

無制御での電流バランスと スイッチの低耐圧化が可能な 非対称共振3相インタリーブLLCコンバータ

茨城大学

多田喜耶 鵜野将年

ハイライト

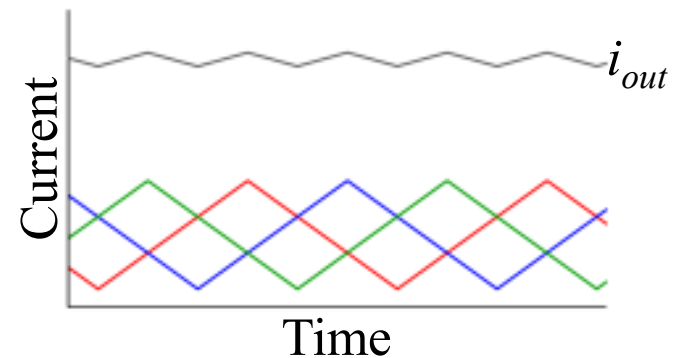
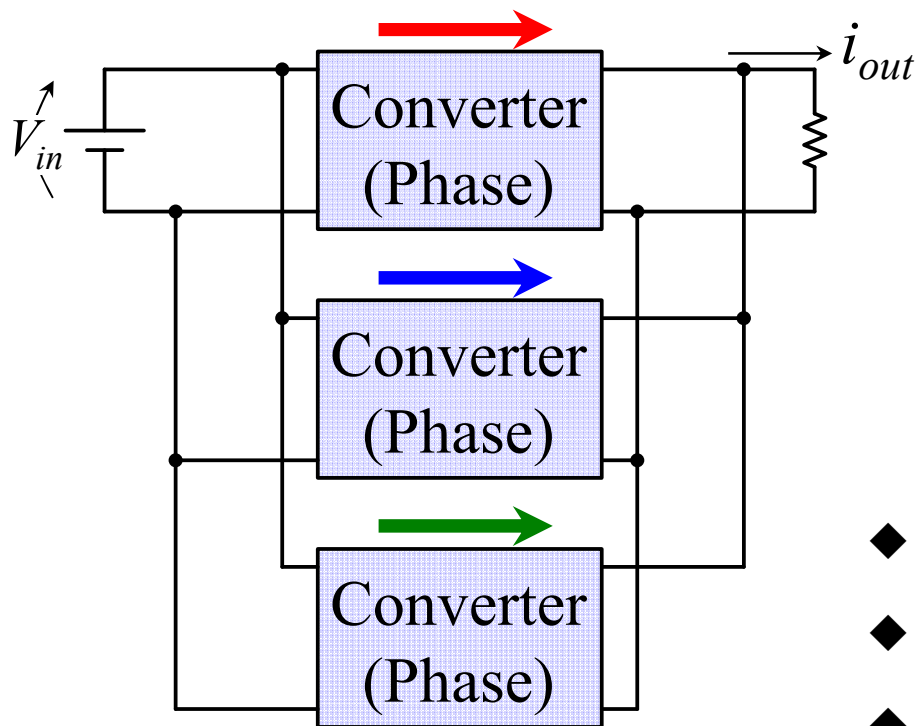
- フライイングキャパシタの採用による電流バランス
- 非対称共振動作によるジュール損失の低減
- 1 kW試作回路で効率93.1%を達成

目次

- 背景
 - インタリーブPWMコンバータ
 - インタリーブLLCコンバータ
- 非対称共振3相インタリーブLLCコンバータ
 - 電流バランスの原理
 - スイッチの低耐圧化
 - 非対称共振動作
- 実機検証
 - 電流バランス
 - スイッチの電圧ストレス
 - 電力変換効率と損失解析
- まとめ

背景

インタリーブコンバータ

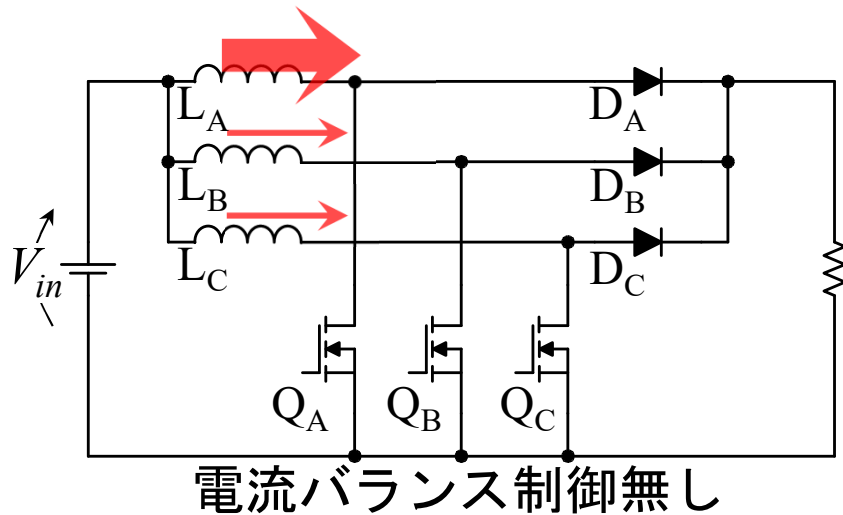


各相の電流波形

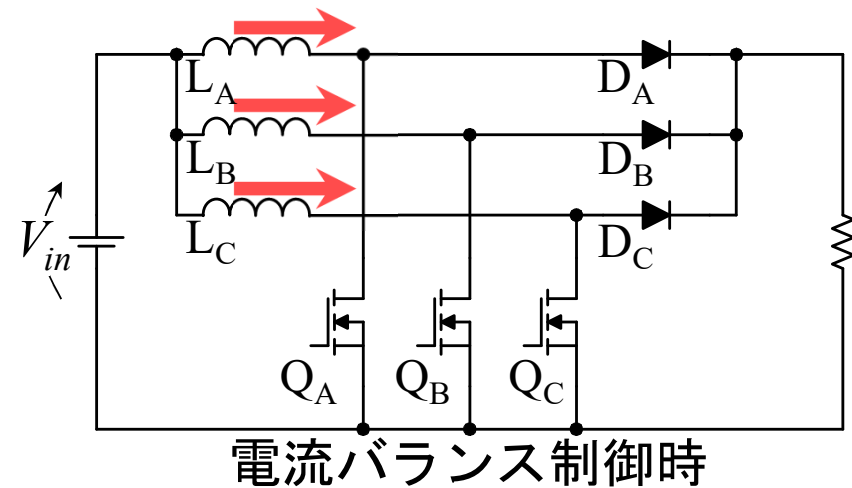
- ◆ 複数のコンバータの多相並列化
- ◆ 各相に位相差をもたせる
- ◆ 同一スイッチング周波数で動作

- 入出力部の電流リップルを低減
- 電流容量の増加が可能
- 電流バランスが必要

インタリーブPWMコンバータ



- 電流集中
- 素子の電流ストレス増加

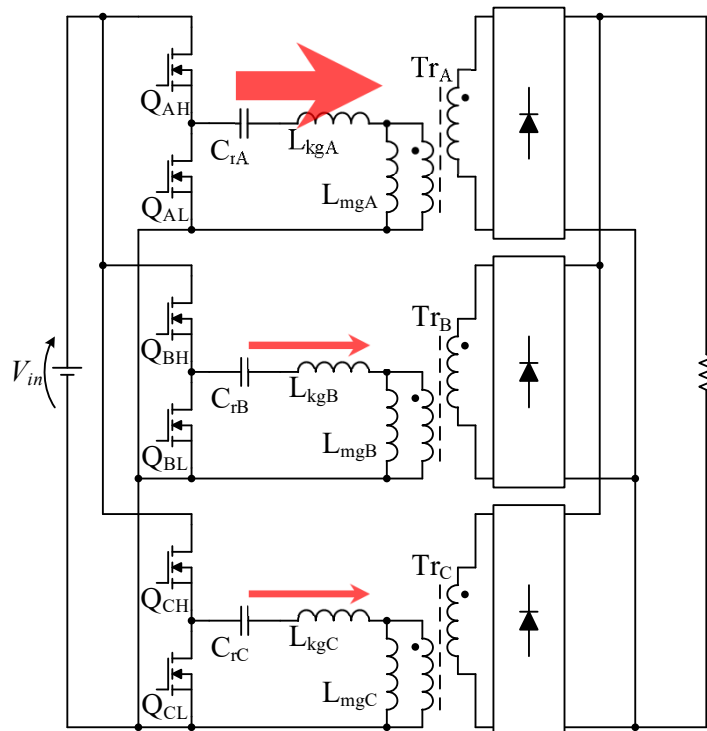


- 電流分担
- 素子の電流ストレス低減

各相の d を調整することで電流をバランス
複数の電流センサやフィードバック回路が必要

H.C. Chen, C.Y. Lu, and U.S. Rout, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 5, May 2018, pp. 3683–3687.

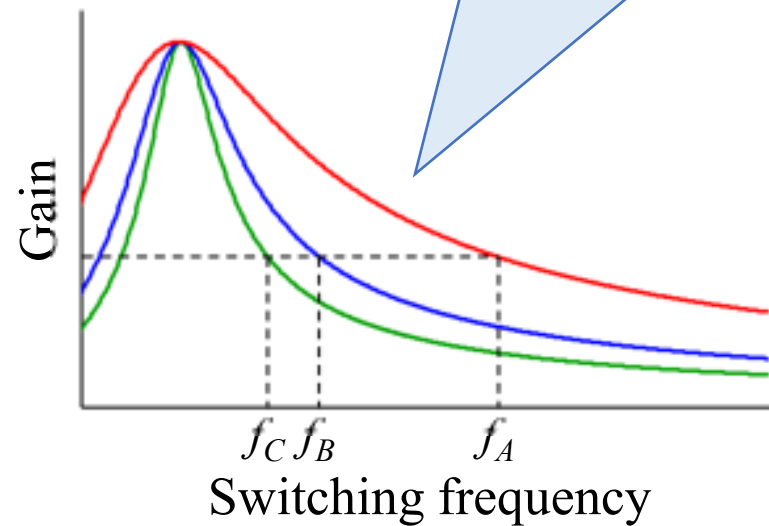
LLCコンバータのインタリーブ化



多相LLCコンバータ

- 低スイッチング損失
- 高電力密度

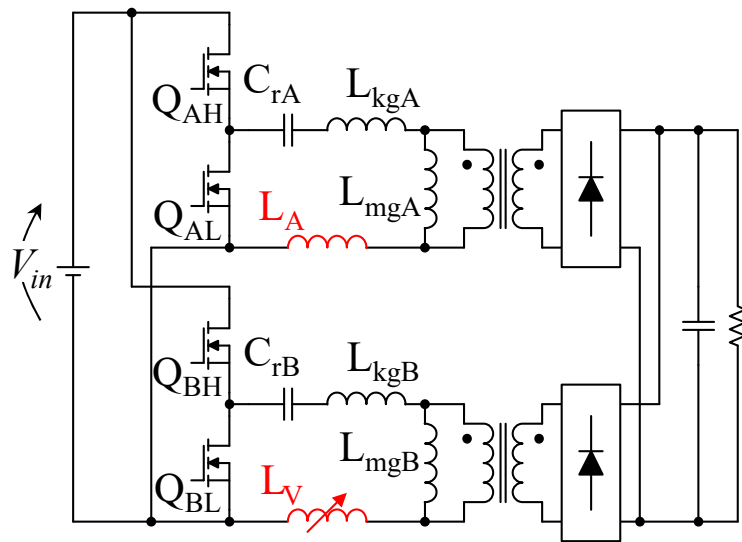
電流バランスのために
相毎にPFM制御



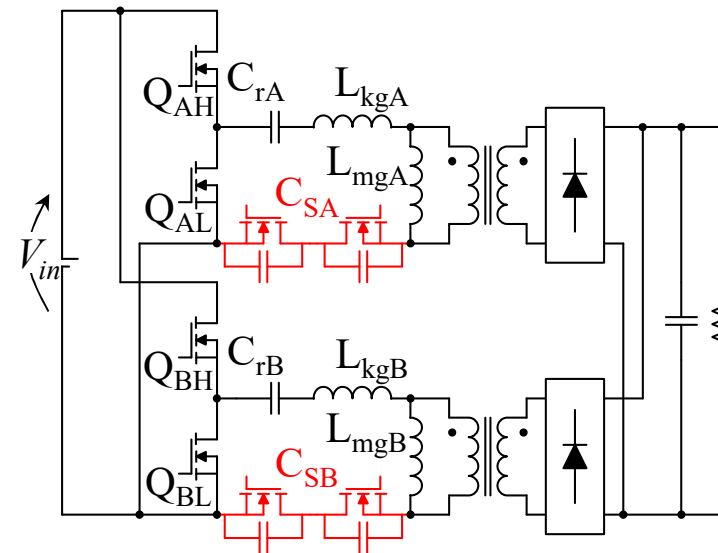
LLCコンバータのゲイン特性

電流バランスとインタリーブ動作が実現不可能

インタリーブLLCコンバータ



可変インダクタ方式



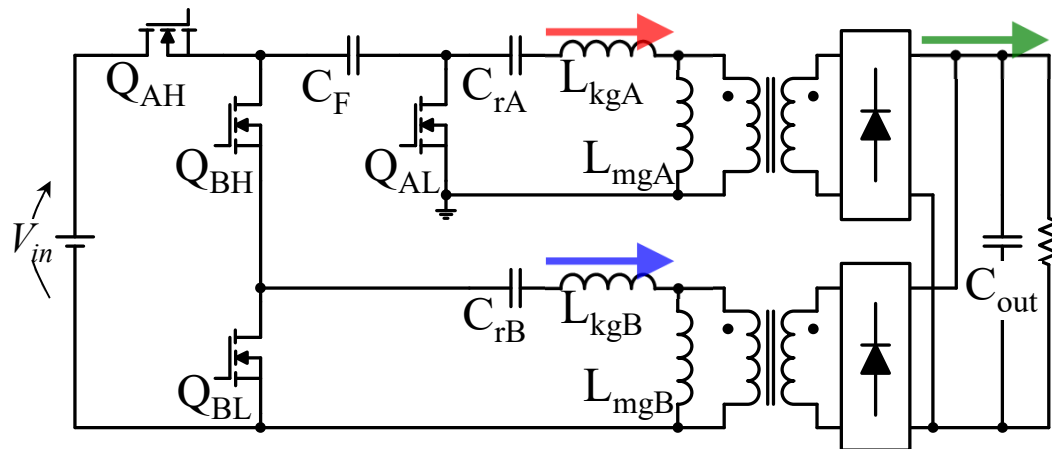
可変容量方式

- 複数の磁性素子
- 軽負荷時に電流が不均一化
- 多数のスイッチ
- 容量ばらつきにより電流集中

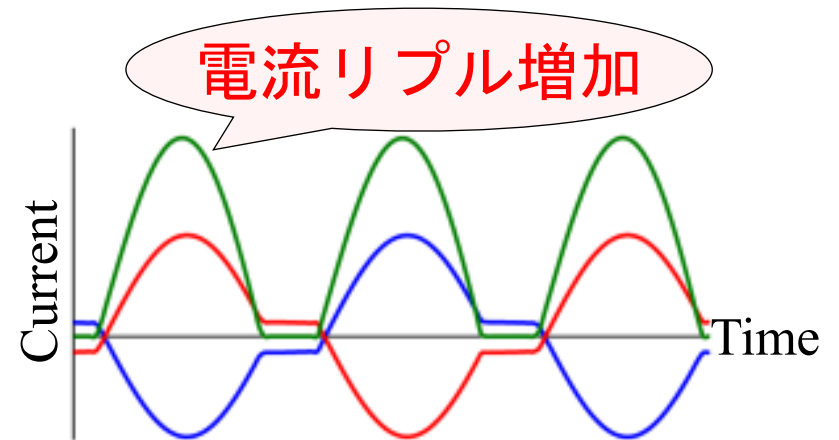
複雑な制御や補助回路が別途必要

E. Orietti *et al.*, in *Proc. Brazilian Power Electron. Conf.*, 2009, pp. 298–304, Oct. 2009. †
Z. Hu, *et al.*, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2931–2943, Jun. 2014. ††

インタリーブLLCコンバータ



フライングキャパシタ方式



各相の電流波形

- C_F の電荷バランスにより
無制御で電流がバランス

- 出力電流リップルが増加
- 3相以上の構成に拡張不可能

O. Kirshenboim and M.M. Peretz, *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 33, no. 7, pp. 5613–5620, Jul. 2018.

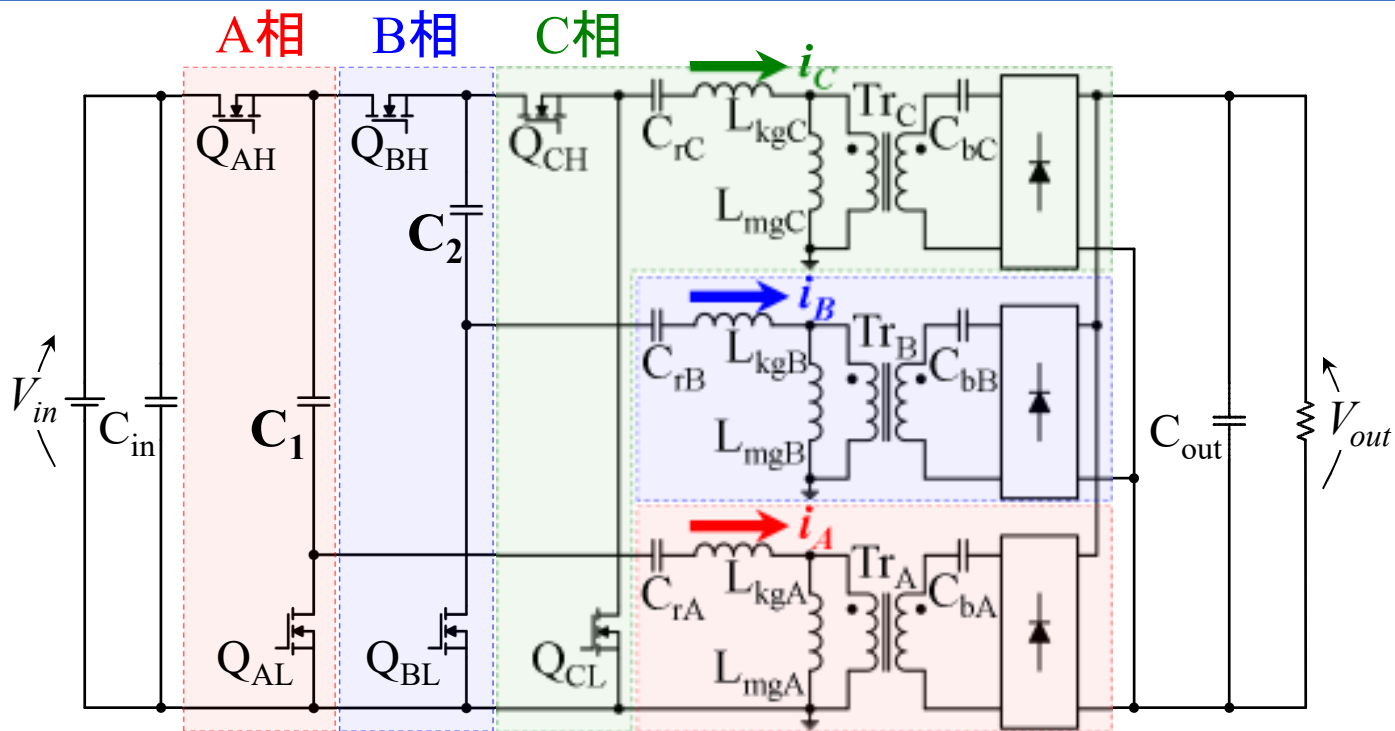
研究目的

提案インタリーブLLCコンバータ

- 出力電力によらず無制御で電流バランス
- 出力電流リップルの低減
- 高拡張性
- ソフトスイッチング

非対称共振3相インタリーブ LLCコンバータ

非対称共振3相インタリーブLLCコンバータ

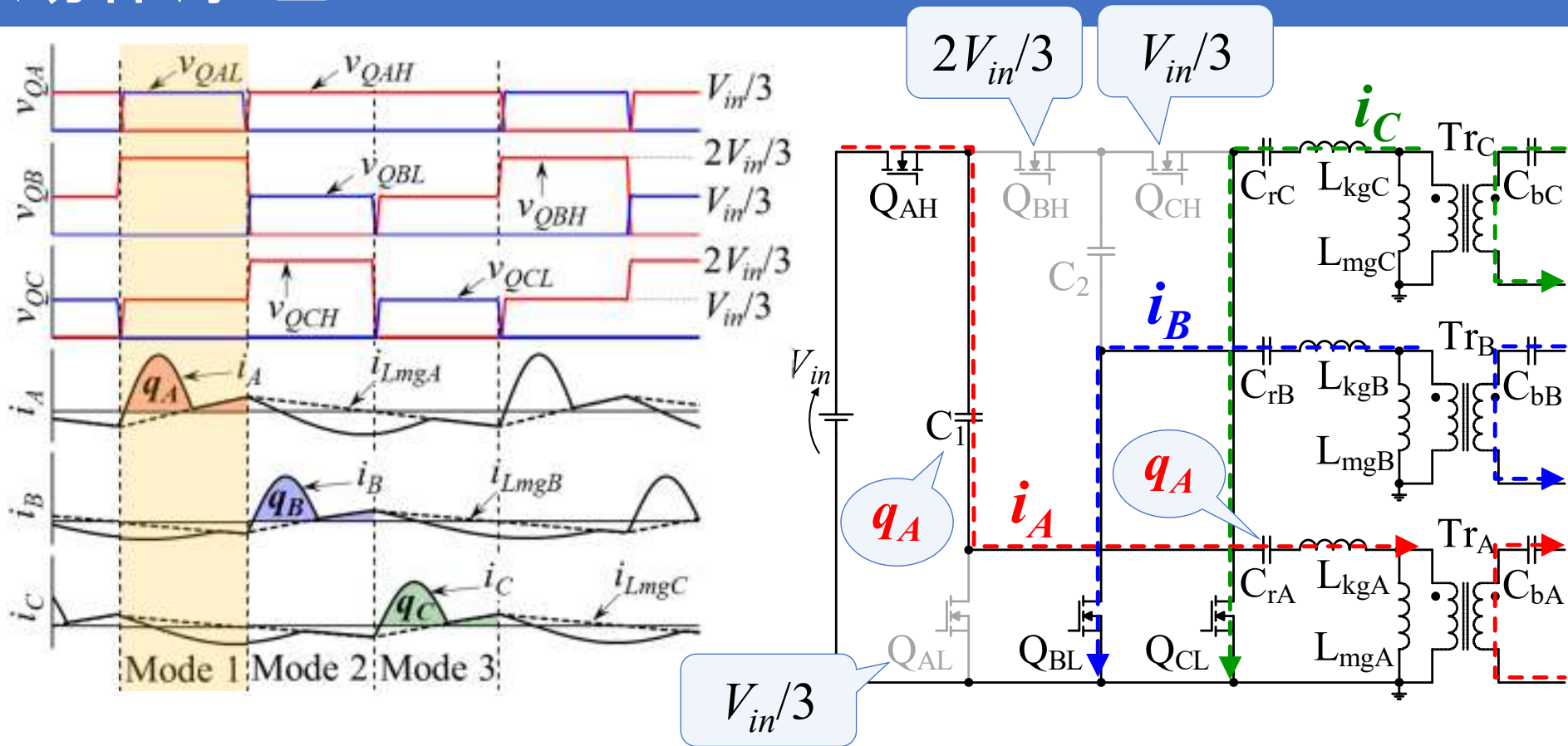


- Q_{AH}, Q_{BH}, Q_{CH} の $d = 0.33$
- 各相に 120° の位相差

- 無制御での電流バランス
- スイッチの電圧ストレス低減
- 非対称共振によるジュール損失低減
- ソフトスイッチング
- 高拡張性

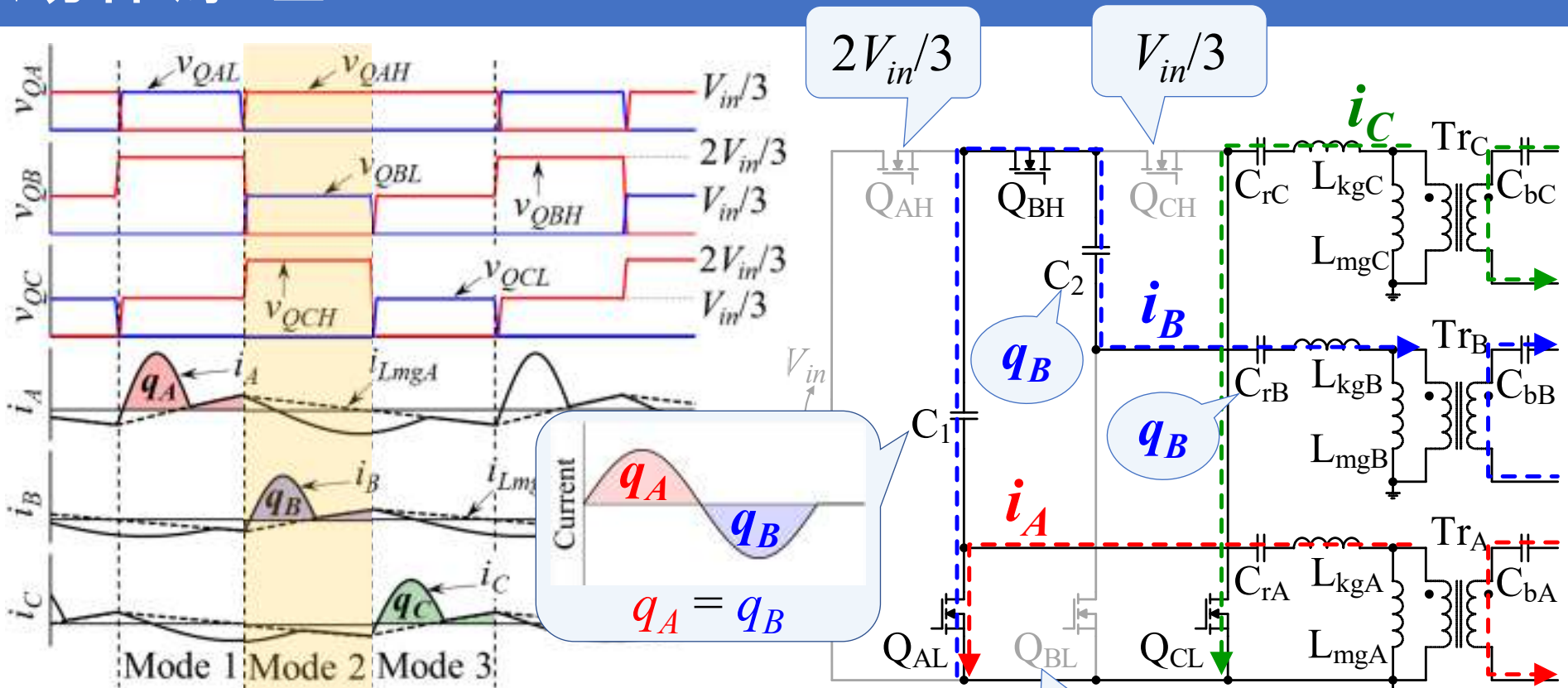
動作原理

動作原理：Mode 1



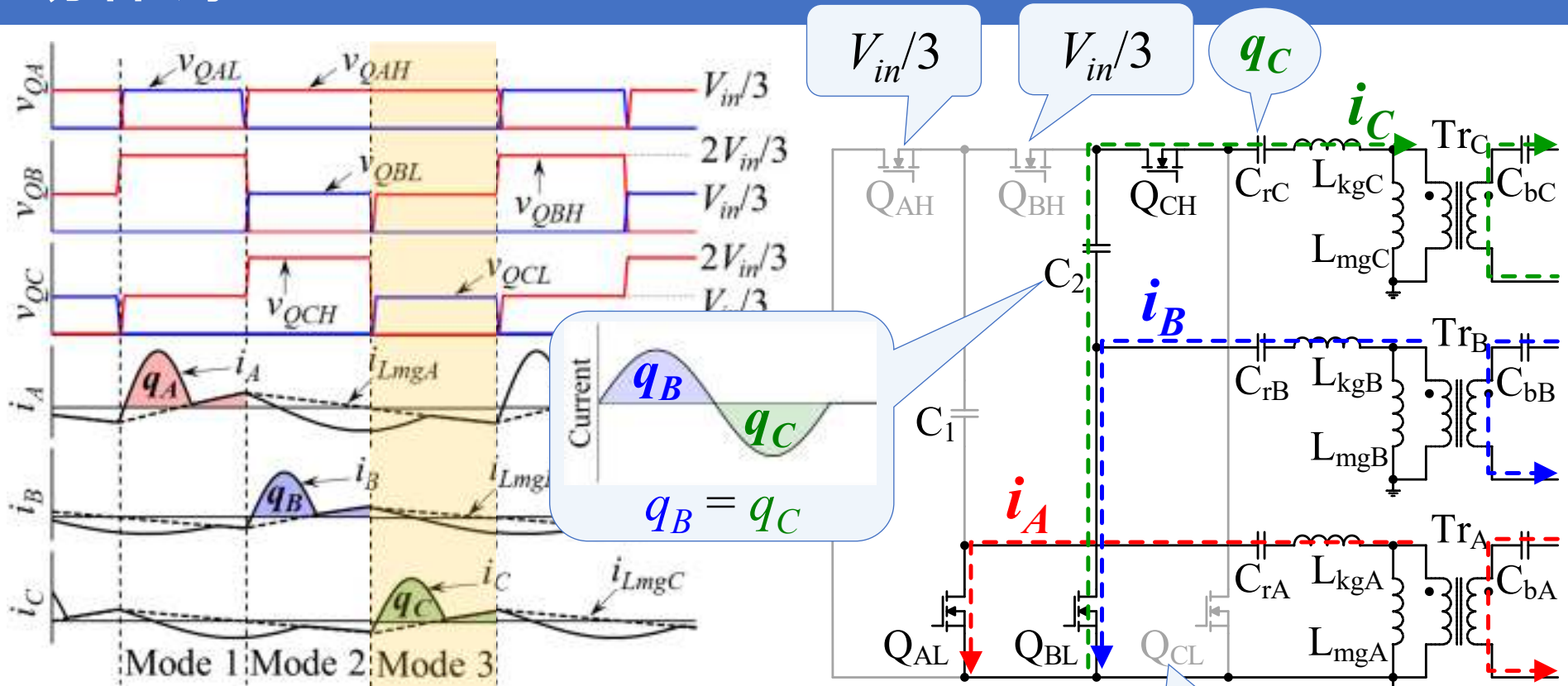
- A相では共振タンクに加えC₁も共振
- i_A がC₁を充電

動作原理：Mode 2



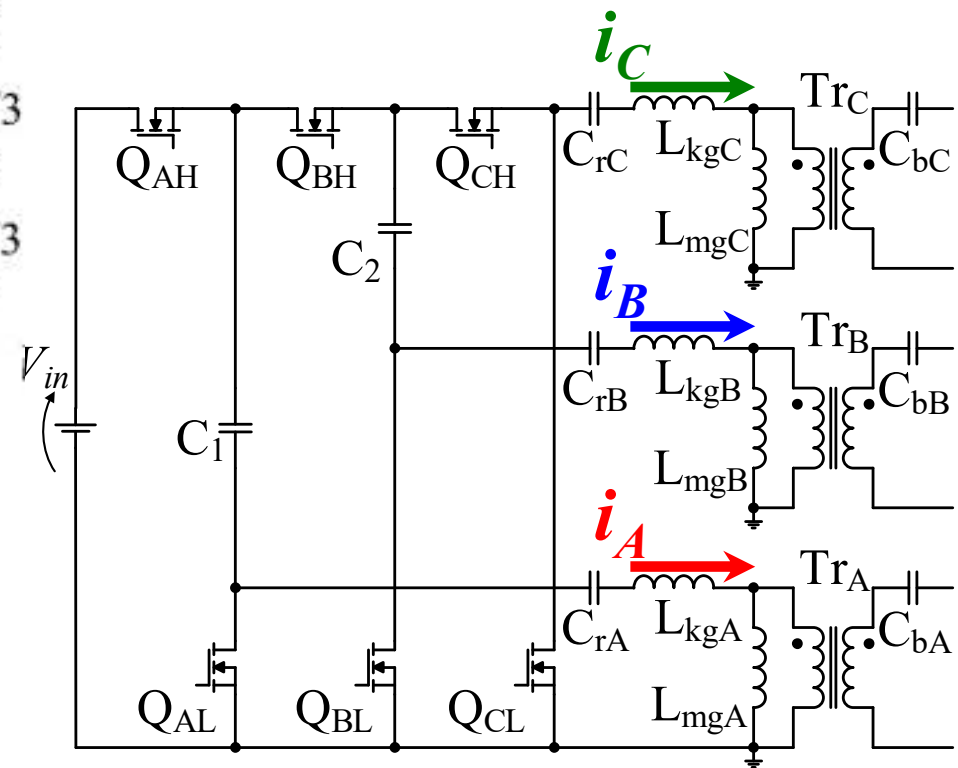
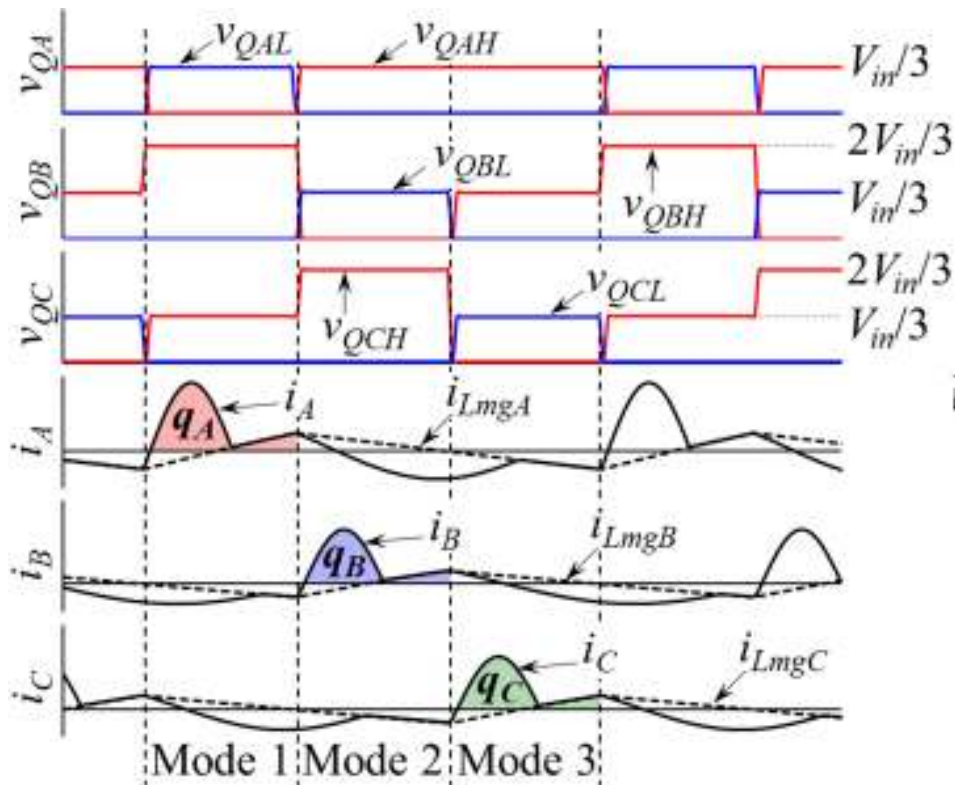
- i_B が C_1 を放電
- B相では共振タンクに加え C_1 と C_2 が共振
- C_1 の電荷バランスにより i_A と i_B がバランス

動作原理：Mode 3



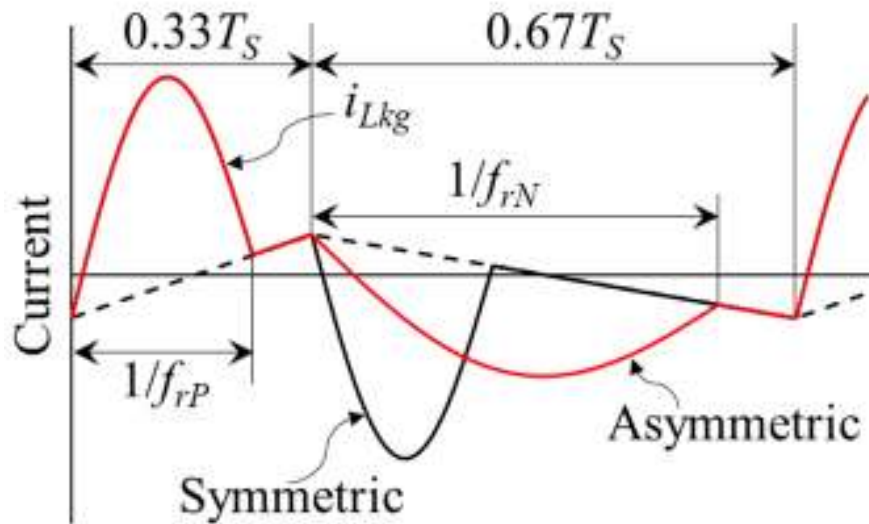
- i_B が C_2 を放電
- C相では共振タンクに加え C_2 が共振
- C_2 の電荷バランスにより i_B と i_C がバランス

動作原理：まとめ

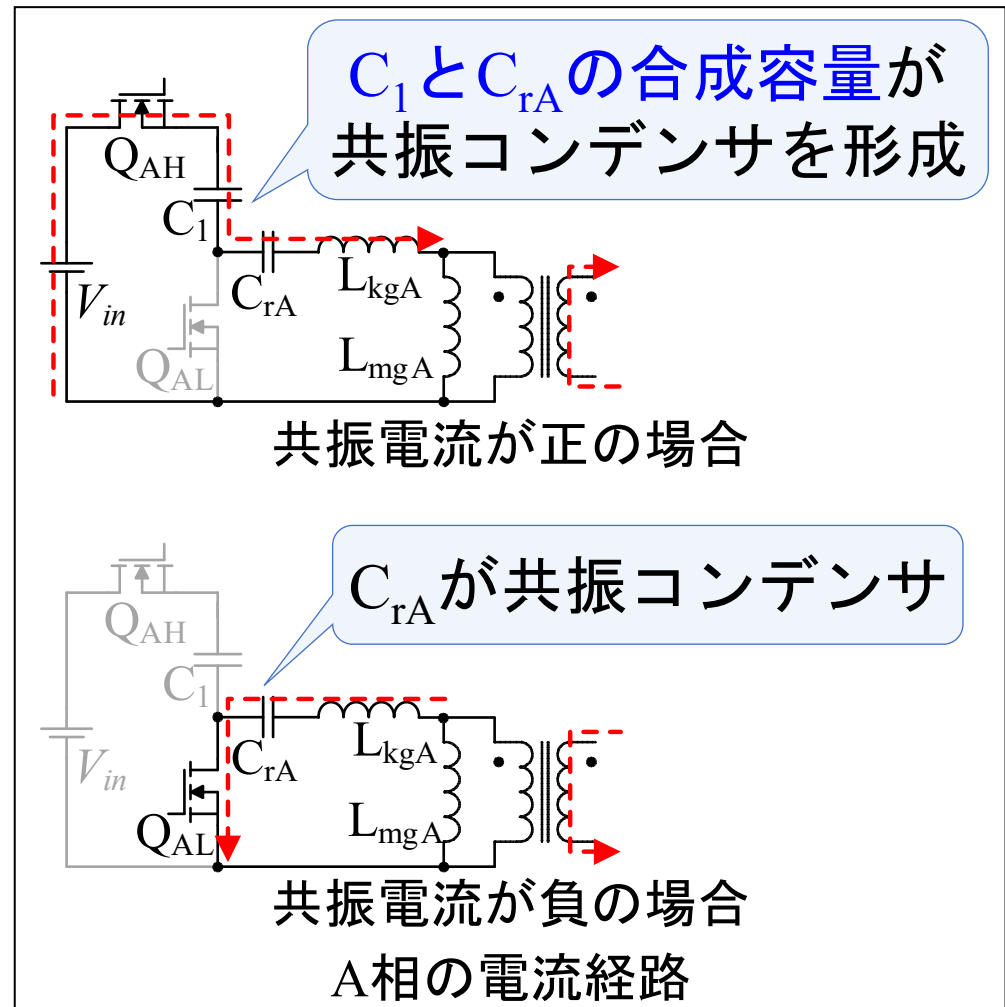


- C_1 と C_2 の電荷バランスにより i_A , i_B , i_C がバランス
- C_1 と C_2 によりスイッチの電圧ストレスを $2V_{in}/3$ 以下に低減

非対称共振動作

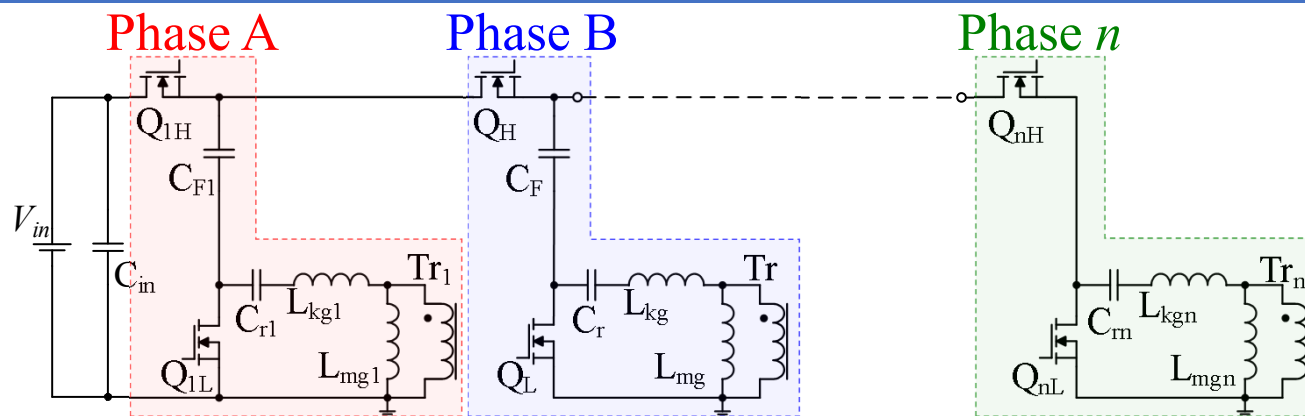


対称共振と非対称共振の電流波形

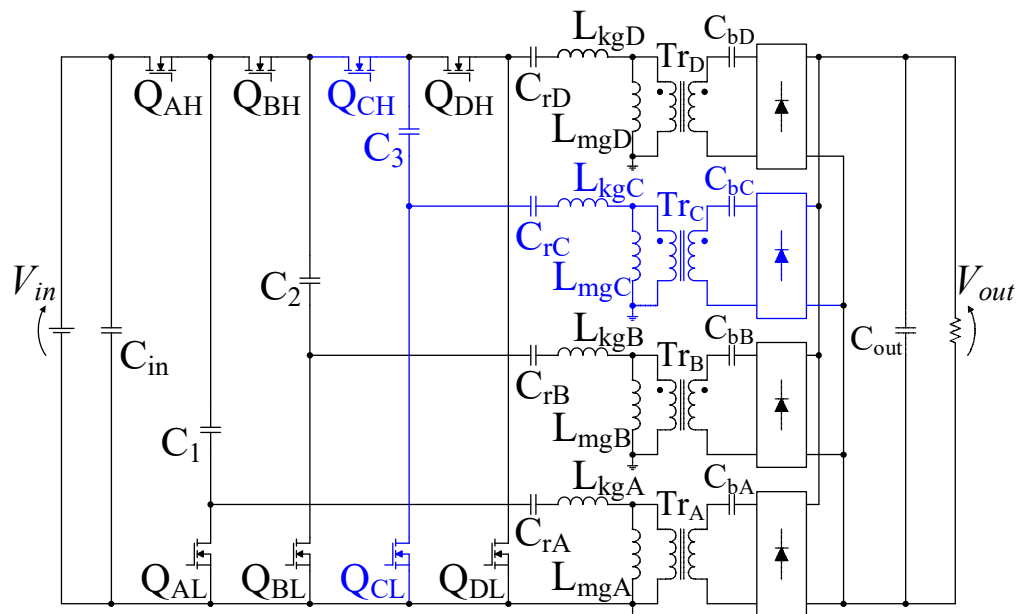


非対称共振動作による素子のジュール損失低減

相数の拡張



拡張回路の概念図

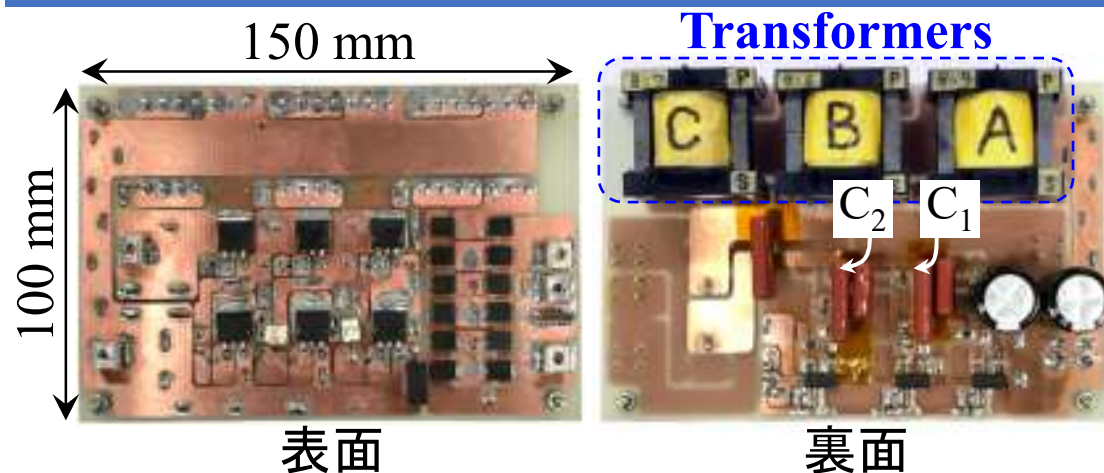


4相インターリーブLLCコンバータ

• LLCコンバータ
 • フライイングキャパシタ
 の追加により
 相数を任意に拡張可能

実機検証

1 kW試作回路

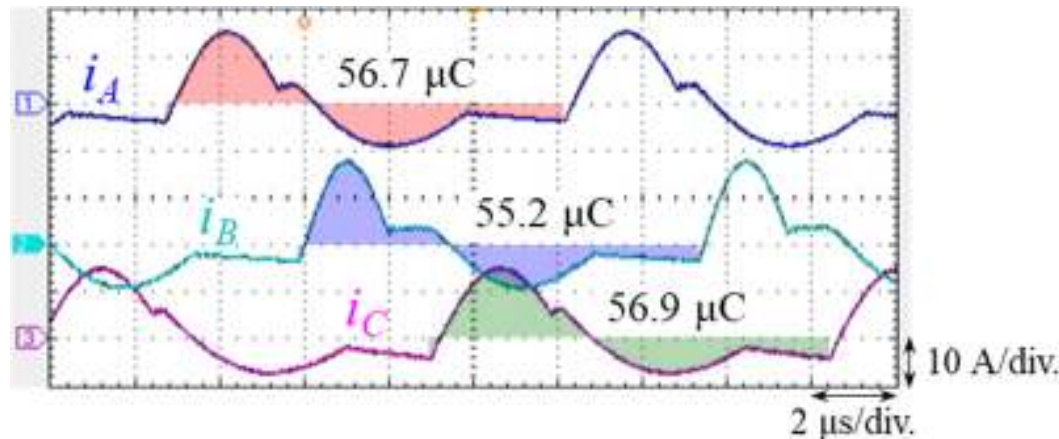


- 入力電圧 $V_{in} = 400 \text{ V}$
- 出力電圧 $V_{out} = 48 \text{ V}$

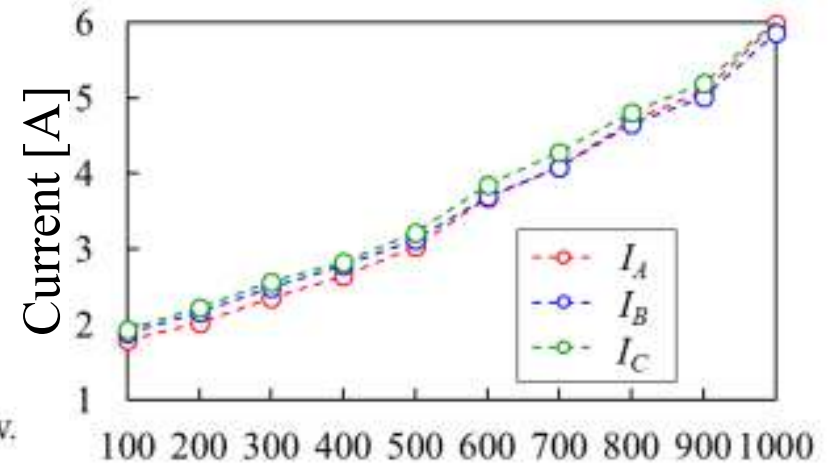
	A相	B相	C相
トランスの パラメータ	$n = 1.4$ $L_{kg} = 2.98 \text{ } \mu\text{H}$ $L_{mg} = 60.7 \text{ } \mu\text{H}$	$n = 1.2$ $L_{kg} = 3.51 \text{ } \mu\text{H}$ $L_{mg} = 61.2 \text{ } \mu\text{H}$	$n = 1.75$ $L_{kg} = 3.49 \text{ } \mu\text{H}$ $L_{mg} = 49.3 \text{ } \mu\text{H}$
共振周波数	$f_{rAP} = 200 \text{ kHz}$ $f_{rAN} = 128 \text{ kHz}$	$f_{rBP} = 257 \text{ kHz}$ $f_{rBN} = 130 \text{ kHz}$	$f_{rCP} = 172 \text{ kHz}$ $f_{rCN} = 110 \text{ kHz}$

非対称共振と対称共振の2つの動作について実機検証

電流バランス



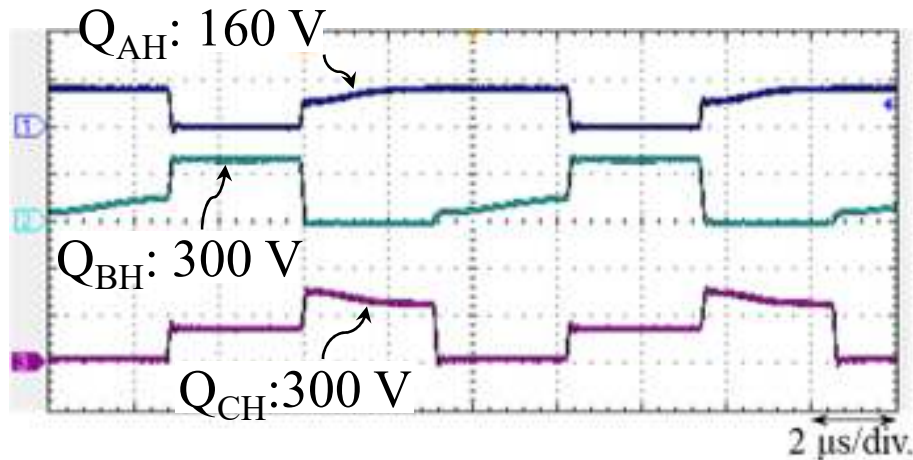
出力電力1 kW時の電流波形



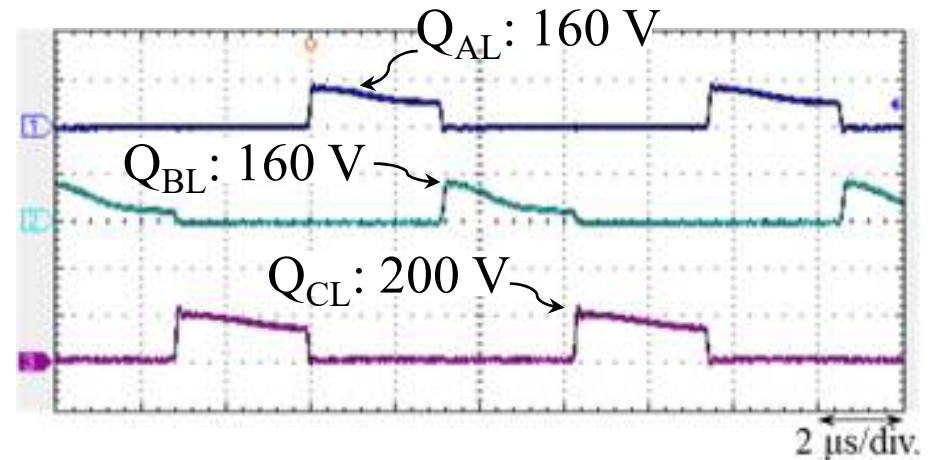
相電流の絶対値平均

- トランスのパラメータばらつきによらず電流バランス
- 非対称共振動作により電流ピーク値が低減
- 電流バランスの誤差はおよそ2%以下

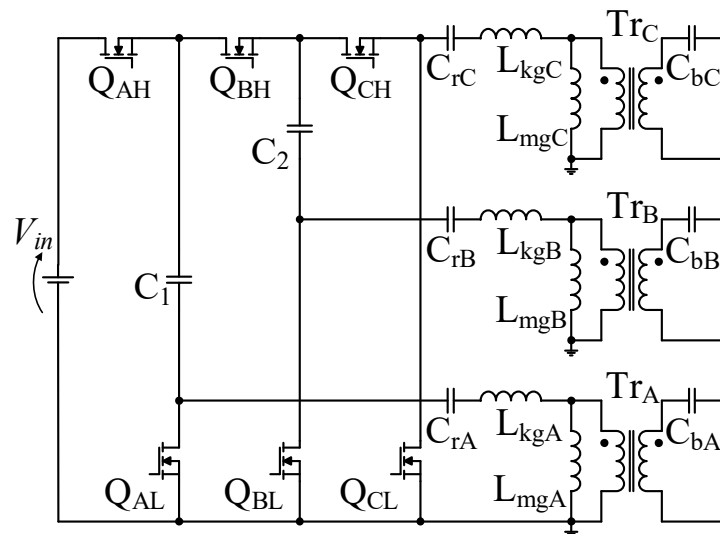
スイッチの電圧ストレス



ハイサイドスイッチ (200 V/div.)



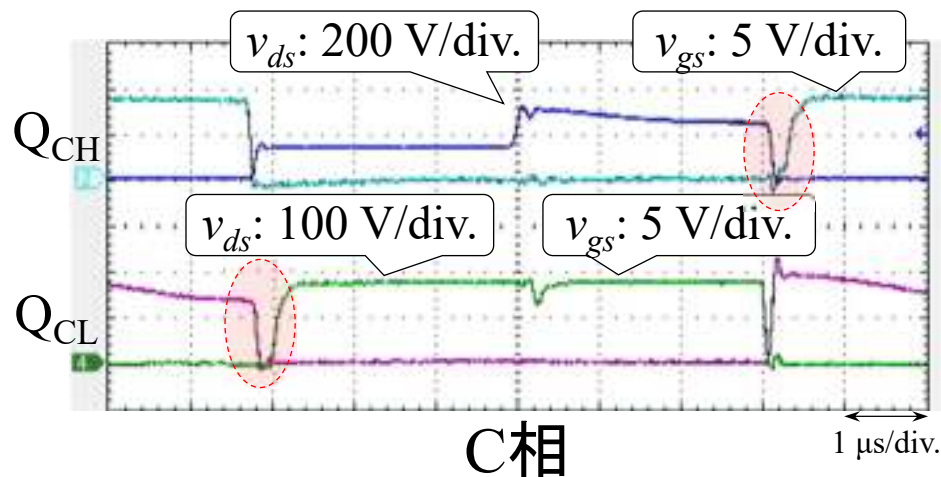
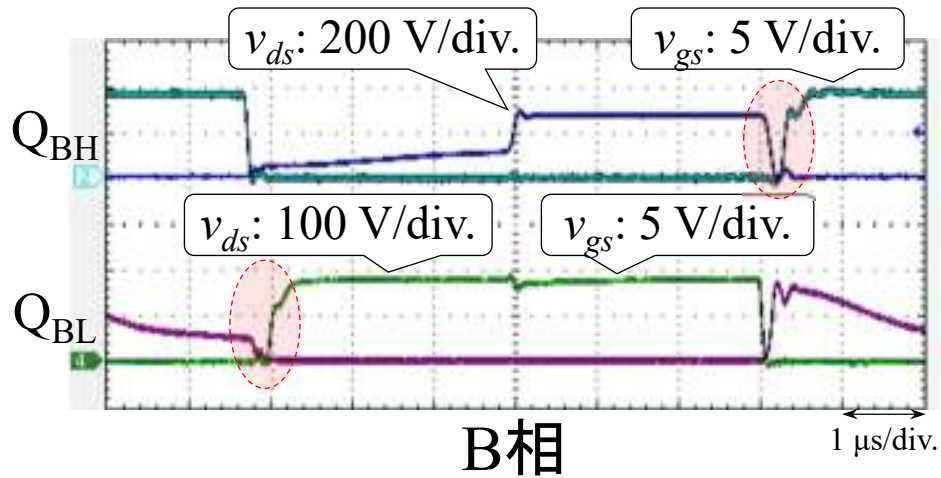
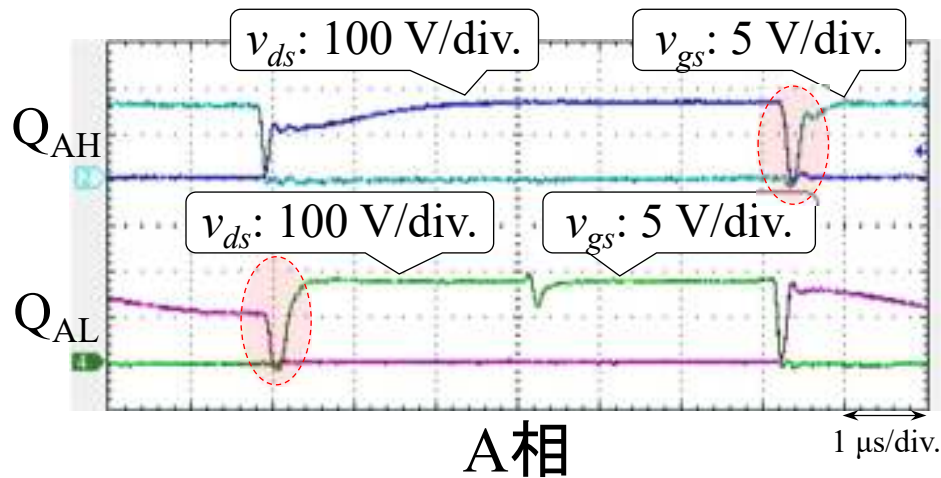
ローサイドスイッチ (200 V/div.)



提案回路1次側

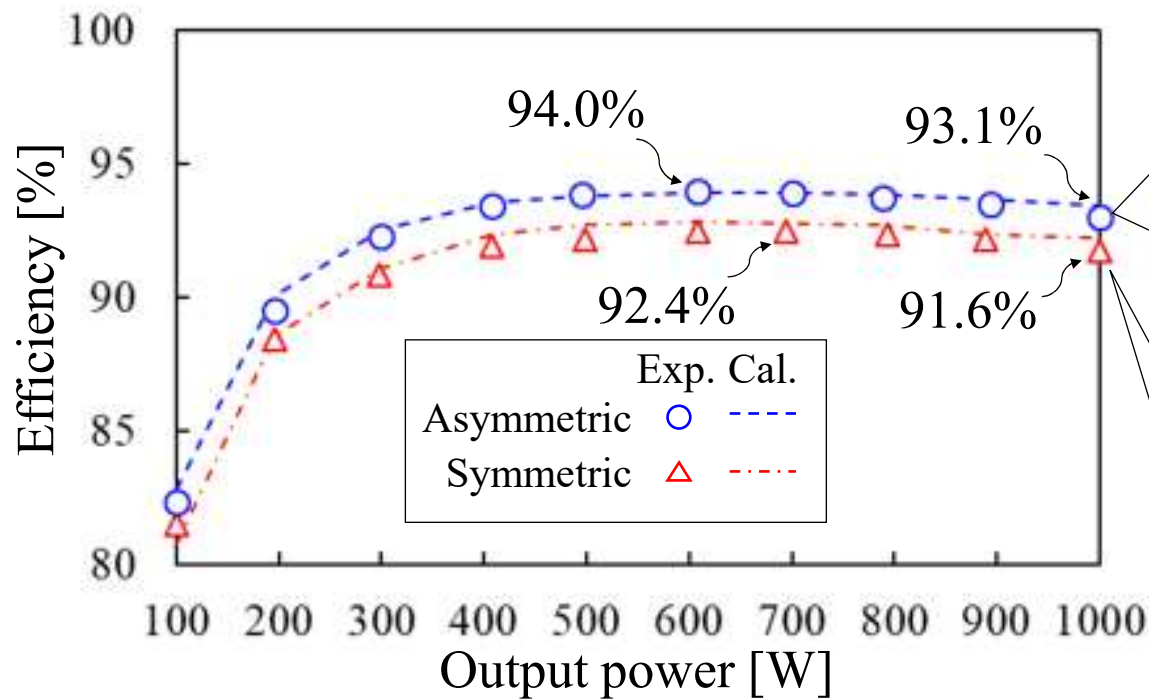
スイッチの電圧ストレスを
およそ $2V_{in}/3$ 以下に低減

ゼロ電圧スイッチング (ZVS)

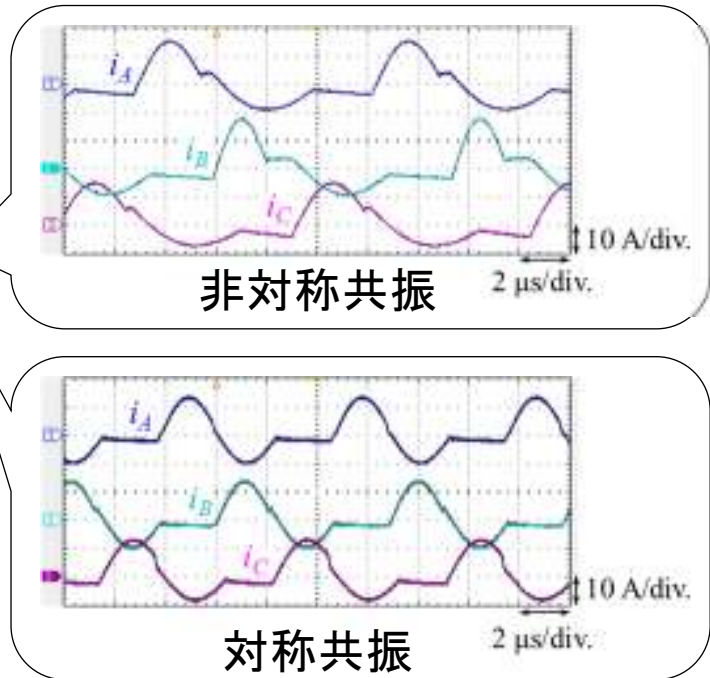


全てのスイッチにおいて
ZVSを達成

対称共振と非対称共振の比較



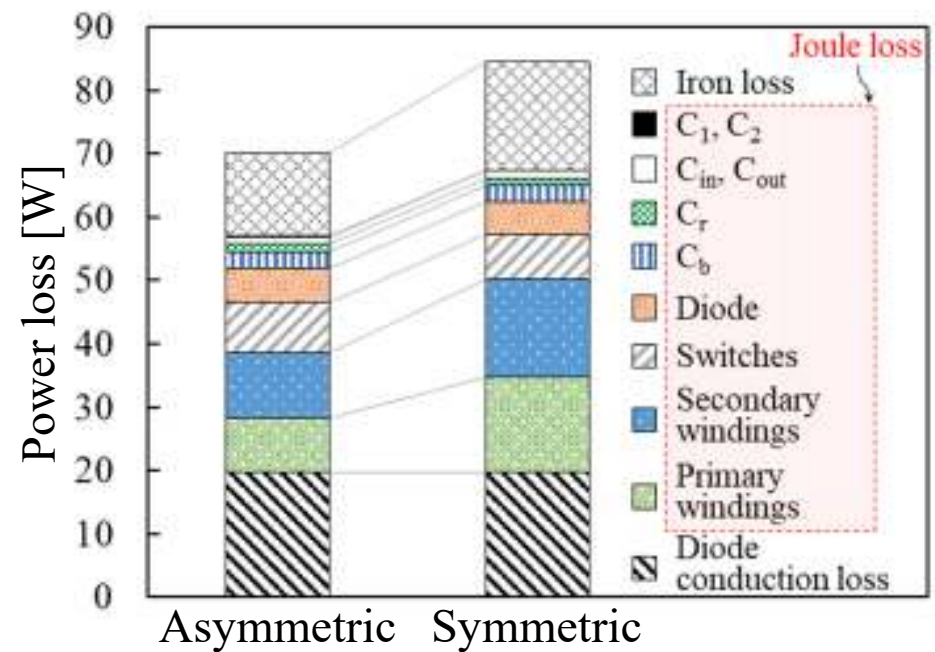
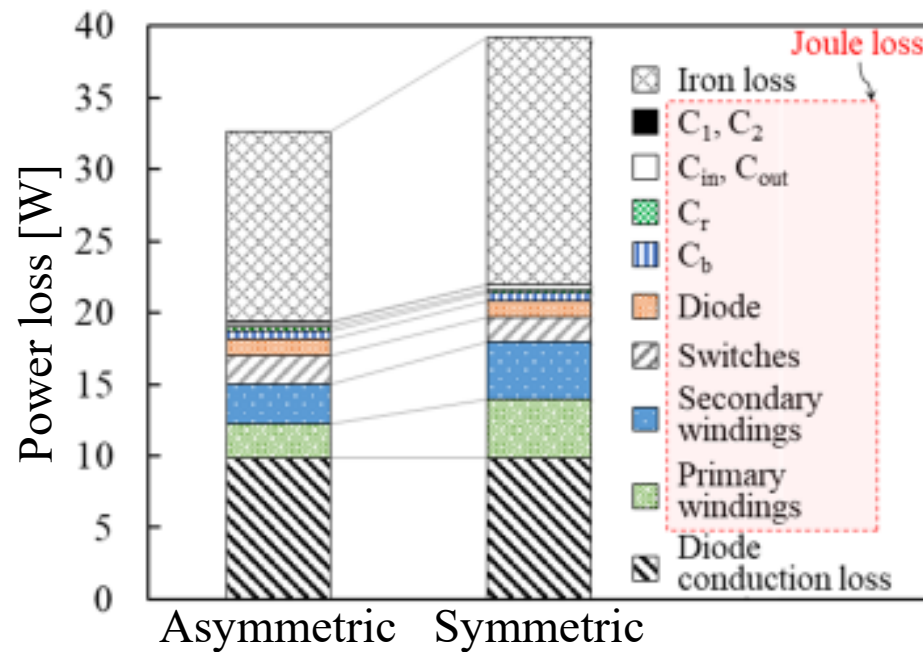
電力変換効率



- 対称共振動作と非対称共振動作を比較
- 理論値と実験値の一致を確認

非対称共振動作により1.5ポイントの高効率化を達成

損失解析



- 非対称共振動作にジュール損失を低減
- トランスの鉄損及びダイオードの導通損失が支配的な損失

まとめ

- 従来のインタリーブLLCコンバータ
 - 電流バランスのために**複雑な制御**
 - 共振周波数を調整するための**補助回路**
- 提案3相インタリーブLLCコンバータ
 - **無制御での電流バランス**
 - **スイッチの電圧ストレスを $2V_{in}/3$ 以下に低減**
 - **非対称共振動作によるジュール損失の低減**
- 実機検証
 - 出力電力1 kW時に**効率93.1%**を達成
 - 非対称共振動作により**高効率化を達成**