

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18064

研究課題名(和文) 直流マイクログリッドにおける高速高精度パワーフロー制御を実現する電力変換器の開発

研究課題名(英文) Development of Power Converters for Realizing Fast and Precise Power Flow Control in DC Micro-grids

研究代表者

小原 秀嶺(Obara, Hidemine)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：50772787

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)：近年、太陽光発電等の自然エネルギーや電力を有効に利用するための蓄電装置の導入が進められている。電力変換段数低減による高効率化を目指し、直流マイクログリッドへの期待が高まっている。従来の交流系統に比べて、直流マイクログリッドに用いる電力変換器には、高速で高精度なパワーフロー制御性能が求められる。本研究では、所期の性能を実現し得るパワーフローコントローラとして、マルチレベル電力変換器とフライングキャパシタ線形増幅回路の2方式を適用することを提案した。回路およびフィルタの設計法について検討し、構築した模擬システムにおいて実験を行った結果、従来方式と比較して28倍高速な電流応答を実証した。

研究成果の概要(英文)：Photo voltaic generations and energy storage devices are promoted for effectively utilizing natural energy. DC micro-grids are one of the promising solution to realize high efficiency systems by reducing the number of the power conversion stages. The requirement of power converters used in the DC micro-grids becomes more severe compared with the conventional AC grid systems. The power flow controllers need high-speed and high-precision power flow control performance. This research proposes two solutions. First one is multi-level converters, and second one is flying capacitor linear amplifiers as the power flow controllers for realizing the required performance. As the results, design procedures of the power flow controllers and output filters have been clarified. It has been experimentally verified that the prototypes of the 7-level converters demonstrate a current response of 28 times faster than that of the conventional 2-level converters in an experimental condition.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス マルチレベル電力変換器 フライングキャパシタコンバータ フライングキャパシタリニアアンプ 直流マイクログリッド 高速電流制御 フィルタ 高効率

1. 研究開始当初の背景

近年、インバータを代表とする電力変換器の需要が益々高まっている。特に、電力系統においては、既存の大規模発電所から負荷への一方的な電力供給だけでなく、太陽光発電や蓄電要素の導入により双方向の電力のやりとりをネットワーク的に行うため、分散的に電力変換器が用いられる。太陽光発電や蓄電池の出力は直流であるため、交流系統に接続するためには、直流電力から交流電力への変換が必要であり、その過程で損失が生じてしまう。そこで、図1のような直流マイクログリッドとしてこれらを運用することによって、電力変換段数を低減し、より高効率で高度な電力のやりとりを実現することが望まれる。直流系統は、交流系統のように位相(無効電力)の概念がないため、パワーフローは要素間の電位差とその線のインピーダンスのみにより決定される。しかし、通常、線のインピーダンスは非常に小さく、わずかな電位差があるだけで大きな電流が流れるため、電力変換器には優れた電流制御性能が求められる。すなわち、直流マイクログリッドのパワーフロー制御は、電力変換器の応用の中でも最も高速で高精度な電流制御が求められる応用の一つであるといえる。

昨今、直流マイクログリッドの研究は盛んに行われているが、現在広く用いられている2レベル電力変換器を用いて検討されている例がほとんどであり、パワーフロー制御の高性能化には限界がある。

2. 研究の目的

現在広く用いられている電力変換器は2レベル電力変換器と呼ばれ、出力電圧波形は図2(a)のような2値的なパルス列である(図2はパルス幅変調により交流正弦波を出力した場合の例)。出力電流の制御は、半導体パワーデバイスのスイッチング周期ごとに行うため、高速な電流制御を実現するためには、スイッチング周波数を高くする必要がある。しかし、周波数を高くするほどパワーデバイスで発生する損失が増えてしまい、これまでは数百kHz(周期数 μs)程度が限界であった。また、パルス波形には不要な高調波が含まれるため、直流、交流問わず、系統に連系するためにはローパスフィルタや連系リアクトルを用い、出力電圧と系統電圧の差分による急峻な電流の変化を抑制する必要があるが、それはすなわち電流制御の時間遅れを生じること他にならず、究極的な高速電流制御の実現のためには、フィルタを小型化もしくは不要とする新たな方式の開発が必要である。

本研究では、『マルチレベル電力変換器』および『フライングキャパシタ線形増幅回路』を直流マイクログリッド用のパワーフローコントローラとして用いることを提案し、現在の2レベル電力変換器では原理的に実現不可能なレベルの高速高精度のパワーフロー制御を実現することを目的とする。

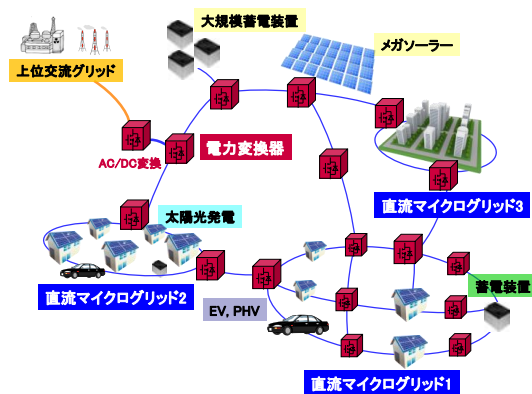
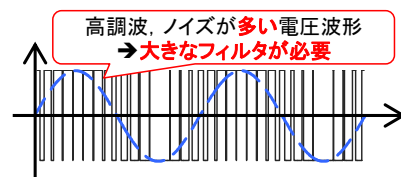
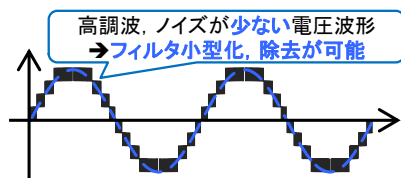


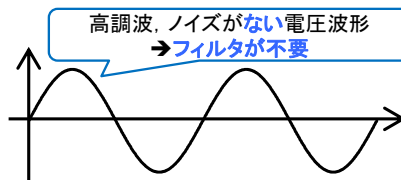
図1 直流マイクログリッドの概念図



(a) 従来型2レベル電力変換器



(b) マルチレベル電力変換器(9レベル)



(c) リニアアンプ

図2 交流出力電圧波形の比較

具体的には、従来の2レベル電力変換器では、電流制御周期は数 μs ~十数 μs が限界であったのに対して、上記2方式により、1 Ω 以下の直流配電線において、制御周期 $2\mu\text{s}$ 以下で電流リップル5%以下の電流制御を実現することを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、直流マイクログリッドにおける高速高精度の電流制御を実現するパワーフローコントローラの実現方法として、『マルチレベル電力変換器』と『フライングキャパシタ線形増幅回路』の2方式の適用を提案する。

(1) マルチレベル電力変換器

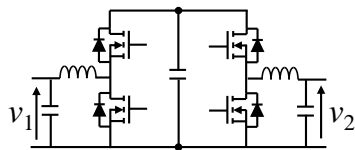
マルチレベル電力変換器は、3値以上の電圧を出力できる電力変換器の総称であり、図2(b)のように出力可能な電圧の数を増やす

ことができる。すなわち、原理的に高調波および出力電圧と系統電圧の差を小さくできるため、出力フィルタや連系リアクトルを小型化することができる。また、出力レベル数を増やすほどスイッチング時の損失を低減できるため、2レベル電力変換器に比べて高周波化が可能であり、より高速な電流制御が実現できる。

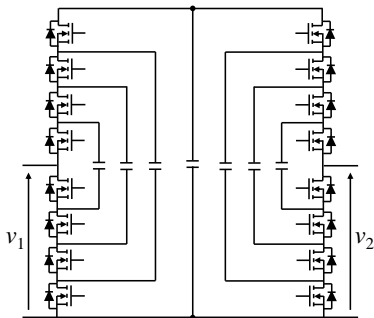
マルチレベル電力変換器については、これまでの研究をベースに、直流マイクログリッドへ適用する際的设计論を確立し、3台のフライングキャパシタ形マルチレベル電力変換器(図3(b))の試作回路を用いて3ノード3リンクの模擬直流グリッドを構築し、高速パワーフロー制御の実証を行う。

(2) フライングキャパシタ線形増幅回路

リニアアンプは、半導体デバイスのスイッチングではなく非飽和領域を用いて動作するため、図2(c)のような連続的な出力電圧を得ることができる。すなわち、フィルタ無しではほぼ制御指令値通りの電圧を出力することができ、電流制御の周期もスイッチング周期に依存しないため、原理的に最も高速高精度の電流制御が実現できる。しかし、一般的



(a) 従来型 2 レベル方式



(b) フライングキャパシタマルチレベル方式 (5レベル回路の例)

図3 電力変換器の回路構成

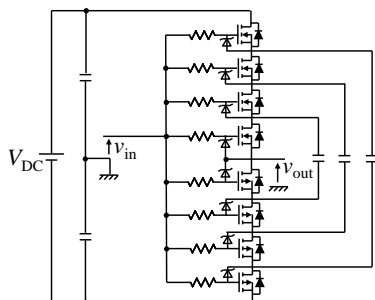


図4 フライングキャパシタ線形増幅回路 (4直列回路の例)

にリニアアンプの電力変換効率は低く、例えばB級増幅回路の理論効率は78.5%である。したがって、これまではリニアアンプを比較的大電力を扱う電力変換の用途に用いることはできなかった。そこで本研究では、前述のフライングキャパシタ電力変換器を応用した図4の『フライングキャパシタ線形増幅回路』を提案する。この方式は、低ひずみと高効率を両立できる可能性のある新しい電力変換回路方式である。

フライングキャパシタ線形増幅回路は、本研究で提案する新しい回路方式であるため、基礎的な動作解析、理論効率の導出、実機検証を行い、総合的な高性能化の検証を行う。

4. 研究成果

(1) マルチレベル電力変換器

始めに、電力変換器のレベル数と出力LCフィルタの設計論について検討し、出力電流リップルの制約下で高速な過渡応答を実現する設計法を確立した。本設計法を用いて電流リップル5%以下として設計した2レベルコンバータおよび7レベルコンバータのフィルタパラメータを表1に示す。

等価出力スイッチング周波数を2レベルと7レベルとで500kHzに揃えた場合、出力フィルタを7レベルコンバータでは2レベルの1/6程度に出来ることが分かる。これはフィルタの小型化のみならず、高速応答に寄与する。

等価出力スイッチング周波数を揃えた本条件では、2レベルコンバータの方がスイッチング損失が大きくなるため、実用の観点からは、2レベルと7レベルとで損失が同等の条件で比較するのがフェアとも考えられる。この観点から、等価出力スイッチング周波数83.3kHzの2レベルコンバータと500kHzの7

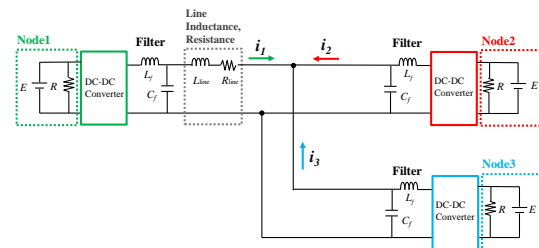


図5 3ノード3リンク直流マイクログリッド実験用ミニシステムの回路図

表1 検討条件

The number of levels	m	2-level	7-level	
Node voltage [V]	E	200		
Reference of duty ratio	d	0.5		
Deadtime [ns]	T_d	200		
Filter capacitance [nF]	C_f		18	
PWM switching frequency [kHz]	f_{PWM}	83.3	500	500
Filter inductance [mH]	L_f	60	10	1.8
Measured efficiency	η	95.2 %	93.6 %	95.6 %

レベルコンバータの比較を行った。表1より、この条件では7レベルの方が2レベルの1/33のフィルタパラメータとすることが出来ることが分かった。

これらの設計値を用いて2レベルコンバータと7レベルフライングキャパシタコンバータをそれぞれ3台ずつ試作し、図5および6のように直流マイクログリッドの一部を模

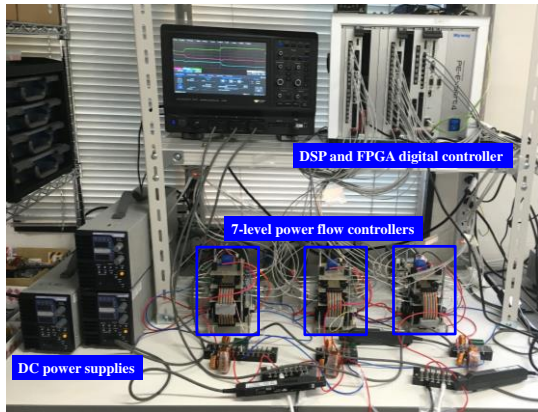


図6 3台のマルチレベル電力変換器を用いて構築した3ノード3リンク直流マイクログリッド実験用ミニシステム

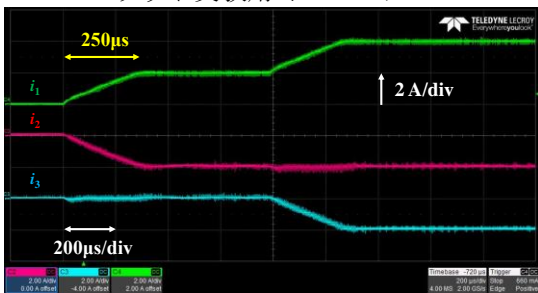


図7 2レベルコンバータを用いた際の実験波形 ($f_{PWM}=500$ kHz)

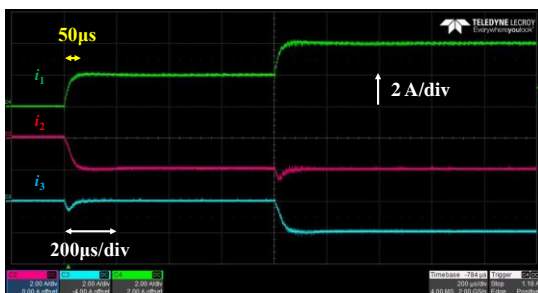


図8 7レベルコンバータを用いた際の実験波形 ($f_{PWM}=500$ kHz)

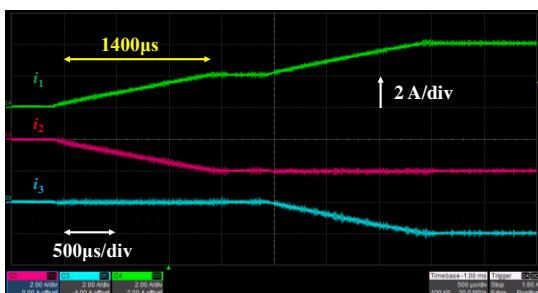


図9 2レベルコンバータを用いた際の実験波形 ($f_{PWM}=83.3$ kHz)

擬した3ノード3リンクの実験システムを構築した。図7から図9に、本実験システムにおいて電流指令値を2回ステップ的に変化させた際の各ノードの電流実測波形を示す。電流の応答速度は、出力フィルタのパラメータに大きく影響を受け、7レベルコンバータでは、効率を揃えた比較条件であるスイッチング周波数 83.3kHz の場合の2レベルコンバータと比較して、応答速度を28倍速くすることができることを実証した。この応答速度の向上は、将来的には直流マイクログリッド全体の安定性の向上に寄与すると考えられる。

(2)フライングキャパシタ線形増幅回路

回路シミュレーションによる動作解析の後、理論効率の導出を行った。先に提案されている別方式ダイオードクランプ線形増幅回路の理論効率も併せて導出し、フライングキャパシタ線形増幅回路の長所および短所を数式的に明らかにした。図10の赤色のプロットは、導出した理論式を用いて、回路を構成する MOSFET の直接接続数を横軸として示した変換効率である。理想的には、素子直列接続数を増やすほど、効率を高めることが出来るが、実際のパワー半導体デバイスの損失を考慮すると、ある直列接続数の点に最高効率点が現れることが分かる。ただし、この図は試作に用いた実際のデバイスのパラメータを使用して計算した一設計例であり、最適な設計によりさらに効率を向上させることが可能である。

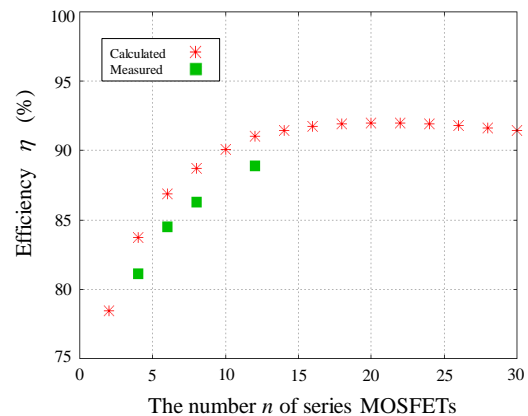


図10 FCLAの変換効率

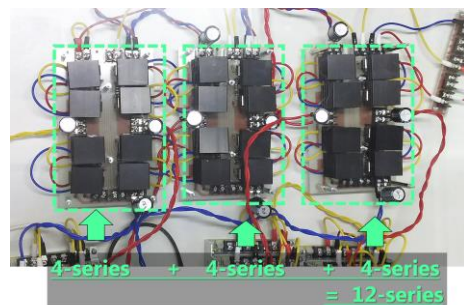


図11 12直列FCLA試作回路

実機検証として、図 1 1 のような試作回路を製作した。フライングキャパシタ線形増幅回路は、その回路構成から、回路の一部を 1 モジュールとし、その同一モジュールの接続数を変えることにより、回路の素子直列接続数を変えることができる。本試作では、2 直列回路および 4 直列回路の 2 つの単位モジュールを開発し、その組み合わせにより 4, 6, 8, 12 直列回路を構成し、動作試験を行った。図 1 0 の緑色のプロットは、各回路で実測した効率である。理論値よりは低い値となっているが傾向は一致しており、素子直列数を増やすほど効率を向上させることができることを確認した。図 1 2 は 12 直列回路の動作波形である。本提案回路で特徴的なのは、各 MOSFET のドレイン-ソース間電圧が、素子数を増やすほど低くなる点であり、12 直列回路では、直流入力電圧 144V に対して、各

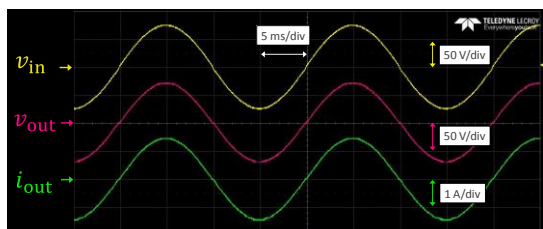
MOSFET のドレイン-ソース間電圧は、最大でも 1/12 の 12V になっていることが分かる。素子直列数を増やすほど、各 MOSFET に印加される電圧を低くすることが出来るため、線形動作時の損失を低減することが出来、高効率化が可能であることを実験で確認することができた。12 直列回路では、効率の実測値が 88.9%であった。これは従来方式の B 級アンプの理論効率 78.5%に対して 10%以上もの効率改善を実現したことになり、リニアアンプを電力変換用途に応用できる可能性を示したといえる。

なお、本提案回路については、特許出願済みである。また、2 年間の成果をまとめて 3 本の論文を投稿中である。

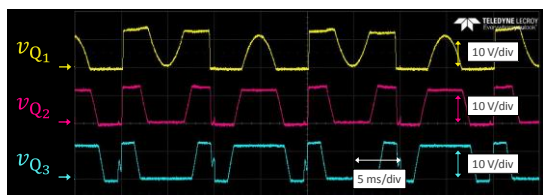
5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

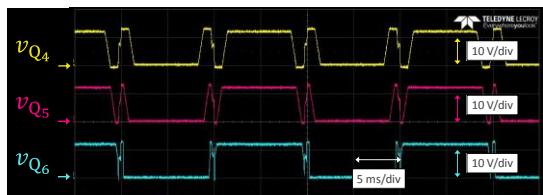
- ① Hidemine Obara, Tatsuki Ohno, and Atsuo Kawamura: "Multi-Level Topology Based Linear Amplifier Family for Realization of Noise-Less Inverters", The 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-ECCE Asia), pp. 1649-1654, 2018-5.
- ② Tatsuki Ohno, Masaya Katayama, Hidemine Obara, and Atsuo Kawamura: "Flying Capacitor Linear Amplifier to Realize Both High-efficiency and Low Distortion for Power Conversion Applications Requiring Highquality Waveforms", IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) 2017, 338, pp.907-912, 2017-12.
- ③ Masaya Katayama, Tatsuki Ohno, Hidemine Obara, and Atsuo Kawamura: "Study on Application of Multilevel Converter to Realize Fast Current Control in DC Microgrid with Extremely Low Impedance Interconnections", IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) 2017, 343, pp.697-702, 2017-12.
- ④ 片山 正也, 大野 達樹, 小原 秀嶺, 河村 篤男: 「マルチレベルコンバータによる直流マイクログリッドの擾乱抑制効果に関する基礎検討」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 1-103, pp. 465-468, 2017-8.
- ⑤ 大野 達樹, 片山 正也, 小原 秀嶺, 河村 篤男: 「フライングキャパシタ形線形増幅回路の実験検証」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 1-104, pp. 469-472, 2017-8.



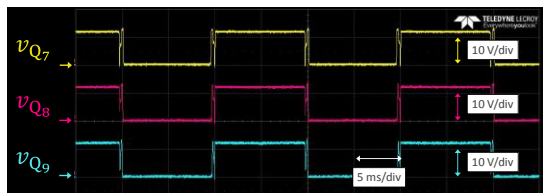
(a) 入力電圧, 出力電圧, 出力電流



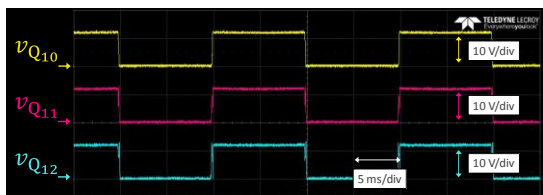
(b) MOSFET Q₁, Q₂, Q₃ のドレイン-ソース間電圧



(c) MOSFET Q₄, Q₅, Q₆ のドレイン-ソース間電圧



(d) MOSFET Q₇, Q₈, Q₉ のドレイン-ソース間電圧



(e) MOSFET Q₁₀, Q₁₁, Q₁₂ のドレイン-ソース間電圧

図 1 2 12 直列 FCLA 試作回路の動作波形

- ⑥ 片山 正也, 大野 達樹, 小原 秀嶺, 河村 篤男:「直流マイクログリッドにおける高速電流制御実現のためのマルチレベルコンバータ適用に関する検討」, 平成 29 年電気学会全国大会, 4-122, pp.207-208, 2017-3.
- ⑦ 大野 達樹, 片山 正也, 小原 秀嶺, 河村 篤男:「フライングキャパシタ形線形増幅回路の提案および動作解析」, 平成 29 年電気学会全国大会, 4-164, pp.285-286, 2017-3.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 線形増幅器、及び電力変換装置
発明者: 小原 秀嶺, 大野 達樹, 片山 正也, 河村 篤男
権利者: 横浜国立大学
種類: 特許
番号: 特願 2017-47150
出願年月日: 2017 年 3 月 13 日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kawalab.dnj.ynu.ac.jp/html/obara/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小原 秀嶺 (OBARA, Hidemine)
横浜国立大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 5 0 7 7 2 7 8 7