

令和 6 年 4 月 11 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04038

研究課題名（和文）EV向け電源システムの高信頼と高効率を両立するハイブリッド双方向チョッパの開発

研究課題名（英文）Development of bidirectional hybrid converter which enables both high reliability and high efficiency for EV power supply system.

研究代表者

逆瀬川 栄一（Sakasegawa, Eiichi）

鹿児島工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授

研究者番号：30390503

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、3レベルインバータへの応用に適し、かつ、EDLCを用いた複数電源方式の新しい昇圧コンバータの開発を行った。従来回路は、直列接続された4つのスイッチと1つのバッテリーを用いて、昇圧と中性点電位制御が可能な回路である。一方、提案回路に求められる制御性能は3つであり、昇圧、中性点電位制御、そしてEDLCの電流制御である。

結論として、提案回路は、従来回路に比べ、スイッチ1つの追加のみで、求められる制御を実現可能であることをシミュレーションにより示した。さらに、提案回路の昇圧、中性点電位制御、そしてEDLC充放電の各出力モードを解析し、従来回路との動作モードの違いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案回路は複数の直流電源（バッテリーおよびEDLC）を持ち、片方の電源を予備電源と利用できる可能性を有している。社会的意義として、提案回路はEDLCを用いて電源システムの信頼性も強化した回路構成になっている。現在、持続可能な社会の実現のために、EVやPHV等の電気自動車はますます普及していくことが確実になっている。そのような社会において、本研究で提案した電源システムを有するEVが普及することにより、事故や自然災害等で片方の電源を失った場合に、2つめの電源により運転を継続でき、利用者が安全、安心を確保できる可能性を有している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a novel multi supply type boost converter with EDLC that suitable for three level inverters. A conventional circuit consists of series connected four switches and one battery, and can control boost operation and neutral point potential. Control performance required for proposed circuit are boost operation, neutral point potential control, and current control of the EDLC. For the purpose, in this study, we examined a novel circuit and its control system that enables three control performance and having the switch of the minimum number. We used PI control for the control system and applied a design method derived from conventional circuit design. In conclusion, we represented the effectiveness of the proposed system for the control performance by simulation. Furthermore, we clarified the circuit modes that appear in each control mode such as boost operation, neutral point potential control and current control of the EDLC.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：昇圧コンバータ NPCインバータ 電気二重層キャパシタ 回生

1. 研究開始当初の背景

現在、自動車主機用モータドライブの信頼性と装置の大型化が、電気自動車の拡大普及の妨げになっている。具体的には、今後、自動運転技術が普及するためには、自動車の信頼性/安全性をさらに向上させる必要がある。しかしながら、現行のシステムでは1モータに対し1電源しか持たないため、高信頼性が困難である。一方、従来から求められている性能として高効率化があり、そのために運転速度に応じて広範囲に電圧を可変できる電源が求められているが、1電源では限界がある。これらの問いへの解が「多電源化に適した電力変換の実現」である。多電源にすることにより、片方の電源が故障した際にも運転を継続することができる。現行のPHV主機モータ駆動システムには二相昇圧コンバータと2レベルインバータを用いた回路方式が採用されているが(図1)、さらなる高効率化が求められている。

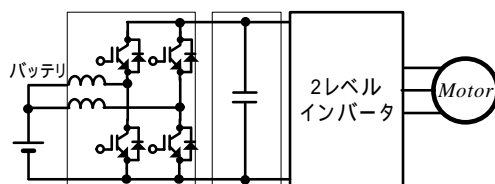


図1 現行方式(1電源1モータ方式)

高効率化の一解決策として、マルチレベル電圧を出力可能なTタイプインバータとそれに適した昇圧コンバータがある(図2)。しかし、回生方式については課題が残されており、バッテリーの小型化、高信頼化についても課題が残る。

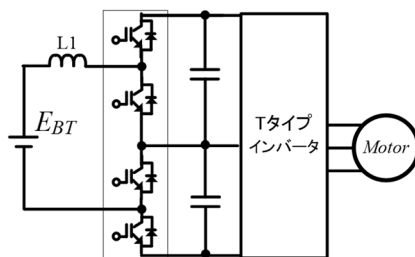


図2 従来方式(NPC昇圧コンバータシステム)

2. 研究の目的

そこで本研究では、これらの課題を一掃できる電力変換器を提案する。図3に示すハイブリッド電源双方向コンバータ(以下NPC昇圧コンバータ)を提案し、その制御法を開発する。本研究の学術的独自性は、1つのモータに対し複数の電源を備え、スイッチング技術を用いて個別あるいは直列に組み換えることで、システムの高信頼化と高電圧化を実現できることである。本研究の目的は、電気自動車(EV/PHV)を想定したモータドライブシステムを設計開発して、提案する回路、制御技術が高信頼化、高電圧化に有効であるかを、実験により明らかにすることである。具体的には、図3に示す回路の昇圧コンバータ部に着目し、昇圧、中性点電位制御(NPP制御)、EDLCの充放電電流制御が行える回路方式とその制御方式をシミュレーションおよび実験で明らかにする。また、その各制御における回路の動作モードを明らかにすることである。

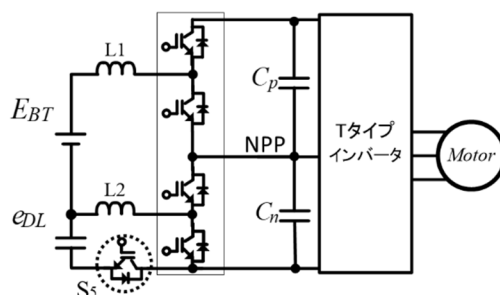


図3 提案方式(EDLC付NPC昇圧コンバータシステム)

3. 研究の方法

本研究では昇圧コンバータの開発を行うため、図3のインバータ部は抵抗に置きかえる。NPC

昇圧コンバータ（図2）の制御技術はすでに確立しており、本研究では EDLC のエネルギーマネジメントと入出力波形の開発と評価に専念する。本課題では具体的に次の2点に取り組む。

1. EDLC を追加した際の素子 S5 の PWM 制御法
2. バッテリ寿命の改善効果

上記1の PWM 制御法については、状態平均化法による理論解析とシミュレーションによる動作検証を行う。上記2の評価方法として、充放電効率を検討する。

研究計画について述べる。

R3 年度は、理論構築とシミュレーションによる有効性確認を行う。理論構築では EDLC を用いた場合の昇圧コンバータのスイッチングモード解析を行う。シミュレーションには PSIM を用いて検証を行う。PWM 制御原理として、EDLC への回生とバッテリーのアシストを行うパターンを構築し、その動作を確認する。

R4 年度は、プロト機の製作と実機検証を遂行する。実機検証では、プログラマブル直流電源を用いた回生・加速アシスト動作試験、直列接続モードでの高電圧化試験、さらに、受動素子の小型化の実機検証を行う。

R5 年度は、充放電効率測定試験と総合評価を行う。YOKOGAWA の多チャンネル高精度電力計 WT1800E を用いて、直列接続電源モードにおける充放電効率を測定し、バッテリーのみの場合との比較検証を行う。

4. 研究成果

4-1. 提案回路1

図4は提案回路1の回路構成とその制御システム構成を示す。図4は、昇圧、中性点電位制御、EDLC の電流制御の3つの制御を行うために、1つの制御あたり2つのスイッチを使用する構成となっている。追加のスイッチは S5, S6 である。EDLC の電流制御のための電流指令は2つの電源の接続部に流れる電流の関係より決定している。

表1にシミュレーションに用いた回路定数を示す。バッテリー電圧 70V、EDLC の初期電圧 30V、1つのインダクタンス 2mH、1つキャパシタンスは 100uF、負荷抵抗 50、スイッチング周波数は 10kHz である。

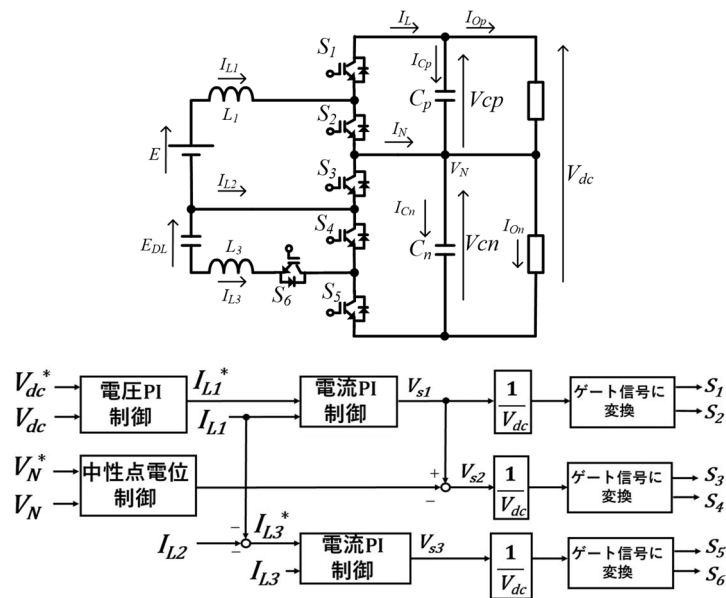


図4. 提案回路1と制御システム構成.

表1 提案回路の回路定数

Parameters	Value
Battery E [V]	70
Initial voltage of EDLC E_{DL} [V]	30
EDLC Capacity [F]	300
Inductance L_1, L_2 [mH]	2
Capacitor C_p, C_n [μ F]	100
Resistance R_1, R_2 [Ω]	50
switching frequency f_{sw} [kHz]	10

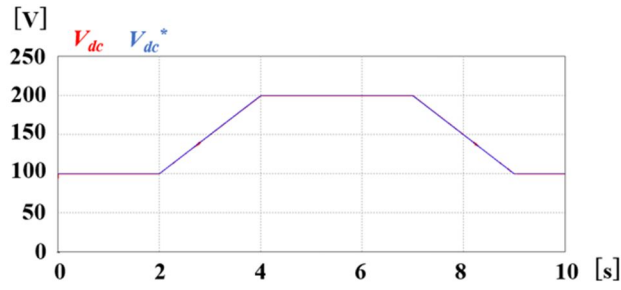


図5 Simulation waveforms of V_{dc}^* and V_{dc}

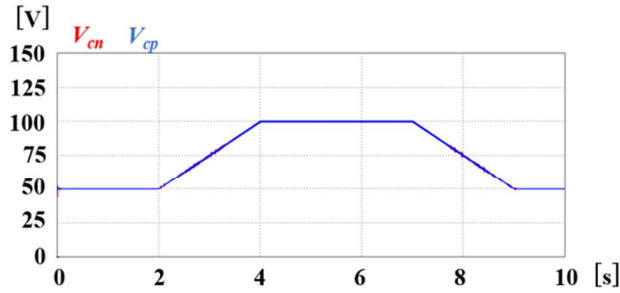


図6 Simulation waveforms of V_{cp} and V_{cn}

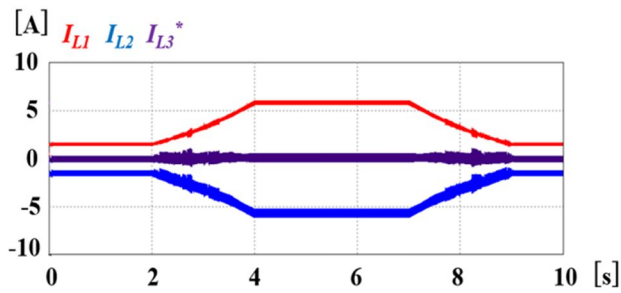


図7 Simulation waveforms of I_{L1} and I_{L2} and I_{L3}^*

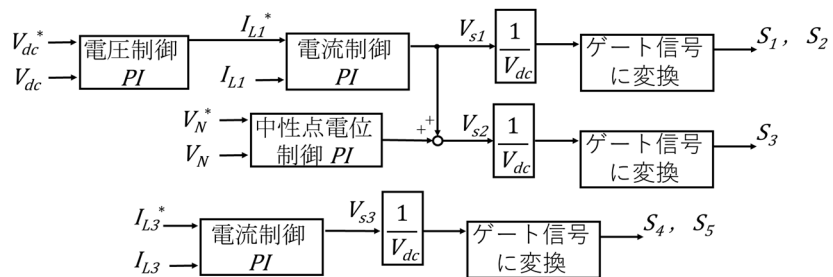
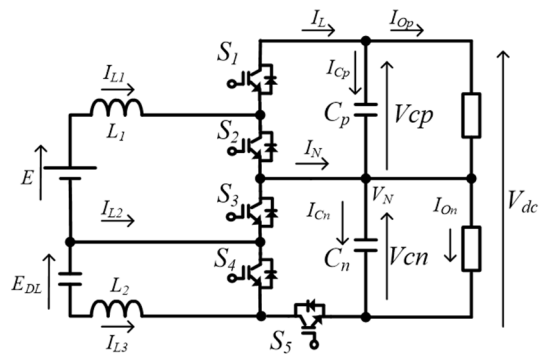


図8. 提案回路2と制御システム構成.

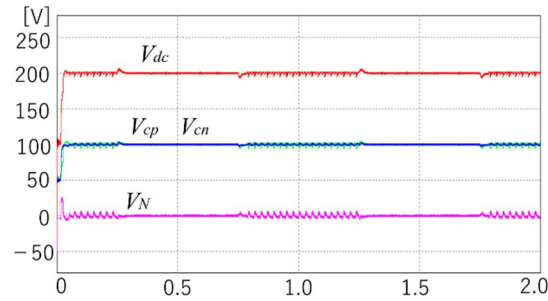


図 9. Simulation waveforms of output voltages.

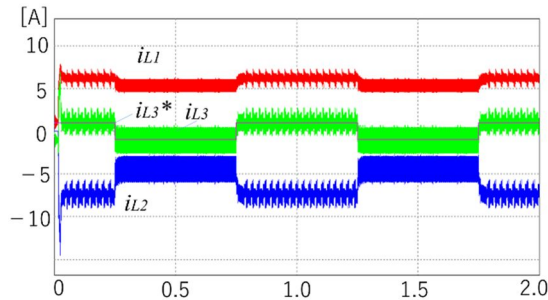


図 10. Simulation waveforms of input currents.

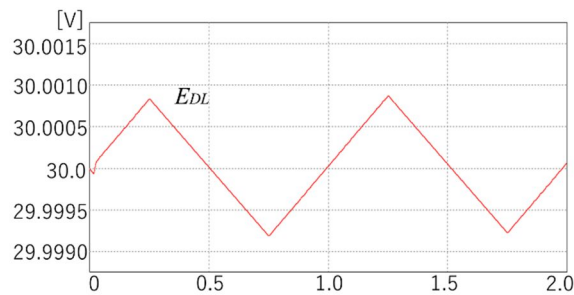


図 11. Simulation waveform of current of EDLC.

図 5～7 に提案回路 1 のシミュレーション結果を示す。出力電圧指令は 200V, 中性点電位の指令値は 0V とし、出力電圧を 2 秒で 200V まで台形波状に変化させたときの波形である。図 5、図 6 より、出力電圧、中性点電位は正しく制御されていることが確認できる。また、入力電流についても、正しく動作していることがわかる。しかしながら、この方式は従来回路に比べスイッチを 2 個多く必要とすることと、EDLC の充放電電流を任意の値に設定できないという問題がある。

4 - 2 . 提案回路 2

提案回路 2 は提案回路 1 の問題を解決するため、スイッチの数を 5 つとし、EDLC の電流指令を任意の値に設定できる制御方式である。追加したスイッチは S5 である。図 9～11 にシミュレーション結果を示す。これは出力電圧を 200V に昇圧しながら、中性点電位を 0V に、かつ EDLC の充放電電流指令である i_{L3}^* を 1 秒間で $\pm 2A$ に変化させたときの波形である。図 9 より、出力電圧は指令値に制御されていることがわかる。また、EDLC の充放電電流の指令値に対し、実際の電流が正確に追従しており、そのほかの電流も常にバランスよく制御されていることがわかる。

研究成果のまとめ

提案回路の出力電圧、中性点電位、EDLC の電流制御系の設計方法を明らかにした。また、スイッチングモード解析により、提案回路の昇圧、中性点電位制御、EDLC の電流制御の出力モードを明らかにし、従来回路との動作モードの違いを明らかにした。

提案回路 2 は従来回路に比べ 1 つのスイッチの追加のみで、昇圧、中性点電位制御、そして EDLC の電流制御が可能であり、従来回路に比べ高効率化、高信頼性を実現可能な電源方式であることをシミュレーションにより確認した。しかしながら、シミュレーションによる動作検証に想定以上の時間を要してしまい、実験による検証ができなかった。これについては、今後の研究テーマとしたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 E.Sakasegawa, R.Chishiki, R.Sedutsu, T.Soeda, H.Haga, R.M.Kennel	4. 巻 2022年12月
2. 論文標題 Comparison of interleaved boost converter and two-phase boost converter characteristics for three-level inverters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 World Electric Vehicle Journal an Open Access Journal by MDPI, 26 December 2022	6. 最初と最後の頁 1, 17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 知識凜, 逆瀬川栄一, 添田拓巳, 芳賀仁
2. 発表標題 3レベルインバータに適した昇圧チョッパと2相昇圧チョッパの特性比較
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永大成, 逆瀬川栄一
2. 発表標題 回生機能を有する新NPC昇圧チョッパの提案
3. 学会等名 電気学会九州支部高専研究講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	芳賀 仁 (Haga Hitoshi) (10469570)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	EDLCを用いたNPC昇圧コンバータのシミュレーション結果のディスカッション

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	Technical University of Munich	TUM School of Engineering and Design	