

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02126

研究課題名(和文) 電磁ノイズを発生しないパワーエレクトロニクス基盤技術の創生

研究課題名(英文) Creation of Fundamental Technology for Noise-Free Power Electronics

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・准教授

研究者番号：50772787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、電磁ノイズや高調波といった電力変換器が発生する広義のノイズの問題を対症的ではなく本質的なアプローチで解決することを目指し、高効率かつノイズフリーを実現する新しい電力変換方式の基盤技術創生に取り組んだ。パワー半導体デバイスのスイッチング動作を行わずに高効率とノイズフリーを実現する電力変換回路方式としてマルチレベルリニアアンプの概念を提案し、基本となる3つの回路方式と応用回路方式について動作特性をまとめ、実験実証を行った。さらに、高効率化のための多数のパワーデバイスの実装方法として半導体1チップへの集積化を試み、8つのMOSFETを1チップに実装した5レベルインバータを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度な電力変換を行うインバータ等の電力変換装置は、現代の高度電力化社会に必要な不可欠なものとして重要な役割を担っている。パワー半導体デバイスや回路技術の発展により、今や電力変換回路の効率は95%以上が当たり前となっているが、このような高効率化のためにはパワー半導体デバイスを高速にスイッチング動作させる必要があり、近年のSiCやGaNといった高速動作可能なデバイスの登場も相まって電磁ノイズの問題が顕在化している。本研究成果は、このような電磁ノイズの問題を根本的に解決し、周囲の機器への悪影響や大きなノイズフィルタに頼らない低コストの電力変換装置の実現に貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：This research aims to solve the problem of noise generated by power converters such as electromagnetic interference and harmonics with a fundamental approach rather than a symptomatic approach. The concept of a multi-level linear amplifier has been proposed as a new power conversion principle and circuits that achieve high efficiency and noise-free without switching operation of power semiconductor devices. Operation characteristics of three basic topologies and advanced topologies have been analyzed and summarized, and they were experimentally verified in laboratory prototypes. Furthermore, as an implementation method for a large number of power devices to achieve higher efficiency in the multilevel converters, a monolithic IC consisting of eight MOSFETs was designed and developed. A 5-level inverter using the prototype IC with eight MOSFETs has been experimentally verified.

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 マルチレベルリニアアンプ マルチレベルコンバータ 電磁ノイズ 高効率
モジュラーカスケードリニアアンプ(MCLA) フライイングキャパシタリニアアンプ(FCLA) ダイオード
ドクランプリニアアンプ(DCLA)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

電気自動車や鉄道といった輸送機関, 太陽光発電や風力発電などの系統連系, エアコンやLED照明などの家電, 大小様々な産業機械などにおいて, 高度な電力変換を行うインバータ等の電力変換器は, 現代の高度電力化社会に必要な不可欠なものとして重要な役割を担っている。電力変換器がこのような普及した最も大きな原因の一つは, 高い変換効率の達成によるものである。パワー半導体デバイスのオン, オフ動作(スイッチング動作)のみを用いることで, 原理的には電圧と電流の積である素子損失が常にゼロとなる。実際の半導体デバイスはオン, オフの切り替わりに有限の時間がかかり, オン時の抵抗分も排除しきれないが, 近年のパワー半導体デバイスの高性能化により, 今やインバータの変換効率は95%以上が当たり前である。しかしながら, 現在の電力変換器の特性が必要十分な水準に達しているかという点, 必ずしもそうとは言えない。特に, スwitching動作と回路内の寄生成分に起因して発生してしまう電磁ノイズに関しては, 本質的な解決が図られておらず, 対症的にノイズフィルタを接続して, なんとか基準を満たすように抑圧しているのが現実である。本研究は, 今後の電力変換器のますますの普及と応用範囲の拡大を見据え, これまであまり取り組まれて来なかった電磁ノイズや高調波といった電力変換器が発生する広義のノイズの問題を対症的ではなく, 本質的なアプローチで解決することを目指すものである。

2. 研究の目的

本研究は, これまで研究代表者が取り組んできた「スイッチング動作を行わない高効率かつ電磁ノイズレスの電力変換技術」を基に, 標準回路方式を提案, 実証し, 本質的に電磁ノイズを発生しない新しいパワーエレクトロニクス分野の基盤技術を生み出そうとするものである。本質的に電磁ノイズを発生しないパワーエレクトロニクスを実現し得る電力変換回路方式として, 以下の2通りが考えられる。

- (1) マルチレベル電力変換器
 - 原理的に高効率な電力変換器の内部を低電圧のスイッチング動作のみで実現することによって電磁ノイズを低減する回路方式
- (2) マルチレベルリニアアンプ
 - 原理的に電磁ノイズを発生しないリニアアンプの内部を低電圧の線形動作のみで実現することによって効率を高める回路方式

表1にこれらの比較を示す。(1)マルチレベル電力変換器(以下, ML電力変換器)は, 回路内に入力電圧よりも低い複数の直流電圧を保持し, それらの組み合わせによって複数の電圧値を出力することのできる電力変換器で, 用いるパワー半導体デバイスの数(出力レベル数)を増や

表1 マルチレベル電力変換器とマルチレベルリニアアンプとの比較

回路方式	マルチレベル電力変換器	マルチレベルリニアアンプ																																																																				
一相分の回路図	<p>5レベルフライングキャパシタ電力変換器</p>	<p>4直列フライングキャパシタリニアアンプ</p>																																																																				
素子数とTHD	<table border="1"> <caption>THD [%] vs 出力レベル数</caption> <thead> <tr> <th>出力レベル数</th> <th>THD [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>100.0</td></tr> <tr><td>3</td><td>52.3</td></tr> <tr><td>5</td><td>26.9</td></tr> <tr><td>7</td><td>18.2</td></tr> <tr><td>9</td><td>13.8</td></tr> <tr><td>11</td><td>11.1</td></tr> <tr><td>13</td><td>9.26</td></tr> <tr><td>15</td><td>7.96</td></tr> <tr><td>17</td><td>6.98</td></tr> <tr><td>19</td><td>6.22</td></tr> <tr><td>21</td><td>5.60</td></tr> <tr><td>23</td><td>5.10</td></tr> <tr><td>25</td><td>4.70</td></tr> </tbody> </table> <p>理想的には変換効率は100%</p>	出力レベル数	THD [%]	2	100.0	3	52.3	5	26.9	7	18.2	9	13.8	11	11.1	13	9.26	15	7.96	17	6.98	19	6.22	21	5.60	23	5.10	25	4.70	<table border="1"> <caption>効率 η [%] vs 素子直列数 n</caption> <thead> <tr> <th>素子直列数 n</th> <th>効率 η [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>84</td></tr> <tr><td>3</td><td>88</td></tr> <tr><td>4</td><td>90</td></tr> <tr><td>5</td><td>91</td></tr> <tr><td>6</td><td>92</td></tr> <tr><td>7</td><td>93</td></tr> <tr><td>8</td><td>94</td></tr> <tr><td>9</td><td>94.5</td></tr> <tr><td>10</td><td>95</td></tr> <tr><td>11</td><td>95.5</td></tr> <tr><td>12</td><td>96</td></tr> <tr><td>13</td><td>96.5</td></tr> <tr><td>14</td><td>97</td></tr> <tr><td>15</td><td>97.5</td></tr> <tr><td>16</td><td>98</td></tr> <tr><td>17</td><td>98.5</td></tr> <tr><td>18</td><td>99</td></tr> <tr><td>19</td><td>99.5</td></tr> <tr><td>20</td><td>100</td></tr> </tbody> </table> <p>目標効率95%</p> <p>理想的には高調波, 電磁ノイズは発生しない</p>	素子直列数 n	効率 η [%]	2	84	3	88	4	90	5	91	6	92	7	93	8	94	9	94.5	10	95	11	95.5	12	96	13	96.5	14	97	15	97.5	16	98	17	98.5	18	99	19	99.5	20	100
出力レベル数	THD [%]																																																																					
2	100.0																																																																					
3	52.3																																																																					
5	26.9																																																																					
7	18.2																																																																					
9	13.8																																																																					
11	11.1																																																																					
13	9.26																																																																					
15	7.96																																																																					
17	6.98																																																																					
19	6.22																																																																					
21	5.60																																																																					
23	5.10																																																																					
25	4.70																																																																					
素子直列数 n	効率 η [%]																																																																					
2	84																																																																					
3	88																																																																					
4	90																																																																					
5	91																																																																					
6	92																																																																					
7	93																																																																					
8	94																																																																					
9	94.5																																																																					
10	95																																																																					
11	95.5																																																																					
12	96																																																																					
13	96.5																																																																					
14	97																																																																					
15	97.5																																																																					
16	98																																																																					
17	98.5																																																																					
18	99																																																																					
19	99.5																																																																					
20	100																																																																					
素子数と効率																																																																						

すほど素子一つ当たり印加される電圧を低くすることが出来る。その結果、ノイズや出力高調波を通常の電力変換器(2レベルに相当)に比べて低減することが出来る。今日のパワーエレクトロニクス常識に従ってスイッチング動作を用いているため、変換効率は理想的には100%であり、原理的に、ノイズや高調波が発生してしまうが、出力レベル数を増やすほどこれらを低減することが出来る。出力電圧の全高調波ひずみ率(THD)は、表1左下の図のように求めることができ、究極的には、出力レベル数を無限大にするとTHDが0となり、高調波や電磁ノイズを発生しない電力変換器を実現することができる。

他方、(2)マルチレベルリニアアンプ(以下、MLLA)は、ML電力変換器と同様に、回路内に入力電圧よりも低い複数の直流電圧を保持し、オンとオフの中間の領域で線形動作するパワー半導体デバイスの印加電圧を低減することで、通常のリニアアンプの短所である効率を改善することのできる電力変換回路方式である。スイッチング動作を用いないため、理想的にはノイズや高調波は発生しない。一方、線形動作により損失は発生してしまうが、表1右下の図のように素子直列数を増やすほど効率を高めることができる。究極的には、素子直列数を無限大にすると効率を100%にすることができる。

以上のように、電力変換方式の原理を突き詰めると、デバイス数を増やすほど、ML電力変換器は、スイッチング動作の方面から「高効率で電磁ノイズを発生しない電力変換器」に近づき、MLLAは、線形動作の方面から「電磁ノイズを発生しない高効率な電力変換器」に近づく。このように、2方式は、電力変換の原理として対極的な特性を有しているが、デバイス数(出力レベル数もしくは直列素子数)を飛躍的に増やすことで、効率100%かつノイズフリーの同じ極限に帰着する。本研究では、このアナロジーを体系立て、電力変換器の効率とノイズの関係を任意に設計できるようにし、最終的にノイズフリーかつ高効率な電力変換を実現することを目指す。

3. 研究の方法

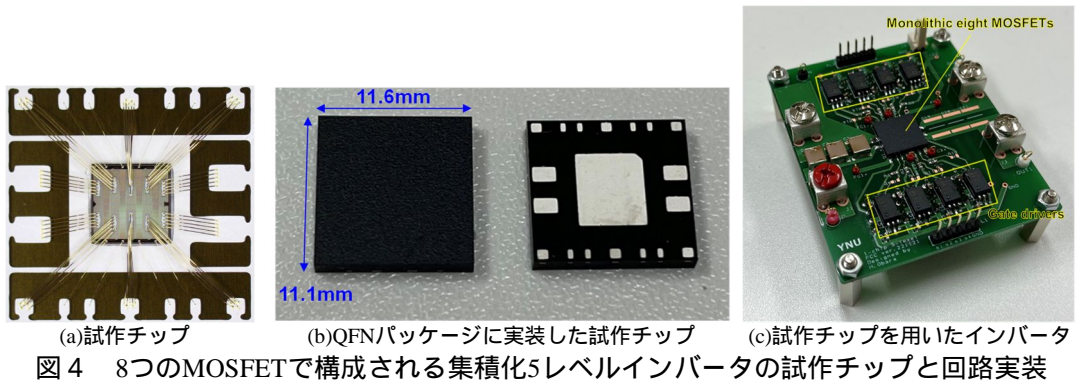
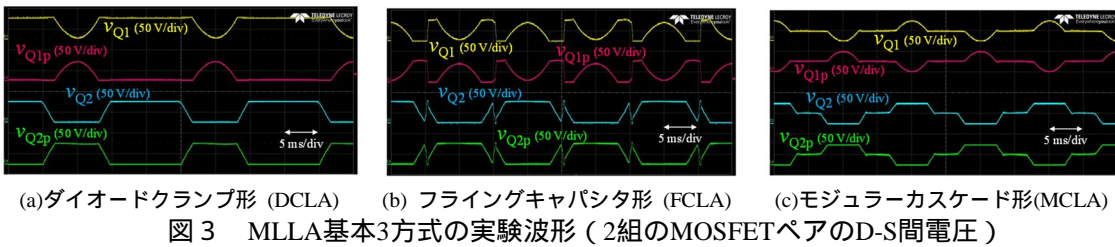
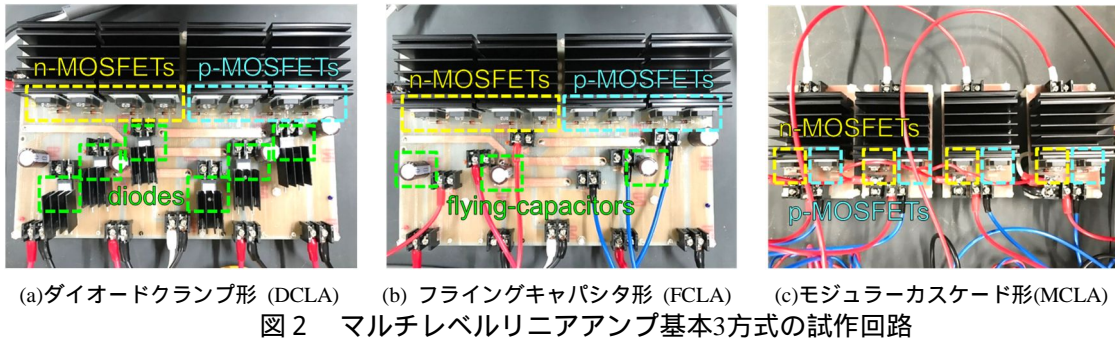
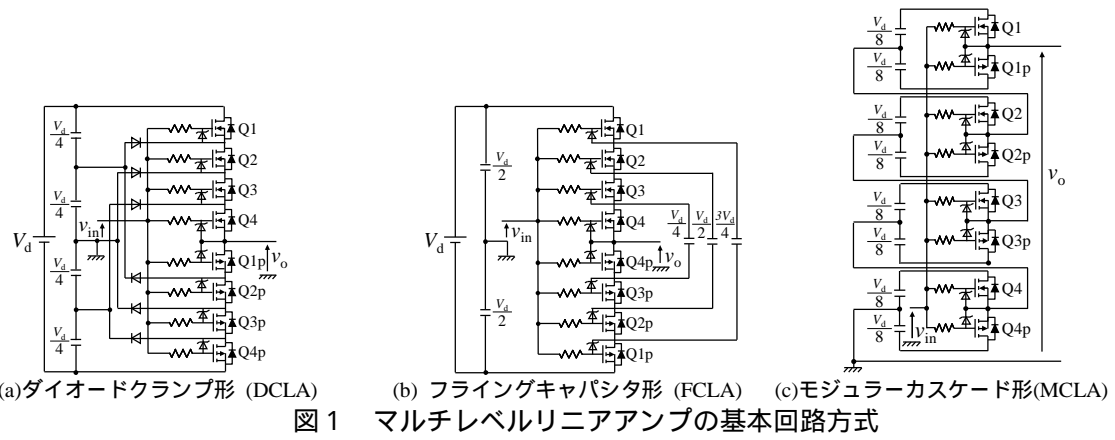
(1)ML電力変換器については、申請者を含め、これまで多くの研究者が研究に取り組んでおり、一電力変換回路方式としてある程度成熟した技術となっている。しかしながら、本研究で目指す電磁ノイズを発生しない電力変換器を実現するためには、レベル数を飛躍的に増やす必要があり、膨大な数のパワー半導体デバイスを現実的に実装するためには集積回路技術の導入が必要不可欠である。本研究では、弱電分野では常識となっているICやLSIといった1つの半導体チップ上に多数の半導体デバイスを実装する技術を電力が2桁以上大きなパワー半導体デバイスの世界へ適用することに挑む。これにより、多レベルの電力変換回路を半導体1チップ上に実装する。一方、(2)MLLAについては、申請者のこれまでの研究を除けば先行研究はほとんど無く、各回路方式の動作解析、実験実証を進め、設計論の確立を目指す。

4. 研究成果

これまで広く研究され明らかになっているML電力変換器の基本3回路方式を基にし、図1のダイオードクランプリニアアンプ(DCLA)、フライングキャパシタリニアアンプ(FCLA)、モジュラーカスケードリニアアンプ(MCLA)の3回路方式がMLLAの動作の基本となることを明らかにした。DCLAは、2007年に提案された方式であるが、申請者の提案したFCLAおよびMCLAが同様のメカニズムで線形動作時の損失を低減できることから、これらを基本3回路方式として定義した。これらの回路動作は、図2の試作回路において実証している。3回路方式は同様の損失低減メカニズムで動作するが、図3のように各MOSFETの動作が異なり回路全体としての動作特性も異なるため、動作解析を行い、それぞれの得失を明らかにした。

さらに、これらの基本3回路を基にして多数の応用回路が成立することが分かり、その中の一回路方式として、MCLAを基にした応用回路を提案、実証した。これは、従来のB級線形増幅回路を1モジュールとして複数カスケード接続した方式であり、動作特性の自由度が高いことから、現在のところ最も高い効率を実現できる回路方式である。さらに、各B級線形増幅回路の直流側電圧を不均等にすることで、素子数を増やすことなく高効率化が可能であることが分かり、効率の変調率依存性、負荷率依存性を定量的に明らかにした。

他方、ML電力変換器としては、多数のパワーデバイスで構成される主回路を1チップIC化するため、その仕様について検討を行い、5レベルインバータを構成する8つのSi-MOSFETを半導体1チップICで実現した。図4(a)が開発した試作チップであり、最大直流入力200V、チップサイズ4×4mmの仕様で設計試作した。この試作チップを図4(b)の専用開発したQFNパッケージに実装し、さらにそれを図4(c)のように回路基板に実装することで5レベルフライングキャパシタインバータを実現した。効率向上や放熱性能に課題があることが分かったが、直流入力電圧180V、出力交流電流1Aで所期の動作を実証し、将来的に半導体の量産効果を利用して低コストで使用する素子数を増やせる見込みを得た。本チップは、ゲート回路の構成を変更することでMLLAとしても動作可能であり、また複数チップを使用することでレベル数を増やすこともできるため、様々な仕様のML電力変換器やMLLAを実現できる見込みである。以上より、ノイズフリーと高効率を同時に実現する電力変換技術の基礎を構築した。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Miguchi Yasuhiko, Setiadi Hadi, Nasu Yoshiki, Obara Hidemine, Kawamura Atsuo	4. 巻 3
2. 論文標題 Control Scheme for Leading Power Factor Operation of Single-Phase Grid-Connected Inverter Using an Unfolding Circuit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of Power Electronics	6. 最初と最後の頁 468 ~ 480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJPEL.2022.3190559	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 -
1. 著者名 Obara Hidemine, Ohno Tatsuki, Kawamura Atsuo	4. 巻 9
2. 論文標題 Systematization of a Multilevel-Topology-Based Linear Amplifier Family for Noiseless DC?AC Power Conversion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 159627 ~ 159639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3130681	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 -
1. 著者名 Setiadi Hadi, Obara Hidemine	4. 巻 11
2. 論文標題 Multilevel Cascaded H-Bridge Linear Amplifier with Unequal DC Capacitor Voltages Using a DC Voltage Source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 522 ~ 530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21011915	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 -
1. 著者名 Obara Hidemine, Ohno Tatsuki, Katayama Masaya, Kawamura Atsuo	4. 巻 57
2. 論文標題 Flying-Capacitor Linear Amplifier With Capacitor Voltage Balancing for High-Efficiency and Low Distortion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 614 ~ 627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2020.3034560	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hidemine Obara and Keiichi Matsushima
2. 発表標題 Efficiency Improvement of Flying-Capacitor Linear Amplifier by Unequal Capacitor Voltage Ratio
3. 学会等名 International Power Electronics Conference 2022 (IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hidemine Obara
2. 発表標題 Development of a Monolithic Five-Level Flying Capacitor Converter with Extendability for the Number of Levels
3. 学会等名 International Conference on Power Electronics - ECCE Asia (ICPE 2023-ECCE Asia) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidemine Obara and Keiichi Matsushima
2. 発表標題 A Study on Flying Capacitor Linear Amplifier Configured by Only N-channel MOSFETs
3. 学会等名 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松島敬一, Hadi Setiadi, 小原秀嶺
2. 発表標題 フライングキャパシタ線形増幅回路における不均等なキャパシタ電圧比を用いた高効率化
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Setiadi Hadi, 小原秀嶺, 河村篤男
2. 発表標題 Study on Advanced Modular Cascaded Linear Amplifier with Unequal Capacitor Voltages of H-bridge Cells
3. 学会等名 電気学会, 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>横浜国立大学 小原研究室 https://obalab.ynu.ac.jp/</p>
--

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	藤本 康孝 (Fujimoto Yasutaka) (60313475)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究分担者	河村 篤男 (Kawamura Atsuo) (80186139)	横浜国立大学・大学院工学研究院・名誉教授 (12701)	
研究分担者	下野 誠通 (Shimono Tomoyuki) (90513292)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	

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
---------	---------