

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

2021 年度

修士論文

Modular Multilevel Converter (MMC) 型
蓄電池システムの分散モジュール制御

2022 年 1 月 25 日提出
指導教員 馬場 旬平 教授

47206057 曾 希萌

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 電力供給と需要の時間的なインバランス	2
1.1.2 配電システムの混雑	3
1.1.3 電力系統慣性力、同期化力の不足	4
1.1.4 まとめ	6
1.2 研究の目的	8
1.3 研究の構成	10
第 2 章 MMC 型蓄電池システムの構成と動作原理	11
2.1 基本ユニットの構成と動作原理	11
2.2 システム全体の構成と動作原理	13
2.2.1 システム全体の接続方	13
2.2.2 パルスの発生と積み合わせ	13
第 3 章 MMC 型蓄電池システムの分散モジュール制御	16
3.1 従来の MMC の制御手法のデメリット	16
3.2 分散モジュール制御	17
3.3 電圧 droop 制御	19
第 4 章 シミュレーションによる検証	20
4.1 シミュレーション条件	20
4.2 SOC インバランスの低減確認	22
4.3 出力電流 THD 評価	24
4.4 出力電流 THD 対策	26
4.5 ユニット故障時の出力電流 THD	31
第 5 章 結論	34
5.1 本研究の成果	34
5.2 今後の課題	34

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本は石油などの一次エネルギーの大部分を海外に依存しており、低いエネルギー自給率は安定供給の観点から問題である[1]。太陽光等の再生可能エネルギーは国際情勢等に左右されず安定供給できるので、再生可能エネルギーの導入拡大は重要な課題となっている。2012年に固定価格買取制度（Feed-in Tariff FIT）が施行されて、太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入が急速に進み、固定価格買取制度が実行される時点から、2020年6月までに、5700万kWの太陽光発電が導入された、固定価格買取制度が実施する前に導入された560万kWの設備を含めて、約6400万kWの太陽光設備が導入された[2]。

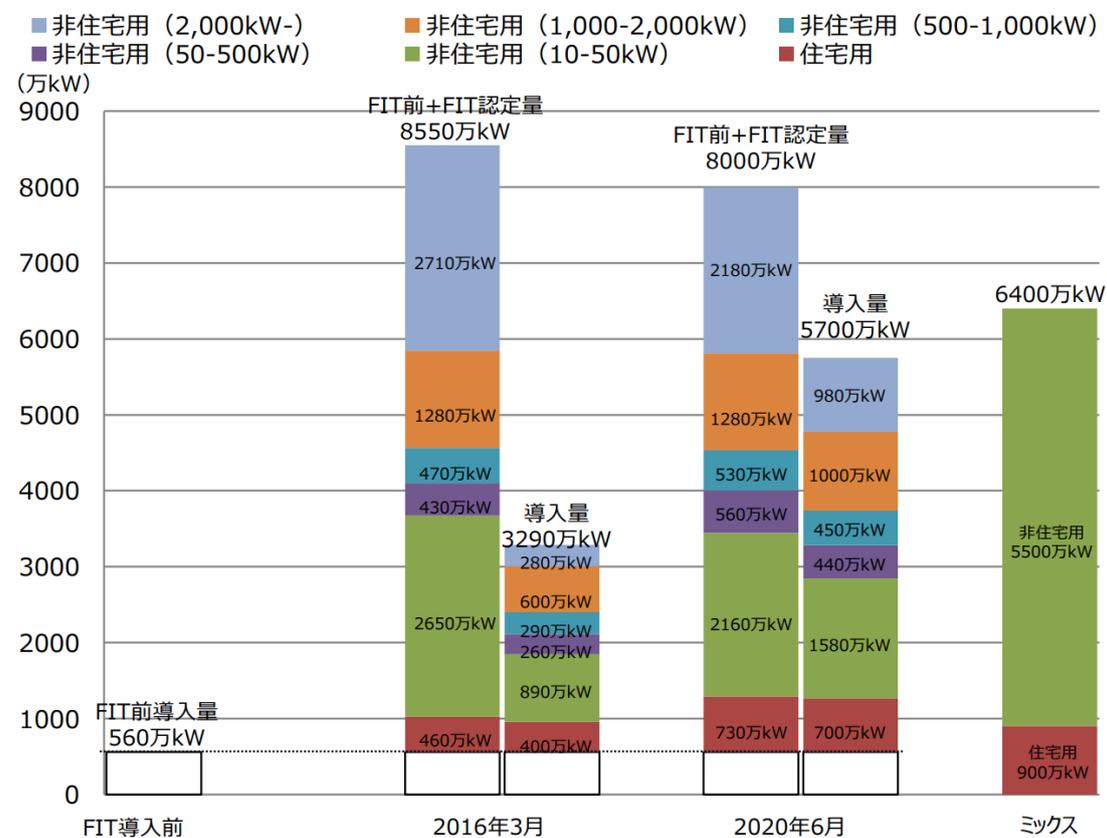


図 1.1 : 日本の太陽光発電の FIT 認定量・導入量[2]

また、発電コストの減少[2]や「2050年カーボンニュートラルを実現する」[3]という日本政府の目標を背景に、今後、太陽光発電はさらに導入されると考えられる。それに伴い、幾つかの課題が懸念されている。

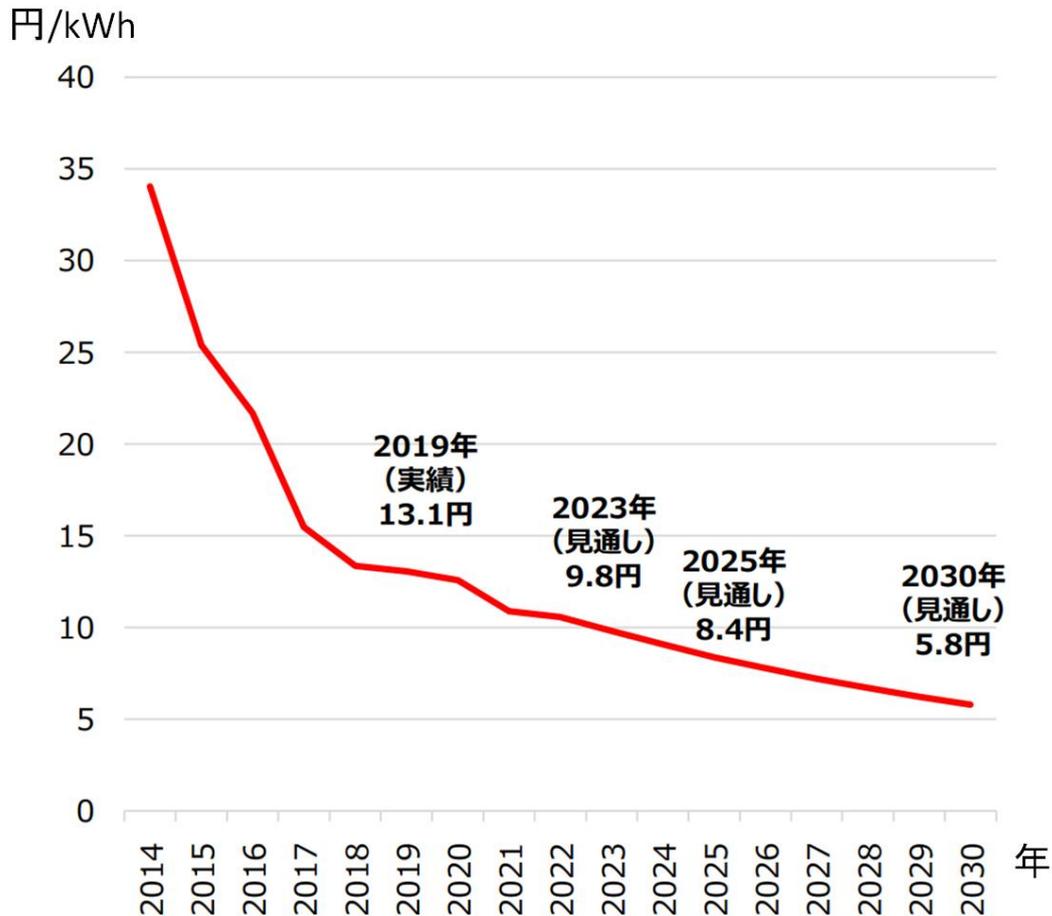


図 1.2：日本の事業用太陽光発電のコストの推移と見通し

1.1.1 電力供給と需要の時間的なインバランス

太陽光発電が大量に導入された九州地区では、需要閑散期の晴天の昼に、再エネの合計出力が需要の 93%に到達し、夕方からは出力が急激に下がる。供給と需要のバランスを取るために、朝から火力発電所を抑制し、昼から揚水動力で電気を貯めて、夕方から火力発電所を増出力させ、揚水発電を利用するなど様々な対策が必要となる。

今後、太陽光発電がさらに導入されると考えられ、供給と需要のインバランスもさらに厳しくなると予想される。この問題の解決のため、電力を蓄蔵できる蓄電池システム (BESS: Battery Energy Storage System) の活躍が期待されている。

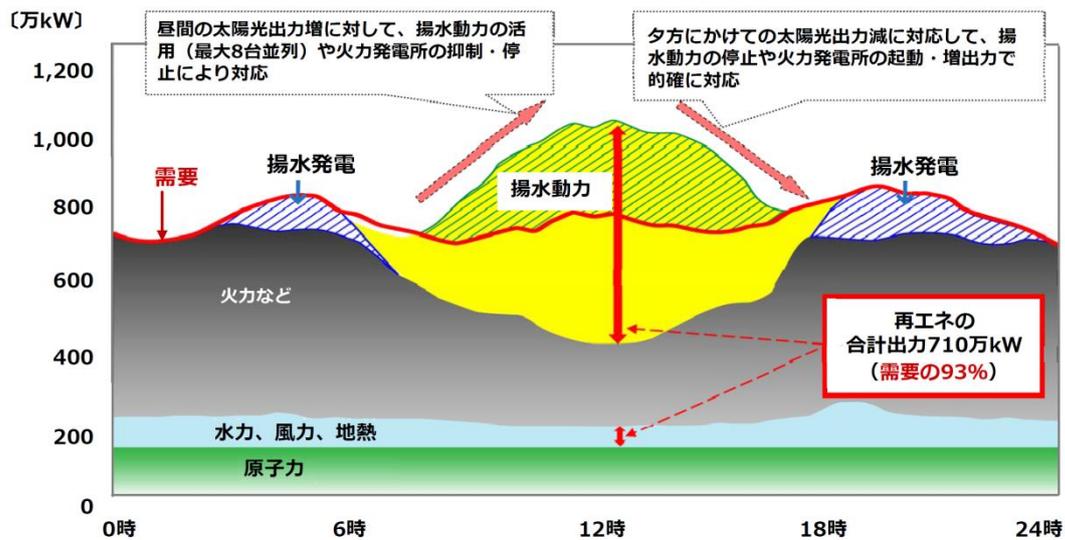


図 1.3 : 2018 年 5 月 3 日の九州の電力需給実績[4]

1. 1. 2 配電系統の混雑

従来の配電系統においては、電力潮流は変電所から需要家への一方にしか流れない。しかし、太陽光発電の導入により需要家から、送電系統に電気が流れることもあり、逆潮流が発生する。配電系統が弱い箇所で、太陽光発電が大量に導入されると、系統末端の電圧値が上限値を超えないように、太陽光発電の出力が抑制される場合がある[5]。

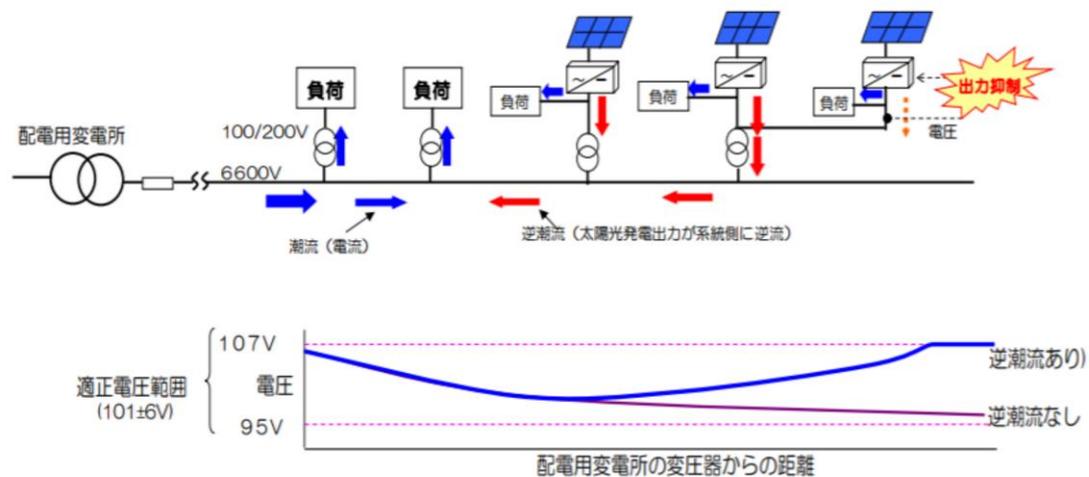


図 1.4 : PV 逆潮流による電圧上昇発生メカニズム[5]

この問題を解決するために、配電系統の適切な場所で、蓄電池システムを設置することで、配電系統の混雑を解消し、系統全体の太陽光発電導入可能容量を増大する研究がある。[6][7]

1. 1. 3 電力系統慣性力・同期化力の不足

太陽光発電や風力発電などのインバータ電源は火力や水力などの同期電源と違い、同期電源のような回転エネルギーを持たず、電力系統の周波数が変化する際、元の周波数を保持する能力がなく、いわゆる慣性力・同期化力を維持する能力を持たない。

今後「再エネ主力電源化」に向けて、再エネ導入量はさらに高いレベルまで増加し、火力発電等の同期電源が減少していくこととなる。同期電源の減少により、電源脱落時の周波数低下スピードが速くなる(周波数変化率(Rate of Change of Frequency)が大きくなる。)周波数変化率 RoCoF が一定値を上回ると、再エネ等の分散電源が解列し、その結果、大規模なブラックアウトにつながる恐れがある。[8]

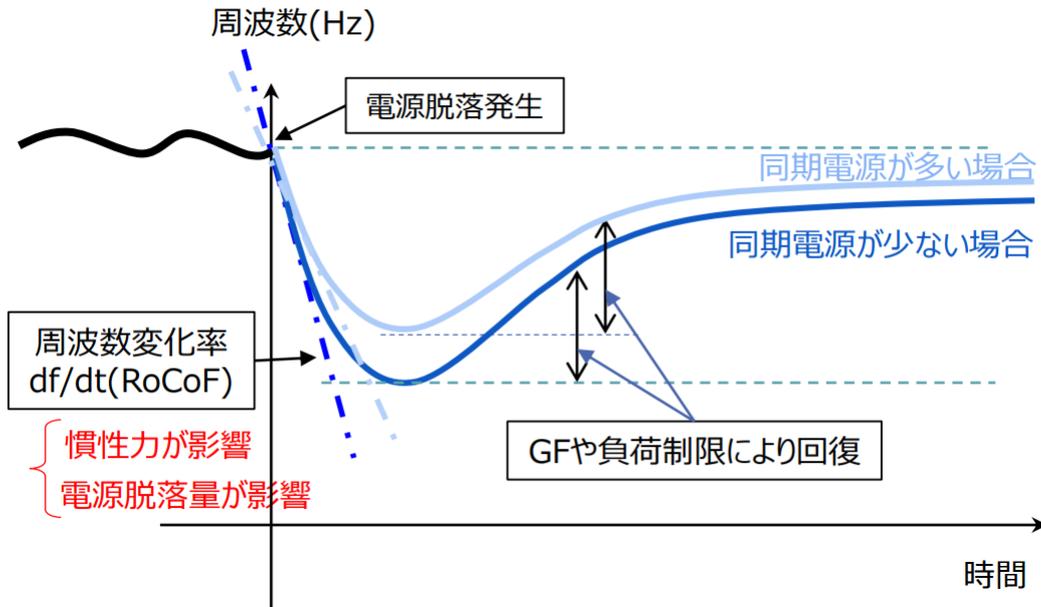


図 1.5 : 慣性力低下のイメージ[8]

この問題を解決するために、グリッドフォーミングインバータ (Grid-Forming Inverter) が提案された[9][10]。グリッドフォーミングインバータは特殊な制御で、電力システムの周波数変動に応じて、出力を変化させることが可能である。電力系統の周波数が低下する時、グリッドフォーミングインバータは出力電力を増大させ、電力系統の周波数が上昇する時、グリッドフォーミングインバータは出力電力を減少させることで、元の周波数を保持するように運転できる。そうすることで、グリッドフォーミングインバータは同期発電機のような特性を持つことになり、電力システムの周波数安定性に貢献できる。

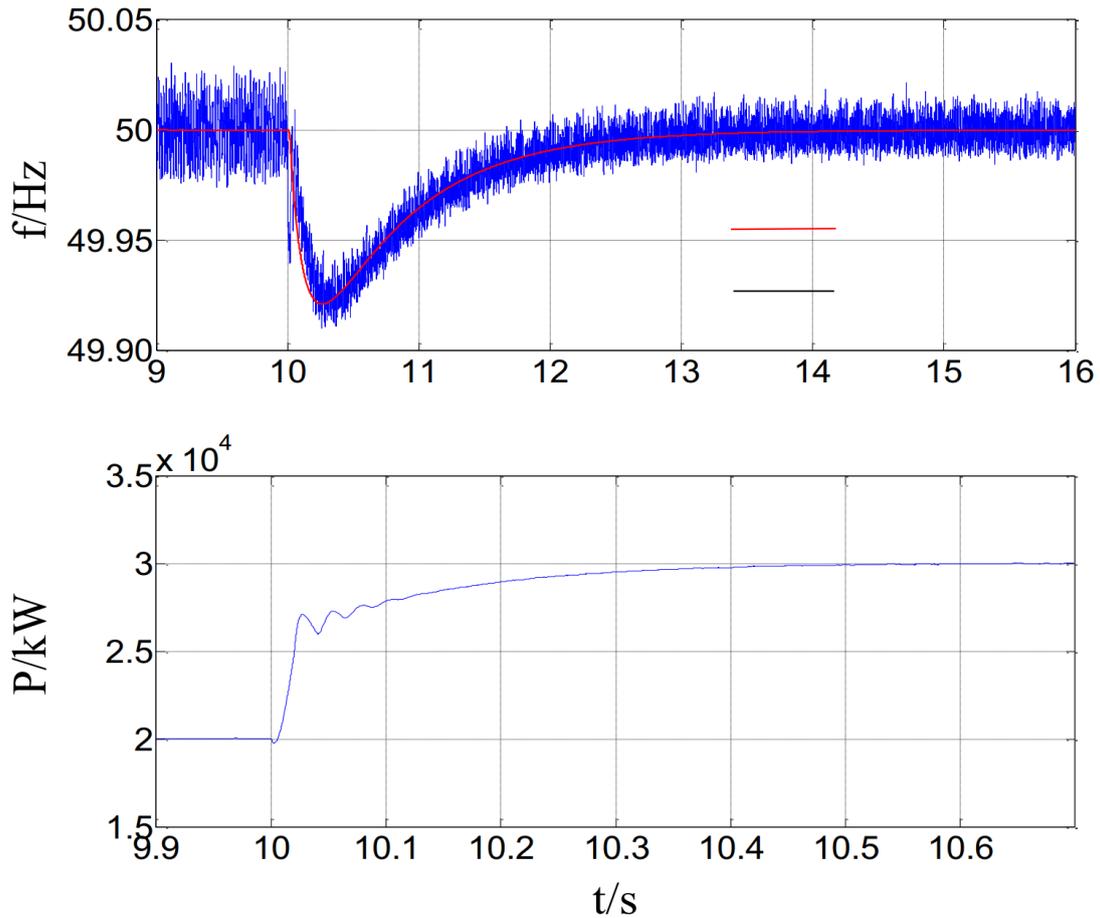


図 1.6 : 電力系統周波数低下時、
グリッドフォーミングインバーターの出カパワー時間変化[11]

図 1.7 はグリッドフォーミングインバーターの系統構成を示す。太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの最大出力は天候により決まるので、システム全体の出力パワーを調整可能にするために、電力貯蔵装置が必要で、その電力貯蔵装置は蓄電池を使用することが多い。

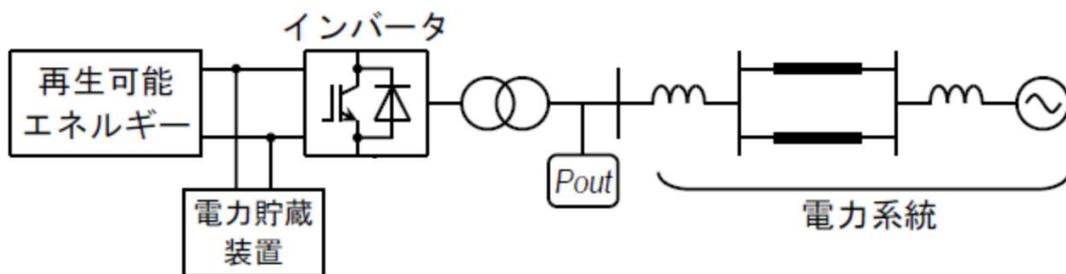


図 1.7 : グリッドフォーミングインバーターの系統図[9]

1.1.4 まとめ

再生可能エネルギーの大量導入に伴う問題を解決するために、蓄電池システムは様々な場所と電圧階級で大量導入されると予想される。

図 1.8 に示す通り、近年、蓄電池の単価が下がり[12]、大容量蓄電池のコストが低減している。しかし、図 1.9 に示す通り、パワーデバイスの耐圧と定格電流は限界がある[13]。

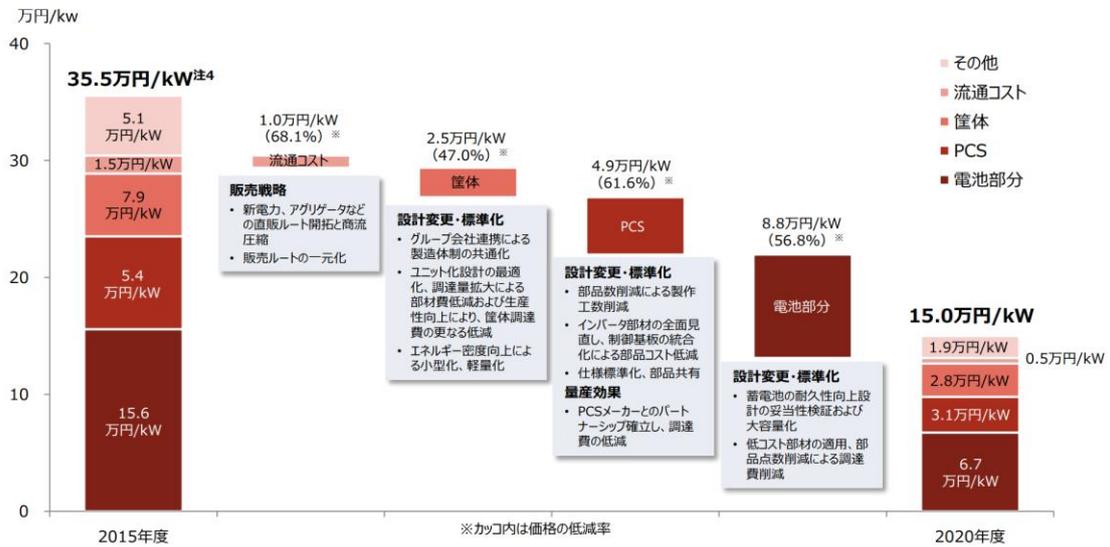


図 1.8：業務・産業用蓄電システムコストの推移[12]

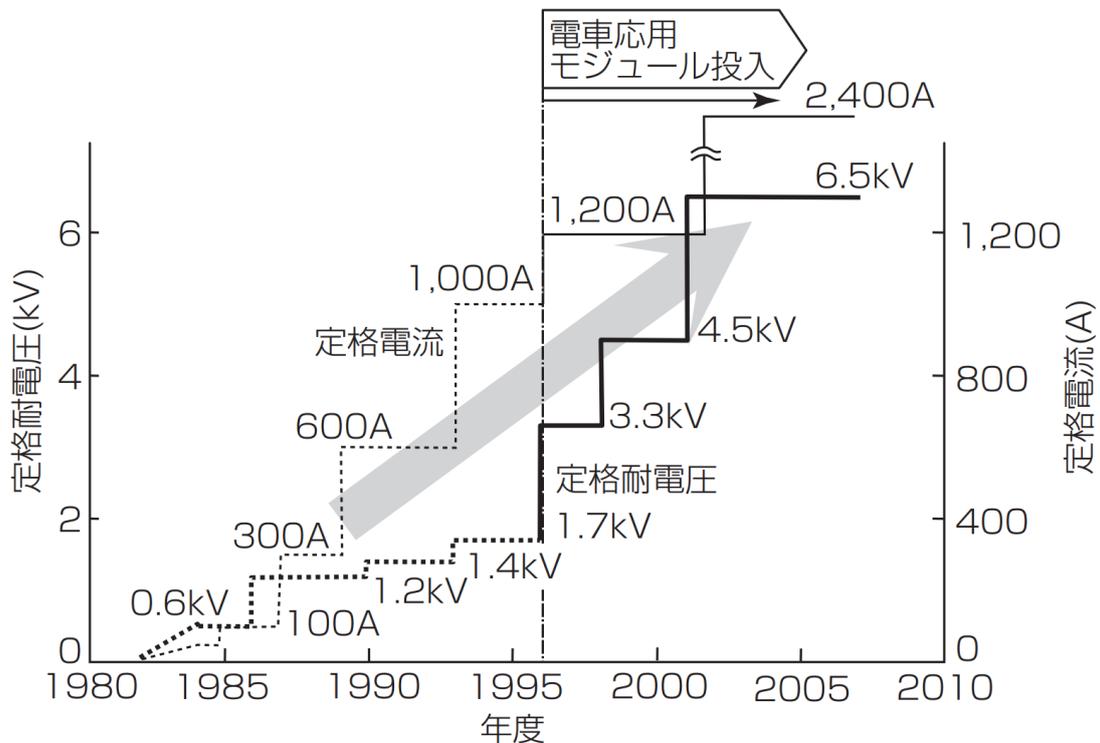


図 1.9：パワーモジュールの定格耐電圧および定格電流の推移[13]

従来の蓄電池システムは蓄電池を直列にし、二象限チョッパを使用し、直流バスと接続する。そして、図 1.10 に示すようなインバータ回路[14]で直流から交流に変換し、電力系統と連系する。

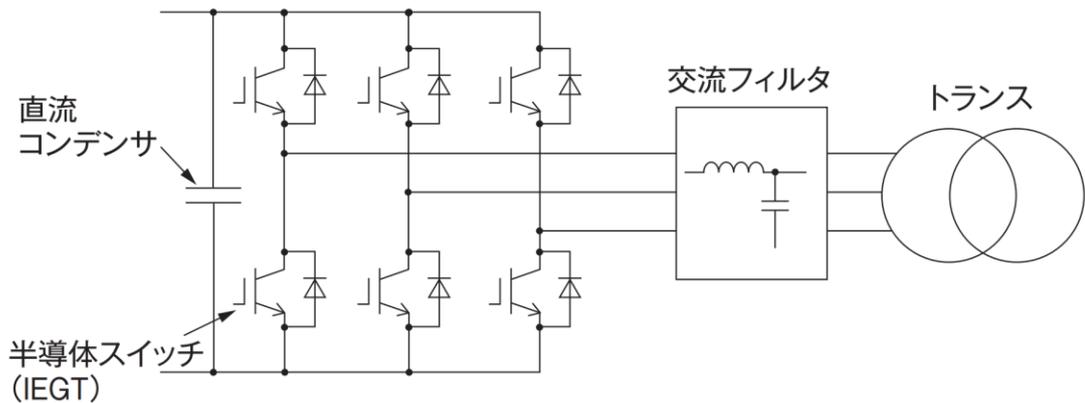


図 1.10 : 従来のインバータ回路[14]

このようなインバータ回路は半導体素子の定格耐圧制限および定格電流制限により、全体の出力電圧および電流が制限され、システムの高電圧化および大容量化が困難である。

1.2 研究の目的

2001年に、R. Marquardt 教授がモジュラーマルチレベル変換器 (MMC : Modular Multilevel Converter) を提案した[15]。MMC 変換器のシステム構成は図 1.11 に示す[14]。

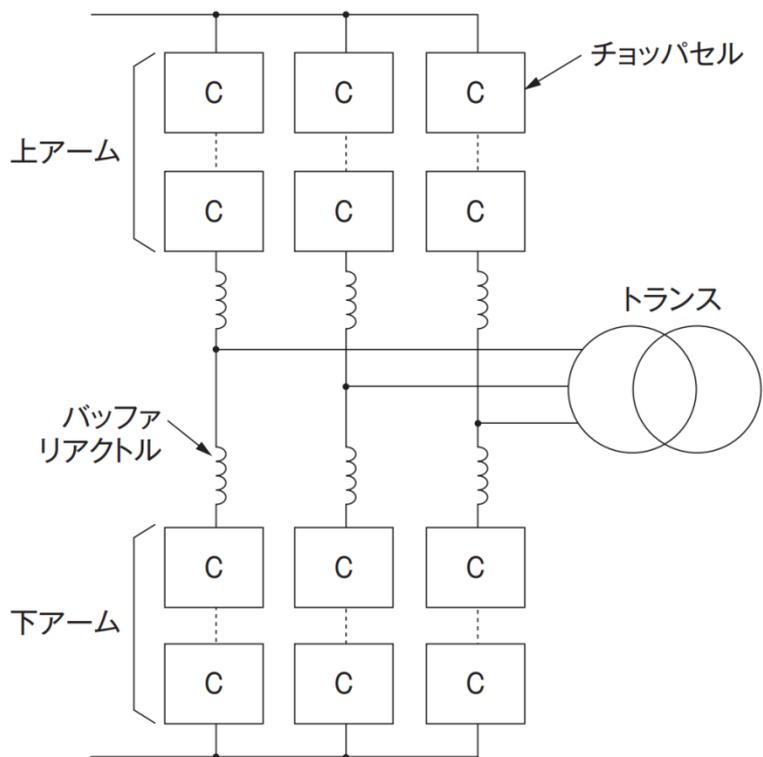


図 1.11 : MMC のシステム構成

MMC のチョップパセルは半導体スイッチとコンデンサで構成される。チョップパセルは図 1.12 の左に示すフルブリッジ式と図 1.12 の右に示すハーフブリッジ式の二種類ある。

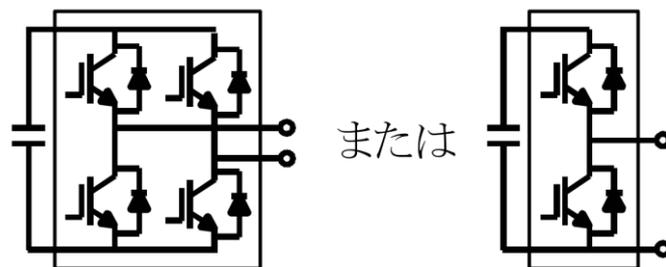
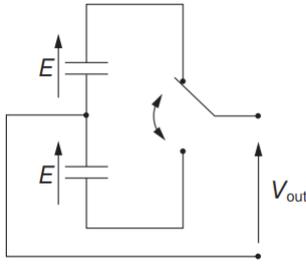
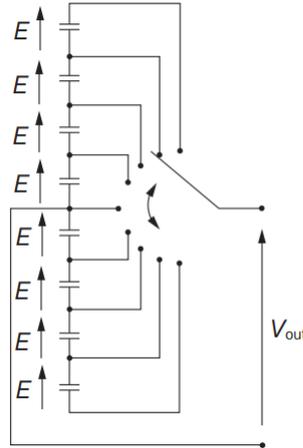
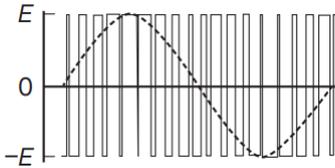
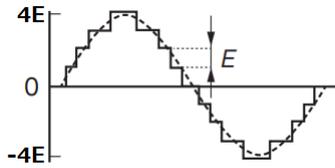


図 1.12 : チョップパセルの回路構成

MMC の一つのチョッパセルの出力電圧は半導体の定格耐電圧に制限されるが、図 1.11 に示すように、大量のチョッパセルを直列することで、高い電圧が得られる。

さらに、表 1.1 に示すように、MMC は従来のインバータ回路より、出力できる電圧レベル数が多く、各チョッパセルの動作タイミングをずらすことで、正弦波に近い波形が出力可能になる。各チョッパセルのスイッチング周波数が比較的に低くても、交流フィルタが不要となり、コストが削減が可能となる[14]。

表 1.1 : 従来方式と MMC 方式の比較[14]

方式	従来方式	MMC 方式
動作原理		
出力電圧波形		

しかし、MMC 変換器が従来のインバータより、スイッチの数が多く、すべてのスイッチを協調して制御する必要があるため、制御システムが複雑になる。MMC は専用の制御器で各スイッチにそれぞれの制御信号を送り、一括して制御することが多い。その原因で、制御システムのコストと信号を伝送する媒質のコストが増える。

本研究の目的はモジュラーマルチレベル変換器 (MMC: Modular Multilevel Converter) の高圧かつ大容量のメリットを利用し、チョッパセルに二象限チョッパと蓄電池を付ける蓄電池システムについて、簡素化と低コスト化を志向した分散モジュール制御方式を開発し、その動作を検証することである。

1.3 研究の構成

本論文の構成は図 1.13 に示す通りである。

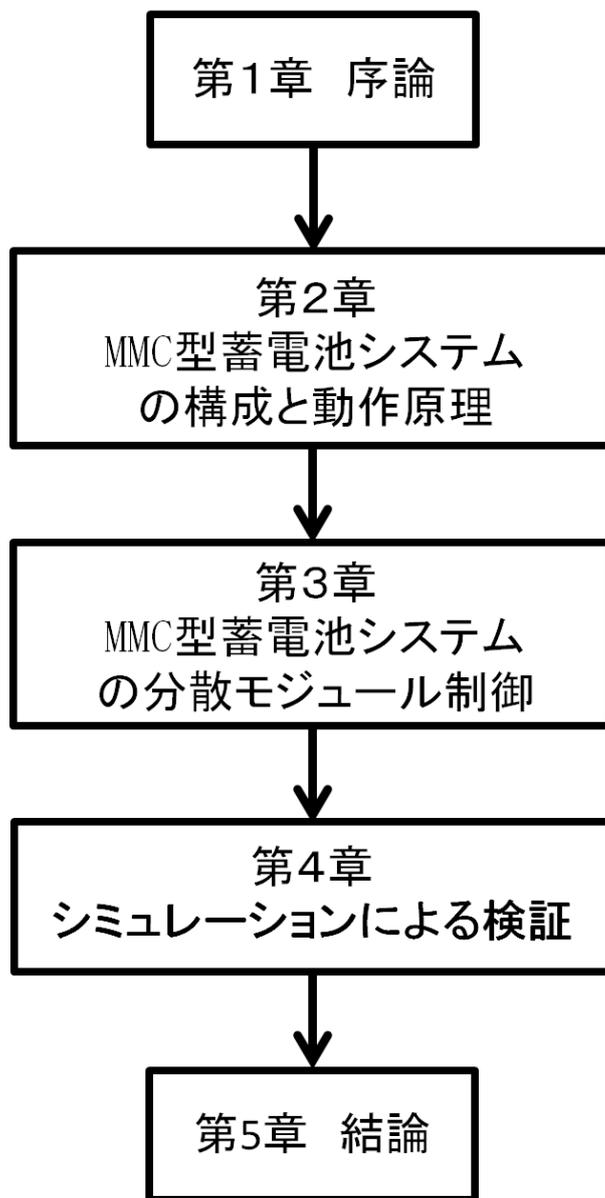


図 1.13 : 本論文の流れ

まず、第 1 章では再生可能エネルギーの大量導入に伴う問題を挙げ、その解決策を提案し、本研究の目的を述べる。第 2 章では、MMC 型蓄電池システムの基本ユニットの構成と全体の構成を紹介し、動作原理を説明する。第 3 章では、MMC を簡素化と低コスト化可能な分散モジュール制御手法を紹介する。更に、分散モジュール制御の課題点 (SOC インバランスと出力電流 THD 問題) を述べる。第 4 章では、シミュレーションを用いて、提案する制御手法により蓄電池が SOC インバランスを解消することを確認し、出力電流 THD を評価する。第 5 章では、本研究の成果と今後の課題を述べる。

第 2 章 MMC 型蓄電池システムの構成と動作原理

2.1 基本ユニットの構成と動作原理

図 2.1 に MMC 型蓄電池システムの基本ユニットを示す。基本ユニットは蓄電池、2 象限チョッパ、単相ブリッジより構成される。

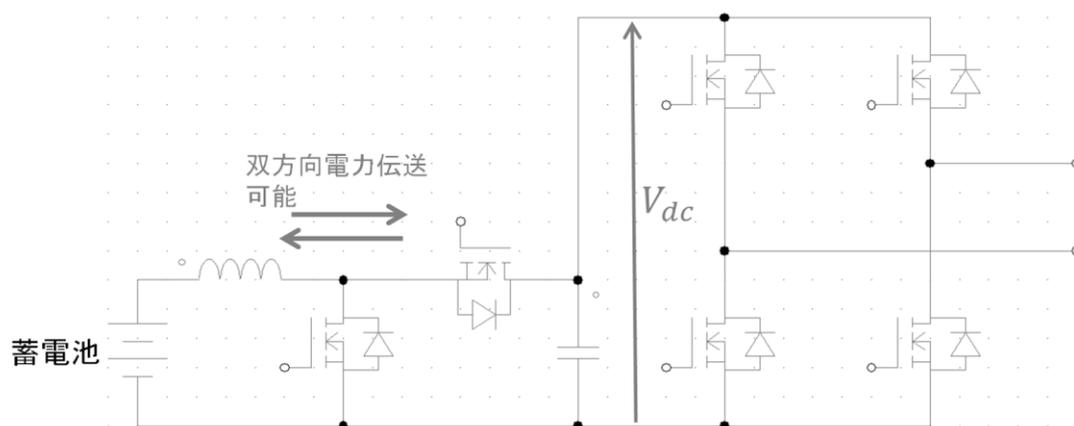


図 2.1 : MMC 型蓄電池システムの基本ユニット

2 象限チョッパはスイッチの duty 比を調整し、蓄電池の充放電を制御することにより、 V_{dc} を一定の値に維持する役割を果たす。

単相ブリッジは、 SW_1 と SW_4 が ON、 SW_2 と SW_3 が OFF の時、 $+V_{dc}$ を出力する。

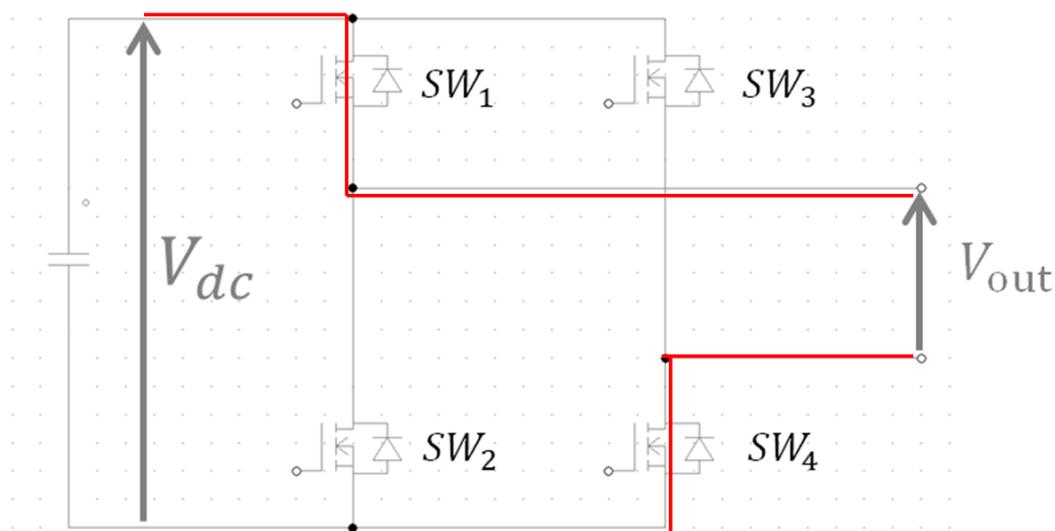


図 2.2 : SW_1 と SW_4 が ON、 SW_2 と SW_3 が OFF の時の電流通路
 SW_1 と SW_4 が OFF、 SW_2 と SW_3 が ON の時、 $-V_{dc}$ を出力する。

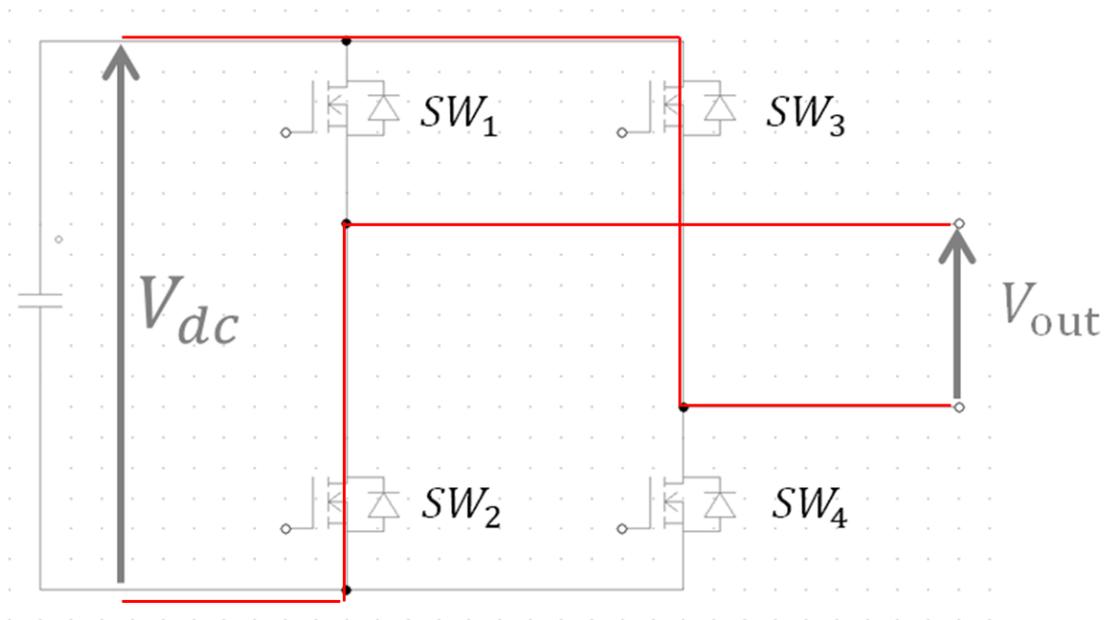


図 2.3 : SW_1 と SW_4 が OFF、 SW_2 と SW_3 が ON の時の電流通路

SW_1 と SW_3 或いは SW_2 と SW_4 だけが ON の時、出力が 0 となる。

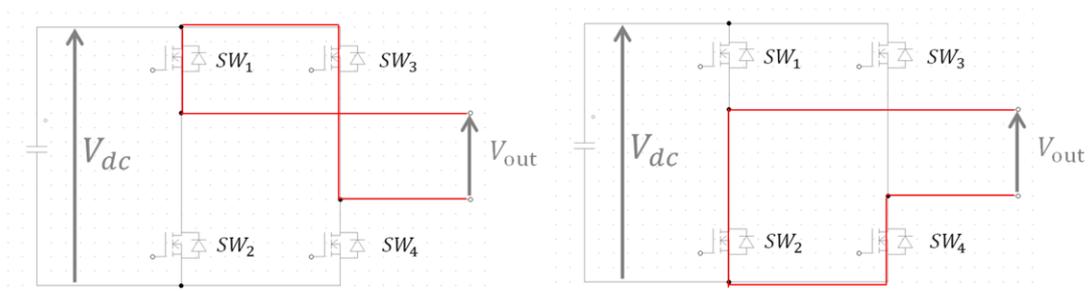


図 2.4 : SW_1 と SW_3 或いは SW_2 と SW_4 だけが ON の時の電流経路

各スイッチの開閉を制御することで、図 2.5 に示すようなパルスを出力することが可能となる。

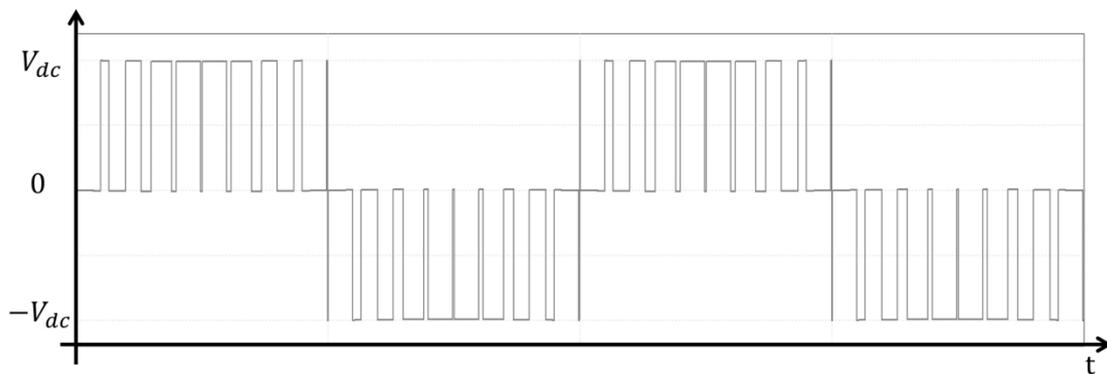


図 2.5 : 単相ブリッジが出力するパルスの一例

2.2 システム全体の構成と動作原理

2.2.1 システム全体の接続方法

図 2.6 に示すように、複数の基本ユニットの出力端子を直列に接続し、連系インダクタンスを介して、電力系統と連系する。

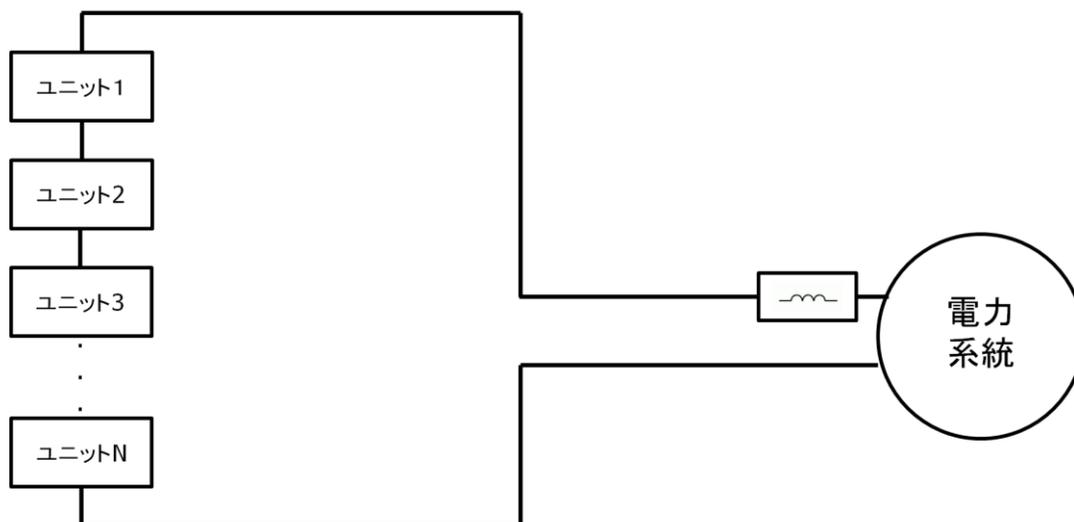


図 2.6 : MMC (Modular Multilevel Converter) 型蓄電池システムの全体構成

2.2.2 パルスの発生と積み合わせ

システム全体の出力周波数が f_{out} 、各ユニットのスイッチング周波数が f_s の場合、各ユニットは一つの出力周期に $m = \frac{f_s}{f_{out}}$ 個のパルスを出力する。一つの出力周期を m 等分し、各区間における、パルスの duty 比は式 (2.1) で決まる。図 2.7 に示すように、ユニット 1 のパルスは一番外側にある。

$$\text{duty} = |\sin\varphi| \quad (\varphi \text{ はパルス中心の位相である}) \quad (2.1)$$

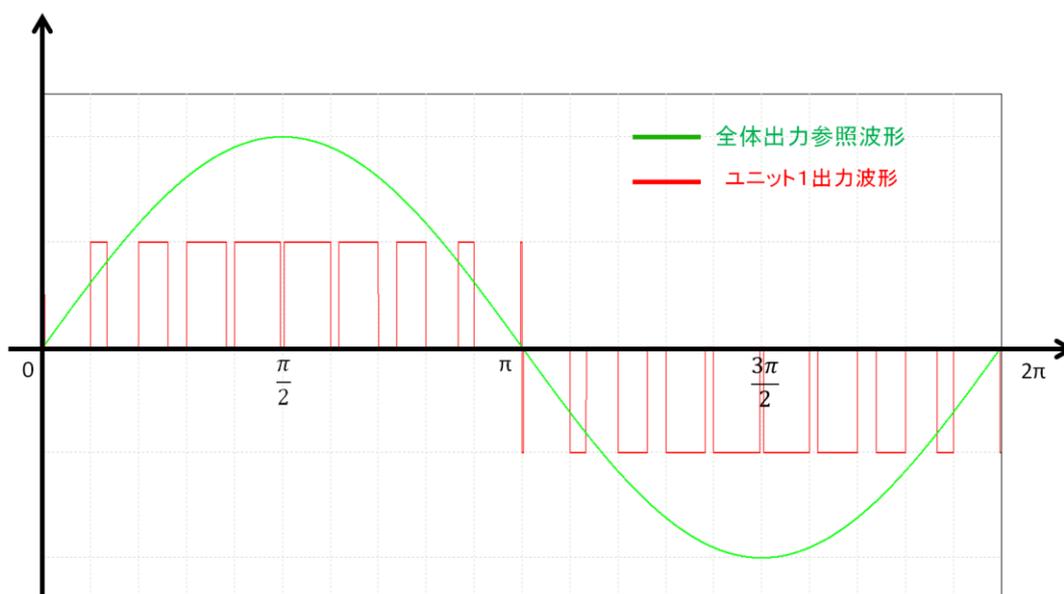


図 2.7 : ユニット 1 のパルス波形とシステム全体出力の参照波形

基本ユニット N 個を持つシステムにおいては出力電圧波形のリプルを低減するため、各ユニットのパルスに位相差 θ を付ける。 θ は式 (2.2) で決まる。

$$\theta = \frac{2\pi}{m \cdot N} \quad (2.2)$$

図 2.8 に示すように、ユニット 2 のパルスはユニット 1 より内側にシフトする。位相差は θ となる。

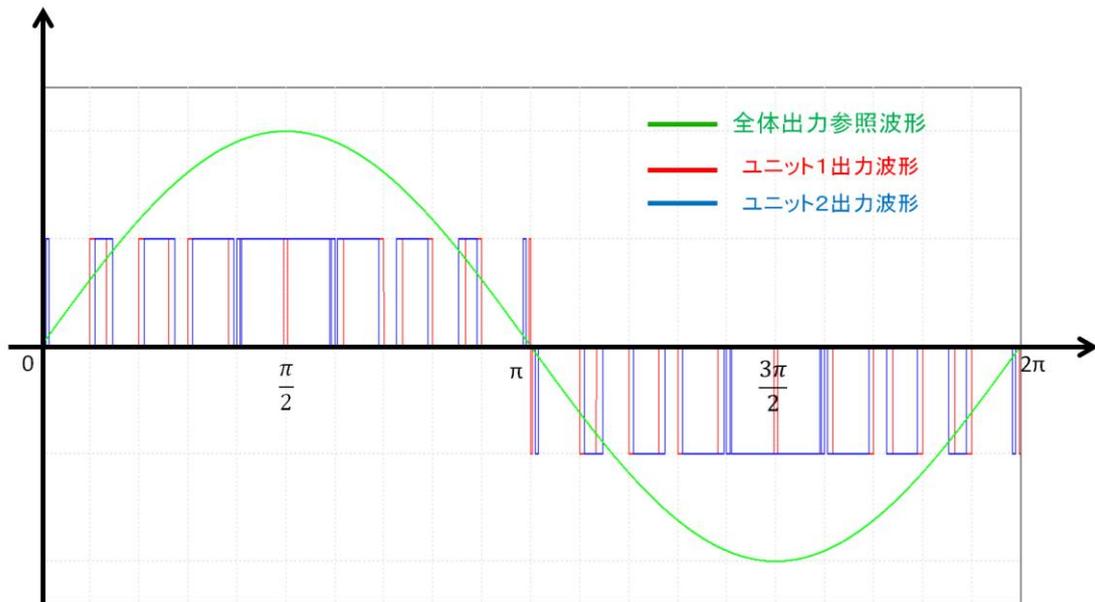


図 2.8 : ユニット 1、ユニット 2 のパルス波形とシステム全体出力の参照波形

図 2.9 に示すように、基本ユニットが出力するパルスの位相を少しずつずらし、その波形を積み合わせて正弦波に近い形状にする。基本ユニットの数を増やせば、各ユニットのスイッチング周波数が同じでも、より正弦波に近い波形を生成可能となる。また、ユニットの数を増やすことで、様々な容量、電圧階級に対応可能となる。

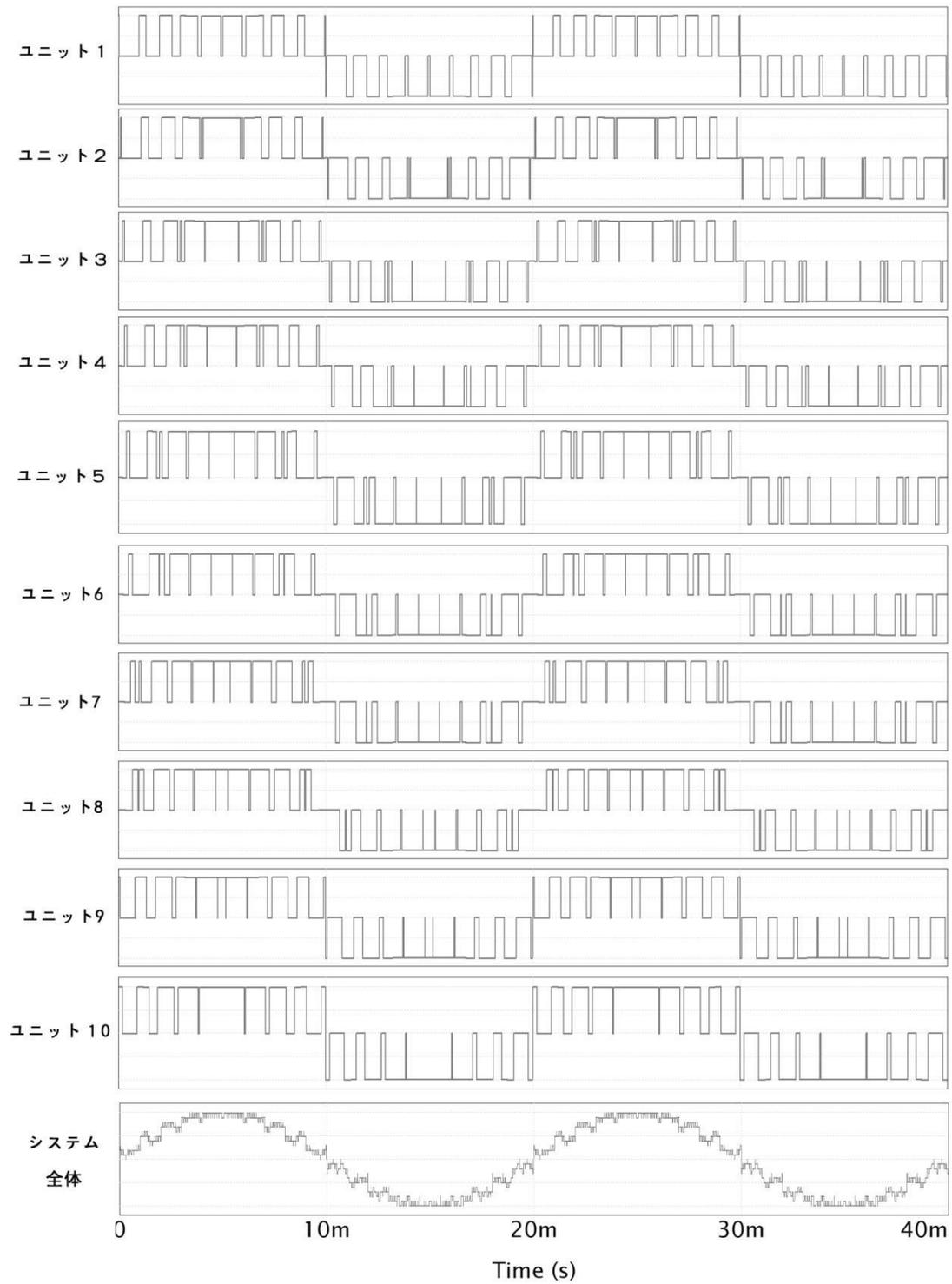


図 2.9 : 10 個の基本ユニットのパルス波形とシステム全体の出力波形

第 3 章 MMC 型蓄電池システムの分散モジュール制御

3.1 従来の MMC の制御手法のデメリット

従来の MMC のセル (サブモジュール) は図 3.1 に示すような構成で [16]、各セル中のスイッチを専用の制御器で一括して制御することが多い [17]。このとき、スイッチングパルスは制御器から光ファイバーで伝送される。セル電圧測定用等の光ファイバーを含めて、一つのセルに対して、複数の光ファイバーが必要となる。

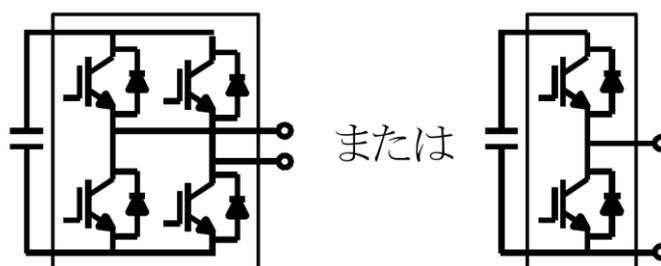


図 3.1: モジュラーマルチレベル変換器のセル (サブモジュール) の回路構成 [16]

図 3.2 に示すようなセルの数が多く、容量が大きい MMC は大量の光ファイバーが必要となり、取り回しも大変になる。



図 3.2: MMC 方式を適用した自励式変換器バルブ [17]

そこで、本研究は光ファイバーの量を減らし、ユニット数の自由度を上げることを目指し、少数の通信路を共有する新しい制御方式を提案する。

3.2 分散モジュール制御

図 3.3 に示す分散モジュール制御方式は、各ユニットに、制御用の小規模なマイコンを配置し、そのマイコンが PWM パルスの生成や情報伝達を行う。出力電圧の一周期をクロックに対し n サンプルであるとし、マイコンにパルス情報やユニット番号等の必要なデータを初期化時点で予め書き込む。

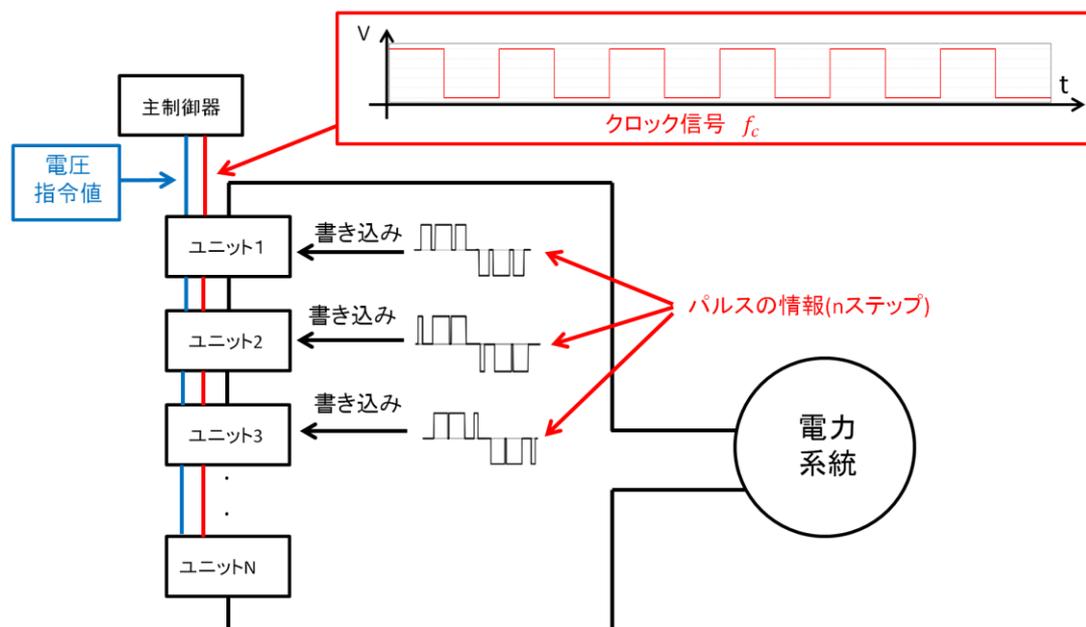


図 3.3 : 分散モジュール制御方式

全ユニットに対し、共通して接続された光ファイバーを用いて、主制御器よりクロック信号を送信する。各ユニットはクロック信号を受信し、初期化時点で書き込んだ情報に応じて、スイッチを制御し、PWM パルスを生成する。その結果、各ユニットは図 3.4 で示すように、主制御器で同期される。主制御器が送出するクロックの周波数 f_c とシステム全体の出力電圧波形の周波数 f_{out} の関係は式 3.1 で表す。

$$f_{out} = \frac{f_c}{n} \quad (3.1)$$

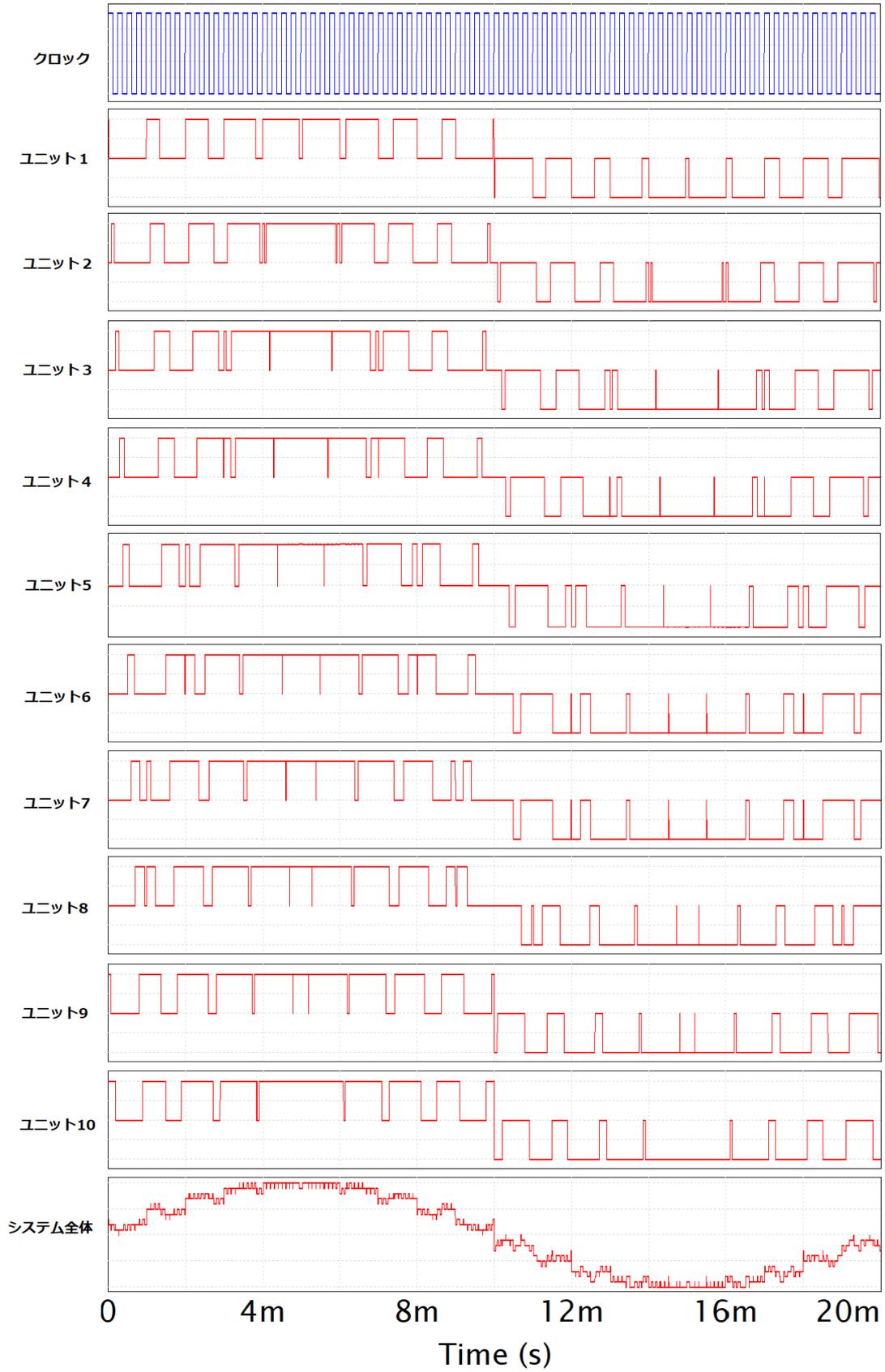


図 3.4 : 主制御器のクロック波形および各ユニットとシステム全体の出力波形

主制御器は電力系統の周波数を測定しながら、クロック周波数 f_c を調整することで、システム全体の出力電圧波形の周波数 f_{out} を調整し、システム全体と電力系統の位相差を調整することが可能になる。

次に、別の光ファイバーで、各ユニットに電圧指令値を送信する。各ユニットは電圧指令値に応じて、電圧 V_{dc} を調整する。その結果、システム全体の周波数と電圧値が調整され、位相制御と電圧制御により、出力有効電力と無効電力が調整可能になる。

但し、この制御手法では、各ユニットは異なる電力を出力することになるため、時間が経つと、各ユニットの電池のSOCインバランスが大きくなる。その問題を解決するために、電圧 droop 制御方式を提案する。

3.3 電圧 droop 制御

電圧 droop 制御方式においては、主制御器が各ユニットに電圧指令値を送信する際に、参照対象として、ユニット1のSOC値 SOC_1 も一緒に送信する。図3.5に示すように、各ユニットは自身のSOC値とユニット1のSOC値を比較し、式3.2で示すように、現在の充放電状態に応じて、単相ブリッジの電圧 V_{dc} を調整する。

$$V_{dc} = V_{ref} \times k(SOC_n - SOC_1) \quad (3.2)$$

その結果、システム全体が充電時、ユニット1よりSOC値が小さいユニットは充電量が多くなり、ユニット1よりSOC値が大きいユニットは充電量が少なくなる。システム全体が放電する際は、ユニット1よりSOC値が小さいユニットは充電量が少なくなり、ユニット1よりSOC値が大きいユニットは充電量が多くなる。最終的に、各ユニットのSOC値がユニット1のSOC値に近づく。SOCのインバランスが低減可能になる。

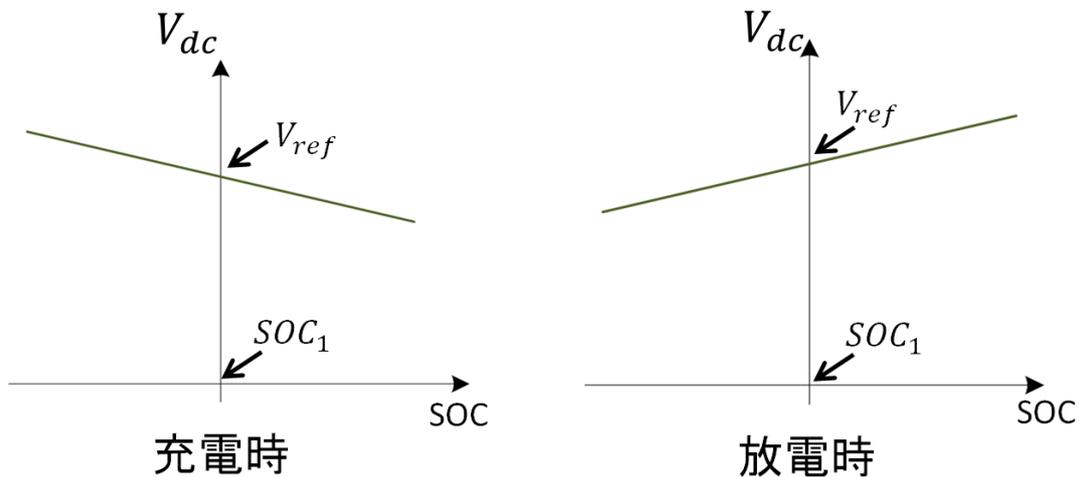


図 3.5 : 電圧 droop 制御方式

電圧 droop 制御方式では、ユニットの数が多い場合でも自律的にSOCを制御することが可能となり、対応可能なSOCインバランス範囲が広いことも利点である。一方、SOCインバランスが生じた際は、ユニット電圧が変化し、出力電圧波形の歪みが生じる。それがシステム全体の電圧制御および出力電流THDに影響を与える。

第4章 シミュレーションによる検証

4.1 シミュレーション条件

PSIMを用いて図4.1に示す10個のユニットを持つMMC型蓄電池システムのシミュレーション回路を構築した。2象限チョップパのスイッチング周波数が単相ブリッジのスイッチング周波数よりはるかに高いことから、2象限チョップパは平均パワーモデルを使用する。

各ユニットは一つのクロックで同期され、予め設定したルックアップテーブルに応じて、各スイッチを制御し、パルスを生成する。10個のユニットの出力端子を直列に接続し、連系インダクタンスを介して、電力系統として扱う無限大母線と連系する。

システム全体と交流電圧源の位相差を調整することで、システム全体の入出力有効電力を調整し、システム全体を充放電させることが可能となる。

各ユニットに蓄電池モデルがあり、様々なSOC初期値を設定することができる。シミュレーション中、蓄電池モデルは充放電量に応じてSOC値が変わる。各ユニットは自身の蓄電池SOC値とユニット1の蓄電池SOC値の差を計算し、式3.2に示すように、電圧指令値を基準にして出力電圧を調整する。

表 4.1 : シミュレーション条件

ユニット数	N	10
ユニット電圧指令値	V_{ref}	1000 [V]
連系インダクタンス	L	2.2 [mH]
電力系統電圧	V_{grid}	7072 [V]
主制御器クロック周波数	f_c	1 [MHz]
単相ブリッジ スイッチング周波数	f_s	1 [kHz]
電力系統周波数	f_{grid}	50 [Hz]
蓄電池電圧	V_{bat}	500 [V]
蓄電池容量	C_{bat}	1000 [Ah]
電圧 droop 制御ゲイン値	k	-1000 (充電時)、1000 (放電時)

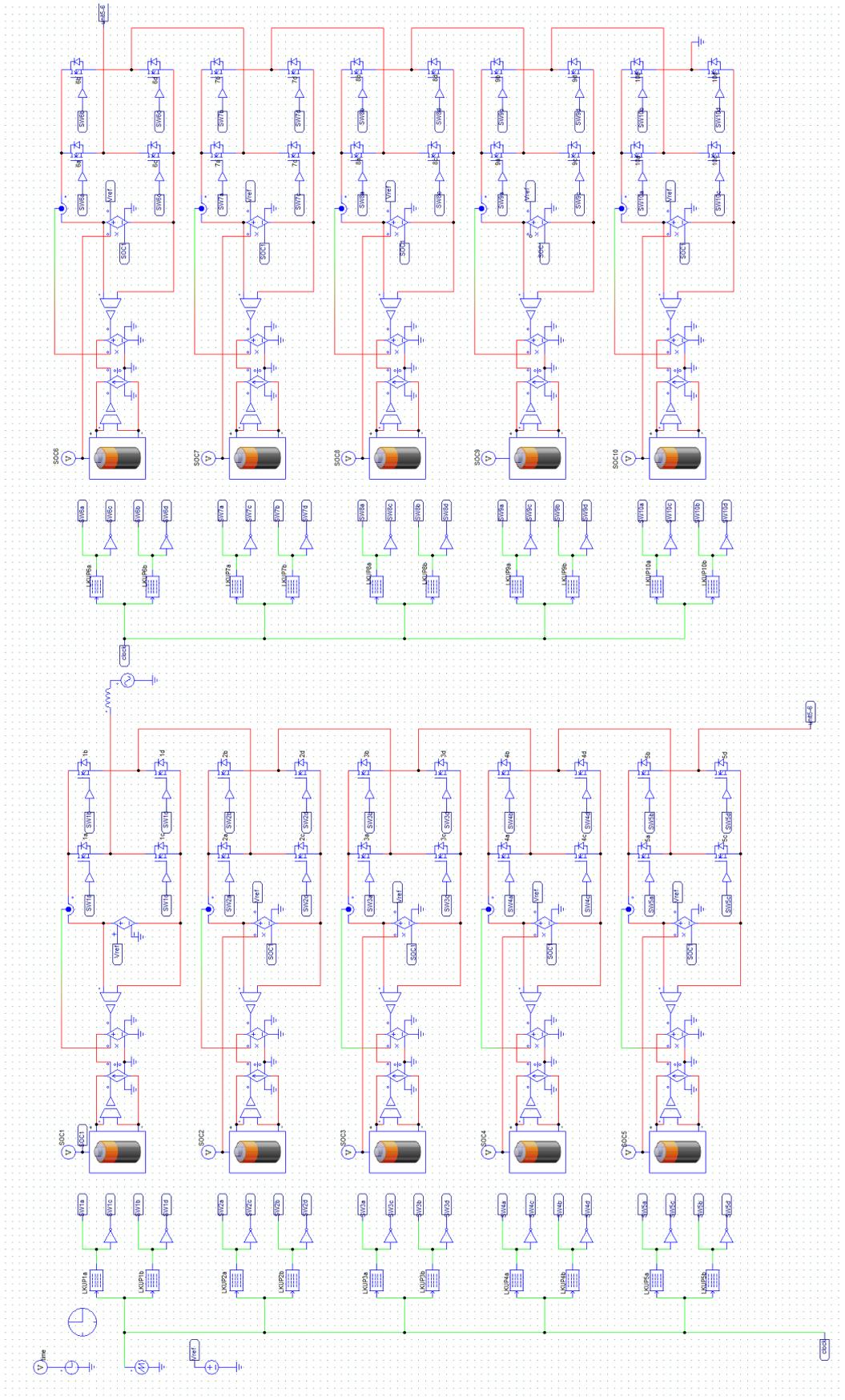


図 4.1 : シミュレーション回路

4.2 SOC インバランス低減確認

シミュレーション開始前、ユニット1の蓄電池SOC値を50%に設定し、残り9個のユニットの蓄電池SOC値を表4.2のように40%から60%まで均等に分布させる。

表 4.2 : 各ユニットの蓄電池のSOC 値

ユニット 1	50.0%
ユニット 2	40.0%
ユニット 3	42.5%
ユニット 4	45.0%
ユニット 5	47.5%
ユニット 6	50.0%
ユニット 7	52.5%
ユニット 8	55.0%
ユニット 9	57.5%
ユニット 10	60.0%

シミュレーション開始後、システム全体を3960Aの電流で充電させ、200秒後、同じ大きさの電流で放電させる。更に200秒後は再び3960Aの電流で充電させる。システム全体の充放電を繰り返しながら、各ユニットの蓄電池SOC値を測定する。各ユニットの蓄電池のSOC値時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化は図4.2の通りである。

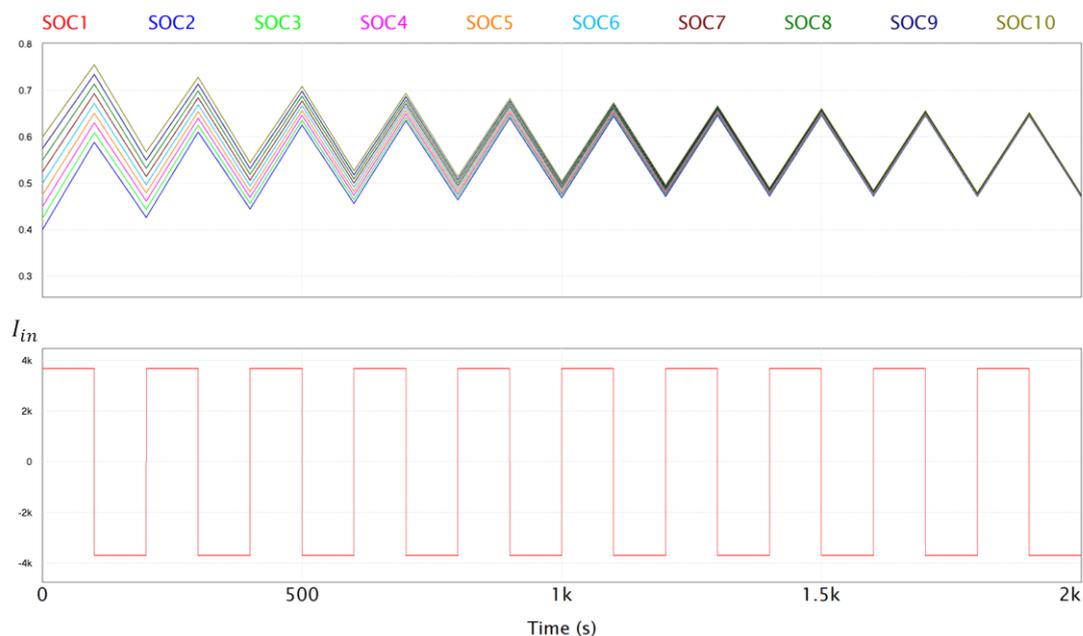


図 4.2 : 各ユニットの蓄電池 SOC 値とシステム全体の充電電流の時間変化

シミュレーションで、最初に 40%から 60%までの間に分散されている各ユニットの蓄電池 SOC 初期値が充放電を繰り返すことで、近づいた。電圧 droop 制御が SOC インバランスの低減効果が確認された。

但し、図 4.3 に示すように、SOC インバランス時、各ユニットの出力電圧が指令値と異なる値になるので、システム全体は予期しない電圧波形を出力してしまい、出力電流 THD (Total Harmonic Distortion) に影響を与える可能性がある。図 4.4 に示すように、SOC インバランス時の出力電流波形は、SOC 値一致時と異なるので、SOC インバランス時の出力電流 THD を評価する必要がある。

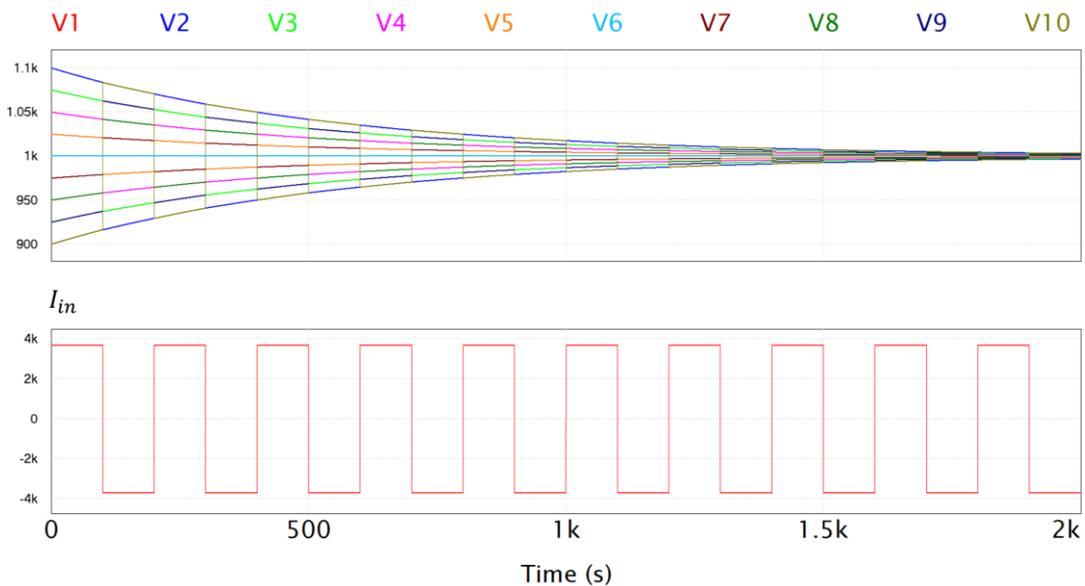


図 4.3 : 各ユニットの出力電圧とシステム全体の充電電流の時間変化

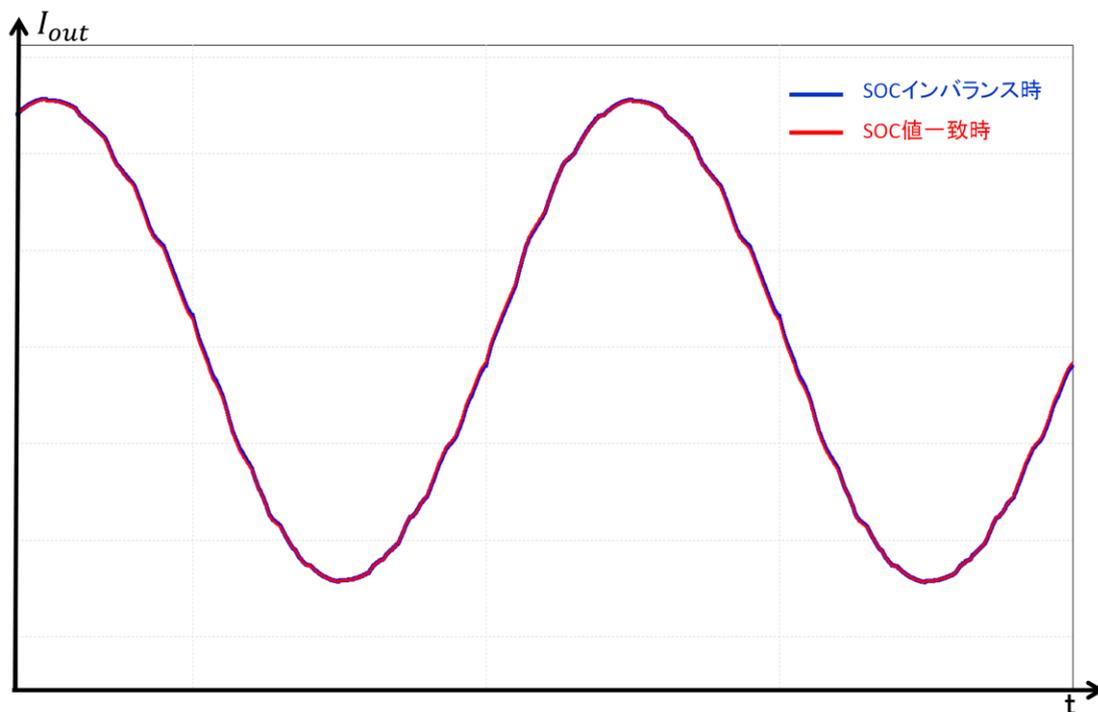


図 4.4 : SOC 値一致時と SOC インバランス時の出力電流波形

4.3 出力電流 THD 評価

式 4.1 で SOC 値一致時と SOC インバランス時の電流 THD 値を計算し、表 4.3 に示す。

$$THD = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (I_1 \text{ は基本波成分、} I_{rms} \text{ は交流波形の全体 rms 値となる)} \quad (4.2)$$

表 4.3 : SOC 値一致時と SOC インバランス時の THD 値

ケース	出力電流 THD
SOC 値一致時	4.20%
SOC インバランス時	4.46%

計算結果から、SOC インバランス時、システム全体の出力電流 THD が大きくなることが分かる。

電力系統中で使用される電気機器は出力電流 THD の全成分が 5% 以内に制限されることが多い[18][19]。出力電流 THD が 5% を超えると、提案するシステムが使用できなくなる可能性があることから、如何なる SOC インバランス状態でも、出力電流 THD が 5% を超えないことを確保する必要がある。

様々なケースでシミュレーションを行い、各ケースの出力電流 THD 値を計算し、表 4.4 に示す。

表 4.4 : 各ケースにおけるシステム全体の出力電流 THD 値

ケース	初期SOC値										出力電流 THD
	unit1	unit2	unit3	unit4	unit5	unit6	unit7	unit8	unit9	unit10	
0	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	4.20%
1	40.0%	42.5%	45.0%	47.5%	50.0%	50.0%	52.5%	55.0%	57.5%	60.0%	4.42%
2	60.0%	57.5%	55.0%	52.5%	50.0%	50.0%	47.5%	45.0%	42.5%	40.0%	3.98%
3	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	3.72%
4	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	4.75%
5	60.0%	40.0%	57.5%	42.5%	55.0%	45.0%	52.5%	47.5%	50.0%	50.0%	4.27%
6	50.0%	50.0%	52.5%	47.5%	55.0%	45.0%	57.5%	42.5%	60.0%	40.0%	4.37%
7	30.0%	35.0%	40.0%	45.0%	50.0%	50.0%	55.0%	60.0%	65.0%	70.0%	4.71%
8	70.0%	65.0%	60.0%	55.0%	50.0%	50.0%	45.0%	40.0%	35.0%	30.0%	3.79%
9	70.0%	70.0%	70.0%	70.0%	70.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	3.36%
10	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	70.0%	70.0%	70.0%	70.0%	70.0%	5.36%
11	70.0%	30.0%	65.0%	35.0%	60.0%	40.0%	55.0%	45.0%	50.0%	50.0%	4.34%
12	50.0%	50.0%	55.0%	45.0%	60.0%	40.0%	65.0%	35.0%	70.0%	30.0%	4.55%
13	36.0%	36.0%	36.0%	36.0%	36.0%	64.0%	64.0%	64.0%	64.0%	64.0%	4.99%

結果から、ケース 4 とケース 10 のようなインバランス状態にすると、出力電流 THD が大きくなった。特にケース 10 の出力電流 THD は 5% の制限値を超えてしまった。図 4.5 はケース 10 の出力電流波形と SOC 一致時の出力電圧波形を示す。図 4.6 はケース 10 の出力電流波形と SOC 一致時の出力電流波形を示す。

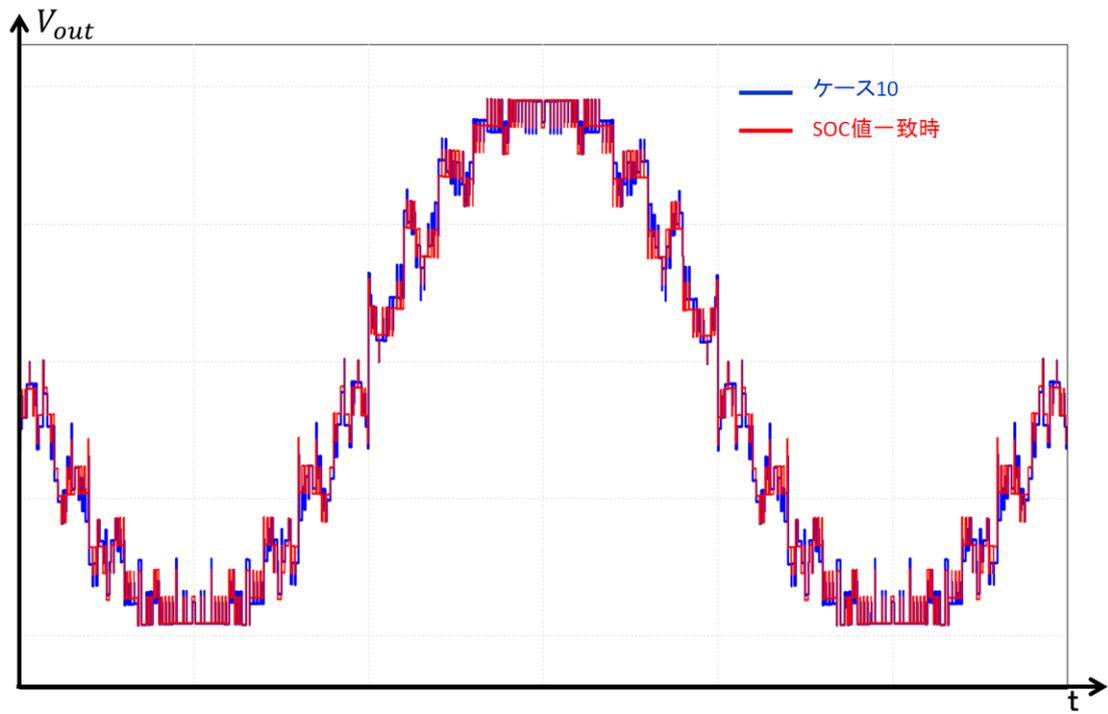


図 4.5 : SOC 値一致時とケース 10 の出力電圧波形

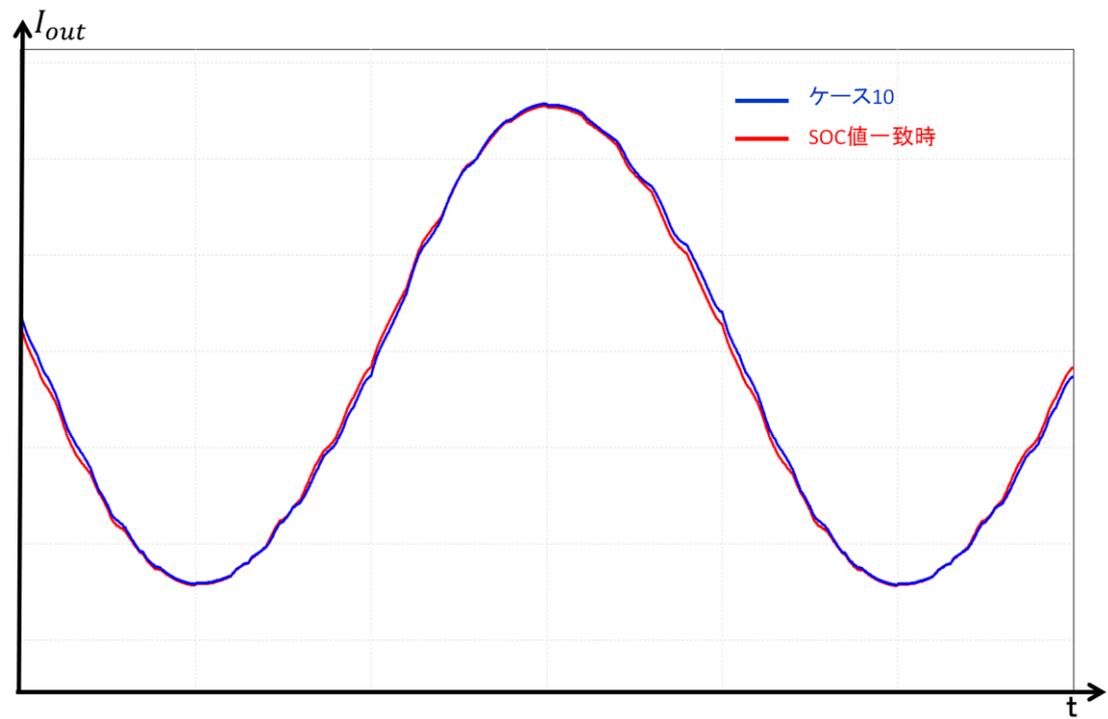


図 4.6 : SOC 値一致時とケース 10 の出力電流波形

ケース4とケース10のようなインバランス状態で、初期SOCインバランス量を調整し、ケース13（初期インバランス量が14%）と設定した場合、出力電流THDが5%以内にすることができた。

4.4 出力電流 THD 対策

如何なるSOCインバランス状態においても、出力電流THDが5%を超えないように、図4.7に示すように、電圧 droop 制御の電圧調整値の上限と下限を設定する。インバランス量が±14%を超える場合は、制限をかける。

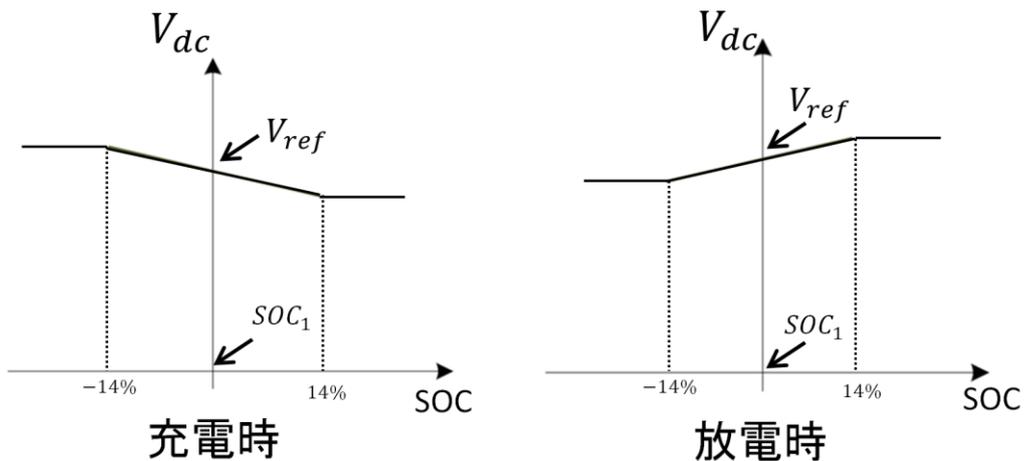


図 4.7：電圧 droop 制御方式

図 4.9 は制限をかける状態のケース 10 の出力電圧波形および SOC 一致時の電圧波形を示す。図 4.10 は制限をかける状態のケース 10 の出力電圧波形および SOC 一致時の電流波形を示す。

制限をかけない状態および制限をかける状態のケース 10 の出力電流 THD 値を表 4.5 に示す。

表 4.5：制限をかけない状態および制限をかける状態のケース 10 の出力電流 THD 値

状態	出力電流 THD 値
制限をかけない	5.36%
制限をかける	4.99%

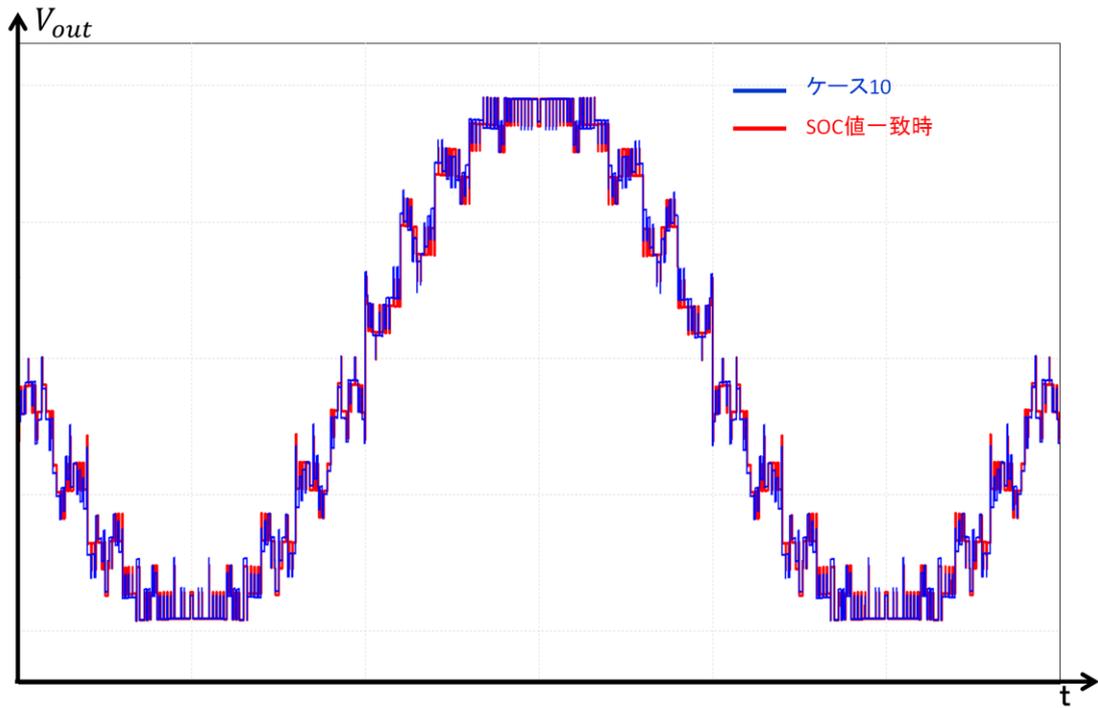


図 4.9 : 制限をかける状態のケースおよび SOC 一致時の出力電圧波形

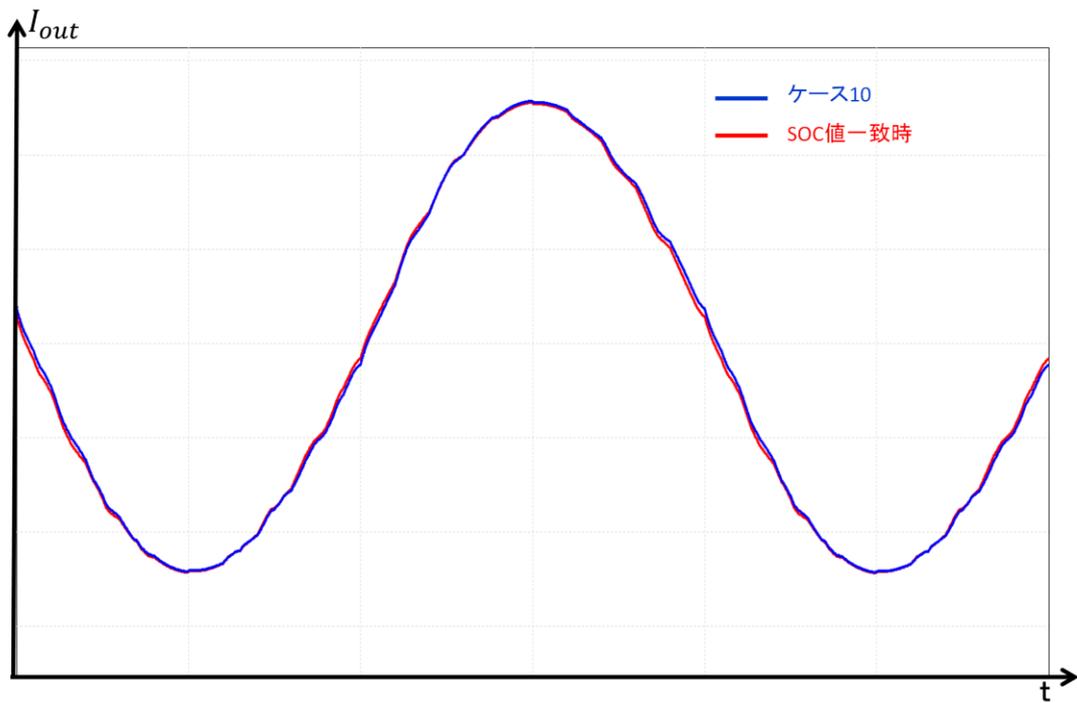


図 4.10 : 制限をかける状態のケースおよび SOC 一致時の出力電流波形

そして、制限をかけない状態と制限をかける状態の SOC インバランス解消効果を比較する。

図 4. 11 は制限をかけない状態のケース 10 における各ユニットの蓄電池の SOC 値時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化を示す。図 4. 12 は制限をかけない状態のケース 10 における各ユニットの出力電圧の時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化を示す。

図 4. 13 は制限をかける状態のケース 10 における各ユニットの蓄電池の SOC 値時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化を示す。図 4. 14 は制限をかける状態のケース 10 における各ユニットの出力電圧の時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化を示す。

シミュレーション結果、電圧 droop 制御に制限をかけることで、初期 SOC インバランスが大きい場合、SOC 値が収束するまでかかる時間が長くなるが、制限をかけることにより、出力電圧が一定の範囲内に抑えて、出力電流 THD を 5 % の制限値以内に収めることが可能となる。

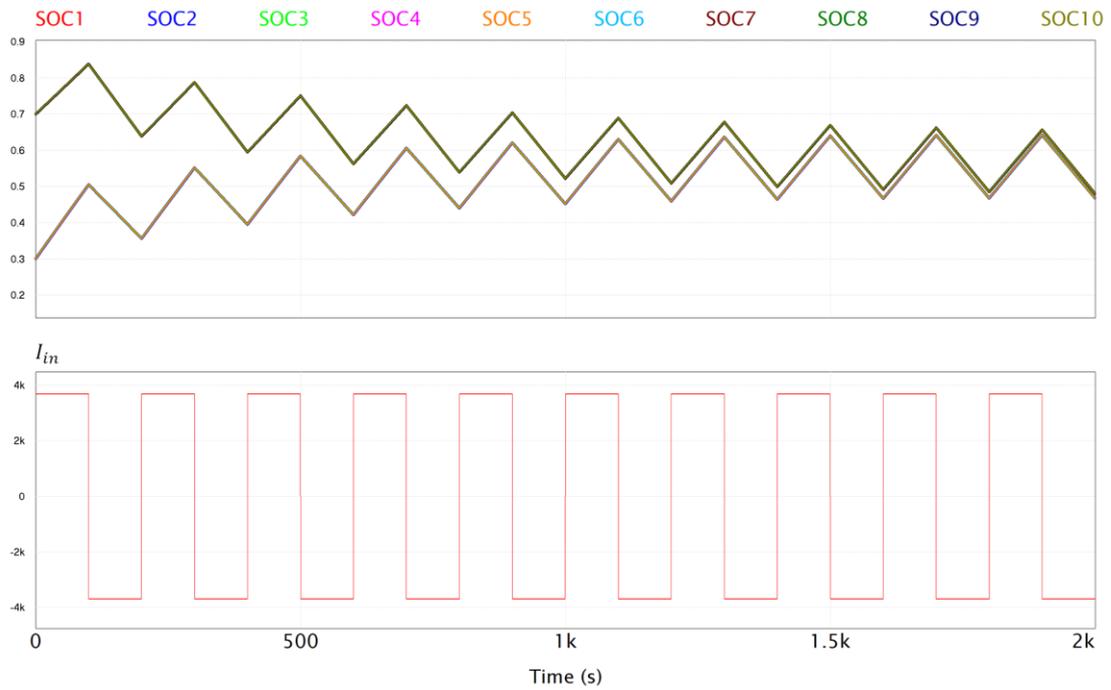


図 4.11：制限をかけない状態のケース 10 における
各ユニットの蓄電池の SOC 値時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化

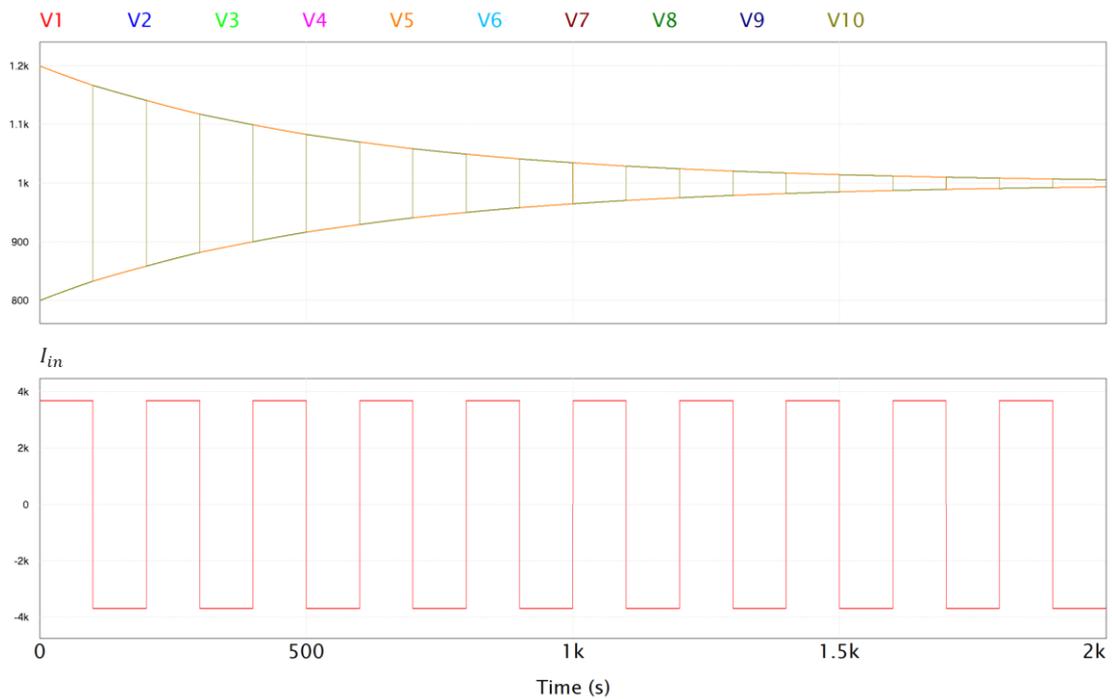


図 4.12：制限をかけない状態のケース 10 における
各ユニットの出力電圧の時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化

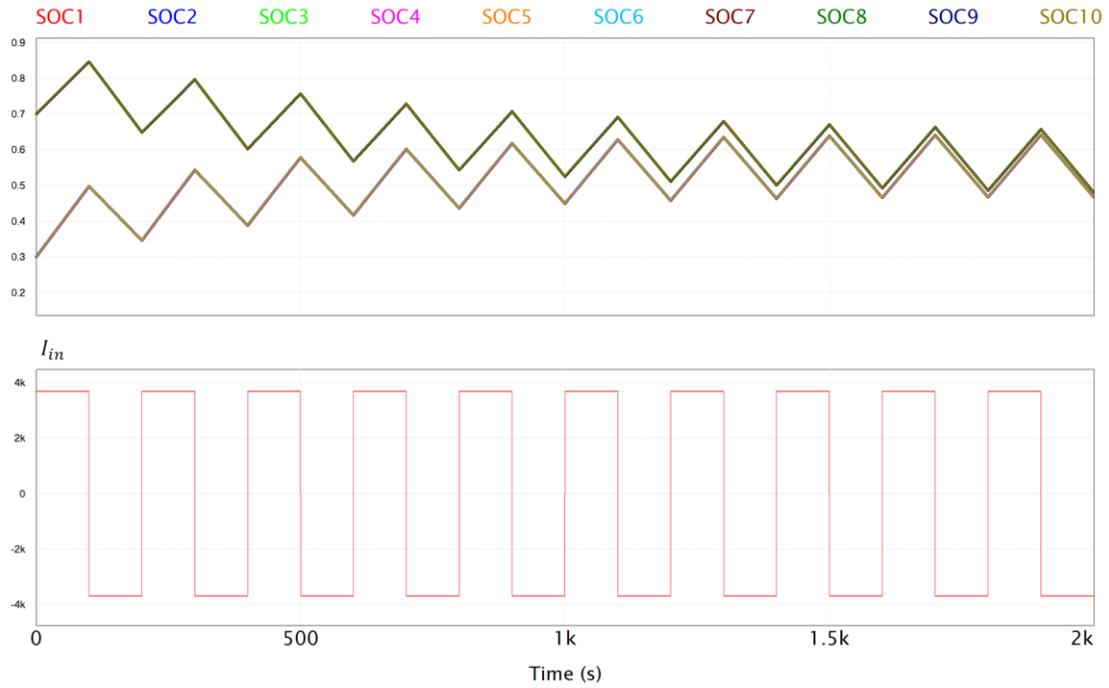


図 4.13：制限をかける状態のケース 10 における各ユニットの蓄電池の SOC 値時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化

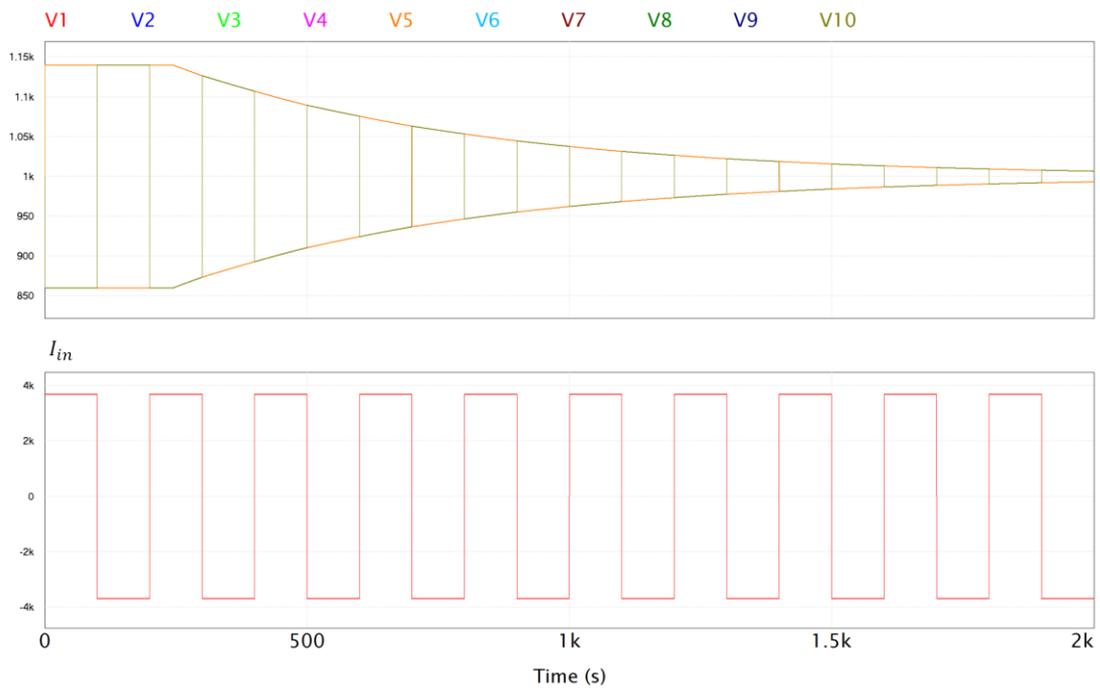
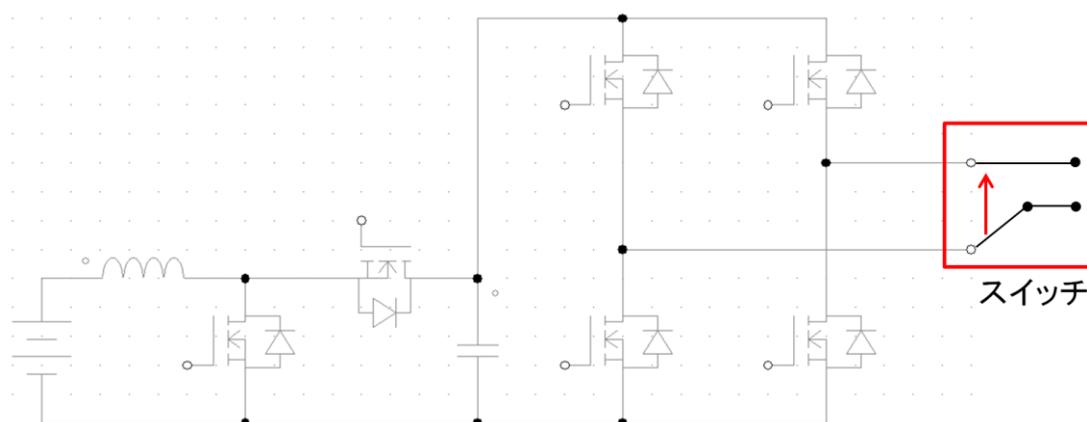


図 4.14：制限をかける状態のケース 10 における各ユニットの出力電圧の時間変化およびシステム全体の入力電流時間変化

4.5 ユニット故障時の出力電流 THD

図 4.15 に示すように、基本ユニットの出力端子にスイッチを付けることで、ユニットが故障する際、スイッチを切り替えることで、このユニットをシステム全体から切り離すことができる。残りのユニットが運転できる条件について、シミュレーションで検証する。



4.15 : 出力端子にスイッチが付いている MMC 蓄電池システムの基本ユニット

各ユニットが SOC 値一致する時、ユニット 10 をシステムから切り離す。切り離した後、システム全体の出力電圧値が切り離した前と同じになるように、電圧指令値を 1.11 倍にする。そして、正常動作の状態とユニット 10 が故障する状態の出力電圧波形を図 4.16 に示す。正常動作の状態とユニット 10 が故障する状態の出力電流波形を図 4.17 に示す。

ユニット 10 が故障する時、出力電圧波形と出力電流の最大値は正常状態と大きく変化がないが、波形は正常状態より大きく変わることが分かる。式 4.2 で THD を計算し、THD 値は 4.34% となる。

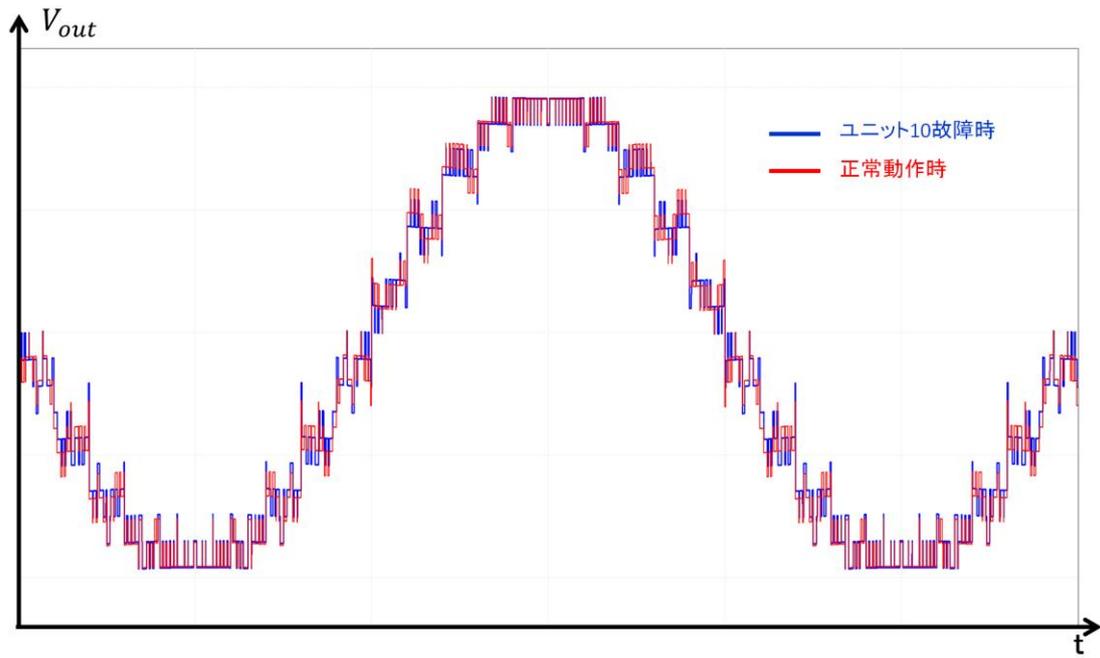


図 4.16 : 正常動作の状態とユニット 10 が故障する状態の出力電圧波形

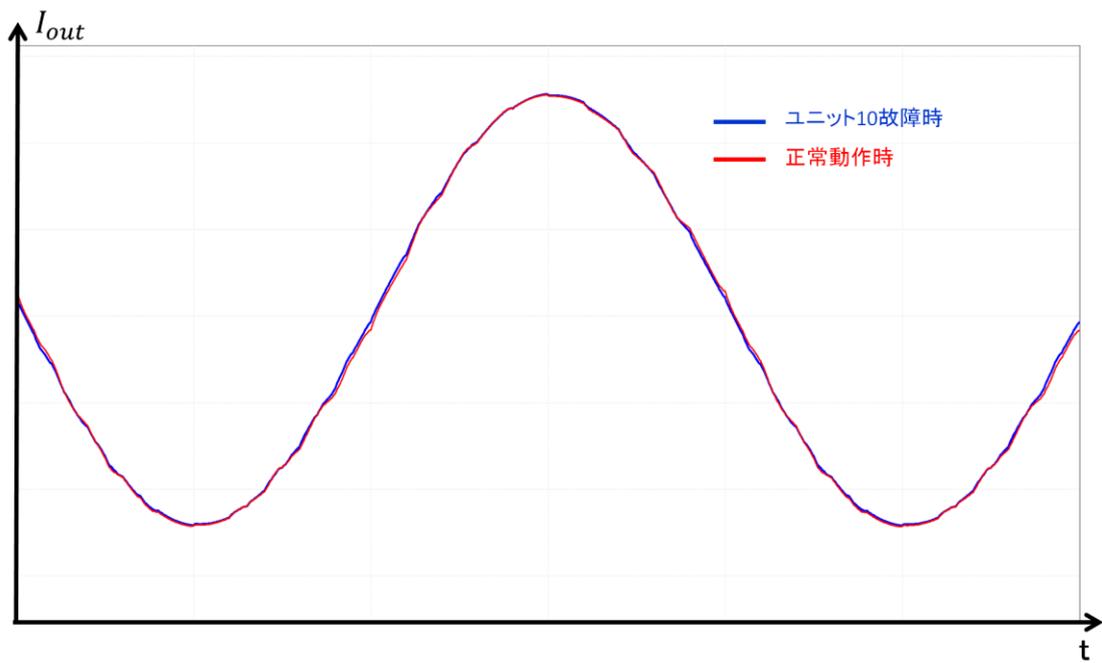


図 4.17 : 正常動作の状態とユニット 10 が故障する状態の出力電流波形

ユニット1からユニット9が故障する時もシミュレーションし、出力電流 THD 値を表 4.6 に示す。

表 4.6 : 各ユニットが故障する時のシステム全体の出力電流 THD 値

故障ユニット	出力電流 THD 値
ユニット1	5.14%
ユニット2	5.23%
ユニット3	5.29%
ユニット4	5.35%
ユニット5	5.26%
ユニット6	5.16%
ユニット7	4.98%
ユニット8	4.72%
ユニット9	4.49%
ユニット10	4.34%

シミュレーションの結果、各ユニットの SOC 値が一致している場合でも、ユニット1～ユニット6中の任意のユニットが故障した際、システム全体の出力電流 THD 値は5%の制限値を超える。10個のユニットを持つ MMC 型蓄電池システムは一つのユニットが故障する際、出力電流 THD 値が5%を超えないように動作する条件が厳しい。

第5章 結論

5.1 本研究の成果

本研究では、太陽光発電の大量導入に伴う問題について、蓄電池の重要性を述べた。第2章で、蓄電池システムに適用する MMC 型電力変換器を提案し、その構造と動作原理を確立する。

第3章では、従来の MMC 制御手法の課題点を述べて、それを解決するために、3.2 節で分散モジュール制御方式を提案する。分散モジュール制御方式は光ファイバーの数を大幅に削減でき、制御器の簡素化と低コスト化も可能となる。MMC ユニットのモジュール化することで、同じユニットでも、異なる数量を使うことにより、様々な電圧階級とアプリケーションに対応できるシステムを組み立てることが可能となる。3.3 節では、分散モジュール制御方式の課題点を述べて、それを解決するための電圧 droop 制御方式を提案する。電圧 droop 制御方式は各ユニットの蓄電池 SOC 値が一致しない場合、各ユニットが自律的に SOC 値を収束させることが可能となる。

第4章では、シミュレーションにより、電圧 droop 制御の効果を確認し、SOC インバランスの場合の出力電流 THD を評価する。更に、4.4 節で、SOC インバランスによる出力電流 THD 増大の結果から課題を抽出し、出力電流 THD が制限値を超えない制御手法を提案し、シミュレーションで検証した。そして、ユニットが一つ故障する場合の運転継続可能性について検討した。

本研究は、MMC 型蓄電池システムが今後実用化するための理論研究を提供する。

5.2 今後の課題

本研究では、蓄電池システムおよび電力系統が定常状態において検討を行った。今後は蓄電池システム主制御器の指令値変動および電力系統の状態が変動する際、過渡状態におけるシミュレーションと検証などを実施する必要がある。

また、ユニットが1個故障する場合、システム全体が出力電流 THD 制限値を超えずに運転できる条件を明確することも課題がある。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁、「エネルギー白書 2021」、
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/>、
(2022 年 1 月 11 日アクセス)
- [2] 資源エネルギー庁、「太陽光発電について」、
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/063_01_00.pdf、
(2022 年 1 月 11 日アクセス)
- [3] 資源エネルギー庁、「「カーボンニュートラル」って何ですか？（前編）～いつ、誰が実現するの？」、
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html
(2022 年 1 月 11 日アクセス)
- [4] 「2018 年 5 月 3 日の九州の電力需給実績」 資源エネルギー庁、2018 年 09 月 07 日、
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/kyushu_syuturyokuseigyو.html (2022 年 1 月 11 日アクセス)
- [5] 経済産業省： 「第 1 回次世代送配電ネットワーク研究会」
- [6] 張昊、“配電系統における集中型エネルギー貯蔵装置を用いた太陽光発電導入可能容量増大手法の検討”、東京大学修士論文、2018 年
- [7] 大淵崇弘、“配電系統における住宅用太陽光発電システムの運用手法・最適構成に関する検討”、東京大学修士論文、2021 年
- [8] 電力広域的運営推進機関 調整力及び需給バランス評価等に関する委員会、“「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について”、2021 年 8 月 23 日、
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2021/files/chousei_64_03.pdf
- [9] 中島達人，“用語解説 第 116 回テーマ： 仮想同期発電機制御インバータ”，電気学会論文誌 B, 140 巻, 11 号, 2020
- [10] Darith Leng, Sompob Polmai “Transient Respond Comparison Between Modified Droop Control and Virtual Synchronous Generator in Standalone Microgrid”, 2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)
- [11] Weiqiang Zhan, Zhenxing Wu “Virtual Synchronous Generator Design Method Based on Stable Voltage and Frequency of the Machine”, 2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics

- [12] 資源エネルギー庁、「定置用蓄電池の普及拡大及びアグリゲーションサービスへの活用に関する調査」、https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000479.pdf、
(2022年1月19日アクセス)
- [13] 三菱電機、「パワーデバイス技術の現状と展望」、
<https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2014/1405102.pdf>、
(2022年1月19日アクセス)
- [14] 東芝エネルギーシステム、「HVDC用高電圧・大容量マルチレベル変換器」、
https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2014/04/69_04pdf/a05.pdf、(2022年1月19日アクセス)
- [15] A Lesnicar, J Hildinger, R Marquardt,
“Modulares stromrichterkonzept für netzkupplungsanwendung bei hohen spannungen”,
ETG-Fachtagung, Bad Nauheim, Germany, 2002
- [16] 佐野憲一郎、“用語解説 第40回テーマ： モジュラーマルチレベル変換器(MMC)”、
電気学会論文誌B, 134巻, 7号, P9
- [17] 東芝エネルギーシステム、「地域を越えて電力融通を実現する電力変換技術」、
<https://www.toshiba-energy.com/transmission/product/power-conversion.htm>、
(2022年1月11日アクセス)
- [18] IEC 61000-3-2:2018, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)
- [19] JIS C 61000-3-2:2019, 電磁両立性 - 第3-2部: 限度値 - 高調波電流発生限度値

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の馬場旬平教授には多大なる研究に関するご指導や助言だけではなく、論文の書き方、発表の仕方などもご指導をいただき、大変お世話になりました。また、電力系統や MMC 変換器などについて、様々なお話しを聞くことができ、非常に勉強になりました。

玉岡徳子氏からは、よく食べ物をいただきます。TA の手続きや学会参加時の申請の手続きなどでお世話になりました。

博士課程の石川幸一郎氏には、普段あまり直接話す機会がないですが、研究室の打ち合わせの際、よく電力市場に関する情報を共有していただきまして、自分の研究だけではなく、将来の仕事にも非常に役に立ちます。山田智之氏、簗津真一郎氏、三ツ木康晃氏にはインバータに関する知識を教えていただき、進捗報告では積極的に質問していただくなど、研究を円滑に進めるうえで助力いただき、本当にありがとうございました。

修士課程の保坂将貴氏にはコロナの中で、あまり直接顔を合わすことも難しい二年でしたが、研究室のオンライン打ち合わせで興味深い研究内容を共有してもらったことが印象に残っています。劉暁熙氏からは、毎年灯油の購入を手伝ってもらって、寒い冬が温かく過ごせることを感謝します。毛致森氏には、よく研究に関する助言をもらうことだけではなく、夕食やライブなども付き合ってくれて、本当にありがとうございました。

寺師彩俊氏、山口祐司氏は自分の課題や研究もある中 TA を手伝ってもらったり、論文の日本語チェックをもらったり、たくさんお世話になりました。董昊坤氏はコロナの関係で日本に来られなく、直接会う機会がなかったが、普段はアイドルに関する情報を共有し、更に自分の誕生日に貴重な『ラブライブ！ スーパースター!!』Liella! 唐可可 B1 タペストリーを送ってもらい、本当に感謝の気持ちしかありません。

学部生の長坂英朗氏、松田響生氏はこちらの都合で TA が回せない時、手伝ってくれて、改めて感謝申し上げます。

最後に、私の研究生生活を支えてくださった全ての方々に今一度感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

発表文献

本論文に関する発表文献

1. 曾希萌, 馬場旬平, “MMC (Modular Multilevel Converter) 型蓄電池システムの分散モジュール制御”, 令和4年電気学会全国大会, 令和4年3月 (発表予定)