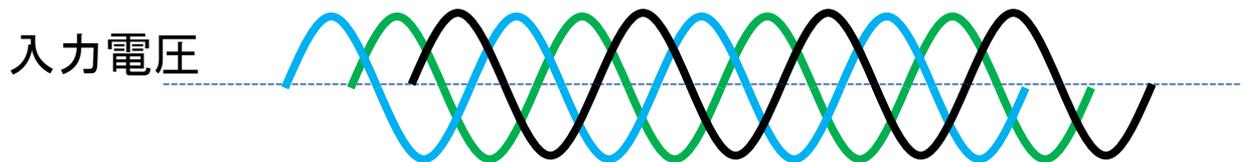
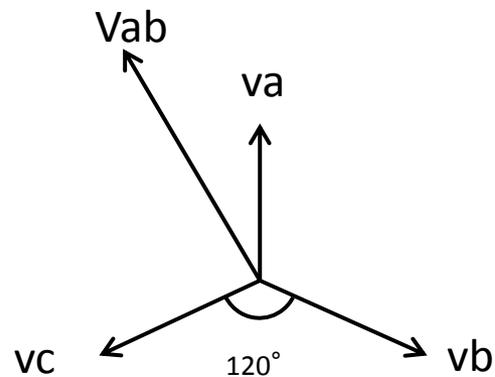
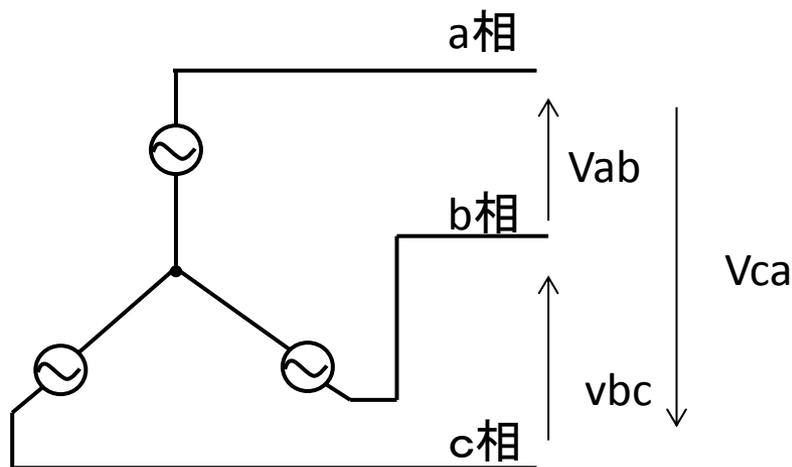
安定した直流を生成できる高力率3相AC-DC電源の検討

outline

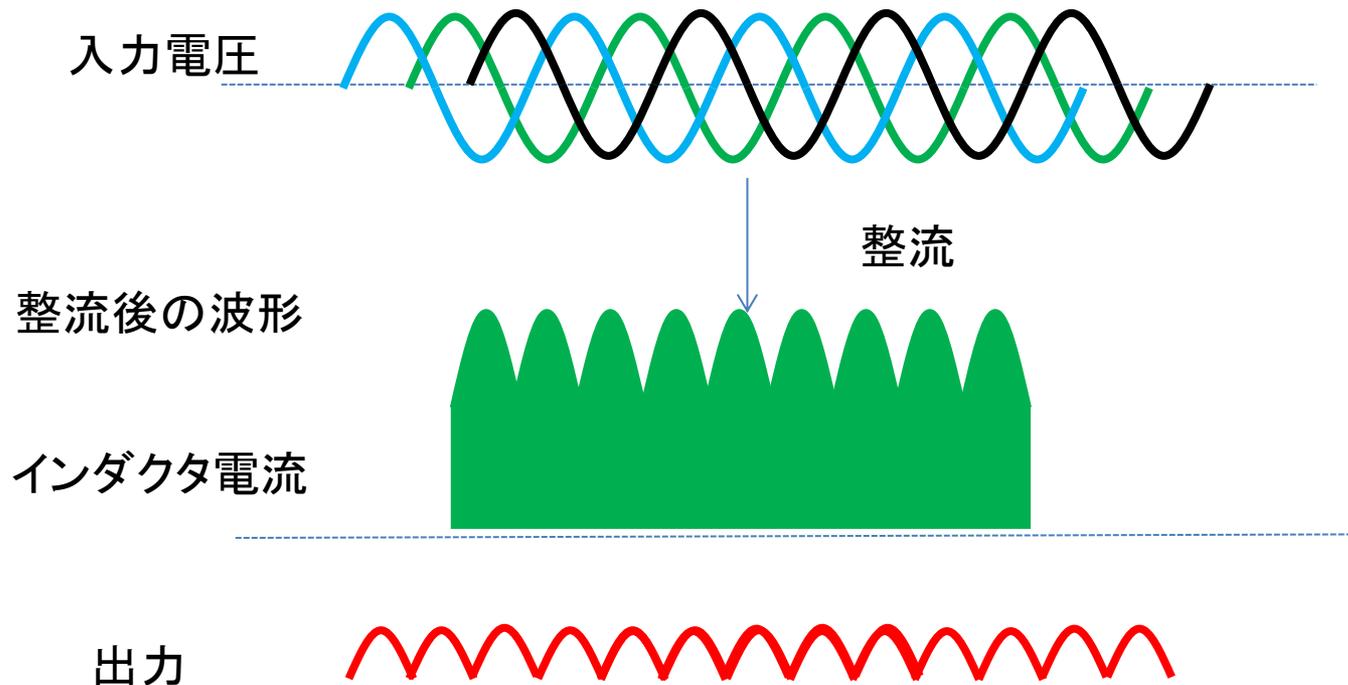
- 研究背景
- **3相入力電源**
- AC-DCコンバータ
- 高調波対策とPFC回路
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- シミュレーション結果
- まとめ

3相入力電源の原理

三相入力電源とは、3組の単相交流を3本の電線で送電できる方式。それぞれの位相差が120度となっている。



3相入力電源の原理



リップルを抑えることが可能

主に大型機器向け電源となっている

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- **AC-DCコンバータ**
- 高調波対策とPFC回路
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- シミュレーション結果
- まとめ

AC-DCコンバータとは

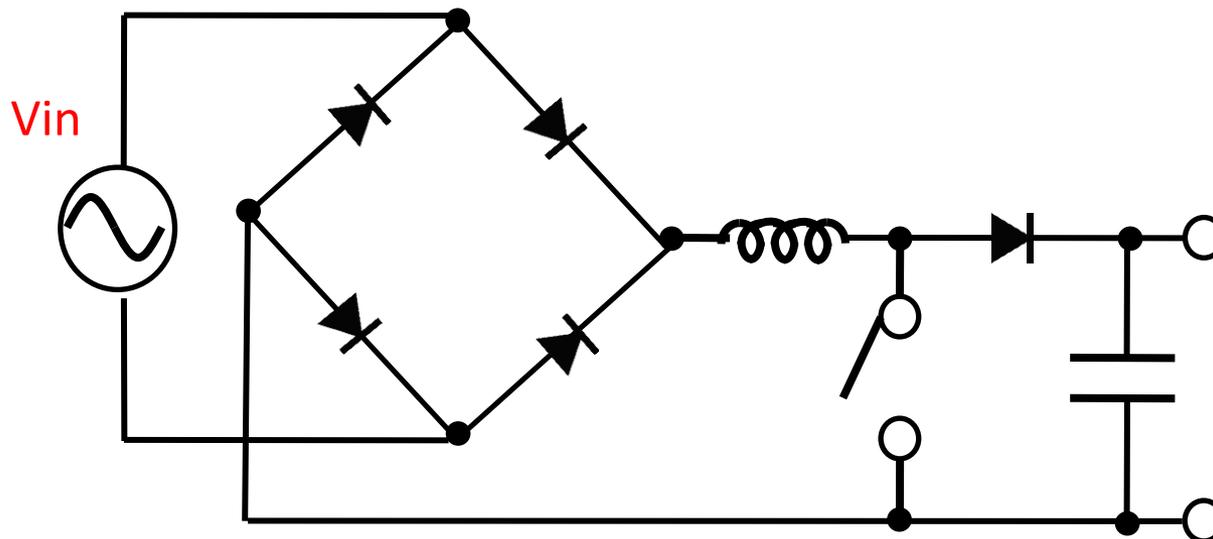
スイッチング電源

スイッチング方式によって制御された直流安定化電源。
商用電源を入力とし、半導体の高速スイッチングにより
制御・整流して所定の直流を得るもの。

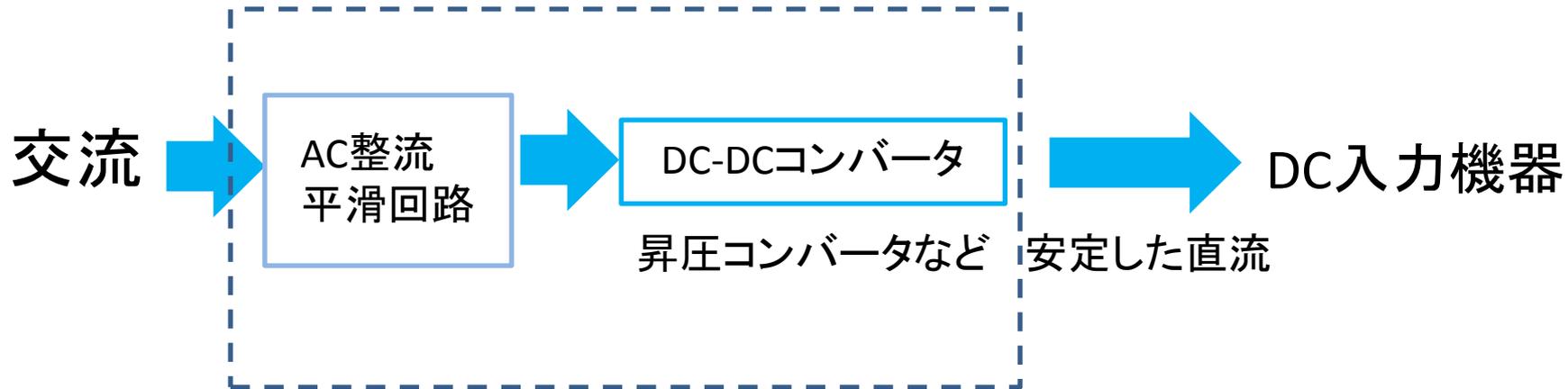
交流を直流に平滑するための回路にスイッチング電源を応用



AC-DCコンバータ



AC-DC電源の課題



2段構成・回路規模が大きくなってしまふ

単相降圧型AC-DCコンバータの概要

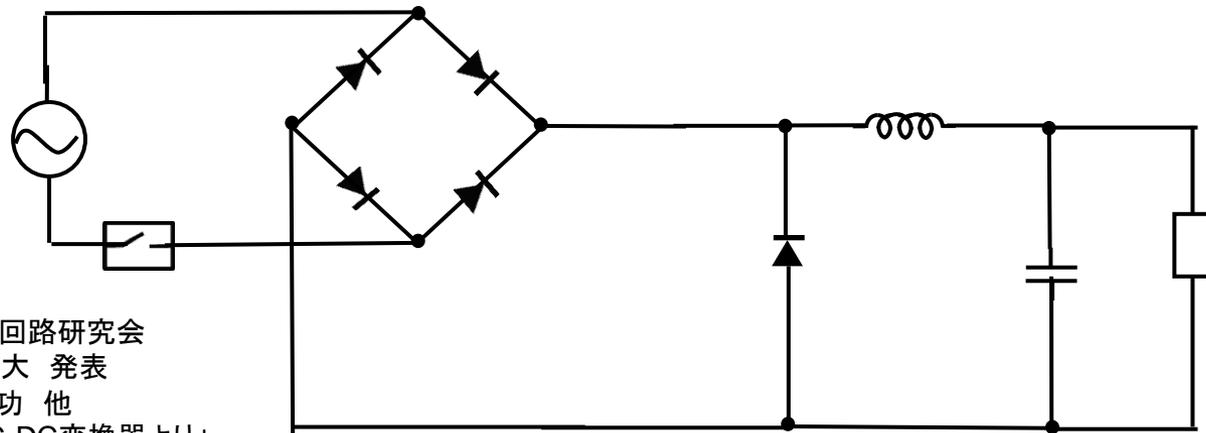
降圧型コンバータのメリット

出力リップルを抑えられる
制御範囲が広い



AC-DCコンバータに応用

1段のコンバータで高い電圧から安定化した直流を得る



2012年1月19日 電子回路研究会
ECT-12-005 山形大 発表
ケイ林 小堀康功 他

「部品数を低減した直接AC-DC変換器より」

制御回路にPFC回路が必要

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- AC-DCコンバータ
- **高調波対策とPFC回路**
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- シミュレーション結果
- まとめ

電源の高調波対策

電化製品などで発生する電源高調波電流は
力率の悪化などの要因となっている

電源高調波電流とは...
家庭用電源に流れる、歪みをもった正弦波

発生しやすい電化製品
テレビ、パソコン、エアコンなど



高調波対策

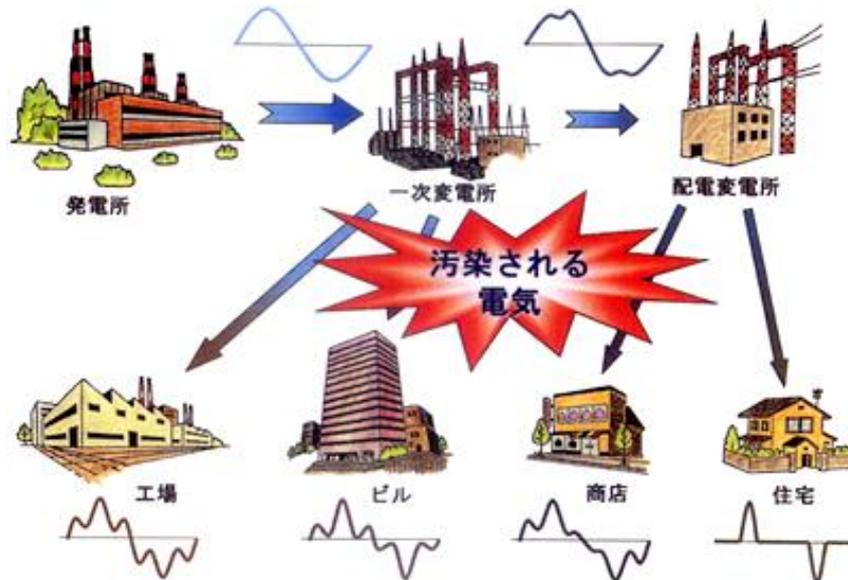
高調波電流の悪影響

力率悪化(送電損失の増加)

進相コンデンサの加熱・発電機の加熱

通信障害

制御機器の誤動作



高調波対策

高調波規格

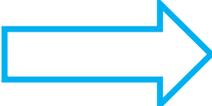
電子機器が発生する高調波電流を規制しようとするもので、電子機器をクラスA～Dに分類し各々に対し高調波発生 の 限度値を規定している

クラスA: 平衡三相機器および他のクラスに属さないすべての機器

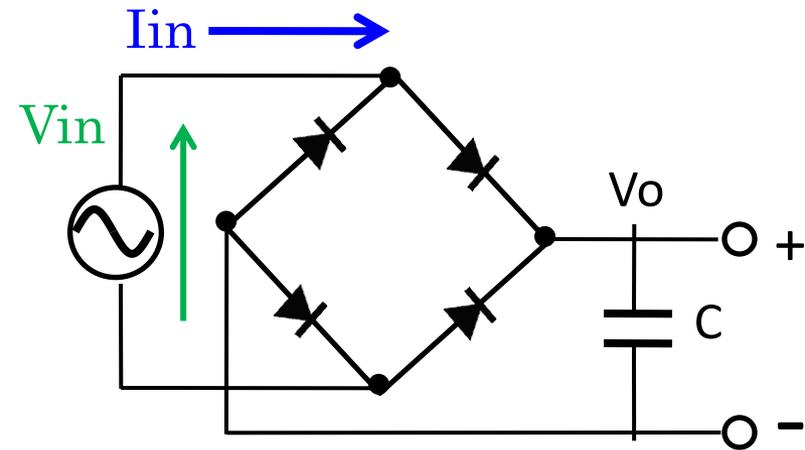
クラスB: 手持ち形電動工具

クラスC: 照明機器

クラスD: 特殊な電流波形の600W以下の機器

 高調波規格に対応した電源回路の設計が必要

電源回路の高調波発生原理



コンデンサ入力型整流回路

入力電圧

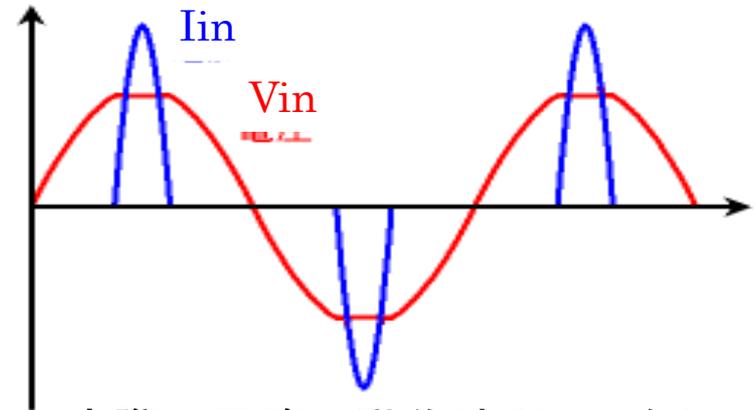
出力電圧

同一面積
(同一実行値)

入力電流 (I)

PFCなし

PFC有り



実際の回路の動作波形(PFCなし)

$|V_{in}| > V_o$ の場合にしか電流が流れない



V_{in} のピーク値付近の短い期間に流れる



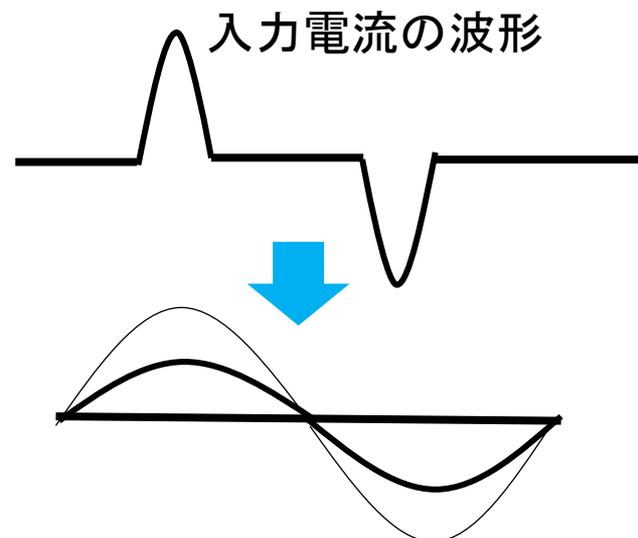
正弦波ではなく高調波が発生

※ V_{in} : 入力電圧, V_o : 出力電圧

高調波電流対策の原理

力率を改善することで、高調波の抑制が可能

交流入力電流が正弦波状に一周期間に渡って流れるようにすることで力率を上げ、高調波電流を少なくすることができる



高調波電流対策の原理

$$\begin{aligned}
 \text{力率} &= \frac{V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{V_{rms} I_{rms}} \\
 &= \frac{V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{\sqrt{(V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots)} \sqrt{(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)}} \\
 &= \frac{V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{\sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad \text{全高調波ひずみ (THD)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\text{高調波電流の和}}{\text{基本波電流}}
 \end{aligned}$$

入力電流のみに高調波が含まれることを考慮

$$\begin{aligned}
 \text{力率} &= \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)}} = \frac{I_1 \cos \varphi}{\sqrt{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)}} \\
 &= \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + (I_2 / I_1)^2 + (I_3 / I_1)^2 + (I_4 / I_1)^2 + \dots}} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + (THD)^2}}
 \end{aligned}$$

力率

$$\text{力率} = \frac{\text{有効入力電力}}{\text{皮相電力}} = \frac{\text{電力の一周期積分}}{\text{入力電流の実効値} * \text{入力電圧の実効値}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\int V_{in} \cdot I_{in} dt}{V_{rms} \cdot I_{rms}} &= \cos \theta \frac{|V \cdot I|_{rms}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \\ &= \frac{\int V_{in} \cdot I_{in} dt / T}{\sqrt{\int V_{in}^2 dt / T} \cdot \sqrt{\int I_{in}^2 dt / T}} \\ &= \frac{\int V_{in} \cdot I_{in} dt}{\sqrt{(\int V_{in}^2 dt) \cdot (\int I_{in}^2 dt)}} \end{aligned}$$

PFC回路動作の比較

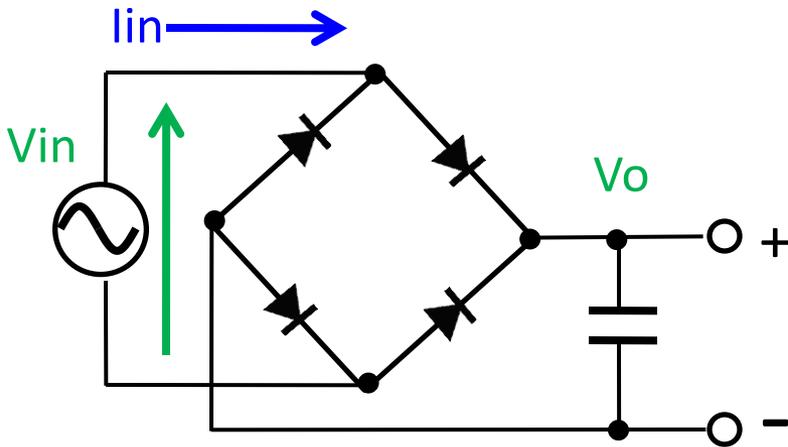


図:コンデンサ入力型整流回路

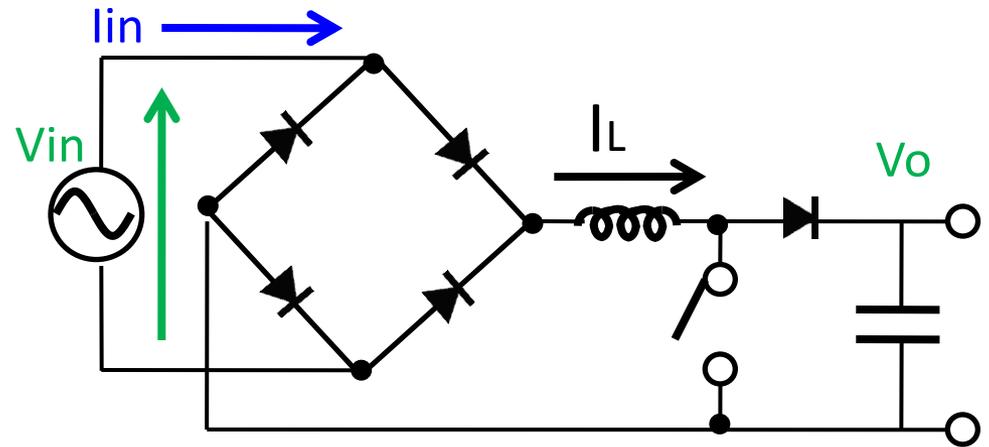
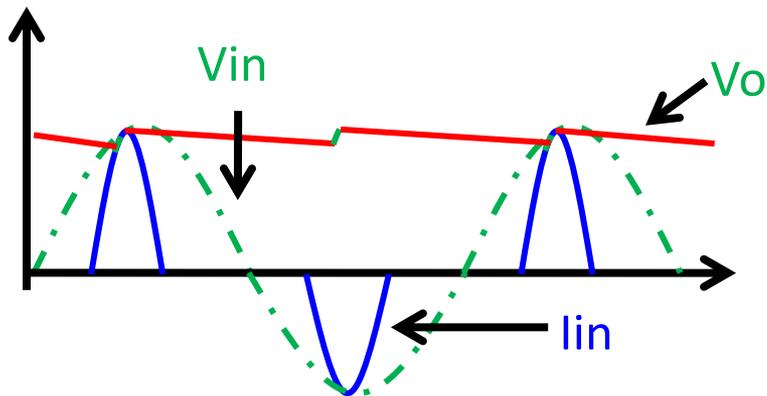
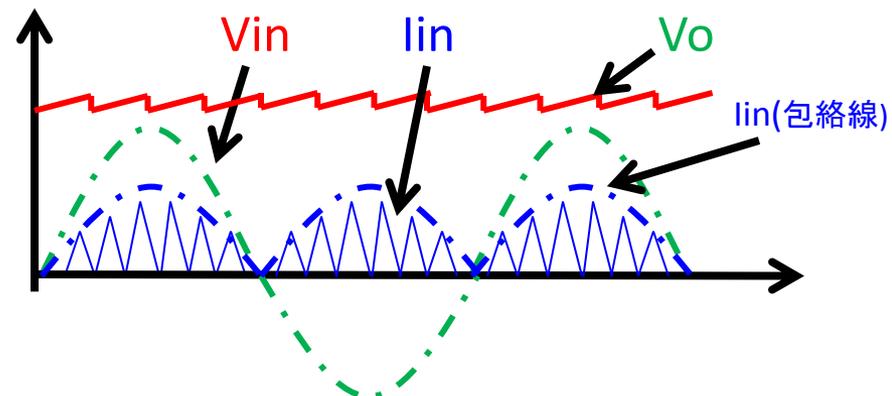


図:コンデンサ入力型整流回路PFC付



動作波形(PFCなし)



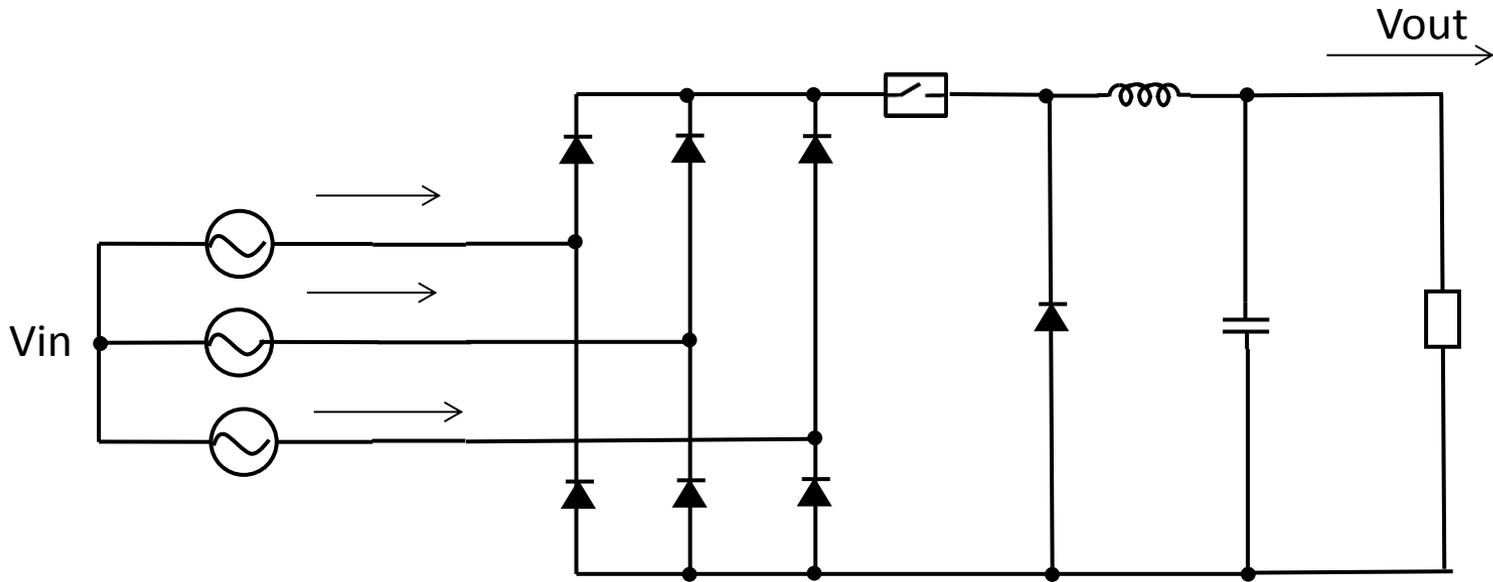
動作波形(PFC付)

PFCを付けることで電流が正弦波に近くなり力率が改善される

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- AC-DCコンバータ
- 高調波対策とPFC回路
- **提案型3相入力降圧型AC-DC電源**
- シミュレーション結果
- まとめ

3相降圧型AC-DC電源

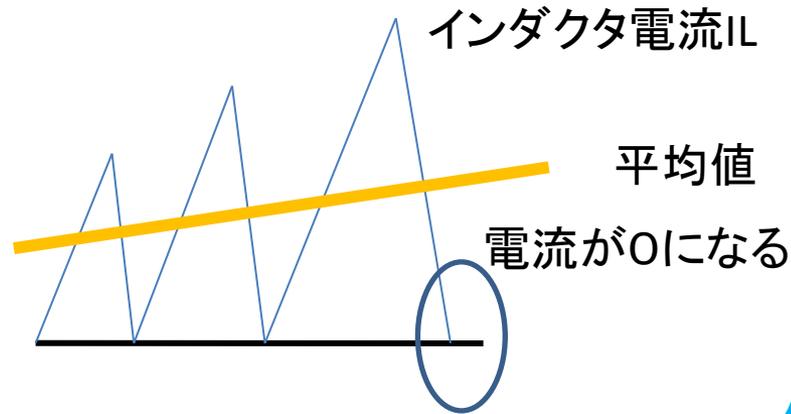


3相入力での1段PFC付AC-DC電源を検討

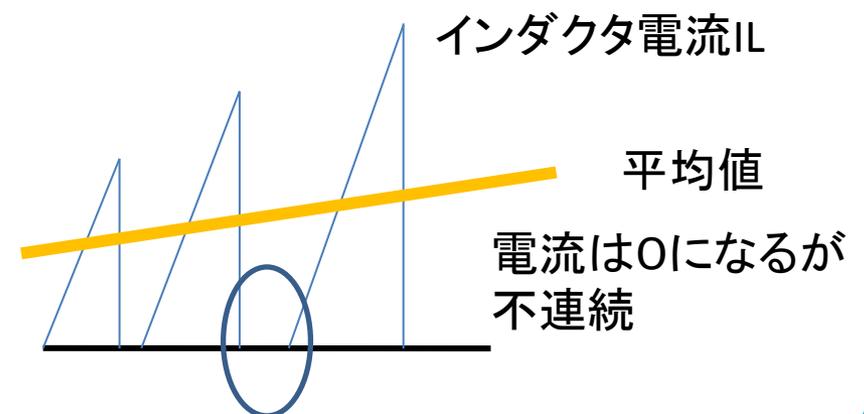
制御方式の検討

3相電源では回路構成が最も簡単にできる不連続モード制御での検討が一般的

電流臨界モード(BCM)



電流不連続モード(DCM)

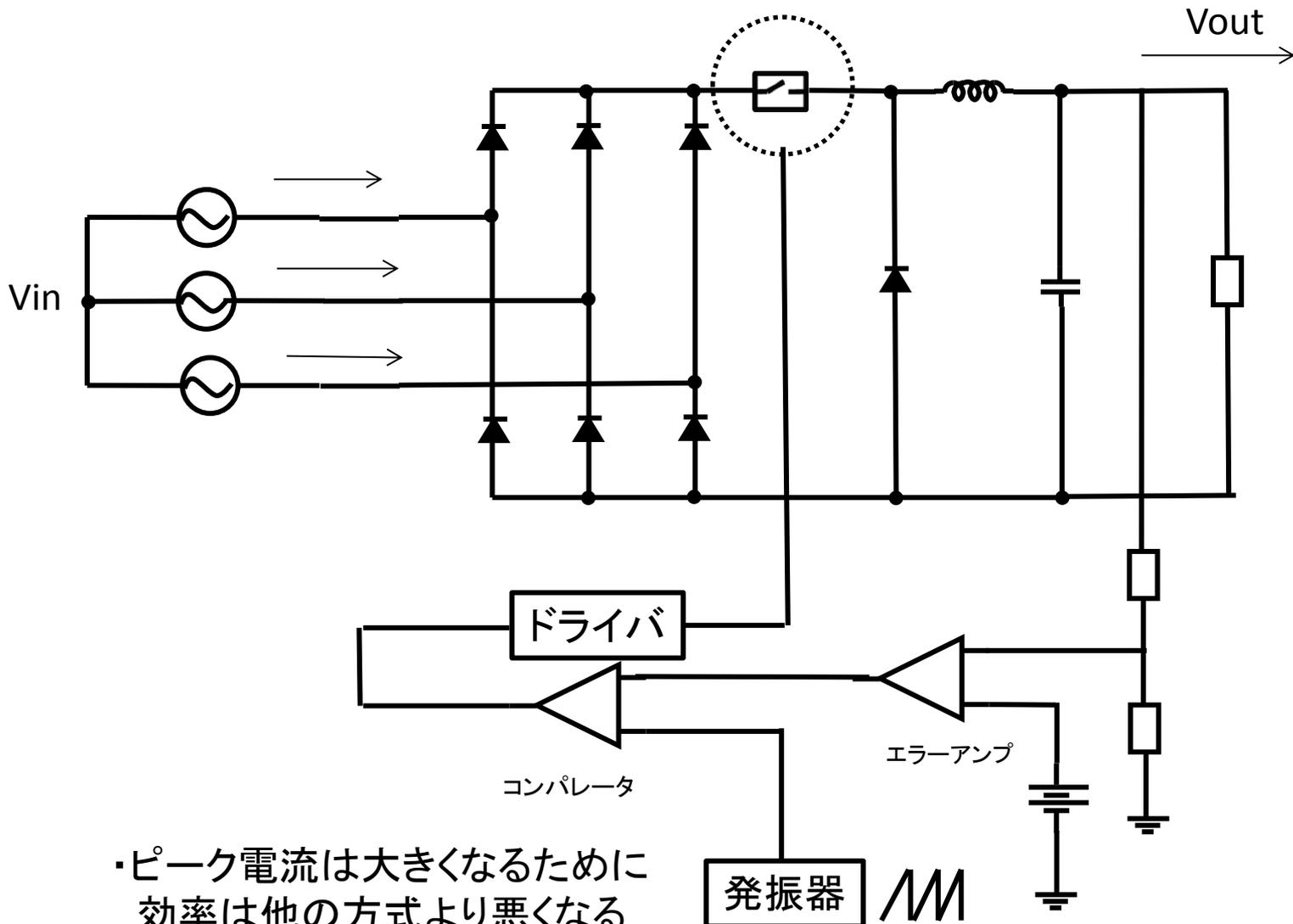


- ・回路構成が簡単で安価
- ・不連続モードより高力率が期待できる

- ・回路構成が簡単で安価
- ・ピーク電流が大きく損失も大きい
- ・力率は入力/出力が大きいほどよくなる

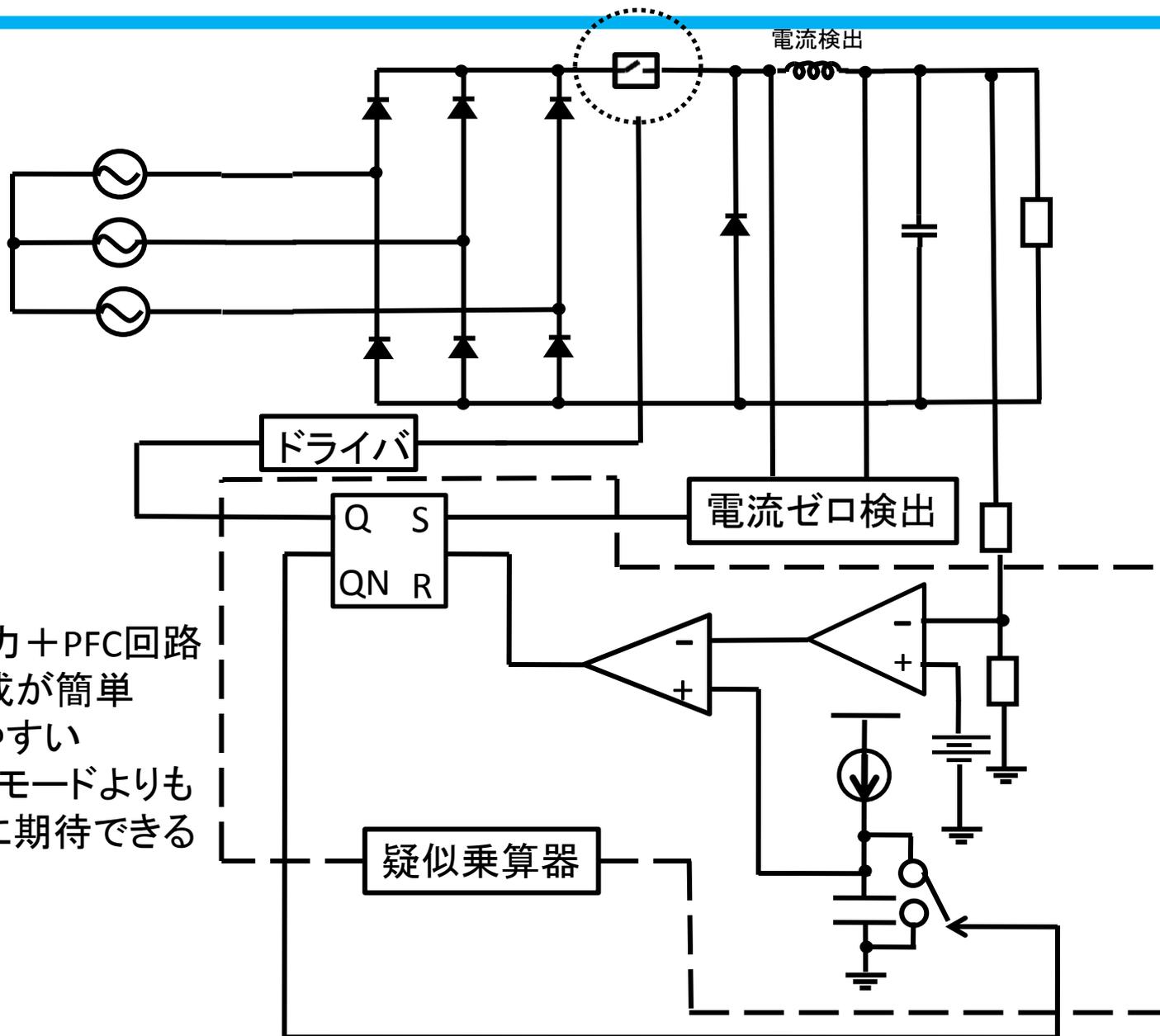
⇒ 標準的な手法が確立されていない

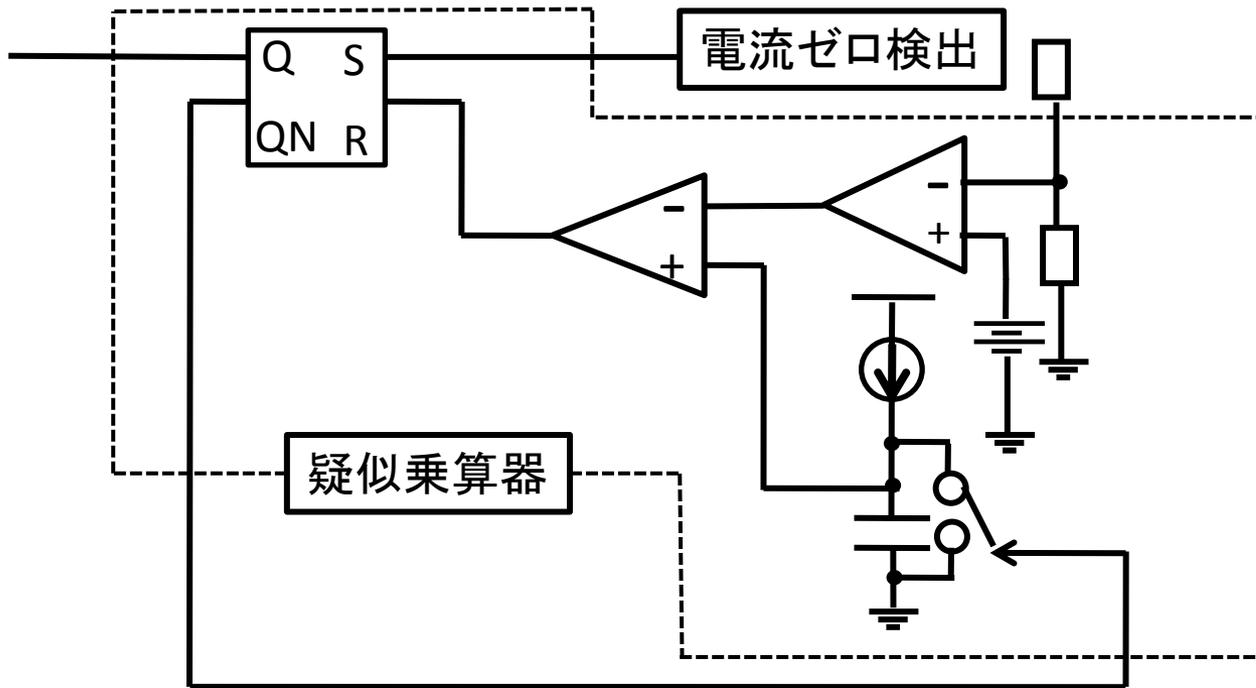
電流不連続モードPFC



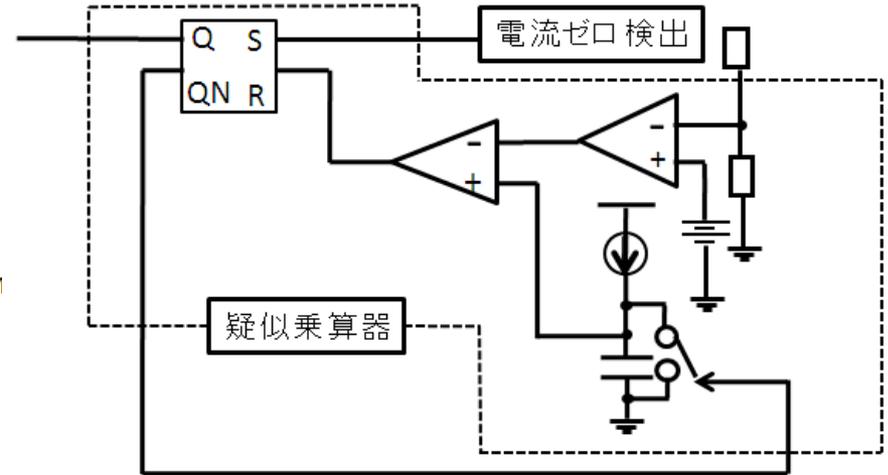
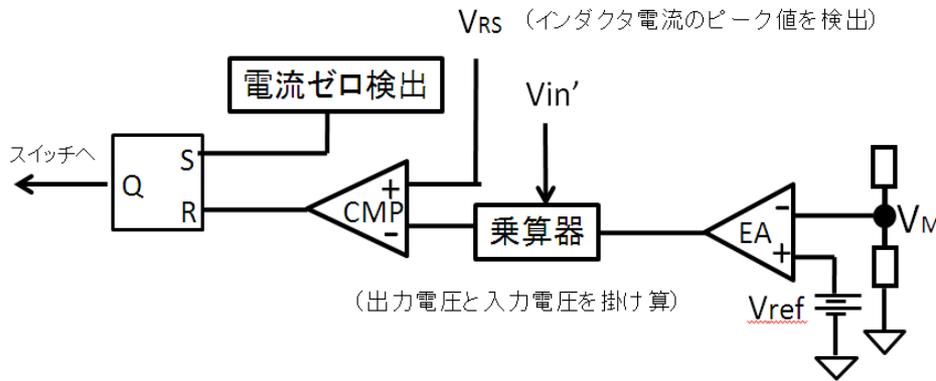
- ・ピーク電流は大きくなるために
効率は他の方式より悪くなる
- ・部品数が少なくて済む

電流臨界モード(BCM)PFC





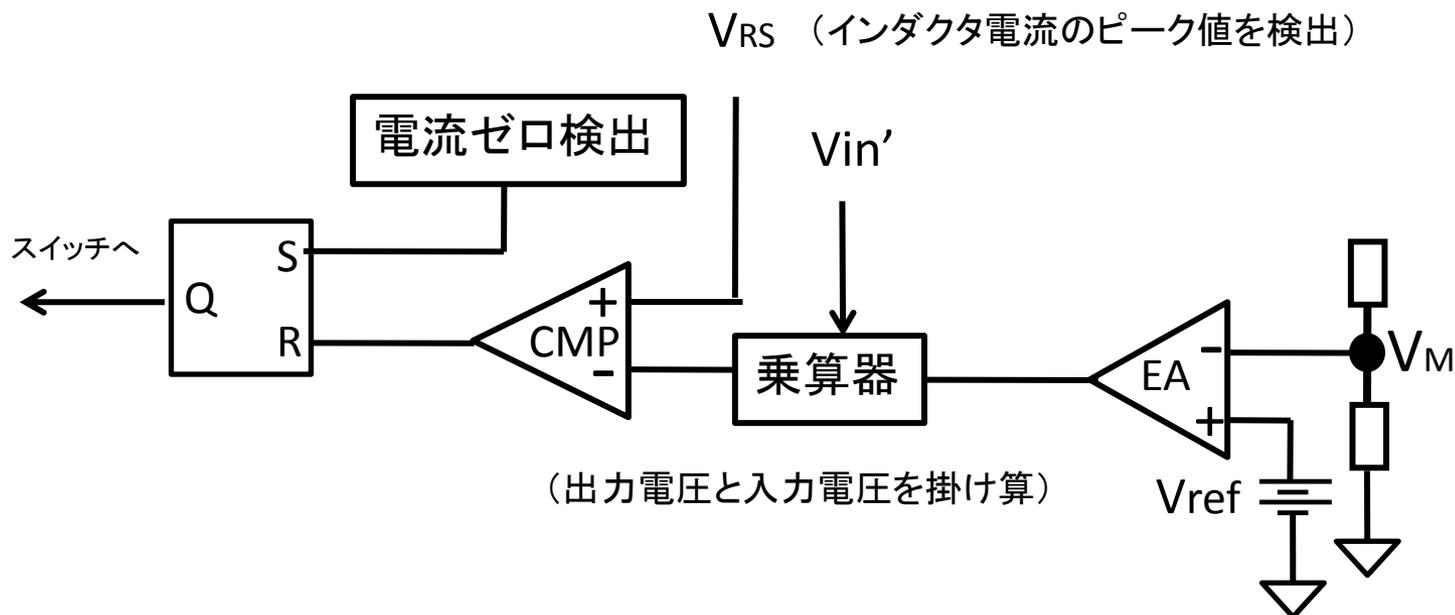
BCM-PFC制御回路(従来型との比較)



従来型	提案型
FF(フリップフロップ)	SRFF(SRフリップフロップ)
電流ゼロ検出回路	電流ゼロ検出回路
コンパレータ	コンパレータ
エラーアンプ	エラーアンプ
乗算器	のこぎり波発生装置

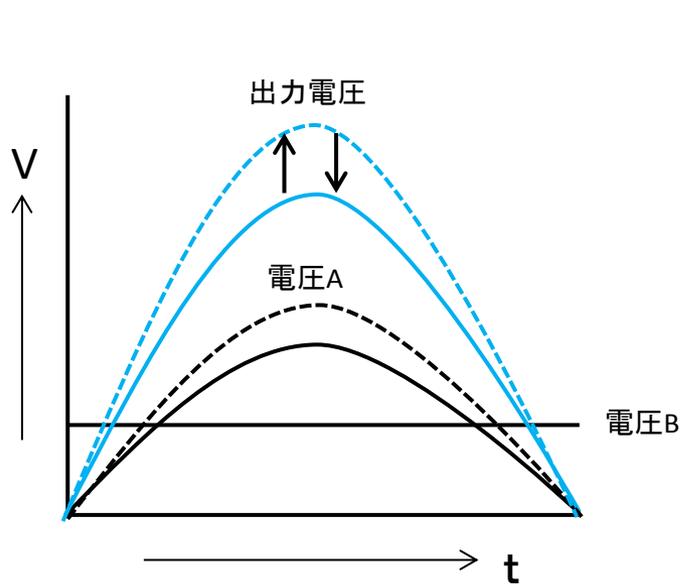
疑似乗算器

従来型BCM-PFC制御回路

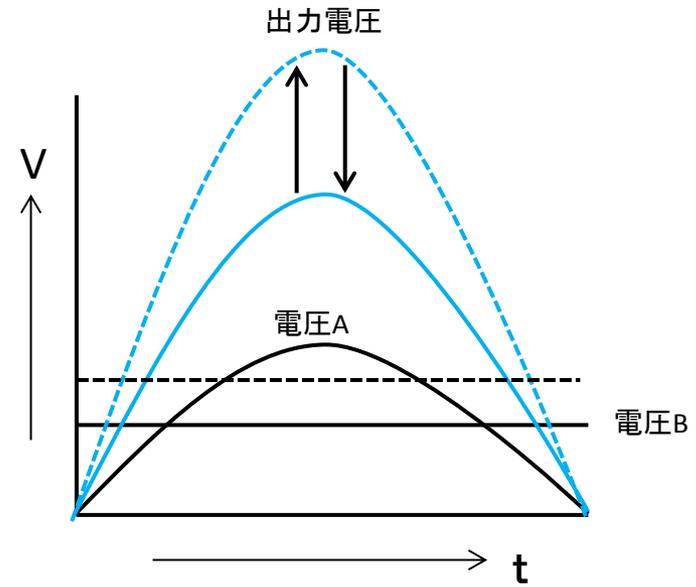


通常使われる乗算器は回路規模が大きい

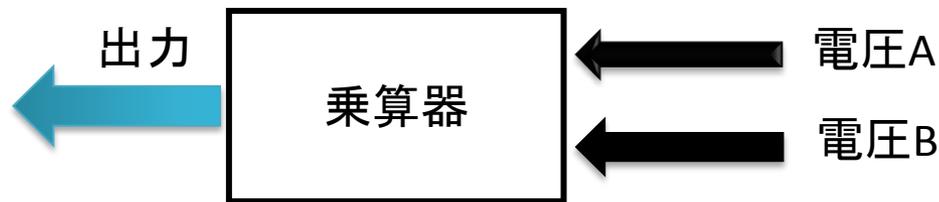
乗算回路の入力電圧と出力電圧



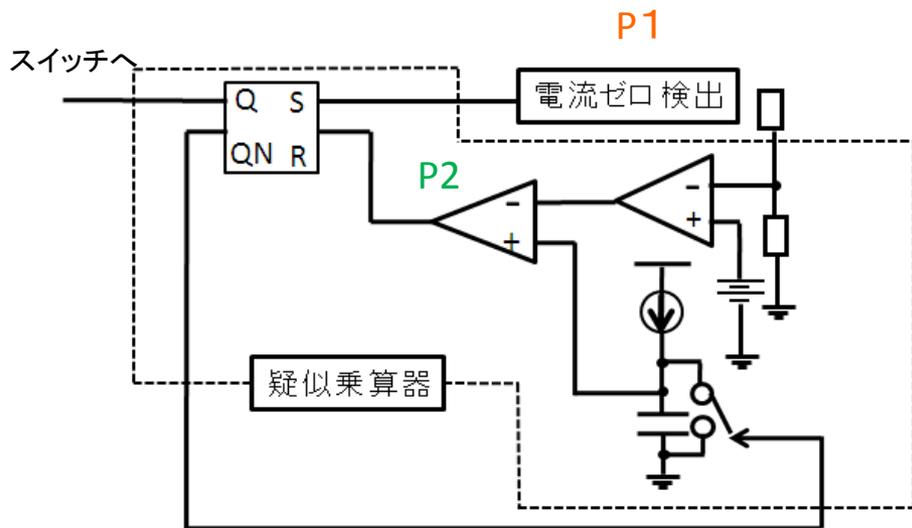
入力電圧Aが変化したとき



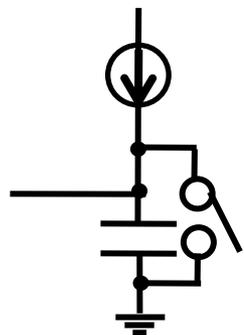
入力電圧Bが変化したとき



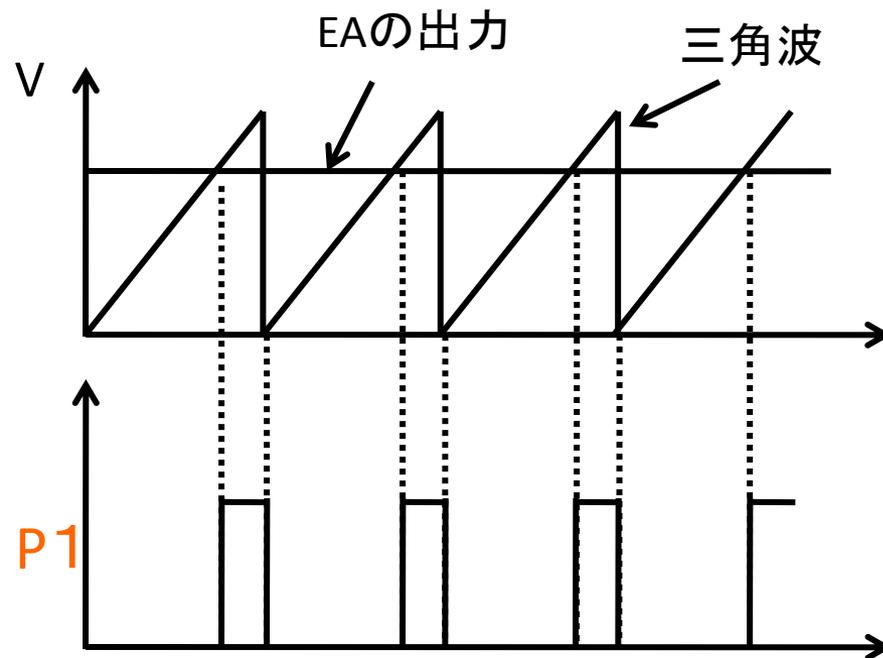
疑似乗算回路



のこぎり波発生器



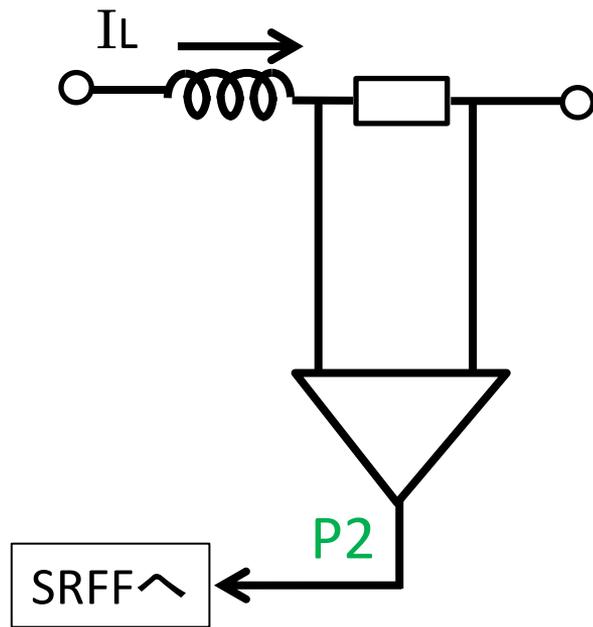
スイッチがオフすることで
コンデンサ電圧がのこぎり波状
となる



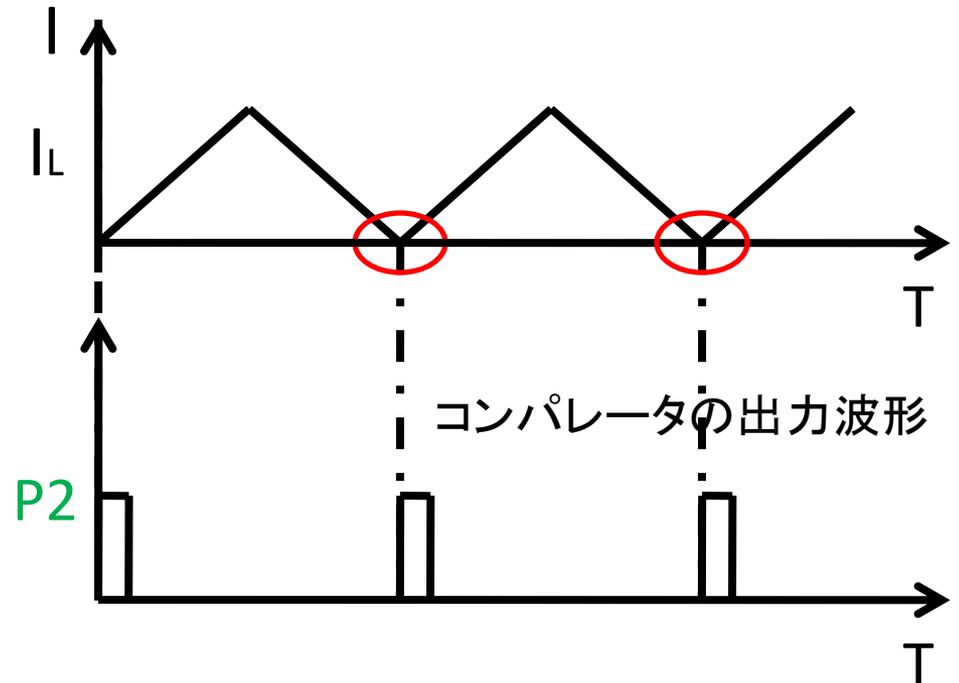
パルス発生波形

(上記:コンパレータへの入力波形)
(下記:コンパレータの出力波形)

ゼロ電流検出回路

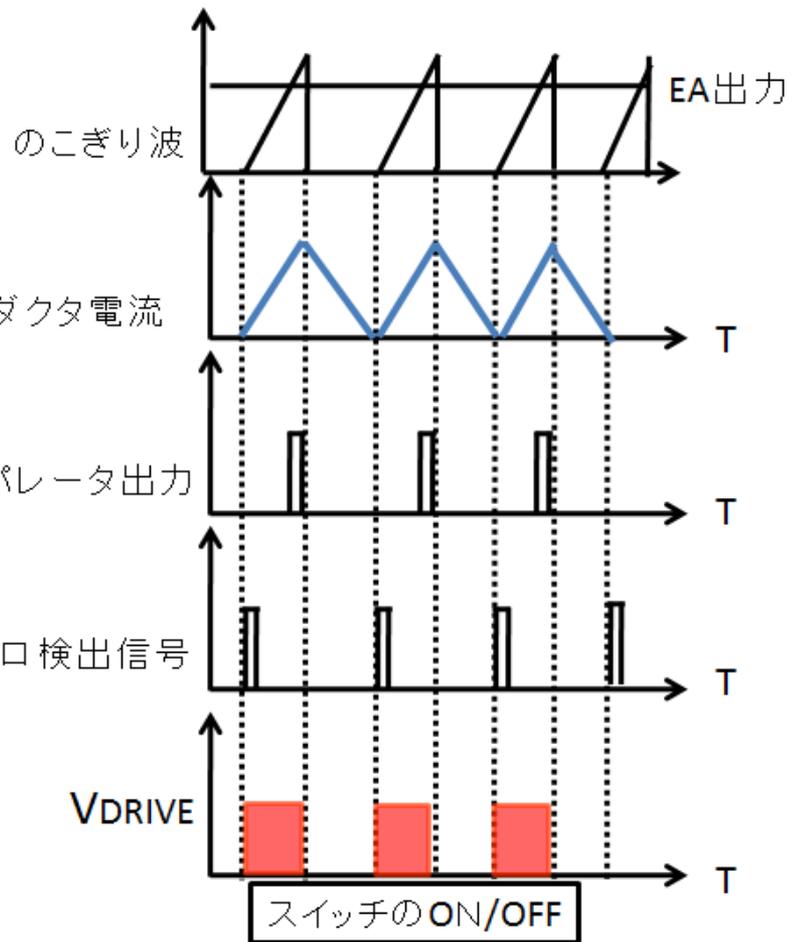
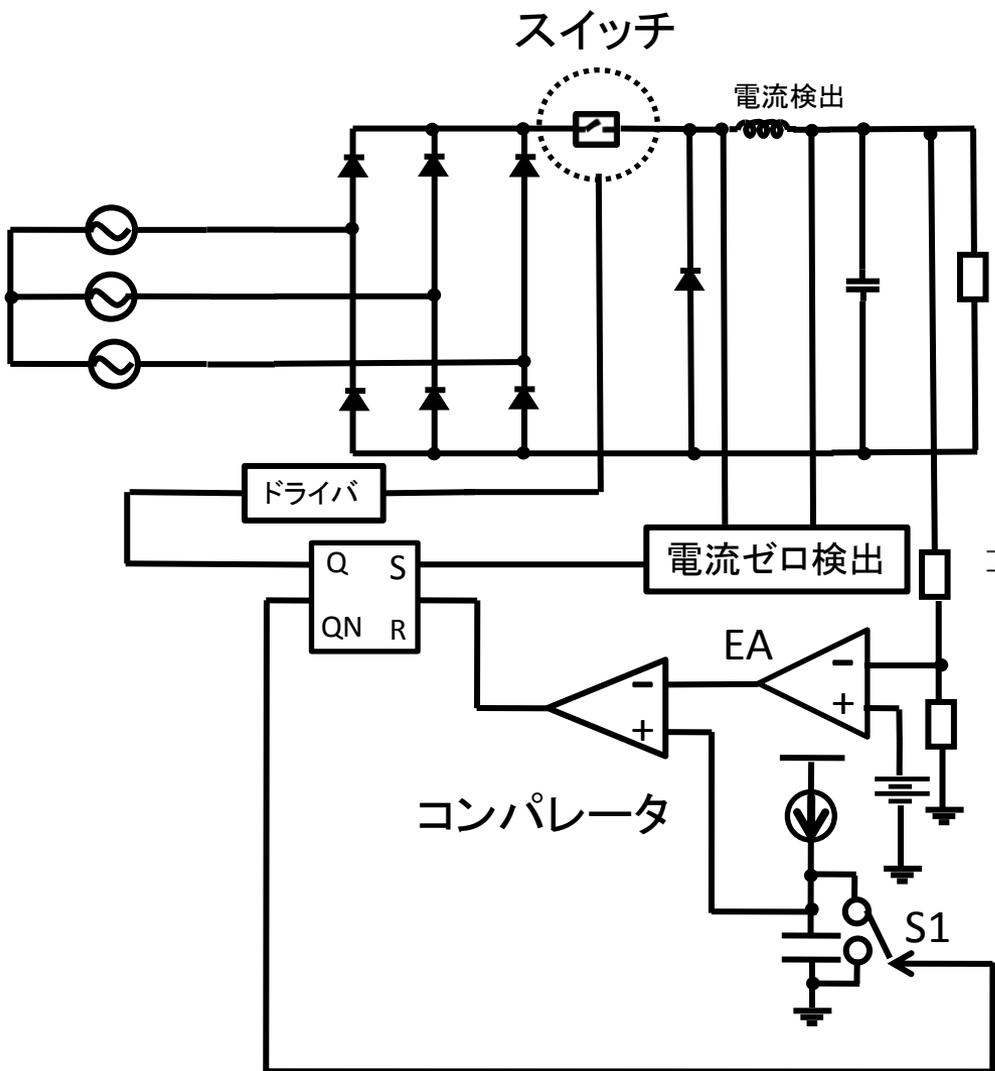


電流検出回路



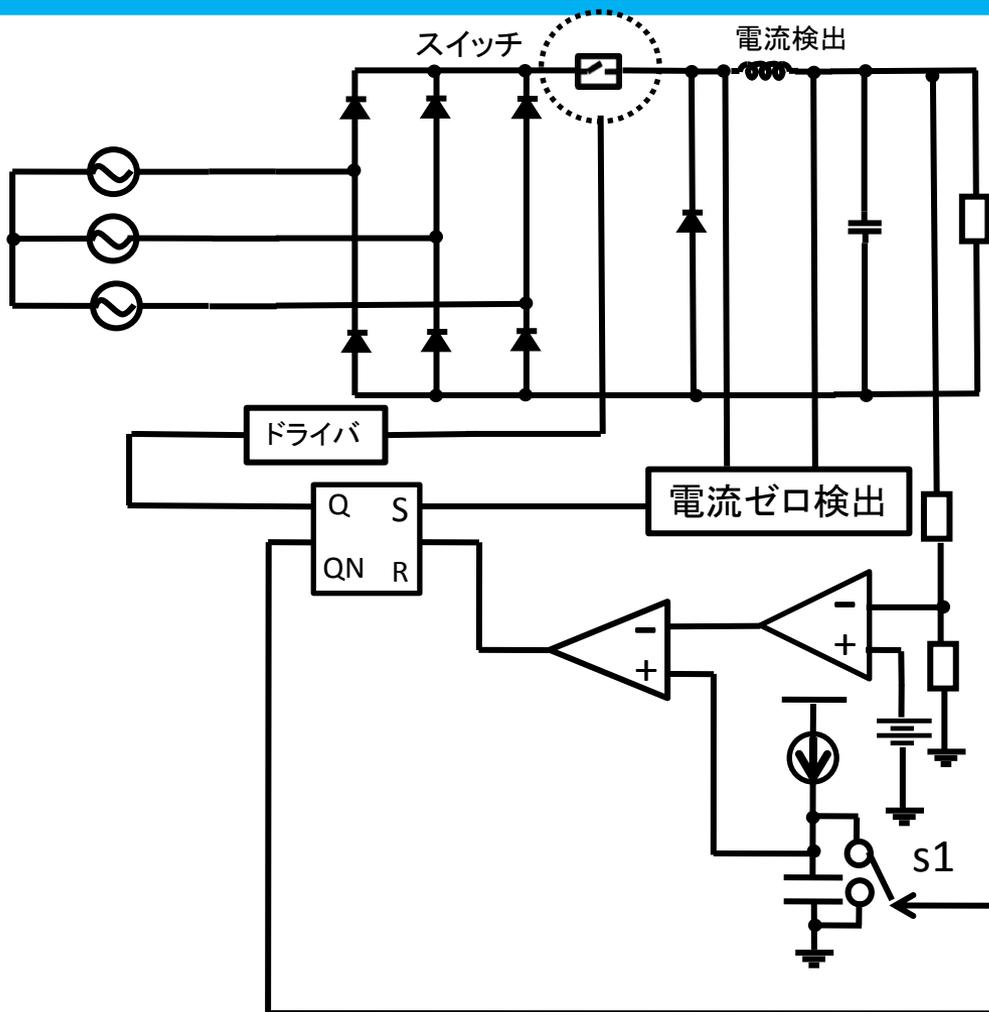
ゼロ検出回路出力波形

全体動作

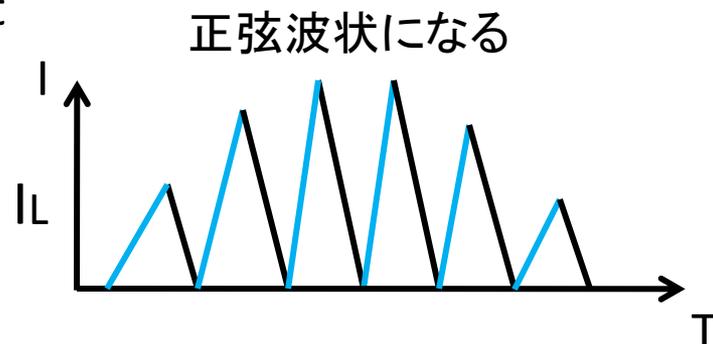


※S1のTOFF=AC-DC変換器のTON

BCM-PFC(タイミングチャート)



DCout



エラーアンプの出力を一定として
のこぎり波生成器のパラメータを固定
(電流源とコンデンサ)

のこぎり波の理論式 $V = \frac{i}{C} T_{OFF}$



AC-DC変換器のオン時間(T_{ON})が一定

※S1の T_{OFF} =AC-DC変換器の T_{ON}

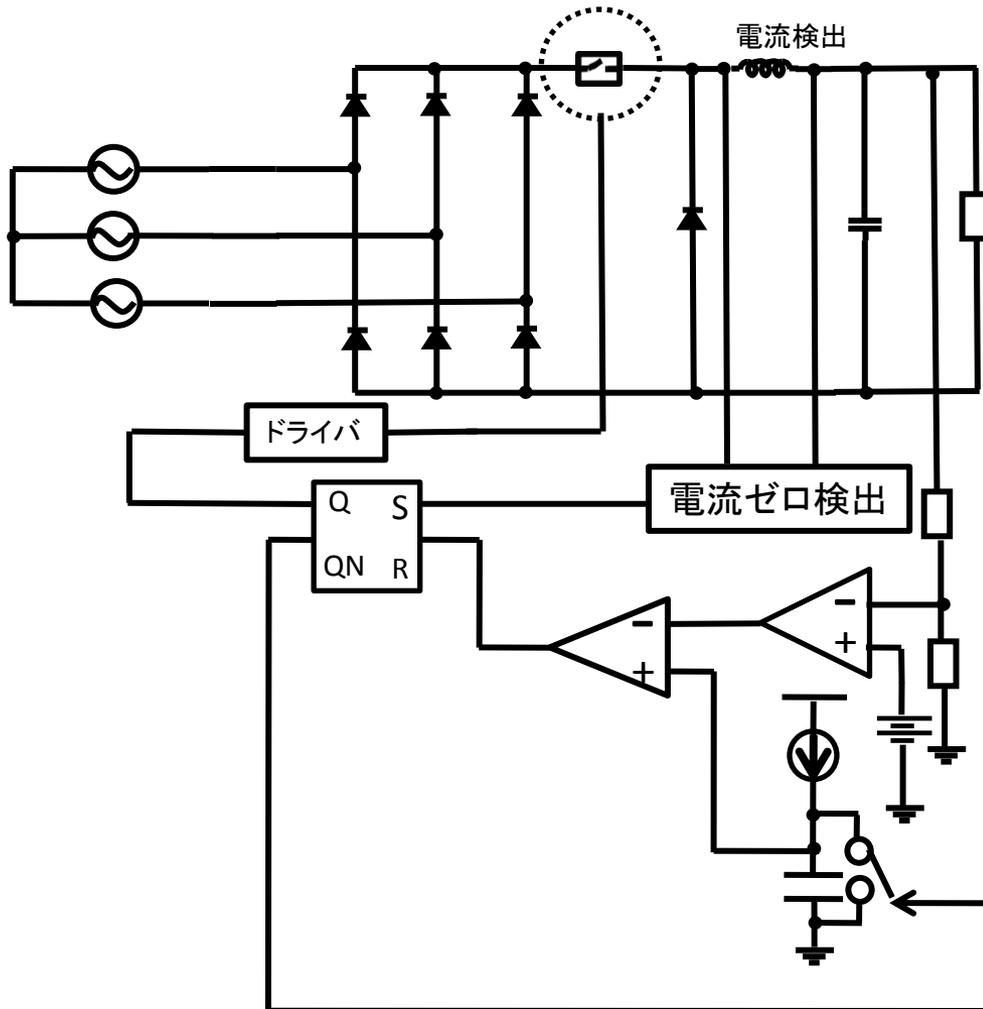
インダクタ電流式

$$I_{LP} = \frac{V_i}{L} T_{ON}$$

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- AC-DCコンバータ
- 高調波対策とPFC回路
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- **シミュレーション結果**
- まとめ

シミュレーション回路

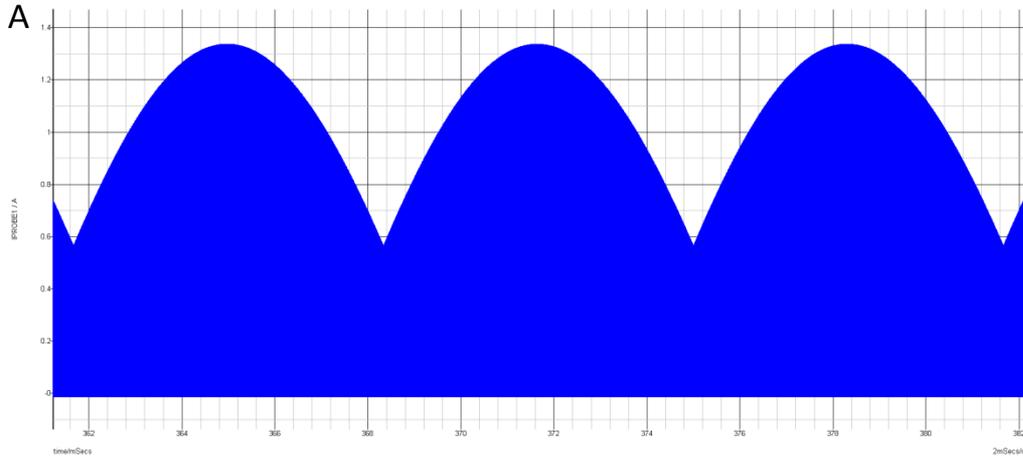


各素子のパラメータ

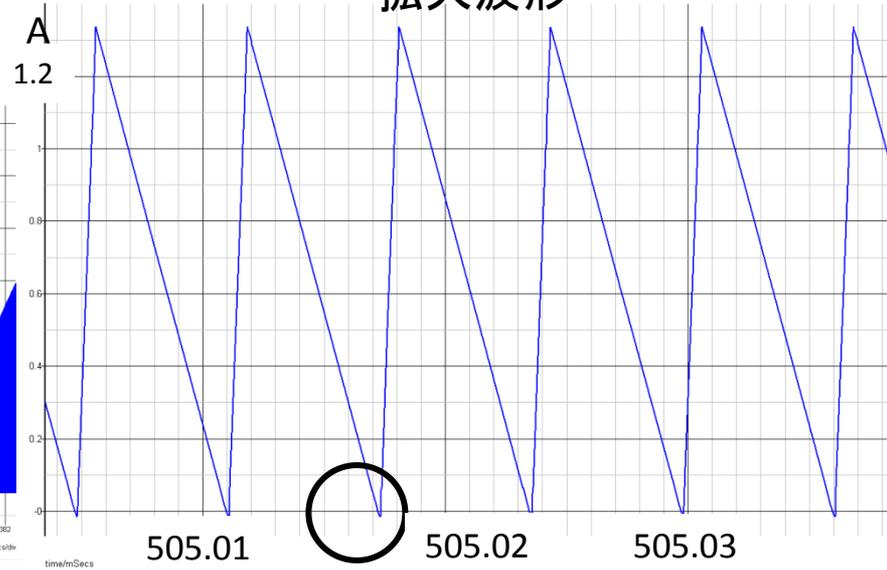
Vin	3相200V
Vo	24V
R	47Ω
Iout	0.5A
L	100uH
C	47mF

シミュレーション結果 (BCMモード)

インダクタ電流波形

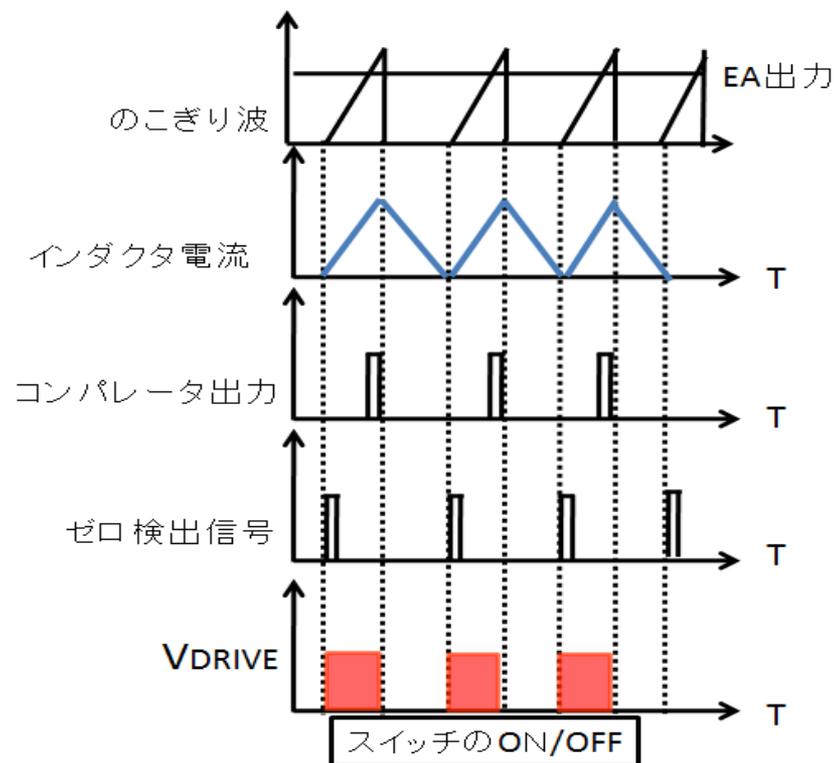
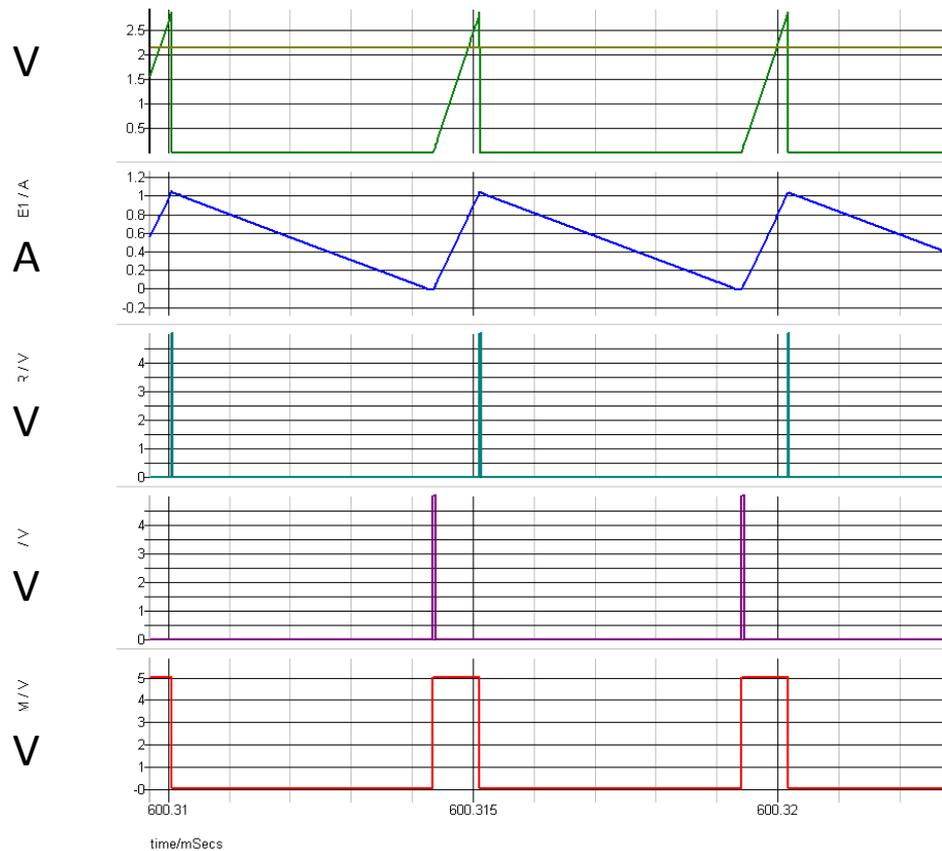


拡大波形



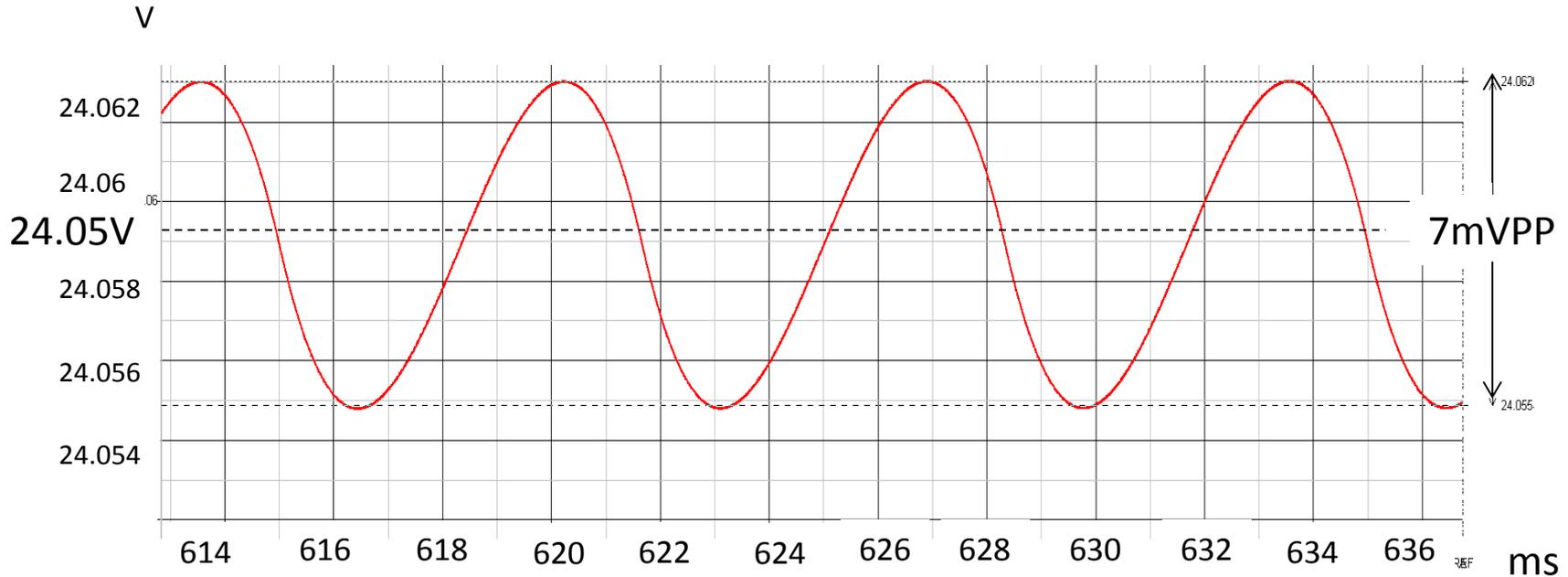
0で充電と放電の切り替えができています。
BCMで動作していることを確認。

疑似乗算回路動作確認



疑似乗算器が動作していることを確認

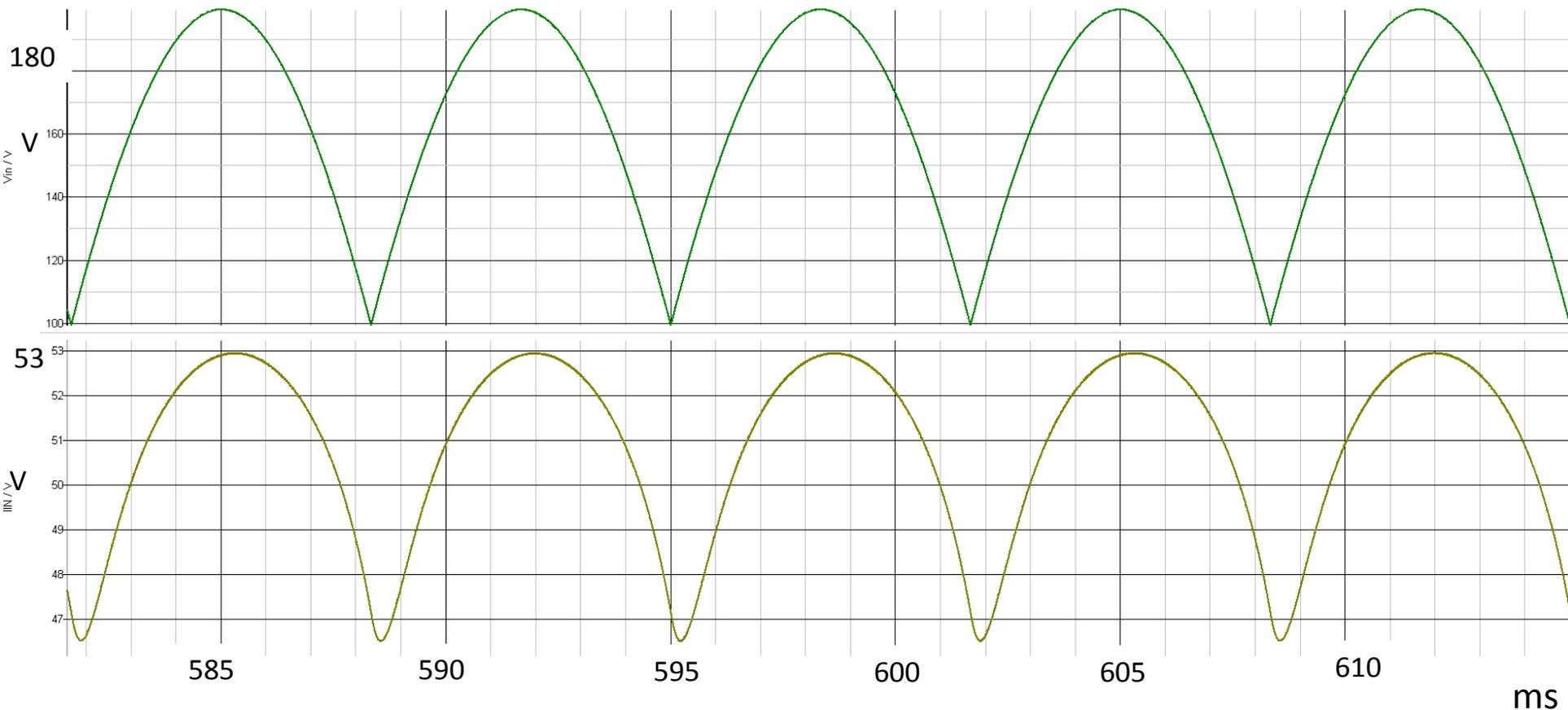
シミュレーション結果 (BCMモード)



出力リップル
7mVPP

設定電圧通りの電圧が出力されていることを確認

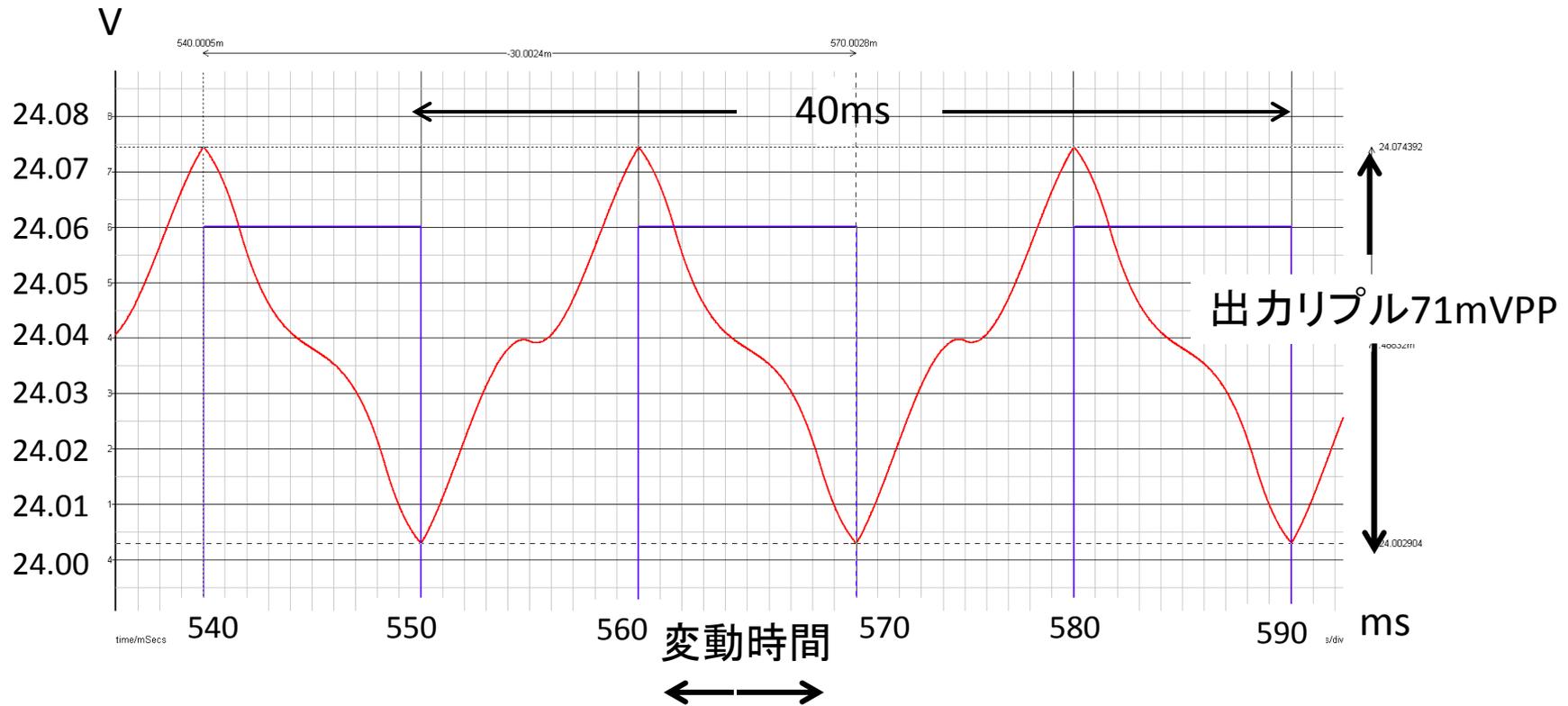
入力電圧と入力電流の比較



入力電流波形が入力電圧波形とほぼ同じ波形になっていることを確認

力率は98.8%を達成

負荷応答特性



出力電流を0.5A,1Aと切りかえたときの出力リップル
 $71\text{mVpp} = \text{出力}24\text{Vの}1\%以下$

outline

- 研究背景
- 3相入力電源
- AC-DCコンバータ
- 高調波対策とPFC回路
- 提案型3相入力降圧型AC-DC電源
- シミュレーション結果
- **まとめ**

まとめ

3相AC-DC電源の高力率制御の検討



- ・疑似乗算器付BCM-PFCで高力率98%を達成
- ・不連続モードとほぼ同じ素子数の回路構成
- ・出力リップル7mVPP、負荷変動にも対応

今後の課題

- ・実装による効率・力率評価
- ・高調波電流の測定

質疑応答

修士論文公聴会

- ・従来型の乗算器と疑似乗算器を使った場合の力率は同じくらいなのか？
- ・出力電圧のオフセットについて
- ・負荷応答特性はどのようにして観測したか？
- ・インダクタやコンデンサの負荷変動はやらないのか？
- ・電流のフーリエスペクトルは見ないのか？
- ・入力電流波形はどのようにして観測したか？

栃木電気学会質疑応答

- ・3相の相間電圧の記載がほしい
- ・力率98.8%は高すぎではないか？
- ・3相用の高調波規格に対応した力率計算をしたほうがいいのか。
- ・スイッチング周波数は？
- ・入力部のフィルタへの考えは？

客員教授 落合政司先生より

■JISC61000-3-2のクラスD

次に示す有効入力電力が600W以下の機器。

- ・パーソナルコンピュータ及び同・モニター
- ・テレビジョン受信機
- ・インバータで制御する圧縮機を搭載する冷蔵庫

■IEC61000-3-2のクラスD

次に示す有効入力電力が600W以下の機器。

- ・パーソナルコンピュータ及び同・モニター
- ・テレビジョン受信機

日本では省エネ化が進んでおり、冷蔵庫、特に大型の冷蔵庫はインバータ化されています。

インバータ化すると電力をほぼ半減させることができます。しかし、インバータ化されると一旦交流を整流・平滑するために高調波電流の発生量が従来回路に比べて増えてしまいます。インバータ冷蔵庫をクラスDにしているのはこのためで、少なくともクラスDの限度値以下にして増加を抑制するためです。