

革新的小型軽量高速充電回路を低コストに -革新的高周波電源-

千葉大学 大学院工学研究院
教授 関屋 大雄

2023年12月21日

本発明の概要

本発明は、複雑な制御を用いずに電力負荷変動に依存することなく定電流給電と定電圧給電の双方が可能な、高周波インバータ回路および電源回路を提供することを目的としている。

本発明は、スイッチを切り替えることによって、複雑な制御を用いずに電力負荷非依存な定電流給電と定電圧給電の双方の給電を高周波動作において可能としたものである。

一つのインバータ回路構成で電力負荷変動に依存することなく定電流給電と定電圧給電とが可能となるように、インバータ回路素子の定数が適正化されているため、負荷変動に対応した複雑な制御回路構成を簡素化することができるという大きな特徴を持つ。

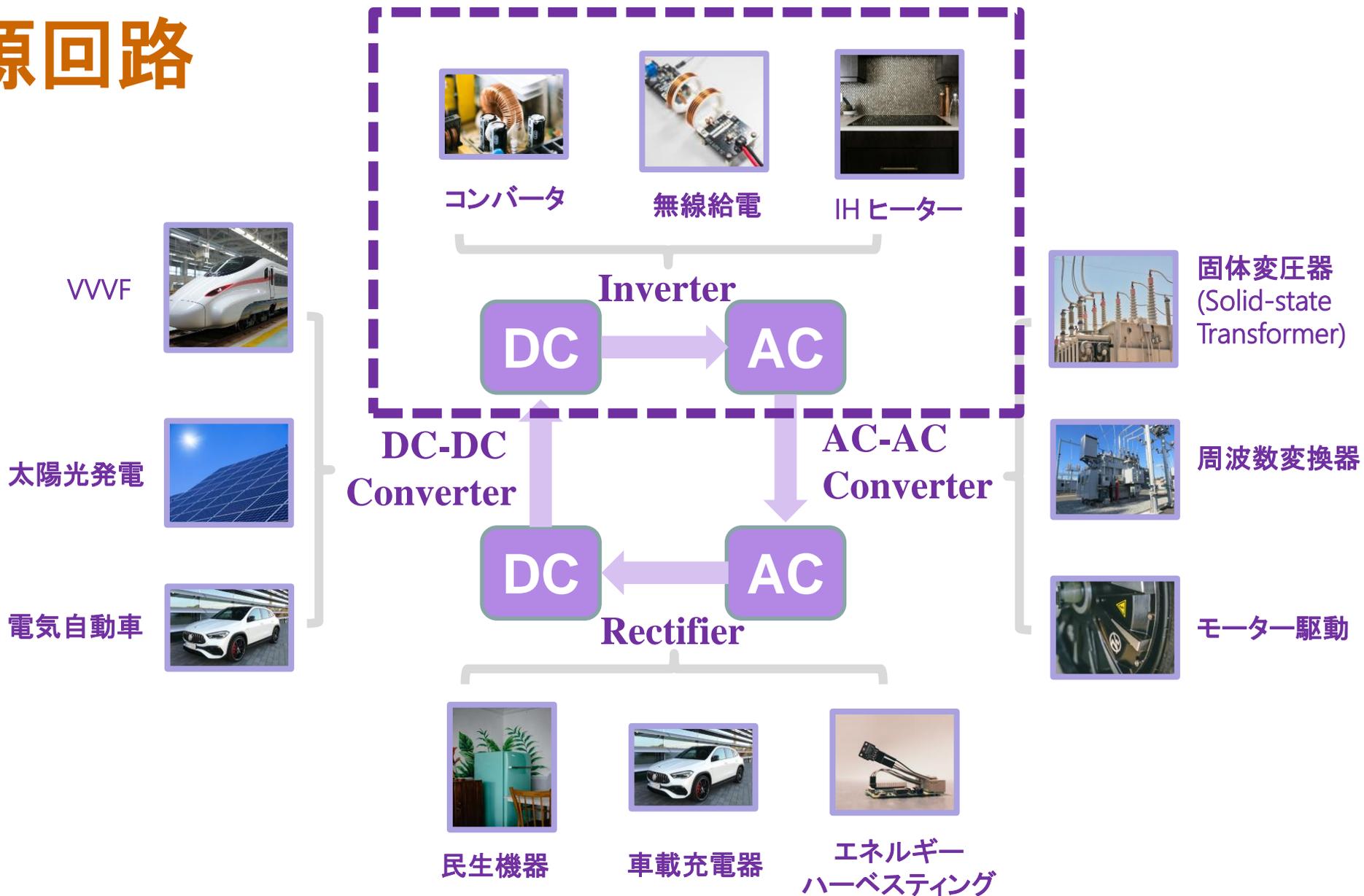
Outline

- **研究背景**
 - WPTシステムの小型高効率化
 - リチウムイオンバッテリーの充電特性
 - 従来研究における問題点
- **提案回路**
 - CC/CVの切替機能を有するハイブリッド型E/EF級インバータ
 - 定電流動作
 - 定電圧動作
- **回路設計と実験**

- **サマリーおよび共同研究開発に向けて**

電源回路

研究対象

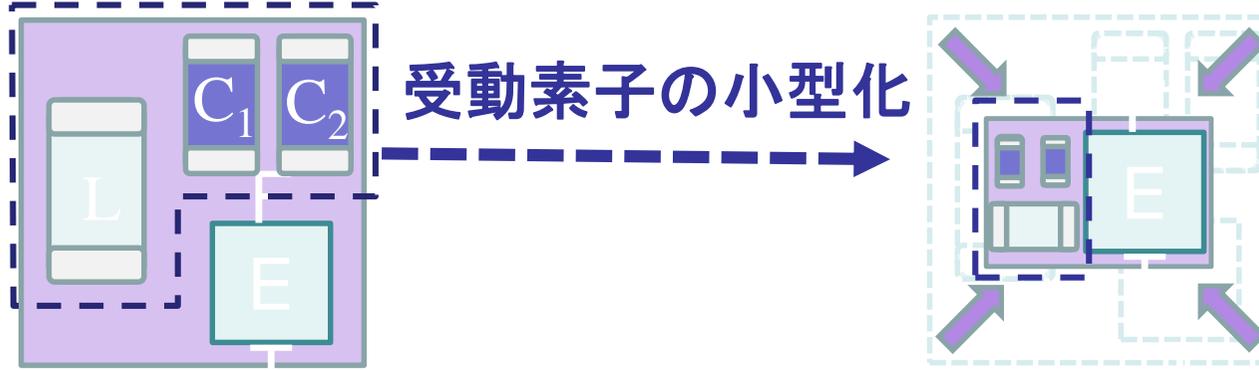


• 技術課題:

1. 小型化

2. 高効率化

高周波化の利点と課題

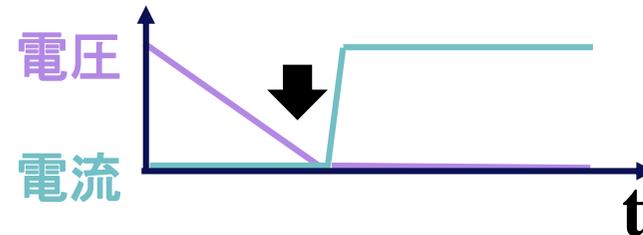
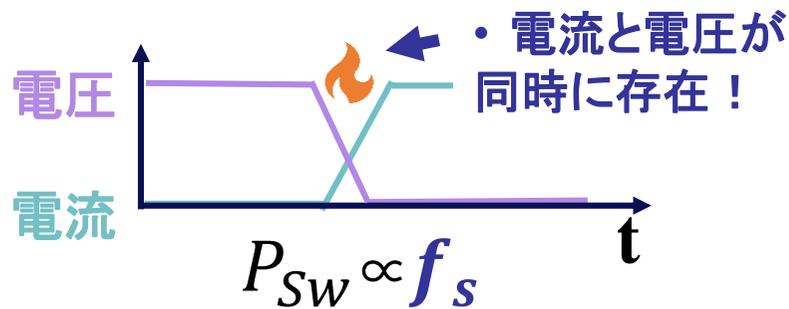


低周波数 (kHz 領域)

高周波数 (MHz 領域)

(矩形波(PWM)コンバータ)

(共振型コンバータ)

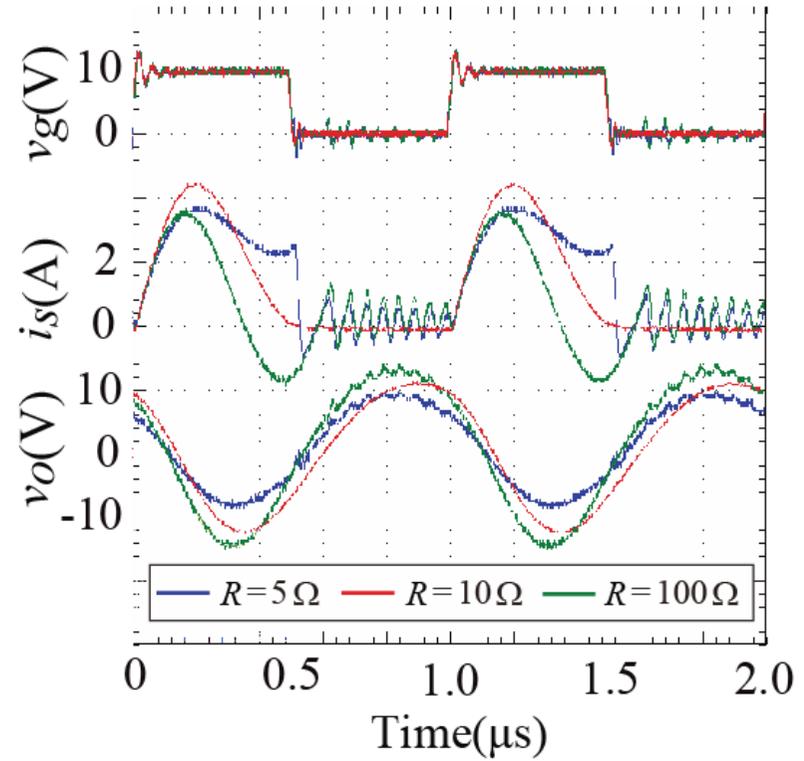
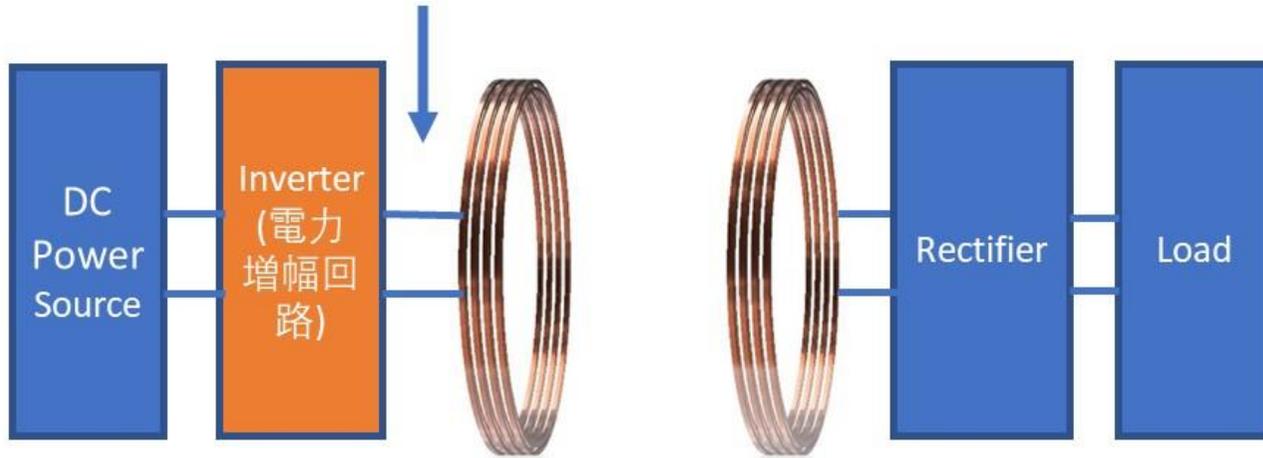


- ・ スイッチング損失
- ・ 電波干渉

- ・ ソフトスイッチング
 - ✓ Zero-Voltage Switching (ZVS)
- ・ 高周波においても高効率

2次電池非接触充電に伴う 研究課題

一定電圧・電流出力



負荷変動時のインバータ波形例

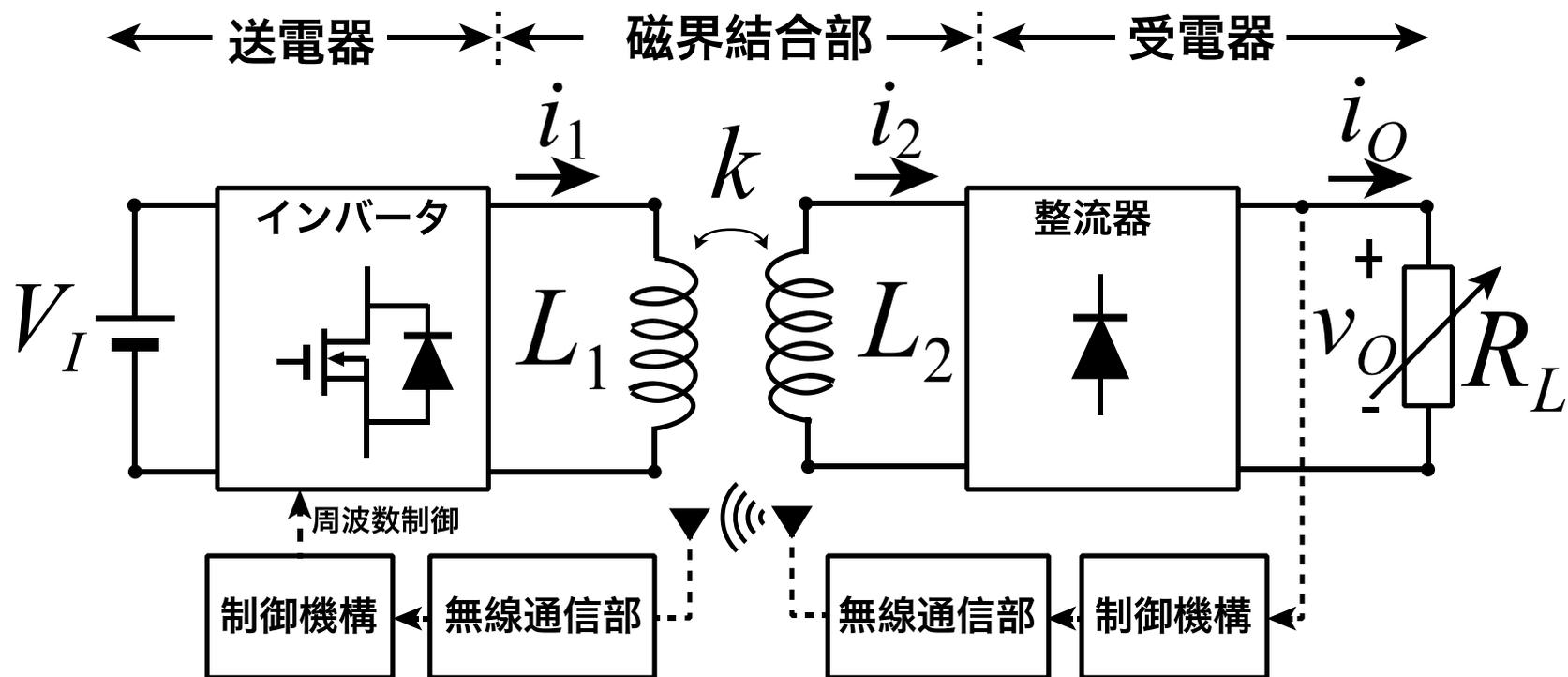


負荷変動・コイルの位置ずれによりスイッチング条件・出力が変動



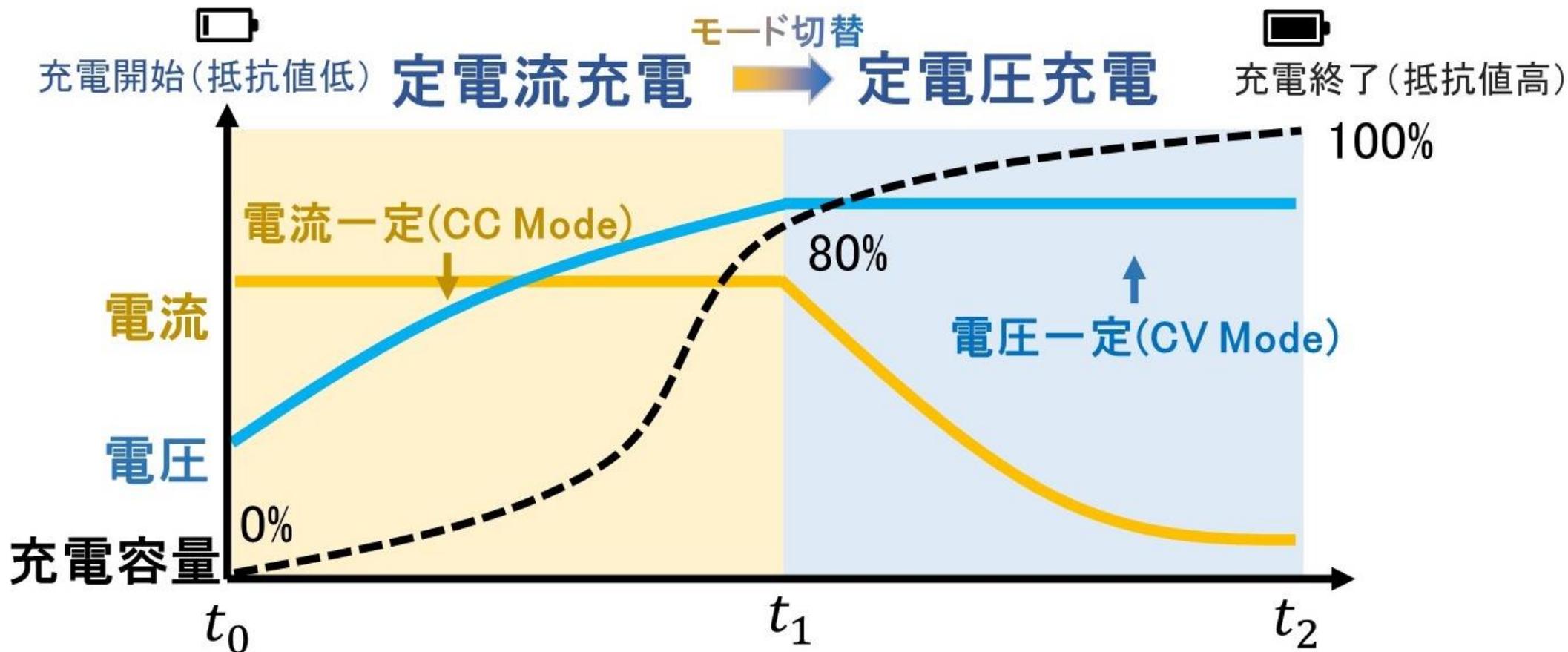
負荷変動に対して常にソフトスイッチング・定電圧・電流出力を達成するインバータの必要性

従来の無線電力伝送システム



- 高周波動作において無線通信の遅延による影響大
- 一定電圧・電流出力およびソフトスイッチングの同時保証が困難、システムが複雑化
- 高周波で使用可能な周波数帯域が狭く、周波数制御が使えない。

リチウムイオンバッテリーの充電特性



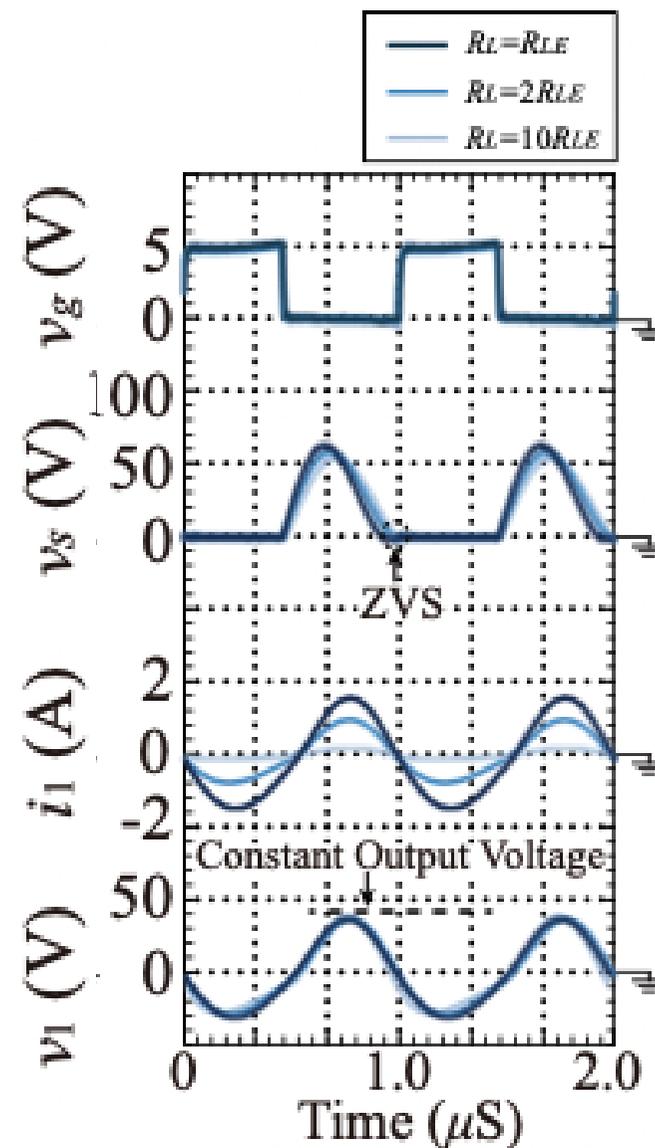
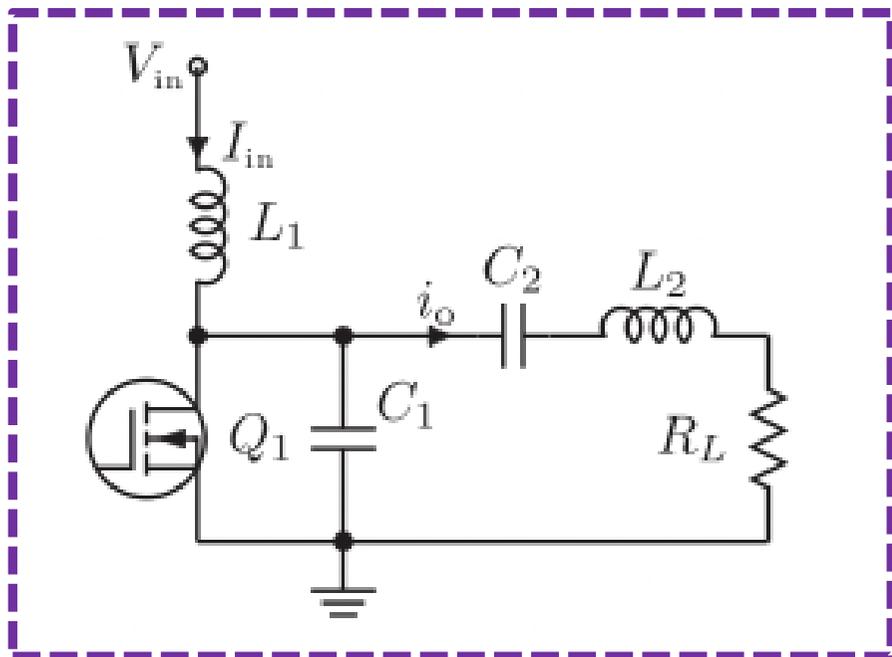
Outline

- 研究背景
 - WPTシステムの小型高効率化
 - リチウムイオンバッテリーの充電特性
 - 従来研究における問題点
- 提案回路
 - CC/CVの切替機能を有するハイブリッド型E/EF級インバータ
 - 定電流動作
 - 定電圧動作
- 回路設計と実験

- サマリーおよび共同研究開発に向けて

負荷非依存E級インバータ [1]

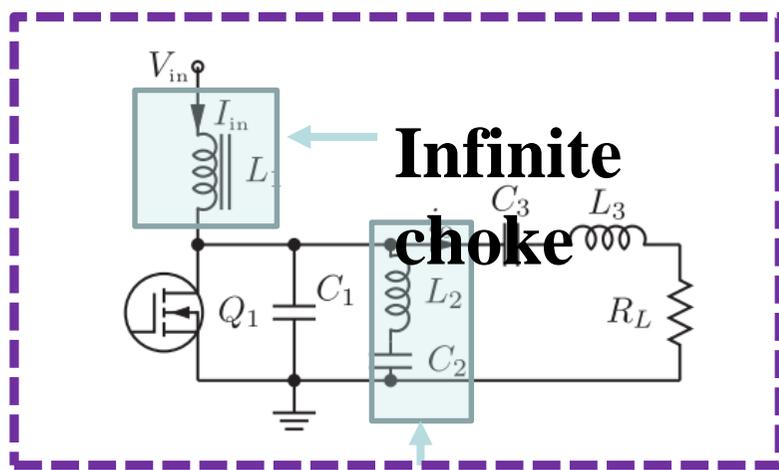
- 制御用いず定電圧出力を達成
- ZVS



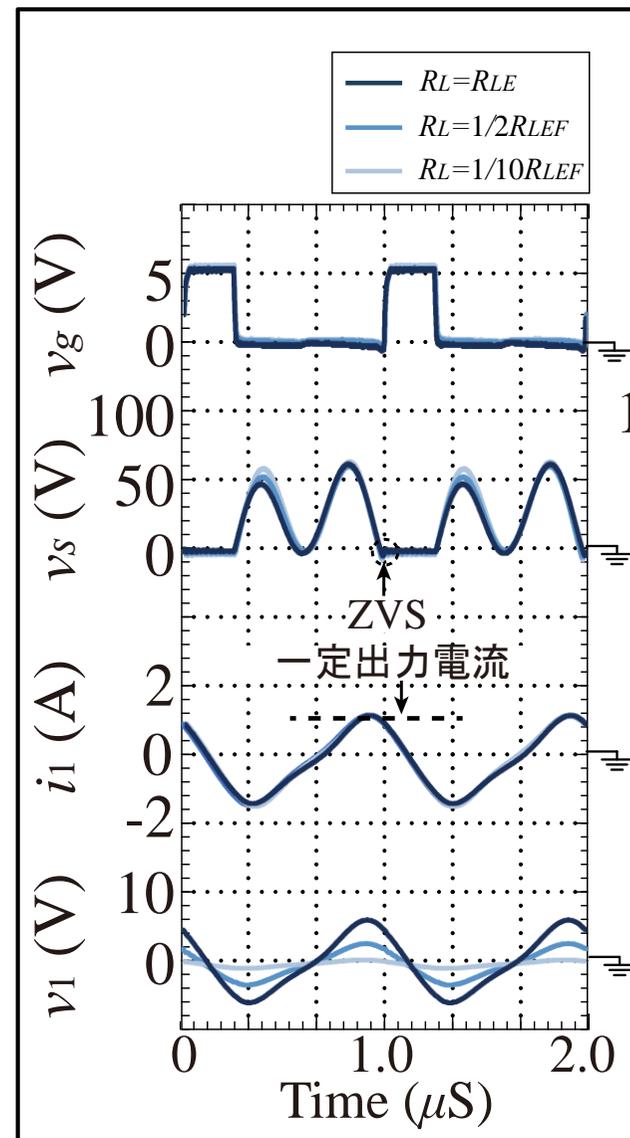
[1] R. E. Zulinski, and K. J. Grady, "Load-independent class E power inverters: part I. theoretical development", *IEEE Trans. Circ. Syst. -I*, vol. 37, no. 8, pp. 1010-1018, Aug. 1990

負荷非依存E/F級インバータ [2]

- 制御用いず**定電流**出力を達成
- ZVS



高調波共
振回路

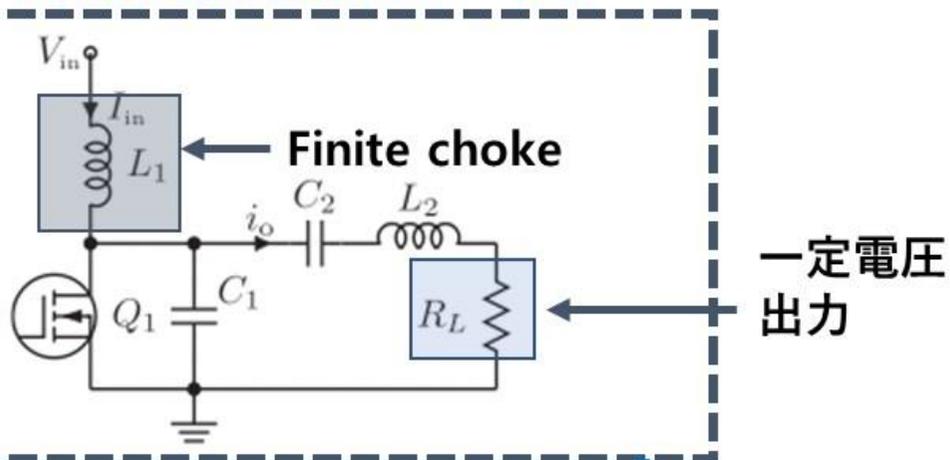


[2] S. Aldhafer, D. C. Yates, and P. D. Mitcheson, "Load independent class E/EF inverters and rectifiers for MHz switching applications," IEEE Trans. Power Electron., vol.33, no.10, pp.8270-8287, Oct. 2018.

研究のアイデア

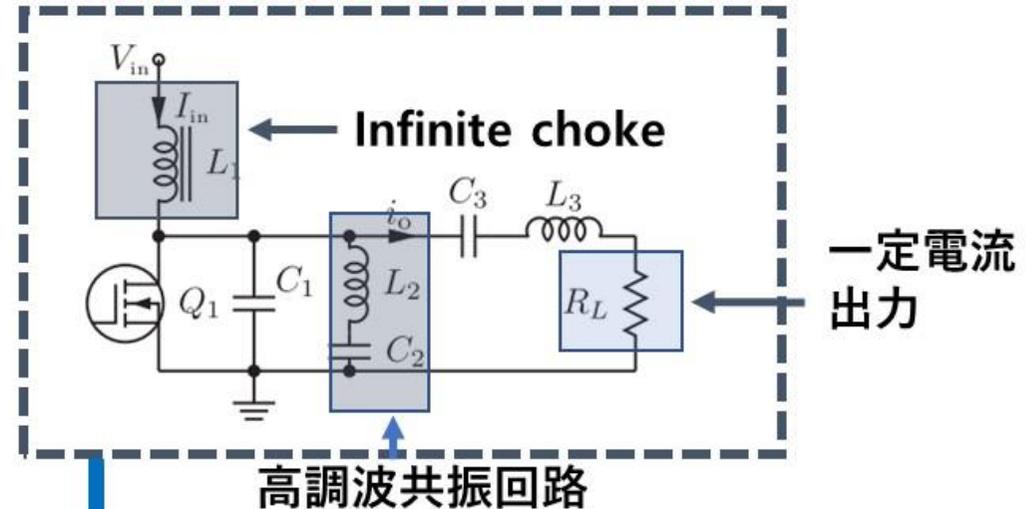
一定電圧出力回路

- 負荷非依存E級インバータ.



一定電流出力回路

- 負荷非依存E/F級インバータ.

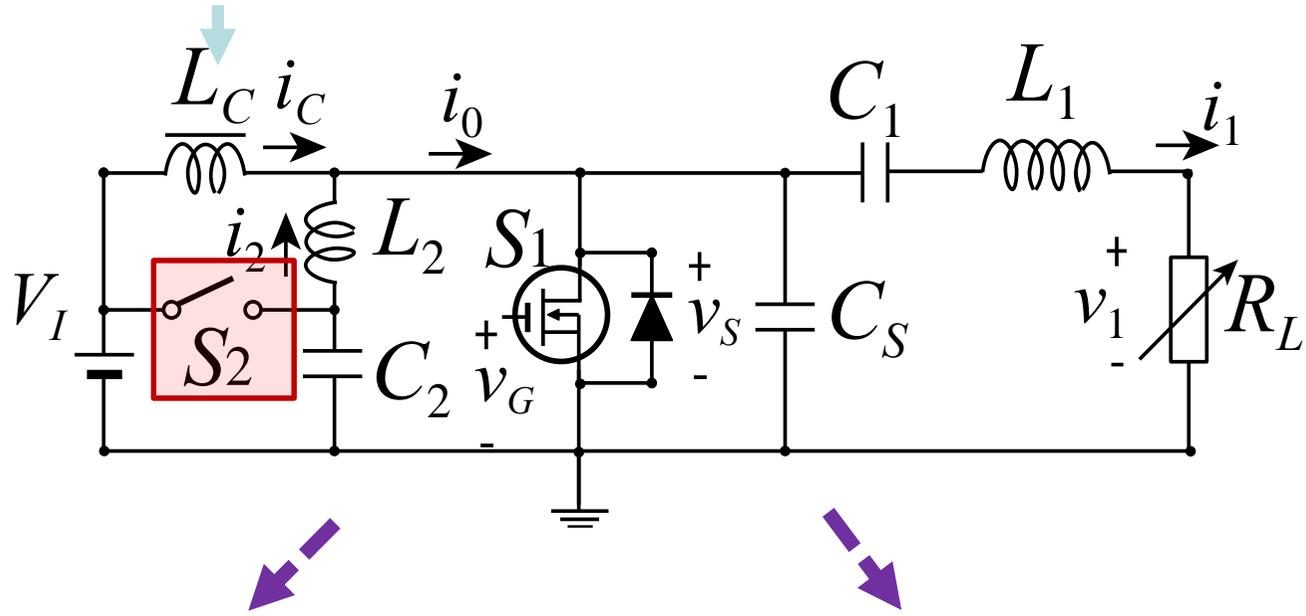


一体化

一つの回路にできないか

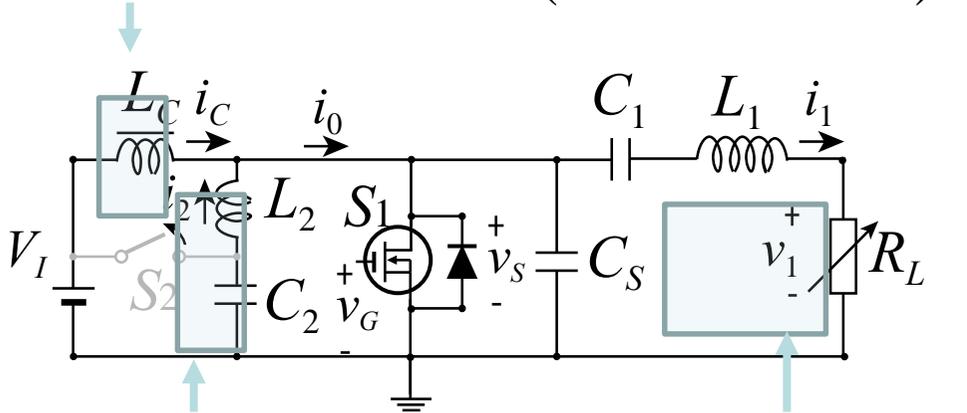
?

提案回路



• S2 is OFF (負荷非依存E/F級):

入力インダクタンス(Infinite choke)

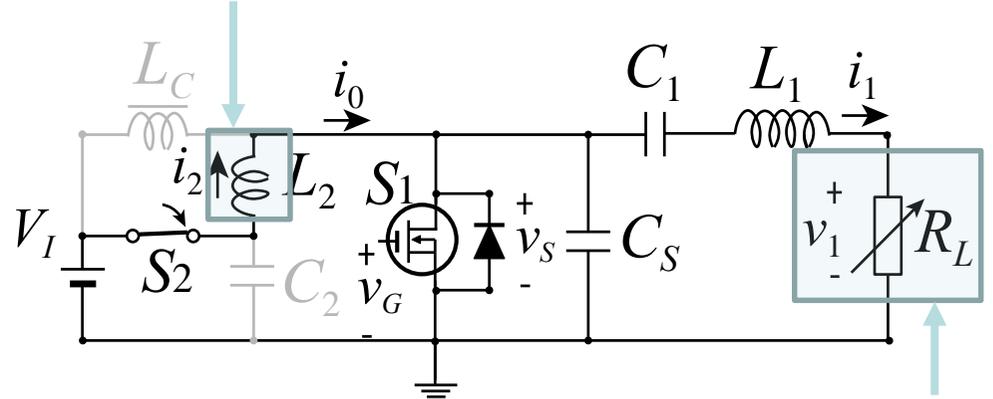


高調波共振回路

出力電流一定

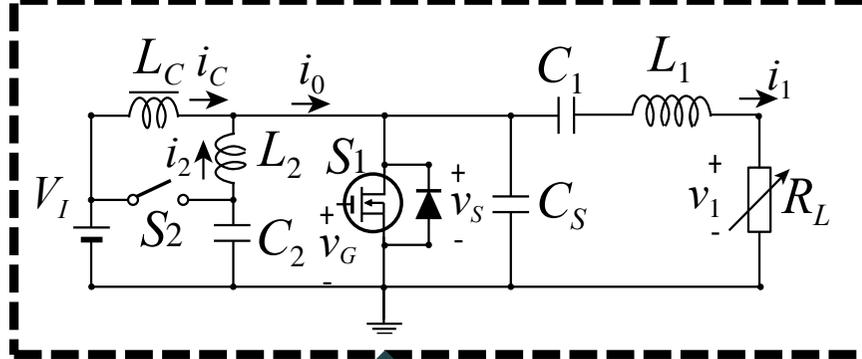
• S2 is ON (負荷非依存E級):

入力インダクタンス(Finite choke)

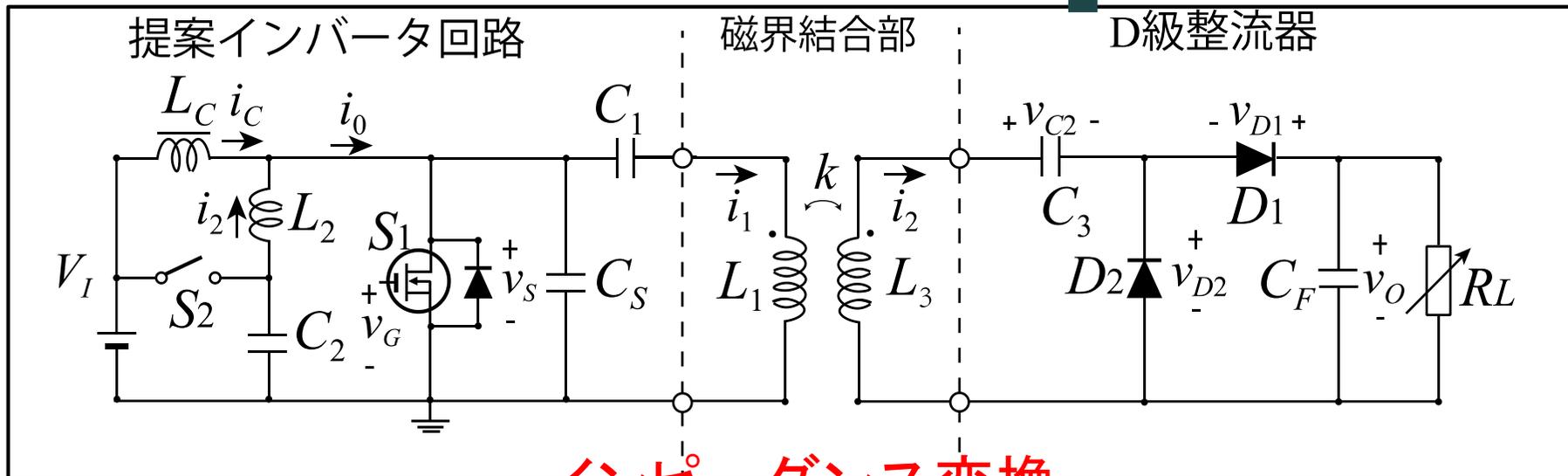


出力電圧一定

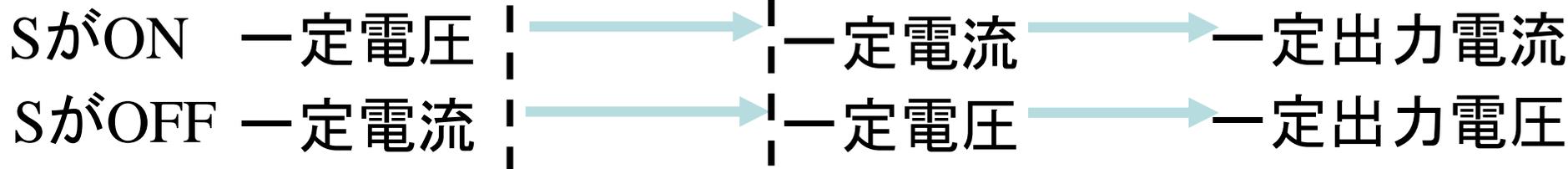
等価モデルとして
インバータに帰着



コンバータへの展開



インピーダンス変換

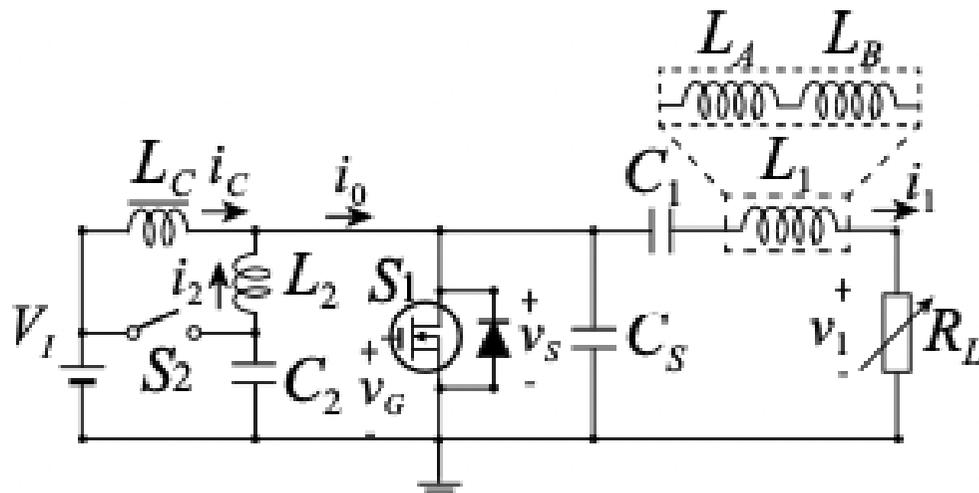
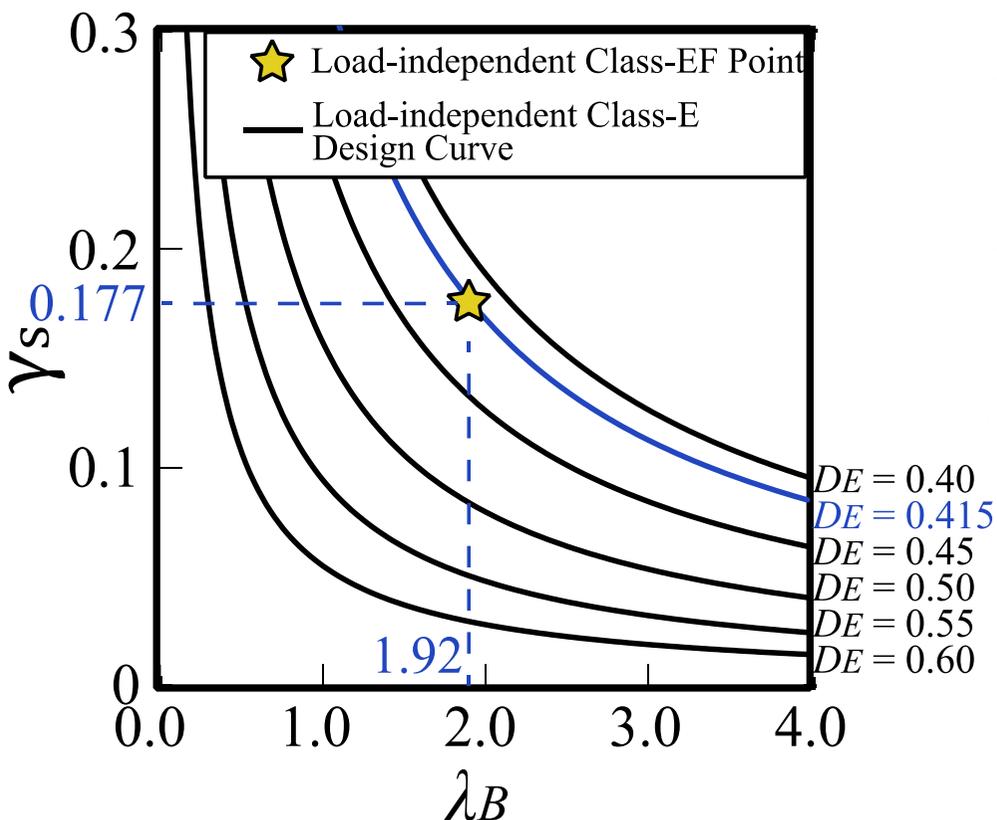


- トポロジーが簡単、小型・軽量化に有利
- ZVSを達成するため、高周波に高効率
- 動作周波数一定のため、ISM周波数で動作可能

Outline

- 研究背景
 - WPTシステムの小型高効率化
 - リチウムイオンバッテリーの充電特性
 - 従来研究における問題点
- 提案回路
 - CC/CVの切替機能を有するハイブリッド型E/EF級インバータ
 - 定電流動作
 - 定電圧動作
- 回路設計と実験
- サマリーおよび共同研究開発に向けて

設計手順



$$\gamma_S = \omega C_S R_L \quad \lambda_B = \omega L_B / R_L$$

CC/CVモードに対し、同時に条件を満足するための設計

(1) 負荷非依存EF級インバータの設計

$$\gamma_S = \omega C_S R_L \quad \lambda_B = \omega L_B / R_L$$

$$\omega_2^* = 1 / (\omega \sqrt{L_2 C_2}) \quad D_{EF}$$

(2) 負荷非依存E級の時比率を決める

$$\gamma_S = G(\lambda_B, D_E). \quad \star$$

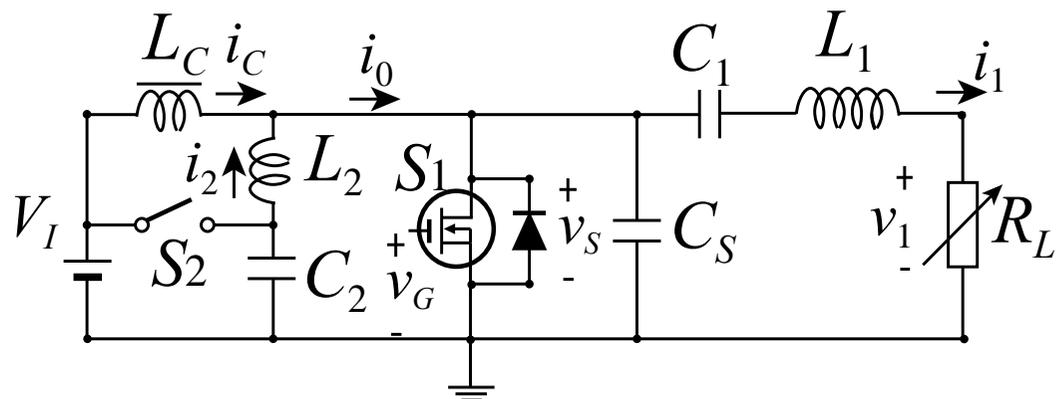
設計結果

CIRCUIT PARAMETER DEFINITIONS AND VALUES.

Param.	Definition	Designed Value
D_{EF}	S_1 On-duty ratio (class-E/F)	0.300
γ_S	$\omega C_S R_{LEF}$	0.177
λ_B	$\omega L_B / R_{LEF}$	1.92
ω_2^*	$1 / (\omega \sqrt{L_2 C_2})$	1.66
D_E	S_1 On-duty ratio (Class-E)	0.415

実験検証

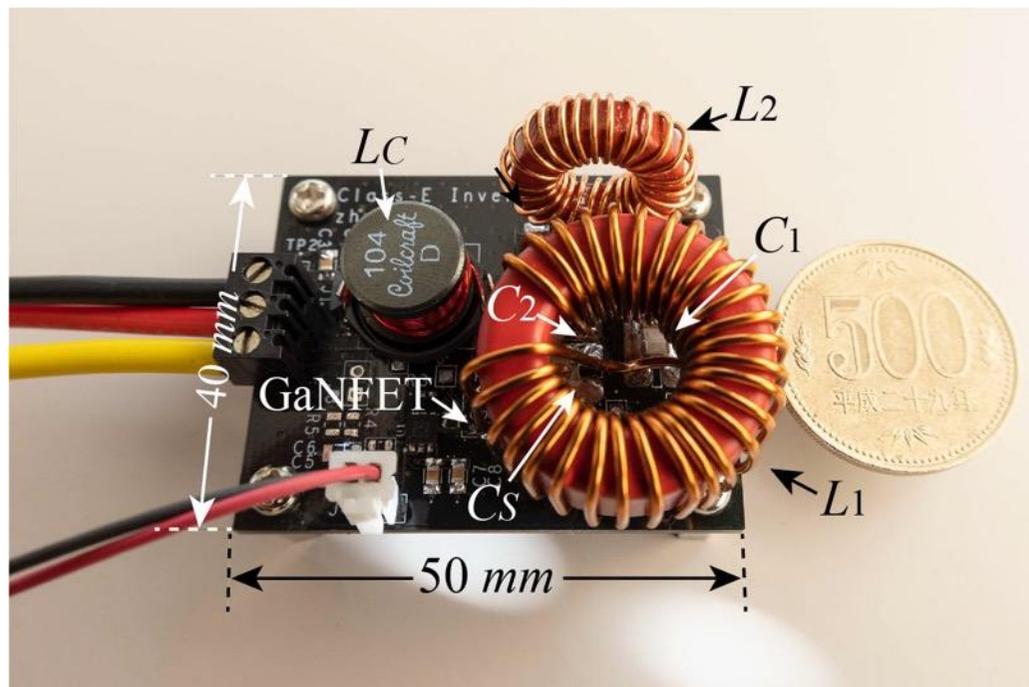
試作回路



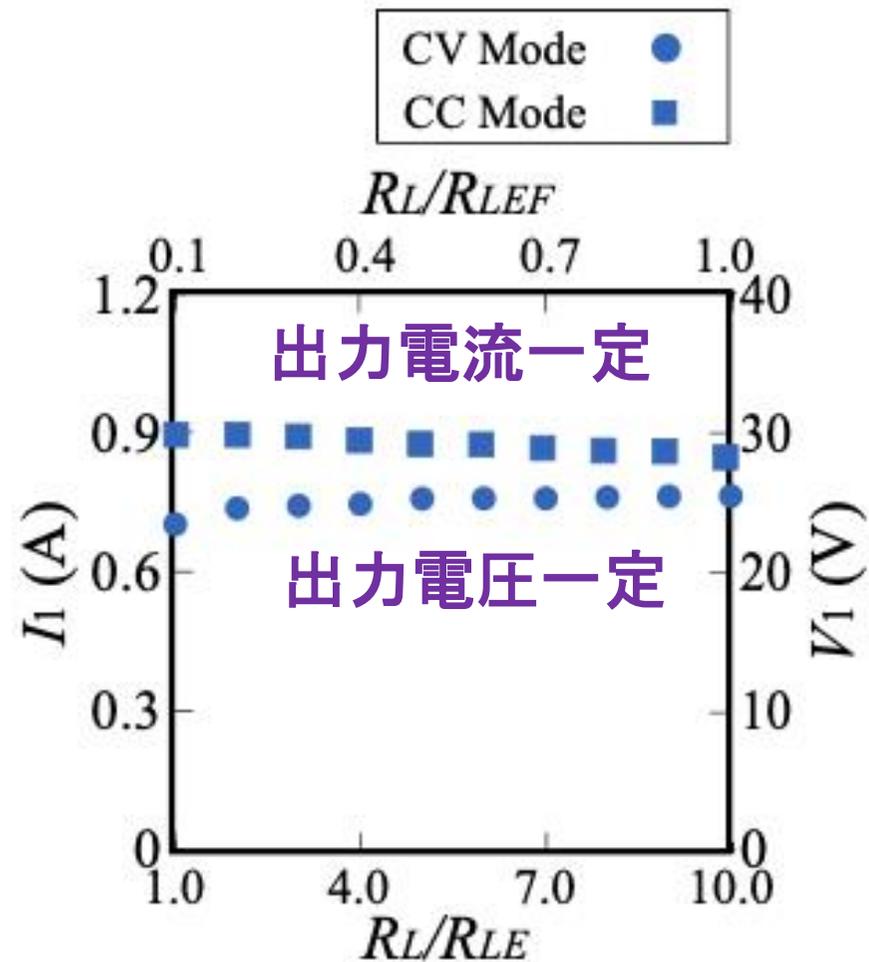
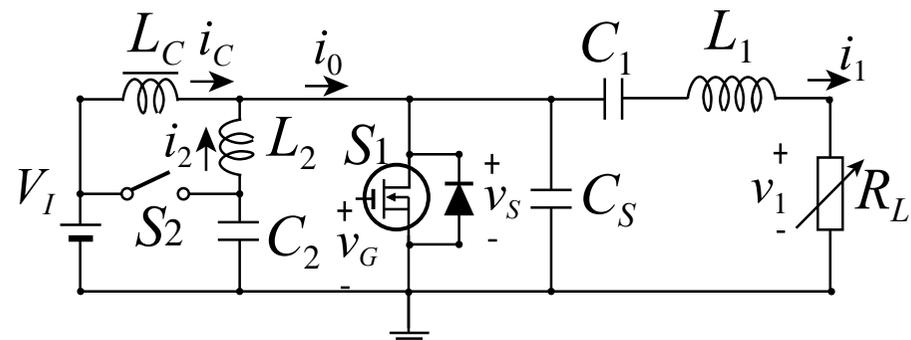
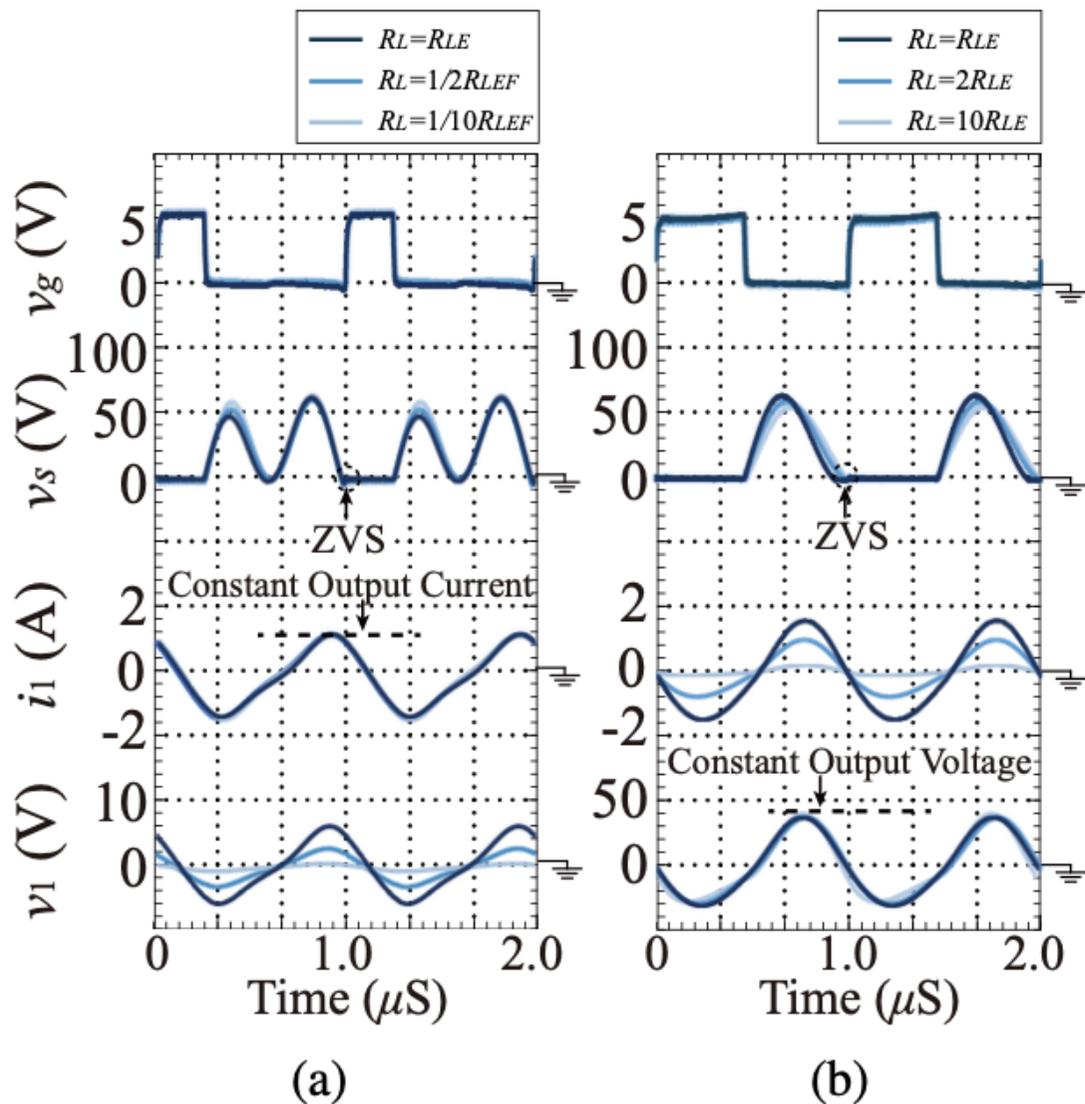
素子値

DESIGNED AND MEASURED CIRCUIT COMPONENTS VALUES.

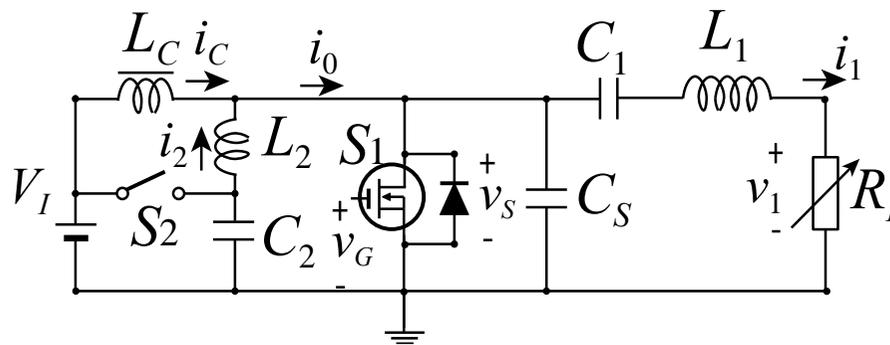
Param.	Designed	Measured	Difference
f_S	1.00 MHz	1.00 MHz	0.00 %
V_I	24.0 V	24.0 V	0.00 %
L_C	100.0 μH	99.2 μH	-0.80 %
L_1	11.9 μH	11.9 μH	0.00 %
L_2	3.24 μH	3.25 μH	+0.30 %
C_S	5.50 nF	5.50 nF	0.00 %
C_1	2.43 nF	2.42 nF	-0.41 %
C_2	2.70 nF	2.68 nF	+0.74 %



実験結果



性能比較



	トポロジー	動作周波数	スイッチ個数
[1]	Class-D (中継回路有り)	一定	6(中継回路含み)
[2]	Class-D	一定	7
[3]	Class-D	変化	4
[4]	Class-D	変化	4
本研究	Class-E/F	一定	2

- 無線通信が不要で、小型・軽量化に有利
- ZVSを達成するため、高周波に高効率
- 動作周波数一定のため、ISM周波数で動作可能

[1] Y. Li et al., "Reconfigurable Intermediate Resonant Circuit Based WPT System With Load-Independent Constant Output Current and Voltage for Charging Battery," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 3, pp. 1988-1992, March 2019,

[2] X. Qu, H. Han, S. Wong, C. K. Tse and W. Chen, "Hybrid IPT Topologies With Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6329-6337, Nov. 2015,

[3] X. Qu, H. Chu, S. Wong, and C. K. Tse, "An IPT Battery Charger With Near Unity Power Factor and Load-Independent Constant Output Combating Design Constraints of Input Voltage and Transformer Parameters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 8, pp. 7719-7727, Aug. 2019,

[4] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen and C. C. Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2273, June 2015,

Outline

- 研究背景
 - WPTシステムの小型高効率化
 - リチウムイオンバッテリーの充電特性
 - 従来研究における問題点
- 提案回路
 - CC/CVの切替機能を有するハイブリッド型E/EF級インバータ
 - 定電流動作
 - 定電圧動作
- 回路設計と実験
- サマリーおよび共同研究開発に向けて

従来技術とその問題点

既に実用化されているリチウムイオンバッテリー充電器には、

CC/CV切り替えと高効率化の両立
制御機構が必須

それに伴む高周波化の限界

等の問題があり、小型・軽量化のボトルネックとなっていた。

本発明の概要

本発明は、複雑な制御を用いずに電力負荷変動に依存することなく定電流給電と定電圧給電の双方が可能な、インバータ回路および電源回路を提供することを目的としている。

本発明は、スイッチを切り替えることによって、複雑な制御を用いずに電力負荷非依存な定電流給電と定電圧給電の双方の給電を高周波において可能としたものである。

一つのインバータ回路構成で電力負荷変動に依存することなく定電流給電と定電圧給電とが可能となるように、インバータ回路素子の定数が適正化されているため、負荷変動に対応した複雑な制御回路構成を簡素化することができるという大きな特徴を持つ。

想定される用途

- 小型モバイル端末のバッテリー充電アダプタに 응용が第一に挙げられる。
- 負荷変動、位置ずれに対するロバスト性を活かし、ドローンなどモビリティを持つものへの無線充電・給電への 응용を目指す。
- 逆にモビリティを持つもの「から」の充電も可能と考えている。

今度の課題・共同研究への期待

- 社会実装に向けた**アプリケーションの提案**とその共同研究開発について企業との協働を希望。
- 高周波電源や無線電力伝送システムを開発中の企業との共同研究を希望。
- 千葉大学として不十分である**システム実装技術**を有する企業との共同研究により、実用化への道が拓くことを希望。
- **小型モバイル機器等へのバッテリー充電器**向けとして、本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : インバータ回路および無線電力伝送回路
- 出願番号 : 特願2022-079500
(2022-5-13 出願)
- 出願人 : 国立大学法人千葉大学
- 発明者 : 関屋 大雄、朱 聞起

産学連携の経歴

- 2010年-2014年 JST A-STEP フィージビリティスタディ（探索タイプ(2010・2011)・シーズ顕在化タイプ(2012-2014)) 事業に採択
- 2010年- 通信・電機メーカー・自動車
関連企業と共同研究実施

お問い合わせ先

千葉大学

学術研究・イノベーション推進機構(IMO)

産学官連携推進部

T E L 043-290-3048

F A X 043-290-3519

e-mail ccrcu@faculty.chiba-u.jp