

博士學位論文
Doctoral Thesis

単相および三相同期化カインバータを用いた

マイクログリッドの構築

Construction of Microgrid Using Single-phase and Three-phase
Synchronous Inverters

学位取得年月 2023 年 9 月

広島大学 大学院 先進理工系科学研究科
電気システム制御プログラム
電力・エネルギー工学研究室

D204550 網本 和也

目次

諸言	1
第1章 序論	
1.1 研究目的・背景	3
1.2 研究の意義	4
第2章 配電系統の電力需給安定化技術	
2.1 電圧系統安定度の分類	6
2.2 過渡安定度の要因	7
2.3 配電系統の故障分類	14
2.4 電力機器を用いた安定化制御	15
2.5 GFL型・GFM型インバータを用いた安定化制御	19
2.6 単相同期化カインバータ (SSI)	22
2.7 三相同期化カインバータ (TSI)	28
2.8 マイクログリッド構想 (MG)	37
第3章 BCPを考慮した分散型蓄電システム管理のためのマイクログリッド周波数制御	
3.1 電気設備のBCP対策	40
3.2 蓄電池制御によるBCP対策	41
3.3 EMSによる蓄電池制御・管理	42
3.4 マイクログリッド周波数制御による蓄電池制御・管理の提案	43
3.5 提案手法によるシミュレーション	50
第4章 単相同期化カインバータを用いた住宅マイクログリッドに関する実験的検討	
4.1 災害対応型住宅マイクログリッドの構築	58
4.2 単相同期化カインバータを用いた蓄電池運用実験	59
4.3 災害対応力向上に対する検討・考察	61
第5章 三相同期化カインバータ導入による高圧配電系統の系統安定性に関する検討	
5.1 実験環境	64
5.2 三相同期化カインバータを用いた負荷投入実験	74
5.2.1 実験方法	74
5.2.2 負荷投入実験に対する考察	75
5.3 1回線地絡事故における三相同期化カインバータの動作検証	76

5.3.1	実験方法	76
5.3.2	1回線地絡事故実験に対する検討・考察	77
5.4	同期発電機脱落事故時の三相同期化カインバータの動作検証	78
5.4.1	実験方法	78
5.4.2	発電機脱落試験に対する検討・考察	79
第6章 単相および三相同期化カインバータを活用した配電システムモデルに関する実験・検討		
6.1	単相，三相同期化カインバータ活用した配電システムモデルの形成	81
6.2	配電システム事故時の動作検証	82
6.3	配電システム事故発生時に対する検討・考察	83
第7章 結論		
	結論	86
	参考文献	86
	謝辞	88

緒言

近年、電力系統への再生可能エネルギー(VRE: Variable Renewable Energy)の大量導入により、従来の大規模同期発電機による供給割合が低くなり、供給信頼度に影響を与えることが懸念されている。このため、同期化力・慣性力に関する検討・対策、VREのインバータへ擬似慣性機能を追加したグリッドフォーミング(GFM: Grid Forming)インバータに関する研究・開発が盛んにおこなわれている。広島大学ではGFMインバータを配電系統に適用するため、単相同期化力インバータ(SSI: Single-phase Synchronous Inverter)を開発し、供給信頼度の向上や系統安定化の効果を検証している。複雑化・多様化する電力系統において、供給信頼度の維持・改善は、大規模停電と密接に関連する重要な課題である。一方、関連企業では災害発生時の損害を最小限に抑え、事業の継続や回復を図るための計画として事業継続計画(BCP: Business Continuity Plan)が進められている。このためBCPの要求を満たすエネルギーシステムとして電力系統から切り離しが可能なマイクログリッド(MG: Micro Grid)が注目されており、MG内の蓄電池管理のできるエネルギーマネジメントシステム(EMS: Energy Management System)などが注目されている。しかしながら、BCPにおける蓄電池管理、インバータを用いたMG構築、さらには単相MGについては開発途上の技術であり、技術開発と実証研究が必要とされている。

そこで、本論文では上記の蓄電池管理を含むBCP技術、インバータを用いた一般的な三相MGおよび新しい取組として単相MGの構築を取り扱う。ここでは広島大学で開発したSSIに注目し、これとGFM型三相同期化力インバータ(TSI: Three-phase Synchronous Inverter)を活用した配電系統モデルを形成し、SSIとTSIによるMG構築の有効性を検証した。また、災害時低圧系統におけるMGモデルを構築し、災害時に活用できる蓄電池管理方法を新たに提案し、これらの有効性を示した。

第 1 章

序論

1.1 研究目的・背景

電力系統への再生可能エネルギー(VRE: Variable Renewable Energy)大量導入により、従来の大規模同期発電機による供給割合が低くなり、供給信頼度に影響を与えることが懸念されている。このため、同期化力・慣性力に関する検討・対策、VREのインバータへ擬似慣性機能を追加したグリッドフォーミング(GFM: Grid Forming)インバータに関する研究・開発が盛んにおこなわれている。広島大学ではGFMインバータを配電系統に適用するため、単相同期化力インバータ(SSSI: Single-phase Synchronous Inverter)を開発し、供給信頼度の向上や系統安定化の効果を検証している。複雑化・多様化する電力系統において、供給信頼度の維持・改善は、大規模停電と密接に関連する重要な課題である。一方、関連企業では災害発生時の損害を最小限に抑え、事業の継続や回復を図るための計画として事業継続計画(BCP: Business Continuity Plan)が進められている。このためBCPの要求を満たすエネルギーシステムとして電力系統から切り離しが可能なマイクログリッド(MG: Micro Grid)が注目されており、MG内の蓄電池管理のできるエネルギーマネジメントシステム(EMS: Energy Management System)などが注目されている。しかしながら、BCPにおける蓄電池管理、インバータを用いたMG構築、さらには単相MGについては開発途上の技術であり、技術開発と実証研究が必要とされている。

そこで、本論文では上記の蓄電池管理を含むBCP技術、インバータを用いた一般的な三相MGおよび新しい取組として単相MGの構築を取り扱う。ここでは広島大学で開発したSSSIに注目し、これとGFM型三相同期化力インバータ(TSI: Three-phase Synchronous Inverter)を活用した配電システムモデルを形成し、SSSIとTSIによるMG構築の有効性を検証した。また、災害時低圧系統におけるMGモデルを構築し、災害時に活用できる蓄電池管理方法を新たに提案し、これらの有効性を示した。

本論文は以下のように3～7章においてSSSIの有効性を確認した。

第3章では、BCPの概要およびBCP対策の中でも電気設備に要件を絞って述べる。また、EMSを利用した蓄電池制御方法にも概説し、MG周波数制御による蓄電池制御と本制御によるBCP対策について提案する。提案手法のシミュレーションを実行し、シミュレーション結果と考察について述べ、その有効性について言及する。

第4章では、SSSIを用いて災害対応型住宅マイクログリッドを構築し、災害時の蓄電池協調運用を考慮した実験を行い、災害対応力向上に対する検討・考察を行う。また、有効性についても言及する。

第5章では、TSIを導入した際の高圧配電システムモデルを構築し、負荷試験、短絡事故、発電機脱落試験を行い、TSI導入の有効性について述べる。

第6章では、SSSIとTSIを活用した配電システムモデルを形成し、新たなMG構築を行う。SSSIとTSIとの組み合わせにより電圧不平衡対策や系統安定性に有効であることを検証する。

第7章では、本研究を総括するとともに、残された問題点について言及する。

1.2 研究の意義

・社会的意義

先に述べた再生可能エネルギーの増加に伴う、系統の安定性問題の解消、近年の自然災害増加もよる、災害対策が必要になっていることから、人命確保や事業の継続の観点から電気を継続して使用するための方策がとられている。このように現在の社会では切っても切り離せない電気を災害時にも安定して供給する手段の一つとして本研究は社会的意義があるといえよう。

・学術的意義

現在の同期化力や慣性力の確保には、本研究のような、①疑似的な発電機インバータの設置、②無効電力調整装置の設置、③M-Gセットの設置と大きく分けて3種類ある。さらに①に関しては、三相のインバータについての研究は国内でも多方面、海外では導入が進んでいる。本研究は①の中でも単相分野に着目したものである。単相分野の研究は本研究以外まだ研究が進んでいないことからこの研究が進むことで、系統の安定化技術の新たな可能性を提示できると考えている。また、三相方面の研究が盛んなことからこれらと同期し動作することで、相乗的な効果を立証できれば、今後の有効的な系統安定化対策の一つとして可能性を示唆できると考える。

・その他

電力という分野について、私の知りうる範囲は配電系統分野のみであった、またその影響については、仕事上、個別（事業者単位）で考えていた。例えば、高調波についても個々の需要家が『高調波ガイドライン』等に定められた基準をクリアすれば、実質的に問題ないものだと思っていた。これは本研究における慣性力や同期化力にも言えるもので、各エリアで慣性力を保持していれば問題がないと考えていたが、系統全体でみると相対的に再生可能エネルギーが増加することでこれらの問題が顕在化することがある。いままでの考え方（工事業務）とは違った新しい視野で研究することで、自分自身への成長へつながることができる有意義な研究であると感じた。

第2章

配電系統の電力需給安定化技術

2.1 電圧系統安定度の分類

電力系統は、多種多様な発電機器や負荷構成などにより複雑に構成されており、また需要電力に合わせて時々刻々と状態が変化している上、雷の直撃や動物の接触など絶えず何らかの外乱に直面している。このような状況下で、電力動揺は回避できない現象であり、頻繁に起こりうるものである。この動揺を抑制することは、電力系統の信頼性を確保し、安定的で経済的な電力供給を行うためには不可欠である。

電力系統が安定に運転されている状態とは、系統のどの部位においても電圧及び周波数が規定値内に維持されており、有効電力、無効電力のバランスがそれぞれ取れている状態である。しかし、急激な負荷変動など電力システムの安定運転を妨げる要素は数多く存在する。安定度とは、負荷変化や故障などによるシステムの状態変化に対して、安定して電力供給を維持しうる度合いを意味する。

電力系統の安定性には、同期の安定性、電圧の安定性、周波数の安定性があり、これら3種類の安定性が保持されなければ安定な運用はできない。同期の安定性は、同期機が電力系統の主要な発電機として用いられていることから発生し、一般に安定度と呼ばれる。これは系統内の発電機の電圧位相角がそれぞれ一定値に収束し、同期運転を維持できるかどうかで安定性を判別するものである。安定度は、大きく以下の2つに分類される。

過渡安定度

系統に加わるじょう乱が比較的大きく、非線形の影響が大きく、かつじょう乱発生からの経過時間が短い領域の安定度を言う。回転子間動揺の第1波、あるいは1秒程度（長くとも2～3秒程度）の時間領域での現象を取り扱う。

定態安定度

電力系統が平衡運転状態にあつて、極めて微小なじょう乱が加わったときに、動揺が収まり元の状態に戻るか否かの安定性をいう。過渡安定度とは違い、十数秒の比較的長い時間領域に対する安定度を対象とするため、通常は線形近似した微分方程式を解析に用いるが、非線形性が問題となる場合もある。

制御系への影響を考慮し、時間ごとに過渡領域（0～1[sec]）、中間領域（1～10 数[sec]）、定態領域（10 数 sec～無限時間）に分類することもできる。以降では、特に過渡安定度二着目する。

2.2 過渡安定度の要因

電力系統には同期発電機が接続されており、系統周波数で決まる同期速度で運転（同期運転）を行っている。発電機の回転子軸と発生磁束軸との相対位置を示す角度を相差点角といい、発電機および電力系統が動揺していない場合、相差点角は一定である。系統事故の発生、発電機脱落、負荷脱落等により系統状態が急変すると、発電機の回転子は、加速もしくは減速して相差点角が動揺するが、このとき加速エネルギーを吸収できる範囲内であれば新たなバランス点を中心に動揺した後収束し、同期運転を継続することができる。しかし系統状態の急変の大きさ、発電機の特性によっては、同期運転が継続できず、不安定な運転状態となる。この状態を脱調現象という。過渡安定度とは、系統事故発生後に相差点角が動揺しても発電機が同期運転を継続できる度合である。以下、過渡安定度において重要な同期化力、過渡安定度が不安定になった場合に発生する脱調現象、過渡安定度解析手法について記述する。

同期化力

同期化力とは、複数の同期発電機が系統に連系しており、同期速度で運転している状態で、何らかの原因でその同期状態を乱す発電機故障や出力変動などの系統じょう乱が起きた場合に、元の同期のとれた状態に戻すために発電機間に働く復元力のことである。

同期化力を定式的に説明するために、図 2.1 のような一機無限大母線系統を用いる。一機無限大母線系統とは、一機の発電機が送電線により無限に大きな電力系統に接続されているモデルである。発電機から見た電力システムは、周波数と電圧の大きさが一定の電源として考えることのできるというものである。またこのような大容量の電力系統をモデル化して電圧と周波数が一定の母線のことを無限大母線と呼ぶ。図 2.1 において、 V_g は発電機の電圧、 V_∞ は無限大母線の電圧、 X は発電機の内部リアクタンスを含むと線路リアクタンスである。電力系統における各種制御機器の抵抗分はリアクタンス分に比べると十分に小さいため無視できると仮定する。また、無限大母線の電圧を位相の中心基準に設定し、この位相基準と発電機内部電圧の位相角との差を相差点角 δ とする。この発電機と無限大母線の周波数が一致しないと、安定な電力を正常に伝達できなくなるのである。

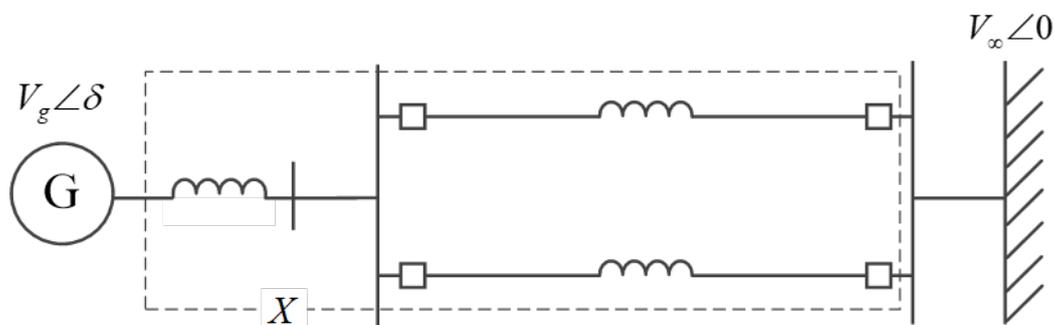


図 2.1 一機無限大母線系統

運転中に送電線において故障などが発生すると、相差角の動きは次に示す動揺方程式（発電機の運動方程式）で表される。

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.1)$$

ここで M は発電機の慣性定数、 P_m は機械的入力、 P_e は発電機出力（有効電力）である。また、発電機出力 P_e は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} P_e &\triangleq \operatorname{Re}\{\dot{V} \dot{I}\} \\ &= \operatorname{Re}\left\{V_\infty e^{j\delta} \left(\frac{V_\infty e^{j\delta} - V_g}{jX}\right)\right\} \\ &= \operatorname{Re}\left\{j \frac{V_g}{X} (V_\infty - V_g e^{j\delta})\right\} \\ &= \frac{V_\infty V_g}{X} \sin \delta \end{aligned} \quad (2.2)$$

この式より横軸を相差角、縦軸を発電機出力として、電力相差角曲線を描くと、図 2.2 のようになる。この相差角曲線において機械的入力 P_m を一定であると仮定し、そのときの相差角を δ_0 とする。このとき、発電機出力 P_e と機械的入力 P_m が $P_e = P_m$ の関係にあるとすると、発電機は平衡運転の状態にあり、電力は安定に送電できる。ここで、電力系統に地絡故障などの何らかの系統じょう乱が発生し、相差角が δ_0 から δ_1 へと変化したとすると、 $P_e < P_m$ となり、動揺方程式の右辺は正なので、発電機は加速する。よって、相差角は元の平衡運転状態である δ_0 へ戻る方向へ動く。また逆に、相差角が δ_0 から δ_2 へと変化した場合は、 $P_e > P_m$ となり、動揺方程式の右辺は負となるため発電機は減速し、同じく相差角は平衡運転状態である δ_0 へ戻る方向へ動いていく。このような、系統じょう乱による相差角の変化が起こっても元の平衡状態へ戻ろうとする方向へ働く力を同期化力という。

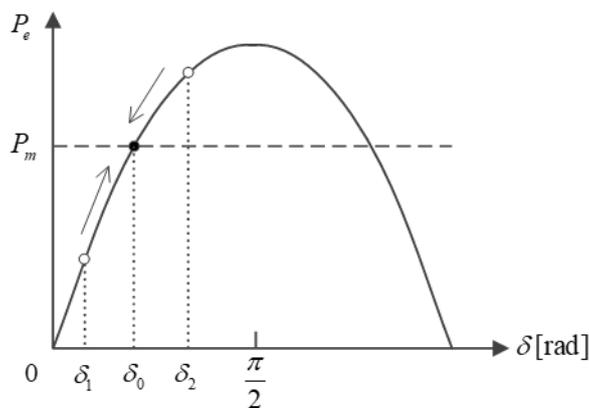


図 2.2 電力相差角曲線

また、同期運転を維持するためには相边角曲線の傾きが正でなくてはならない。つまり、

$$\frac{dP_e}{d\delta} > 0 \quad (2.3)$$

となればよい。この状態であれば、同期運転を維持できる。しかし、じょう乱が過大であったり、同期化力が不足していたりする場合は、発電機の相边角が大きくなり、脱調に至ることもある。また、曲線の傾きが負の場合は安定運転ができないことは明白である。

システムの状態が平衡点近くにあれば同期化力と制動力を用いて電力系統の安定性を議論することができる。特に、系統事故が発生した場合には事故除去などによって系統構成や運転状態が変化するため、安定平衡点がもとと異なる点に移動することもある。

脱調現象

電力系統を構成する主要素の一つである発電機は、ごく一部を除いて同期発電機が用いられている。電力系統において、短絡や地絡などの系統事故が発生すると、事故点近傍の発電機では電圧低下に伴って伝達できる電気エネルギーが低下する。このとき同期発電機の機械的入力ほぼ一定なので、電氣的出力とのバランスが一時的に崩れて回転数に加速力が生じ、これが極端な場合は同期運転を保つことができずに不安定な運転状態となることがある。この状態のことを脱調現象という。この状態を放置し続けると、系統全体の発電機の連鎖的な運転不安定、最終的には停止を引き起こし、系統全体に及ぶ広範囲な停電に発展する可能性がある。従って、系統じょう乱時には、まずこのような脱調を防止するとともに、万一脱調に至った場合でも、その影響を局所的に止めて、系統全体に波及させないための適切な対策が必要である。実際に、米国で起きた脱調の一例を以下の表1に示す。

表 2.1 米国での脱調現象例（1996年8月10日）

事故様相・発生日	事故の概要	事故の進展状況	対策
アメリカ西部 500 kV 系統の 連鎖的事故波及による 大停電事故 1996年8月10日	500 kV 送電線において樹木接触事故が連続して発生し、複数の送電線が遮断。これにより発電機が加速脱調を起こし、系統が不安定な状態にいたった。さらに発電機の誤遮断から無効電力の供給源を失い系統が四つに分離。各単独系統において、UFRによる負荷制限のために停電にいたった	送電線樹木接触事故 ↓ 複数送電線が連鎖遮断 ↓ 系統脱調発生 ↓ 系統不安定後、四つの 系統に分離 ↓ 大停電	運用限度の見直しなど

出典：電力系統安定化システム工学（電気学会出版）

脱調は、同期発電機が相互に同一回転数で運転を維持しようとする同期化力と密接な関係がある。系統事故により加速力が生じた発電機とそのほかの発電機の間には、回転数の偏差により位相角差が生じる。この差が大きくなるにつれて、加速した発電機には同期化力による減速力が働き、系統じょう乱が小さい場合には、元の同期運転状態に戻ることができる。しかし、系統じょう乱が大きい場合には、加速した発電機を同期化力で戻すことができず、ついには脱調に至ってしまうのである。脱調や同期化力を機械的な模型で可視化したものとして、図 2.3 に示す野田モデルがある。

図 2.3 の発電機-1 負荷系統を二つの円盤とこれらをゴム紐で結んだ機械模型において、円盤 M の錘（電氣的には負荷）を増加させるにつれて、発電機側の円盤 G と負荷側の円盤 M のねじれ（電氣的には相差角）が大きくなり、 $\theta = 90^\circ$ のときに W は最大値（負荷へ送電できる電力の最大値）となる。それ以上の負荷をかけようとする θ が 90° を超えるが、伝達できる動力（送電電力）はむしろ低下して、さらに θ が拡大していき、円盤 G に追従して円盤 M が回転（発電機と負荷の同期運転）を保てない状態（脱調）となる。

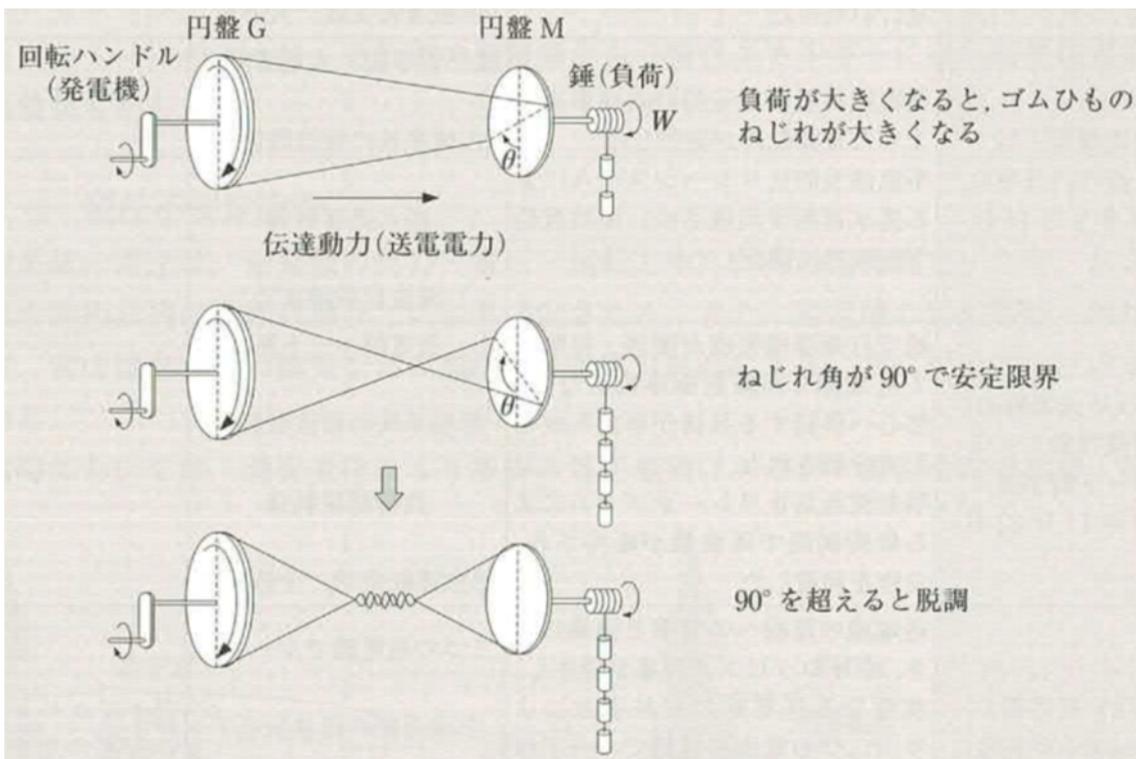


図 2.3 野田モデルによる同期化力・脱調の可視化

参考: 京都大学工学部 野田モデル

<https://www.youtube.com/watch?v=kNAGhdEo5to>

<https://www.youtube.com/watch?v=Hg5GbtW6lxU>

過渡安定度解析の一つに等面積法と呼ばれる手法がある。これは、一機無限大母線系統（あるいは二機系統）に対してのみ適用できる手法である。

まず、図 2.4 に示す一機無限大母線系統において、次の系統事故が発生したと仮定する。

- (1) 時刻 t_1 に、2 回線送電線の片側 1 回線で三相地絡事故が発生する。
 - (2) 時刻 t_2 に事故が発生した送電線一回線の両側の遮断器を開放して事故を除去する。
- その後、残りの 1 回線の送電を継続する。

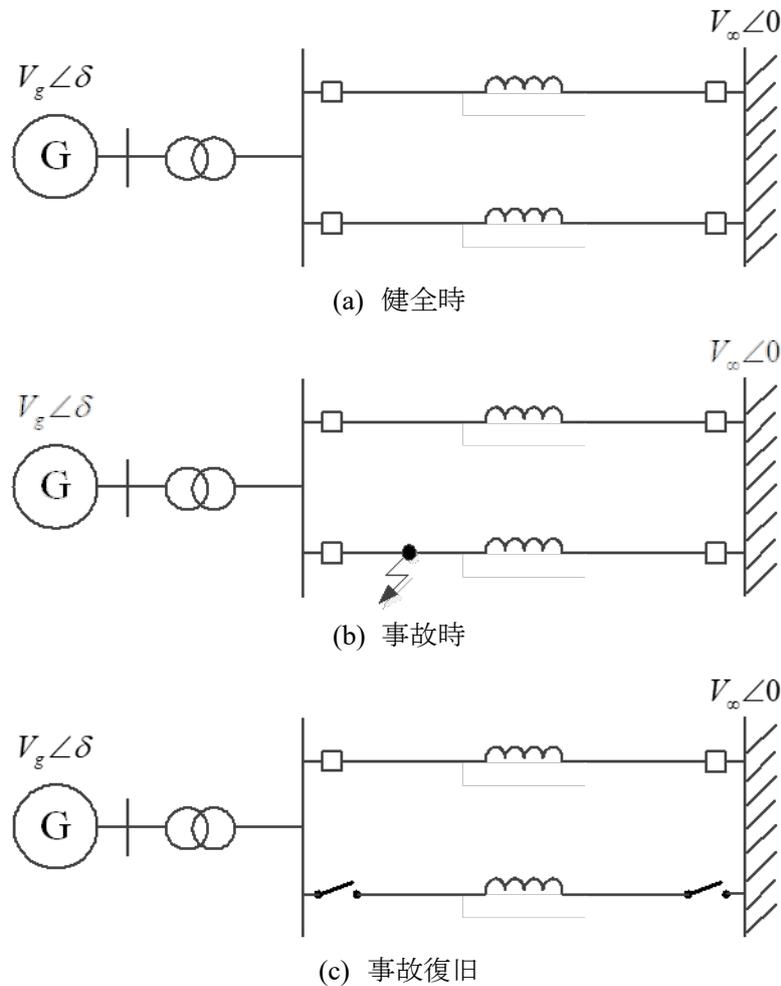


図 2.4 事故の発生と除去

一機無限大母線系統の動揺方程式に両辺に $d\delta/dt$ を乗じると、

$$M \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\delta}{dt} (P_m - P_e) \quad (2.4)$$

(2.4)式において左辺は、

$$M \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} M \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right\} = \frac{dE}{dt} \quad (2.5)$$

$$\therefore \frac{dE}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.6)$$

$$\therefore E = \int dE = \int (P_m - P_e) d\delta \quad (2.7)$$

上式より、 P_m と P_e の差を δ で積分（面積を求める）すると、加速エネルギーがわかる。

3相地絡事故が続いているとき、故障インピーダンスを介して、電力系統が地絡するため発電機の電氣的出力 P_e は、事故除去後の1回線送電時よりも低下する。これを図2.5の等面積法を用いて説明する。まず、事故発生前の発電機の運転点はa点 $[\delta(t_1)=\delta_1]$ に移動するが事故発生とともにb点に瞬時に移動する。発電機の機械的入力 P_m が一定であると仮定しているので、発電機回転子は加速され、発電機の運転点は同図のb点からc点へ移動する。時刻 t_2 [c点： $\delta(t_2)=\delta_2$]に事故が除去され、1回線送電になるため、発電機回転子は図2.5の E_a の面積に等しい運動エネルギーを余分に受け取ることになる。時刻 t_2 （事故回線開放）後には、送電線が1回線の運転状態となり、運転点がc点からd点に移動する。このとき、無限大母線と発電機の間リアクタンスの合計値は2回線時よりも大きくなるので、発電機運転点は1回線時の電力相边角曲線上をf点へ向けて移動する。このd点からf点へ移動する間、電氣的出力 P_e は機械的入力 P_m を上回るので発電機の回転角速度 ω は減速され、相边角 δ は増加し続ける。 $P_m = P_e$ となる点f点（ $\delta = \delta_c$ ）に到達する前に十分に減速されれば、相边角 δ の増大は停止し、やがて1回線時の安定な平衡点に引き戻される。しかし、減速しきれずにf点を通過し $\delta > \delta_c$ となると、 $P_m > P_e$ となり、発電機は再び加速され、結局脱調に至る。これらの現象を、相边角と電氣的出力の時間変化から見ると、図2.6に示すようになる。

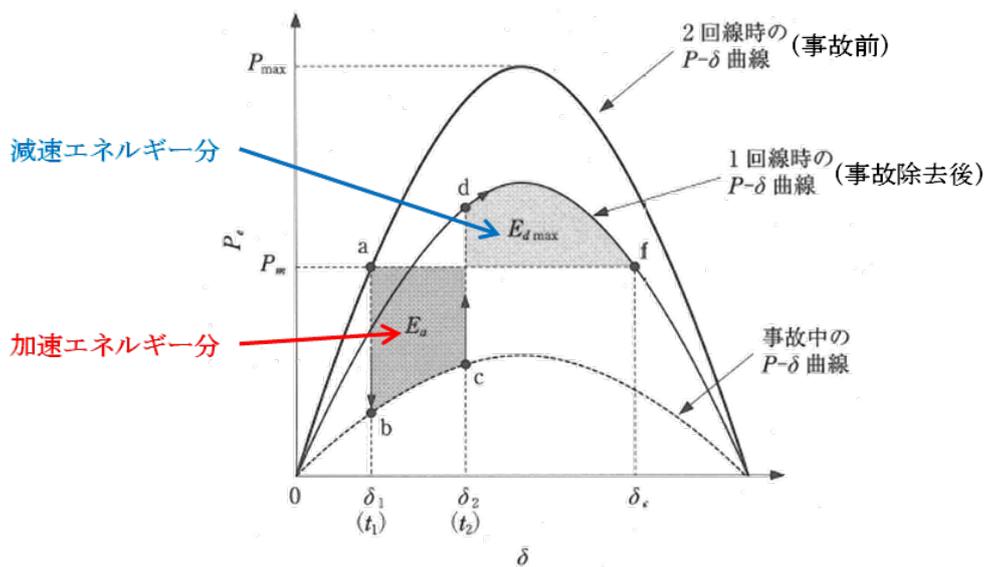
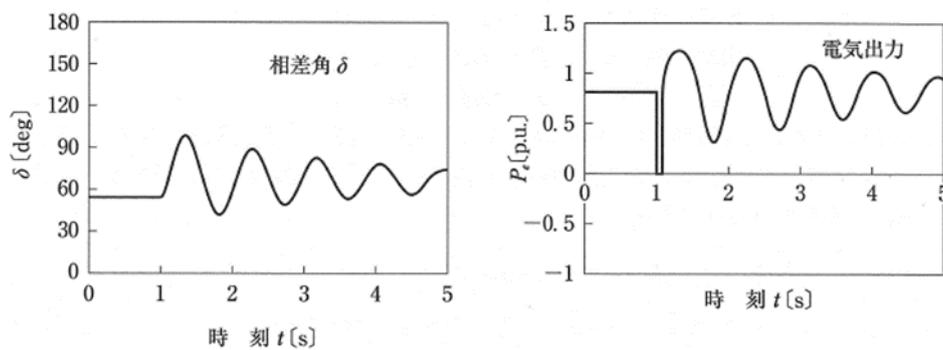
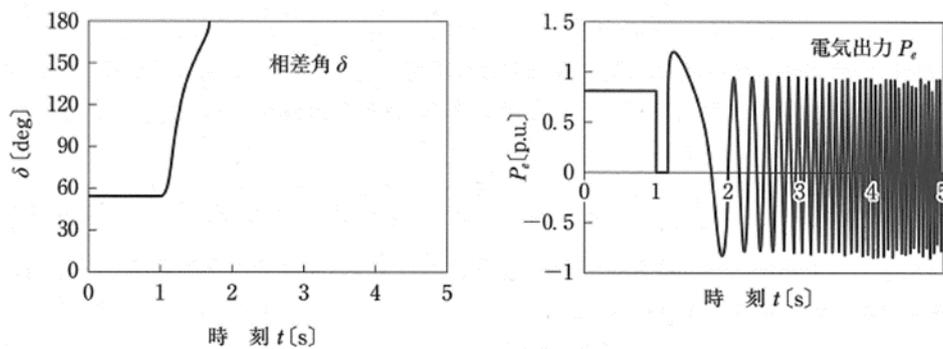


図 2.5 等面積法



(a) 十分に減速される場合(安定)



(b) 脱調する場合(不安定)

出典：電力系統安定化システム工学（電気学会発行）

図 2.6 相差角と電氣的出力の時間変化

2.3 配電系統の故障分類

・瞬時故障と永久故障

配電系統の故障には瞬時故障と永久故障がある。配電系統における故障において、瞬時故障は大部分を占める。瞬時故障の場合、保護装置によって系統を開路し、故障点の消滅を待つて再閉路する方式が有効となる。

・瞬時故障

瞬時故障は故障点が自然に消滅して継電器動作に至らない場合や、回路が一旦停電した後に故障点が消滅し、再閉路した場合であり、瞬時的な雷サージフラッシュオーバや飛来物、鳥獣、樹木などが電線に瞬間的に接触することなどに起因する故障である。

・永久故障

永久故障は故障点が消滅しない場合で、例えば、断線垂下、機器の絶縁破壊及び他物との長時間接触などに起因する故障である。

・短絡事故

配電線で短絡事故が生じると、過電流継電器（OCR）が動作する。

過電流継電器は高圧の電路で発生した短絡事故や、系統負荷が過負荷状態になった状態を検出し、動作する継電器である。

低圧電路では、配線用遮断器の本体に過電流を検出する機構が搭載されているため、外付けの過電流検出機構は不要であるが、高圧系統では流れる事故電流を遮断器本体で検出はできず、過電流継電器を設けて事故電流を検出し、その信号を用いて高圧遮断器を動作させるのが基本となる。

配電線で短絡事故が生じる主な原因は、以下の通り。

①自然災害、②支持物倒壊による短絡（例えば、自動車衝突による）、③配電線の機器内の不良による接触、④道路工事による地中線の損傷

・短絡故障保護

短絡故障は、過電流継電器により保護する。検出感度については、配電線の過電流継電器は通常設備容量の 150 ～ 200 %、需要家の過電流継電器は契約最大容量の 150 % で動作させている。

また、時限設定は設備被害の拡大防止のため、上位・下位系統と協調を図りながら、できるだけ高感度（通常 0.2 ～ 0.4 秒程度）で遮断するように運用されている。

・地絡事故

大地（地面）に電気が流れている状態のことである。配電線で地絡事故が生じると、地絡継電器が動作し、下位区間で停電が発生します。

地絡継電器は、高圧系統に発生した地絡事故を保護するための継電器である。

高圧ケーブルや高圧機器が損傷・劣化し、大地と電路が接続されてしまうことを地絡と呼び、一般に「漏電」とも呼ばれる。地絡事故も短絡事故と同様に早急に取り除かなければならない。漏電状態を放置すると、漏洩電流による発熱で火災を引き起こしたり、人体への感電事故につながるなど大変危険である。

配電線で地絡事故が生じる主な原因は、以下の通り。

①自然災害、②配電線の機器内の不良による接触、③樹木鳥獣の接触、④道路工事による地中線の損傷、⑤クレーン車の接触

・地絡故障保護

過電流継電器と同様に、上位・下位系統と協調を図りながら、電力会社の設定値よりも速く動作する設定にしなければ、大規模停電に波及するおそれがある。波及事故を防止するため、保護協調を検討する。

2.4 電力機器を用いた安定化制御

電力系統内には、多種多様な負荷が存在する。その負荷には、一般家庭で使用される電灯やエアコンその他の家電機器、工場で使用される電気炉、また工作用電気機器などが含まれる。これら負荷は一般に定格電圧で使用される際に最も良い性能を発揮するように設計されている。そのため、機器使用時に電圧が定格から逸脱すると、機器の精度や効率・寿命に悪影響を与えてしまう。これら機器を高精度且つ安全に使用するために、安定的に良質な電力を供給する必要がある。さらに、需要家負荷の受電端電圧を規定値に保持することは不可欠である。以下に主な3つの方法を記載する。

- (1) 発電機の界磁電圧を操作して発電機の内部誘導機電力を調整する。
- (2) 各タップ制御変圧器を操作して変圧比を調整する。
- (3) 調相設備を開閉する。

上記の電圧制御能力には、それぞれに特徴と限界があり、お互いに補完し合うことで各所の電圧を適正値に維持している。この節ではこの3つに加えて、パワーエレクトロニクス技術を用いた FACTS 機器と呼ばれる高速制御可能な装置を使用した制御についてもまとめる。

同期発電機は目標電圧、目標力率を時刻別に系統需要に応じて定めるタイムスケジュール方式の電圧制御を行っている。目標電圧は AVR(自動電圧調整器)、目標力率は自動力率調整器 (APFR : Automatic Power Factor Regulator) により制御され、これらは自動的に発電機の励磁電流を制御して端子電圧を一定にしたり、力率を一定にしたりして制御するものである。また、AQR (無効電力調整器) により発電機の無効電力出力を制御することも行われている。

同期発電機による安定化制御の特徴として、

- ・電圧を連続的に制御できる。
- ・オンライン制御をすれば、電圧を高速に制御できる。

また、課題として、

- ・系統全体の電圧を制御することは容易であるが、局所的に電圧を制御することは困難。
- ・送電線と変圧器で消費される無効電力が大きくなるにつれて、その皮相電力が増大するため送電線と発電機の抵抗による有効電力損失が大きくなる。
- ・機器絶縁や発電機に機械的問題による制約のため、電圧、無効電力、力率に比較的厳しい制限がある。

さて、次に発電機の安定化制御について重要な AVR と PSS について説明する。

(1) AVR(自動電圧調整装置)

AVR は、同期発電機の電圧を自動的に高い精度で一定に維持するための装置である。同期発電機の励磁装置に備え付けられており、定常時の負荷変動に対して電圧を維持し、電圧急変時に即座に電圧を回復する機能および無効電力を調整のうえ動態安定度を向上させることによって、負荷遮断時の電圧上昇を抑制し、過渡安定度を向上させる。つまり、端子電圧が低下した場合に励磁電圧を大きくし、発電機内部電圧を上昇させることで、発電機出力を増加させるものである。すなわち系統故障により発電機が加速している際に、速やかに励磁電圧を増加すると、同期化力が高められ発電機の加速を抑制することができ、過渡安定度が向上する。特に、AVR の応答速度の高速化や、AVR が調整できる励磁電圧の最大値（励磁系シーリング電圧）を挙げることで、過渡安定度のさらなる向上に貢献することができる。AVR には、いくつかの種類があるが、最近では高速過渡応答タイプのサイリスタ励磁方式が多く採用されている。これはいわゆる超速応励磁方式と呼ばれる部類に属するものである。

(2) PSS(電力系統安定化装置)

超速応励磁方式の採用が進んでおり、これにより AVR の応答を速めていくと、同期化力が増す一方で、制動力が小さくなる場合がある。これは安定な状態に引き戻す力である同期化力を強めると、第1波（事故発生直後の揺れ）をより強く抑制できる一方で、特性がより振動的になるために、第2波以降の制動力が悪化するため生じる。つまり電力動揺がかえって拡大する場合がある。これに対して付加されるものが PSS である。PSS とは、発電機励磁系に取り付けられる制御器の一つである。制御部と励磁機器部からなる発電機励磁系において、PSS は AVR とともに制御部を構成しており、その特性は系統の安定度に対して重要であり大きな影響を与える部分である。PSS から AVR へ補助入力を行い、AVR の速応性によって発生した負の制動トルクと逆向きである正の制動トルクが生まれるような位相補償により、第2波以降のダンピングを増加させて、系統の安定化を図る。PSS の入力要素としては、発電機回転数とする $\Delta\omega$ 方式、発電機有効電力とする ΔP 型方式、および、その両方を用いる $\Delta P + \Delta\omega$ 方式が一般に採用される。 $\Delta\omega$ 型 PSS は ΔP 型 PSS に比べ、長周期動揺に効果的であるという特徴を持つ。図 2.7 に ΔP 型 PSS モデルの一例を示す。

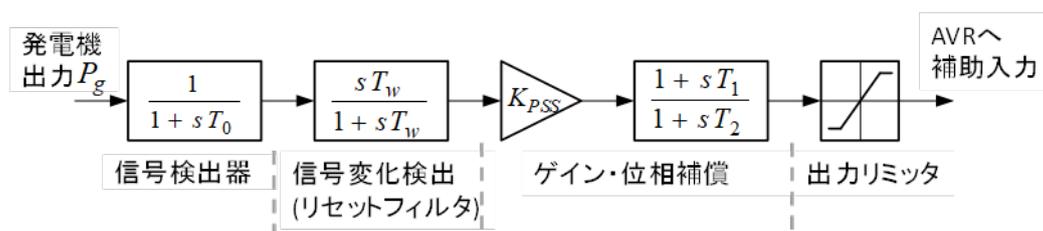


図 2.7 ΔP 型 PSS モデルの一例

最近の電力用変圧器のほとんどに負荷時タップ切換装置が導入されており、これを操作することにより変圧器の変圧比が変化し、電圧を制御できる。これらは、LRT (Load Ratio Transformer)や SVR (Step Voltage Regulator)と呼ばれており、LRT は各種変電所、SVR は配電線の電圧降下の補償に用いられる。

タップ付き変圧器による安定化制御の特徴としては、

- ・発電機端子電圧よりも比較的制約の緩い電流を変えることで、無効電力出力を変更するため、広い範囲で電圧を制御できる。
- ・タップ制御装置は比較的安価であり、個々の変圧器に設置することができることにより、局所的に電圧を制御できる。
- ・設置地点の電圧をフィードバックする簡単な方法により、自動制御に適している。

また、課題としては、

- ・電圧を段階的にしか制御できない。
- ・変圧器と送電線に流れる無効電力が増大し、その皮相電力が大きくなるので、送電線と変圧器の抵抗による有効電力損失が増加する。
- ・分散型電源の連系により、逆潮流が発生すると、逆に電圧安定性が低下する可能性がある。

発電機やタップ制御変圧器による電圧制御は、無効電力出力を調整するものである。しかし、需要から電氣的に遠い地点にある発電機が無効電力を供給しているため、受電端に直接無効電力を発生・消費する機器である調相設備を設置しなければならない。電力用コンデンサのように無効電力を発生するものを進相調整設備、分路リアクトルのように無効電力を消費するものを遅相調相設備という。同期調相機は進相も遅相も可能な調相設備である。電力用コンデンサ (SC) や分路リアクトル (ShR) は、無効電力調整源としてよく利用されており、一般的に電力需要の多い昼間には SC が投入され、無効電力余剰による電圧が高くなる深夜や休日には ShR が投入される。

電力調相設備による安定化制御の特徴として、

- ・無効電力供給を調整するものであるため、発電機に負担をかけない。
- ・発電機に対する無効電力供給能力の制限を受けないため、設置量だけの能力が得られる。
- ・設置地点付近の電圧を局所的に制御できる。

一方、課題としては、

- ・比較的高価である。
- ・設置スペースが必要なため、大木は変電所以外には設置しにくい。
- ・設備容量が段階的であるため、電圧を段階的にしか制御できない。
- ・遮断器を用いて投入・解放による操作のため、自動制御には向かない。

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器は、制御・電子・電力の3技術を総合したパワーエレクトロニクス技術で、電力系統が持つ機能を増強させるために活用される。電力系統内の特定位置に FACTS 機器を設置すると、この技術により FACTS 機器が制御入力に素早く応答し、系統の電圧・位相・インピーダンスの変更が可能である。このため、電圧制御や位相同様制御の高速制御が可能となり、電力系統の安定性が改善される。これまで安定性を必要としている電力系統運用において、FACTS 制御器の使用が拡大されてきた。FACTS 機器の持つ特徴により、特に重負荷な系統における電圧安定性の改善が期待できる。

電力機器による安定化対策をまとめると以下のようなものがある。

表 2.1 系統安定化対策の分類

区 分		系統安定化対策の代表例	対 策 区 分			
			第一 平常時の 安定化	第二 迅速確実な 事故除去	第三 事故波及の 防止	
設 備 対 策	主回路機器	送変電機器	○			
		事故遮断機器		○		
		並列機器	○		△	
		直列機器	○		△	
		直流送電	○			
	制御装置	発電機	○			
		発電機制御装置	○		△	
		系統制御装置	事故除去リレーシステム		○	
			系統安定化システムの設置 [※]			
			脱調防止システム 周波数異常防止システム 電圧安定性確保のための制御システム 過負荷保護システム			○
運用対策		系統変更 潮流調整 自動給電(AFC, VQC)	○			

○：主対策，△：補助対策

※ 事故波及防止リレーシステムと呼ぶこともある。

出典：電力系統安定化システム工学（電気学会出版）

2.5 GFL 型・GFM 型インバータを用いた安定化制御

再生可能エネルギーの大量導入に伴い、従来型の同期発電機の比率が減少することで系統の慣性力、さらには同期化力が低下しており、電力系統の周波数安定性が課題となっている。このことから、再生可能エネルギーや蓄電池等に用いられるインバータにも、既存の同期発電機が担っていた電力系統安定性への貢献、特に周波数安定性への貢献が期待されている。この課題に対するインバータ技術として、既存の回転機の慣性力をインバータに具備し、系統に供給する疑似慣性技術が研究されている。この方式のインバータは Grid Forming (GFM) インバータおよび Grid Following (GFL) インバータに分類し得る。GFM と GFL の分類に関して、現状では定義が曖昧な部分はあるが、制御法の視点では概ね、図 2.8 のような特徴を持つインバータとして記述して良いと考えられる。

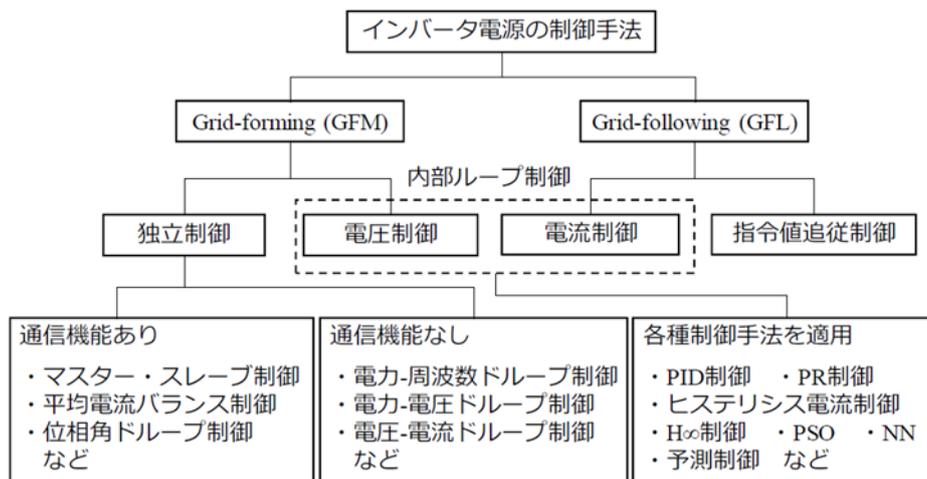


図 2.8 GFM および GFL インバータの分類

GFL インバータ

GFL インバータは、同期発電機などの強力な電圧源が系統に存在することを前提に、電流源として系統に追従する制御方式であり、従来型の電流源型インバータがこれに相当する。電流源型インバータは電源と直列にインダクタンスを接続することで交流負荷側からみた回路のインピーダンスが高くなり、電流源として動作する。

電流形の出力は、電圧がほぼ正弦波、電流が方形波であり、電流が一方向しか流れない。このため電圧形で必要であった帰還ダイオードは不要である。しかし、デバイスに逆電圧が印加される期間があるため、逆阻止機能を持つデバイス（直列ダイオード）を負荷する必要がある。

GFM インバータ

GFM インバータは、回転型同期発電機に近い特性を持ち、電圧源として電力系統に同期連系が可能なインバータである。系統安定化のために高速で応答でき、独立電源としてブラックスタート機能やグリッド構築機能を持つ。

電圧型インバータは交流出力側からみるとインバータのインピーダンスが低くなるので、直流電圧が急変しないことも特徴である。電源には急峻に変化する電流が流れるため、電源と並列にコンデンサを接続する。コンデンサに蓄えられたエネルギーは電圧として負荷に供給され、インバータはスイッチングにより出力電圧を制御する。出力は、電圧が方形波パルス、電流がほぼ正弦波である。サイリスタと並列に帰還ダイオード（フリーホイリング・ダイオード）を接続し、誘導負荷の遅れ電流成分を直流電源に帰還させている。用途としては、電圧源に用いるコンデンサが小型軽量であるため中小容量のインバータに使われており、さらに一般の機器は常時一定電圧を供給する電圧源である商用電源に接続されることを前提に設計されているため、電圧型インバータは負荷への問題が少ないことから、広く用いられている。

GFM インバータの優位性

表 2.3 に GFM インバータと GFL インバータの特徴を示す。先に述べた GFM インバータと GFL インバータを比較すると、GFM インバータは急速な慣性応答に優れ、周波数応答においてもと比べて優位性がある。これらは交流発電機も持っている性能であるが、広島大学では単相の GFM インバータを開発したので、これを単相分野においても容易に適用できるため、交流発電機よりも設置の容易さで優位性がある。

表 2.2 GFM および GFL インバータの特徴

	GFM (SSI) Grid-Forming	GFL (従来型) Grid-Following
基本機能	系統構築型電源	系統追従型電源
電源特性	電圧源	電流源
同期方式	電力・電圧位相角特性 による同期	PLL
ブラックスタート	可	自立電源が必要
グリッド構築	可	発電機が必要
高度な慣性応答	○	×
周波数応答(Nadir)	○	○または×

周波数安定性への寄与

周波数安定性に関する指標として、周波数変化率（RoCoF : Rate of Change of Frequency）および最低周波数值（Nadir）が挙げられる。図 2.9 のように、RoCoF および Nadir の値は小さいほど周波数安定性が高いといえる。

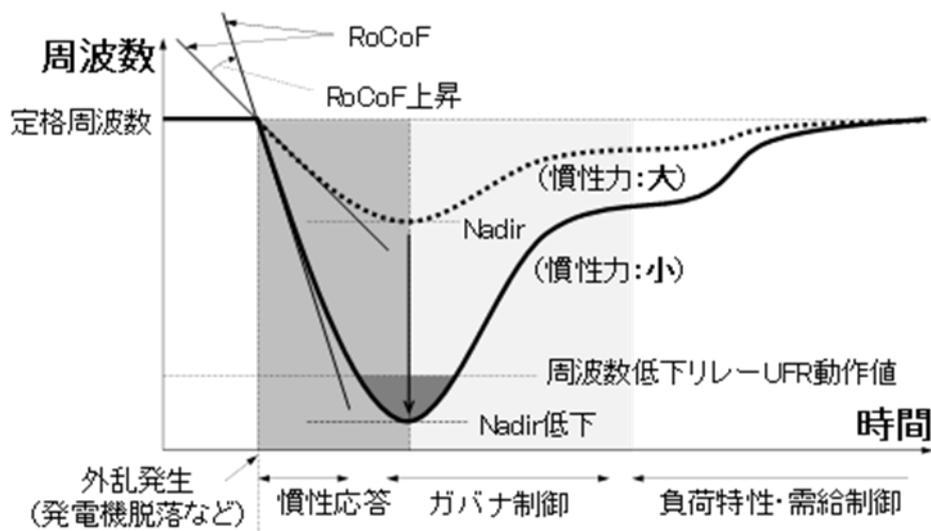


図 2.9 再生可能エネルギー大量導入下における系統周波数特性

GFM インバータは独立した電圧源として同期発電機に近い特性を実装しており、過渡電流を高速に供給できることから、疑似慣性として RoCoF と Nadir 両者の改善に貢献し得る。ただし、GFM インバータにも様々な種類があり、設計により性能に幅がある。一方、GFL インバータは系統内の独立電源の存在を前提として系統連系運転を行う電流源型インバータであり、従来型の分散電源はこの型に属し、前述のように様々な課題が発生している。このため近年は周波数応答特性を実装した様々な方式の新型 GFL インバータが提案されているが、一般に GFL インバータは応答速度に限界がある。そのため Nadir には十分貢献できるが、従来型発電機のような高速な RoCoF への貢献は期待しにくい。

以上のように、本章では電力機器やインバータによる電力系統の安定化制御についてまとめた。電力システムは常に外乱にさらされており、高品質で安全な電力を送るために様々な制御が必要となる。また GFM インバータは、供給サイドで系統安定化を担保する手段として近年、さらなる研究開発が進められている。

2.6 単相同期化カインバータ (SSI)

SSI の概要

本節では、広島大学で開発した単相同期化カインバータ (Single-phase Synchronous Inverter: SSI) の制御系について説明する。第3章で述べたように、同期発電機が持つ同期化力は電力系統を安定的に運用するために重要な役割を担っている。再生可能エネルギー (Renewable Energy Sources: RES) の変換器となる系統連系用インバータの増加は従来電源である同期発電機の減少を意味し電力系統の慣性の低下は不安定化の要因になる。安定度向上の観点から、同期発電機と同様の働きを持つ擬似慣性を電力変換器に具備することは、効果的な手法の一つである。広島大学で開発した SSI は同期発電機と同等の機能を持つため、災害等の非常時に単相マイクログリッドを構築可能であり、電力系統から解列された小規模系統を独立に運用することが可能である。したがって、SSI は RES 導入時における電力の安定供給に不可欠であるだけでなく、非常時のレジリエンス向上に対しても有効であるといえる。

SSI の基本回路構成は図 2.10 に示すとおりであり、蓄電池側の直流リンク電圧 V_{DC} を交流電圧 v^{inv} に変換する単相フルブリッジインバータ回路を用いている。直流側にはリンク電圧 V_{DC} を許容範囲内に保ちながら有効電力を授受するために、蓄電池を接続している。交流側にはインダクタンス L のみを使用しキャパシタンス C は用いていない (図 2.10 における X)。SSI はインダクタンス L を介して外部系統に接続し、SSI 端子と内部起電圧との相互関係に基づいて系統への出力有効電力 P_e をやりとりする。

ここで、 v^{inv} は SSI 出力電圧 (実効値: V^{inv})、 θ_{inv} は SSI の擬似回転子角度、 $\omega_{inv}(\omega)$ は SSI の内部周波数、 i^{inv} は瞬時 SSI 出力電流 (実効値: I^{inv})、 v^{grid} は瞬時グリッド電圧 (実効値: V^{grid})、 θ_{diff} は位相角度ずれ、 P_e は単相有効電力出力である。

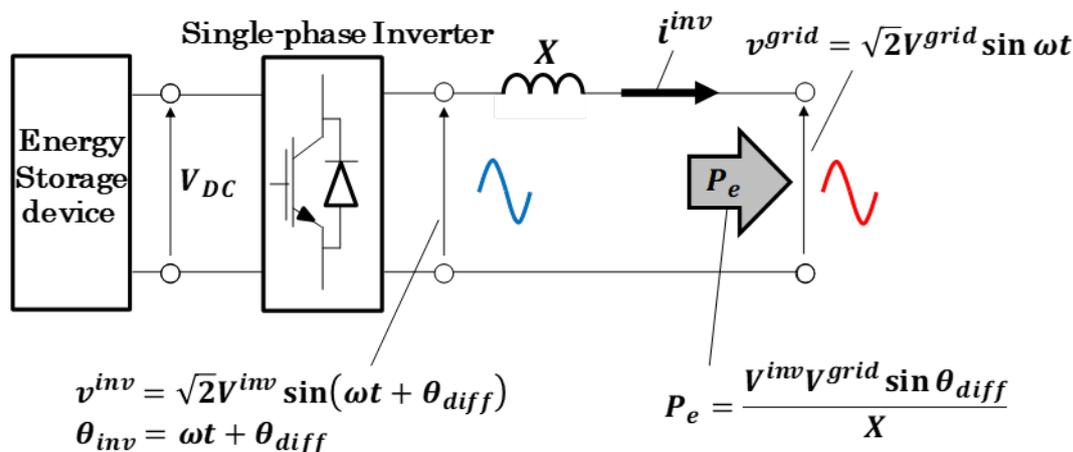


図 2.10 単相同期化カインバータ (SSI) の基本回路構成

コアとシェルの分離設計

SSI では、制御系設計に際して、中核部分（コア）の設計の柔軟性を保証できるよう、コアをサポートする殻の部分（シェル）という概念を取り入れている。SSI におけるコアとシェルの概念を図 2.11 に示す。制御系設計のコンセプトは、実効値解析に系統安定化制御系を極力そのままインバータに実装できることである。一般に電力系統の安定性および信頼性評価には種々の解析が必要となるが、全体系統の安定性評価に際して最も重要な定態安定性解析や過渡安定性解析は実効値レベルの解析である。したがって、従来の系統安定化設計手法に基づき、系統安定化効果に寄与する最適なインバータが設計できれば、極めて有用である。

- (1) コアの設計提案法においては、制御系のコア部分は、いわゆる電力系統の安定化に重要な特性を実装する。コアの設計法としては、従来の安定化制御系の設計法が全て対象となる。すなわち、電力系統全体の実効値解析に基づく大規模な最適設計法を想定している。
- (2) コア特性を実現する PWM（Pulse Width Modulation）制御系をシェルとして独立に構築する。シェルの特性は、コア部分で設計した制御性能をそのまま実現できる制御系である。

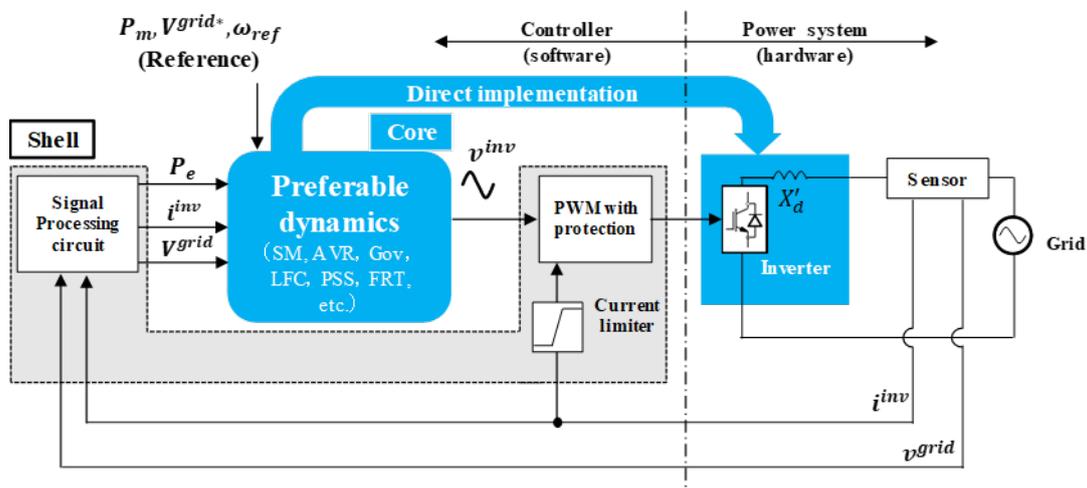


図 2.11 Core-shell 型インバータモデルの概念図

コアの回路構成

4.2 節で述べたようにコアとシェルの分離設計の提案し、そのコア部分には、同期機 X_d' モデルによる動揺方程式に一次遅れ系の调速機機能（Governor: GOV）を付加したモデルを採用した（図 2.12）。インバータの内部周波数と内部位相角はこのモデルから得られる。

この部分と次節以降で述べる自動電圧調整装置 (AVR / AQR), 負荷周波数制御 (Load Frequency Control: LFC) がコア部分のモデルであり, このモデルに基づく演算結果よりインバータ出力電圧を制御する。これより, 実際の同期機の挙動を模擬し, 同期化力を発生させる。これは, 系統内のダンピングの向上に寄与し, 複数台の SSI による単相マイクログリッドの安定運用を可能とする。

以上は三相同期機のモデルに相当するものであるが, 提案モデルでは動揺方程式に基づいた内部の回転系物理モデルにより, 回転磁界による動特性と等価な を演算し, に基づいてインバータ出力電圧を制御することで, 単相系統と安定して同期できるようにしている。

図 2.12 において, M_{inv} は擬似慣性定数, D_{inv} は擬似ダンピング係数, P_m は擬似機械入力, P_{gov} はガバナ出力, K_{gov} はガバナゲイン, T_{gov} はガバナ時定数, ω_{ref} は周波数指令値である。この同機器の同期メカニズム (Power Synchronization) は, PLL (Phase Locked Loop) なしに同期を実現することができ, PLL の不安定性を回避し, 安定な同期を達成することができる。特に, 独立運転時のマイクログリッドの安定運用において効果的である。

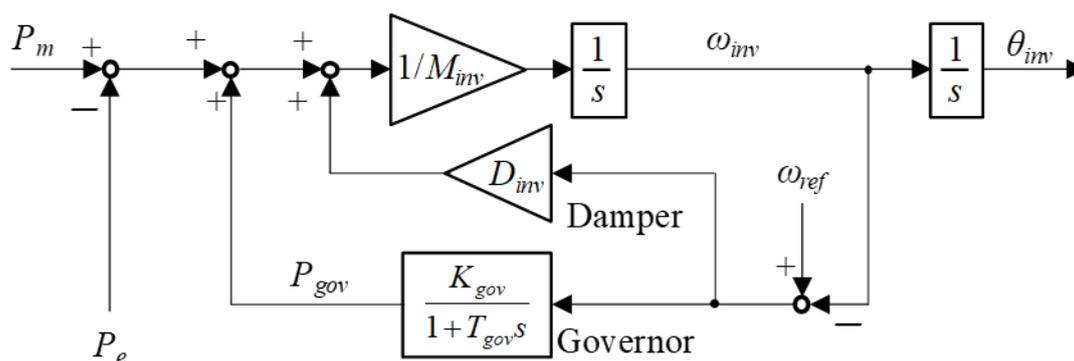


図 2.12 同期発電機を模擬した動揺方程式モデル

自動電圧調整装置(AVR/AQR)

単相マイクログリッドの実用化に向けて, 新たに電圧・無効電力制御系の検討を行った。本節では, この検討によって開発した制御方式について述べる。まず, 従来型の小容量発電機は, 系統連系時には無効電力を指令値に制御する AQR 運転により, 系統に追従し安定性を維持している。一方, 大容量発電機は, AVR 運転により系統電圧を維持する。よって, マイクログリッド運転を想定する SSI 制御系には, 両者を想定した図 2.13 の制御系を提案する。提案法では, 単独運転時またはマイクログリッド運転時は AVR 制御を行うことで, SSI の自立運転を可能とする。このため図 2.13 の Q_{sig} を 0 または 1 に設定し, 電圧制御 (AVR 制御) と無効電力制御 (AQR 制御) の切替に対応する。

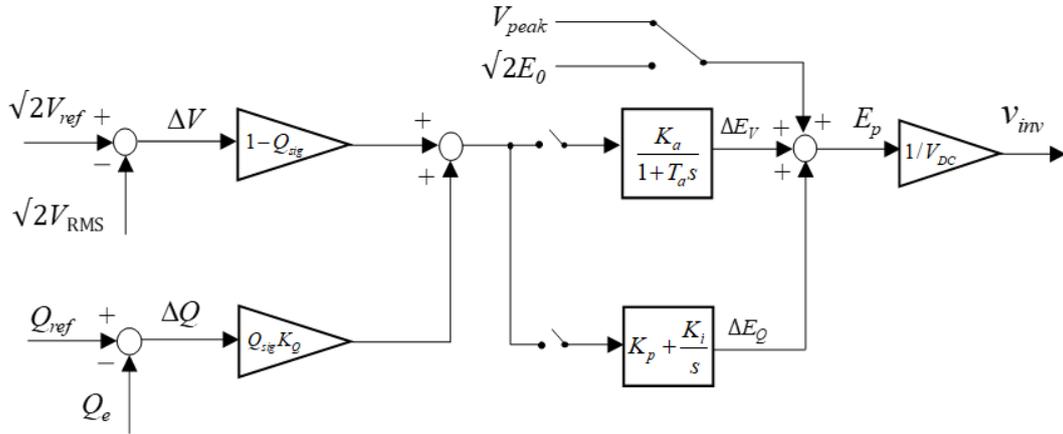


図 2.13 AVR/AQR モデル

AVR 運転では、基本的には電圧指令値 V_{ref} は 100[V] を指令し、単相 100[V] を安定して出力させる。複数機で協調運転をするためには垂下特性が必要であるため、一次遅れ系を用いる。一方、AQR 運転は系統連系時あるいはマイクログリッド運転において、グリッド側で電圧が強固に維持されている場合に用いる。この場合、無効電力指令値 Q_{ref} は 0[Var] を指令し、無効電力は出力させない。また、厳密に出力指令値を維持するために積分器を持つ比例積分 (PI) 制御を準備している。複数台の SSI を連系させる際に、特に AVR 運転において PI 制御を用いると、SSI 間で干渉し不安定となるので、その際は 1 次遅れ制御を用いる。なお、実験においては、SSI の立ち上げ時に希に不安定となる事例があるので、立ち上げ時には端子電圧ピーク値 V_{peak} を用い、SSI が定常運転になった後に、 $E_0 = 100[V]$ に切り替える。また、制御の切替の際には、切替のショックを抑えるため、 E_0 の値も更新している。例えば、Q-PI 制御から V-1L 制御への切替では、次式を適用する。

$$\sqrt{2}E_0 = E_p - \Delta E_V \tag{2.8}$$

ただし、右辺は切替直前の Q-PI 制御モードでの最終値で、 E_p はインバータ内部電圧の振幅である。 V_{DC} はインバータに印加される入力電圧であり、AVR 出力はこの値を用いて正規化されている。

図 2.13 における V_{RMS} は、実験環境におけるノイズやオフセットの対策により提案された実効値フィルタから計算された v^{grid} の実効値である。 V_{RMS} は一般的な実効値計算(2.9)式により計算されるが、図 2.14 に示すように正弦波の半周期ごとに計算範囲を変更していく。この場合、最大で $T[\text{sec}]$ の遅れが生じるが、提案技術ではマイクログリッドの安定化を重視しているので、この問題については考慮しない。

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v^{grid})^2 dt} \tag{2.9}$$

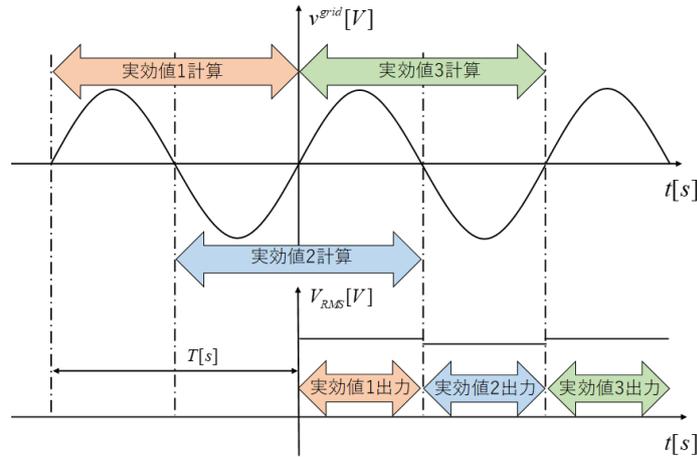


図 2.14 RMS フィルタ

負荷周波数制御(LFC)

災害時等において独立運転あるいは小規模マイクログリッド運用を可能にするためには周波数制御機能が必要になる。このため、提案法ではコア部分において、電力系統の標準的な LFC (Load Frequency Control) 機能を付加した。この LFC は、各電力会社が次式に基づいて、自エリア i 内の需給調整を行うことで周波数の協調制御を実施する方式である。

$$AR_i = \Delta P_i + K_i(f_i - f_R) \quad (2.10)$$

(2.10)式において、 AR_i は地域 i の制御要求量、 $\Delta P_i = P_i - P_{Ri}$ は隣接エリアへの電力融通計画値からの偏差、 P_i は地域 i から流出する連系線電力の合計出力、 P_{Ri} は地域 i から他地域への電力融通計画値、 K_i は変換ゲイン、 f_i は地域 i で観測した現在の運用周波数、 f_R は電力系統の運用周波数 (50 または 60Hz) である。LFC においては(2.10)式の AR (Area Requirement) は地域 i 制御誤差に相当するものであり、この誤差 AR_i を負帰還させ、誤差を小さくするよう地域 i の発電機群の出力を調整する。そして、各地域 i でこの制御を実施することにより、 $AR_i = 0$ を極力維持し、連系系統全体の周波数と電力融通 P_i を計画地の近傍に押さえ込む。なお、この方式では交流系統内の平均周波数はどこで観測しても同一であるという性質を利用している。この方式を以下の式を用いて適用している。

$$P_{LFC} = \left(K_{p_LFC} + \frac{K_{i_LFC}}{s} \right) ACE \quad (2.11)$$

$$ACE = -AR = P_{out_R} - P_{out} - K_{LFC} \Delta \omega_{inv} \quad (2.12)$$

ここで、 P_{LFC} は周波数制御コントローラ出力、 K_{p_LFC} と K_{i_LFC} はそれぞれ比例ゲインと積分ゲイン、 P_{out_R} は SSI 出力計画値、 P_{out} は SSI から流出する連系線電力、 $\Delta \omega_{inv}$ は SSI 内部

周波数偏差, K_{LFC} は電力変換係数である。LFCを実施する際には, (2.11)式のPI制御系に基づき, 周波数および出力計画値からの偏差を除去するために, P_{LFC} は図 2.12 の擬似機械入力 P_m へ加えられる。単独運転時には, 連系線電力 P_{out} は0となるため, 自動的に周波数偏差のみに基づいたFFC (Flat Frequency Control) を実施する。また, この機能を実施するにあたり, 図 2.15 に示す系統モデルを想定している。

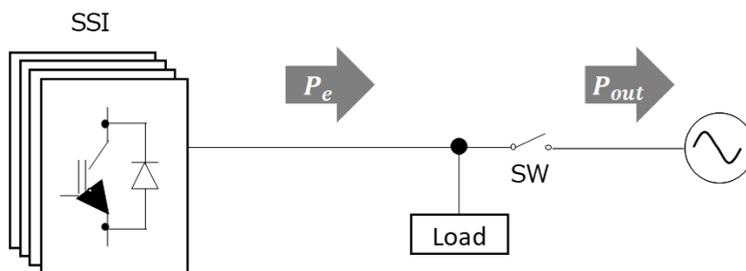


図 2.15 SSI 系統モデル

以上の制御系と機能を組み込んだ SSI のコアとシェルの概念を図 2.16 に示す

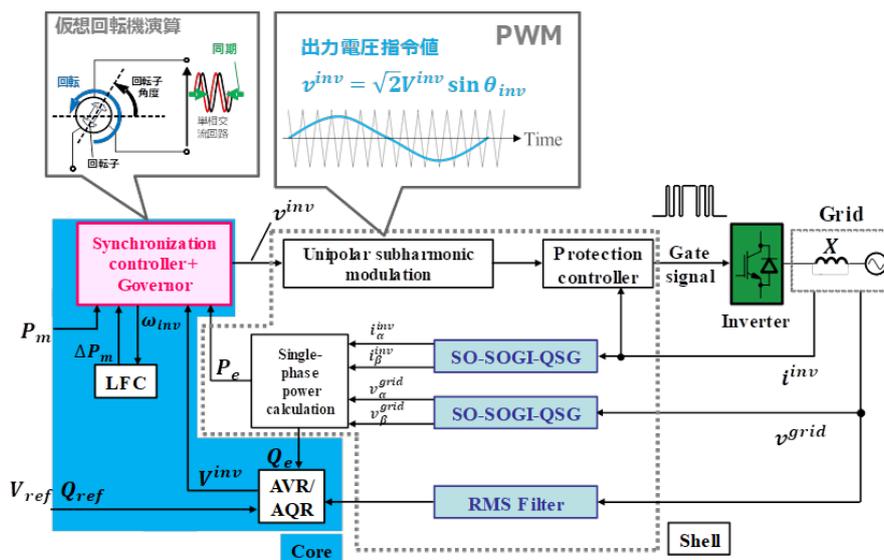


図 2.16 SSI のコアとシェルの概念

2.7 三相同期化カインバータ (TSI)

TSI の概要

まず、本論文で用いる三相インバータの基本原理をまとめる。ここでは、直流電力から三相交流を合成するための方法を実際の整流素子を用いた回路で説明する。三相の場合、直流電源を中性点のある $\pm E/2$ の電源と考える。電源の中性点を接地電位と考え、インバータ出力の相電圧の基準電位とする。この図では、スター結線のRL三相負荷が接続させている。

6個のスイッチで構成されているインバータのスイッチング動作は、S1がオンしているときはその下のS2はオフしているものとする。S3とS4、S5とS6の組についても、同様の動作をする。

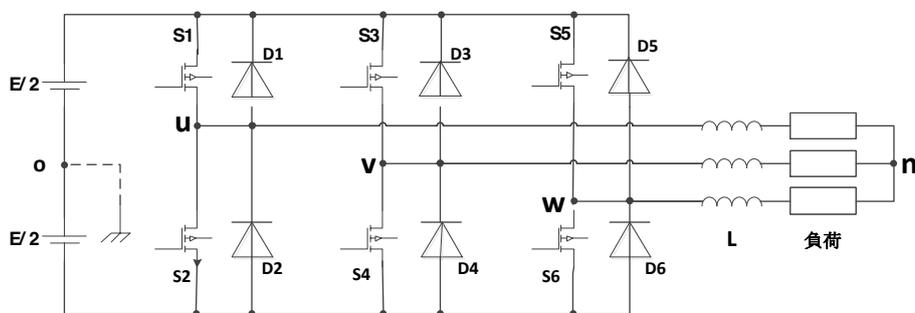


図 2.17 三相インバータ回路

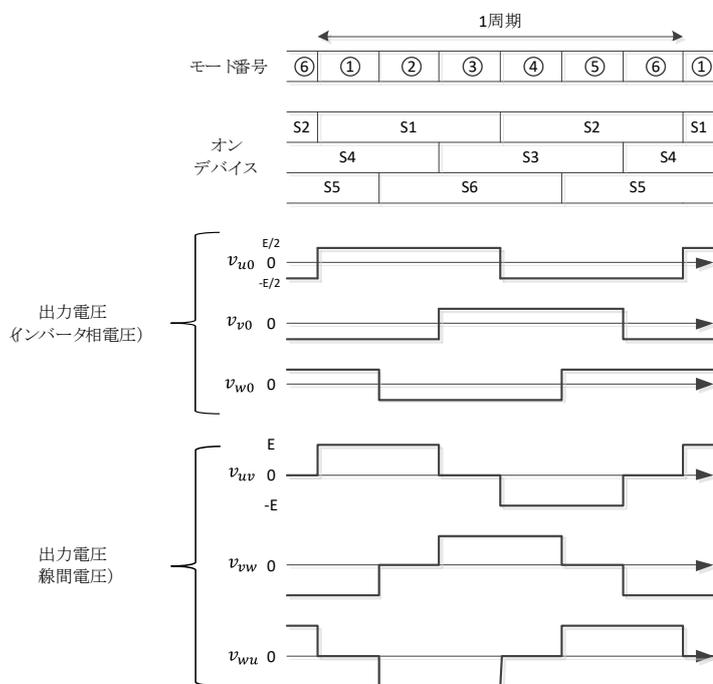


図 2.18 スイッチングによる電圧波形

ここで、インバータはスイッチング素子であるため出力されるパルス波形は振幅が一定である。よってパルス幅を制御しなくてはならない。この PWM 制御により、パルスのデューティ比を制御して出力電圧の大きさを制御することができる。

三角波をキャリア信号（搬送波：Carrier signal）、正弦波を変調波信号（Modulating signal）として、両方の信号を比較してその大小に応じてパルスを出力する方式である。

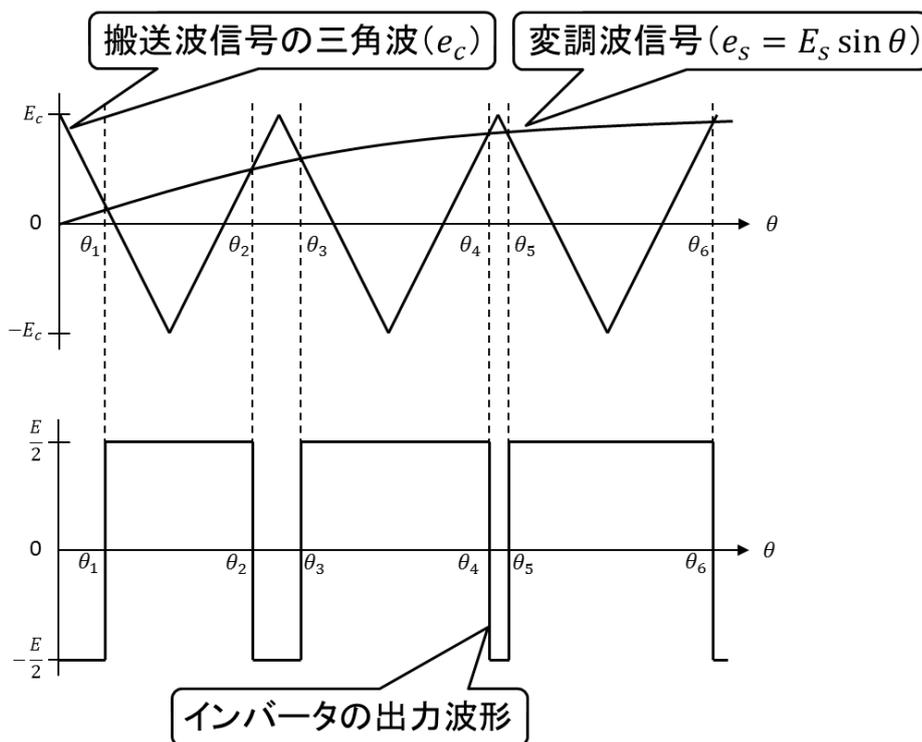


図 2.19 PWM 信号の原理

以下に三角波-正弦波方式の原理を示す。インバータで出力すべき電圧波形を

$$\text{正弦波 } e_s = E_s \sin \omega_s t \quad (e_s : \text{変調波信号}, E_s : \text{振幅}, \omega_s : \text{角周波数}) \quad (2.13)$$

とする。一方、三角波 e_c は搬送波信号（キャリア）であり、変調波信号より高い周波数である。PWM 信号は、この 2 つ波形を比較し、 $e_s > e_c$ のときオン、 $e_s < e_c$ のときオフにすることで正弦波が合成される。

このような三相インバータに擬同期化力機能を実装し実機実験を行う。設計中のインバータは三相平衡状態を仮定しており、現段階では不平衡状態を考慮していない。擬同期化力機能を有する TSI はリアクタンス L を介して系統に接続されており、有効電力 P_e はインバータと系統間でやり取りされる。また、直流リンク電圧 V_{dc} を許容範囲内に保ちながら有効電力を授受するために、直流側に蓄電装置を接続している。図 2.20 において、 v_{uv} , v_{vw} , v_{wu} は線間電圧(瞬時値)、 ω_{inv} はインバータの内部周波数、 θ_u , θ_v , θ_w はインバータの擬同期化角度、 i_u , i_v , i_w は線電流(瞬時値)である。

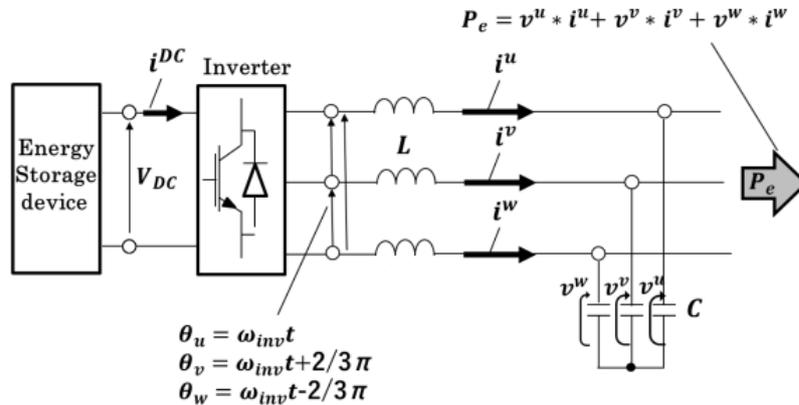


図 2.20 同期化カインバータモデル

・コアとシェルの分離設計

本論文では制御系設計に際して、中核部分 (Core) の設計の柔軟性を保証できるよう、コアをサポートする殻の部分 (Shell) という概念を説明する。本論文におけるコアとシェルの概念を図2.21に示す。

インバータ制御回路のうち、電力システムの安定化に重要な部分を Core と呼び、インバータの主な動特性はここでモデル化される。一方、全体的に高速な動特性を持つ制御回路は Shell と呼ばれる。Shell の高周波領域での安定性が保証されれば、系統全体は、Core が電力システムを高精度に近似できるようになりより安定になる。

電力系統全体の 24 時間安定性を保証するためには、系統障害、連続した非線形擾乱、周期的な高周波擾乱などの有無にかかわらず、実際の状況においていかなる不安定性も生じないことが要求される。そのために、電流制御を平常時は主ループの外で待機させ、臨界状態を検出したときに作動させるという効果的な過電流抑制を採用しており、主制御ループから内部の電流制御を排除している。また、すべての内部ループや高周波特性を持つものなど、不安定要因を極力排除している。

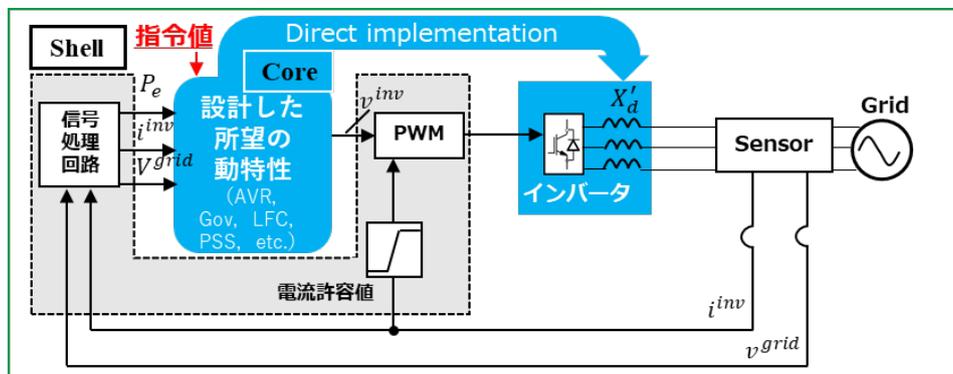


図 2.21 Core-shell 型インバータモデルの概念図

・同期コントローラ

Core と Shell の分離設計では，Core には同期機 X_d' モデルをもとに一次遅れのガバナ(調速機機能)を動揺方程式に追加した(図 2.22)。この演算によりインバータの内部位相角 θ_{inv} と内部周波数 ω_{inv} が得られる。この部分と後述する AVR(自動電圧調整器)および AQR(自動無効電力調整器)が Core に該当し，インバータの出力電圧は計算により導き出された θ_{inv} と電圧波高値を用いて制御される。これにより，実際の回転機が持つ同期化力を擬似的に作り出すことで系統内のダンピングを改善させる。さらに，複数台の SI によって構築される MG は安定した運用が可能となる。

動揺方程式に基づくインバータ内部の回転系物理モデルから θ_{inv} を演算し，回転磁界による動特性と同等な θ_{inv} を用いてインバータの出力電圧を制御することで，系統との安定した同期を実現する。

図 2.22 おいて，SSI の擬似回転子角度は θ_{inv} ，擬似慣性定数は M_{inv} ，擬似ダンピング係数は D_{inv} ，擬似機械入力 P_m ，有効電力出力 P_e ，ガバナ出力 P_{gov} ，ガバナゲインは K_{gov} ，ガバナ時定数は T_{gov} ，周波数指令値は ω_{ref} としている。この同機器のメカニズムは，PLL (Phase Locked Loop) を実装することなく系統との連系運転を可能にし，PLL の不安定性が影響することなく安定した同期を実現させる。特に，系統解列時の MG の安定運用において非常に有効である。

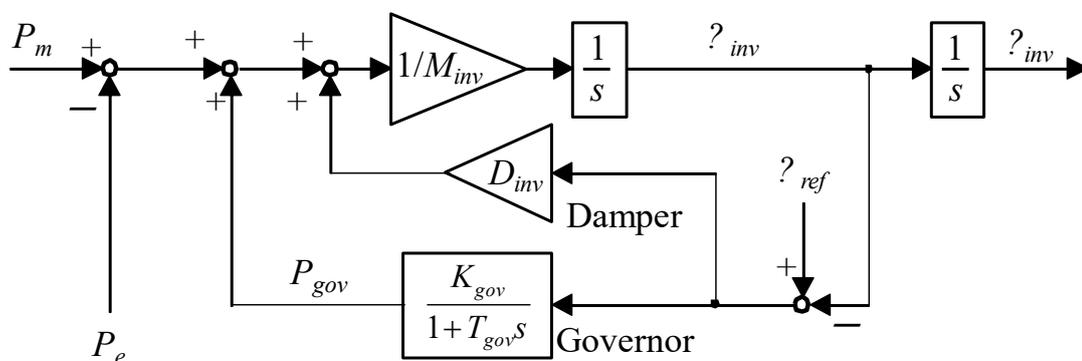


図 2.22 同期機モデル

・自動電圧調整装置(AVR/AQR)

広島大学の単相および三相における MG 構想の実現に向けて、AVR/AQR の検討を行った。本節では、設計した TSI の制御方式について説明する。まず、従来の小型発電機は、AQRにより無効電力を調整することで、系統の電圧や周波数に追従し安定性を保っている。一方、大型の発電機は、AVR によって系統電圧を所望の範囲内に制御している。よって、系統連系と MG 運転の両者を可能にするよう設計した制御系を図 2.23 に示す。

Q_{sig} はパラメータとして、0, 1 の変更により運転中に AVR と AQR を切り替えることができる。AVR は、電圧指令値 V_{ref} を所望の値に設定し、指令値と系統の電圧 v_{grid} との差分をなくすような制御を加える。ここで、今回作成した TSI は基本的に三相平衡の状態を想定しているため、電圧の不平衡状態を考慮した制御は実装していない。そのため、電圧制御に用いる v_{grid} は各線間電圧実効値の平均値になっており、制御に用いた v_{grid} の計算式を以下に示す。

$$v_{grid} = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (2.14)$$

v_d, v_q は uv, vw, wu を $\alpha\beta$ 変換した値 v_α, v_β を dq 変換した値であり、後の節で計算方法について説明する。この v_{grid} を電圧指令値に追従させることで、単独運転中や MG 運転中に電圧を制御する。

一方、AQR は系統連系運転時や MG 運転中に、系統側で電圧が強固に維持されている場合に採用する。このとき、無効電力指令値 Q_{ref} は 0[Var]を指令し、無効電力を出力させない。

また、厳密に出力指令値を維持するため、TSI の制御は電圧制御、無効電力制御どちらも基本的には積分器を持つ比例積分 (PI) 制御を採用している。しかし、先行研究において SSI を AVR かつ PI 制御を用いて運転し、複数台連系させた場合、SSI 間での制御が互いに干渉し合い、系統が不安定となる現象がみられた。その際は AVR に一次遅れ制御を用いてきた。今後、TSI と SSI の連系時に問題が生じるようであれば TSI の一次遅れ制御の適用も検討する。これらは PI_{sig} を 0 または 1 にすることによって切り替える。

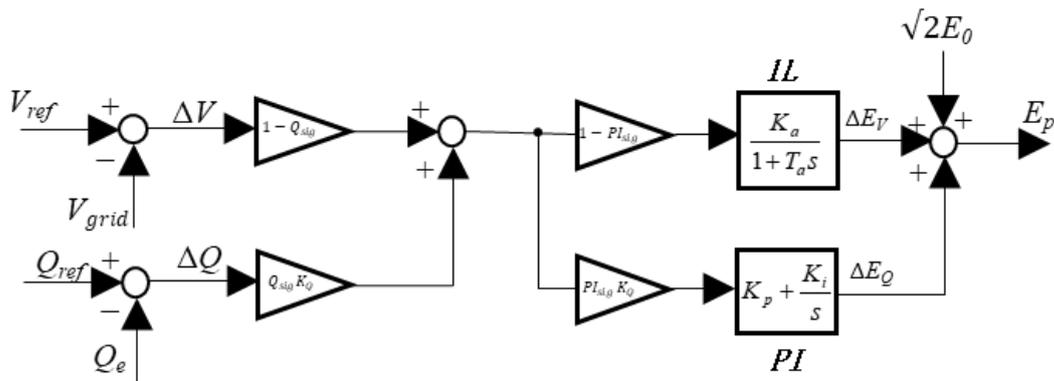


図 2.23 AVR/AQR モデル

図 2.24 における V_{RMS} は、uv, vw, wu 各線間電圧の実効値である。 V_{RMS} は一般的な計算は式 (2.15) により導出されるが、図 2.24 に示すように正弦波の半周期ごとに演算結果を更新していくため、最大で 1 周期 $T[s]$ の遅れが生じる。

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (2.15)$$

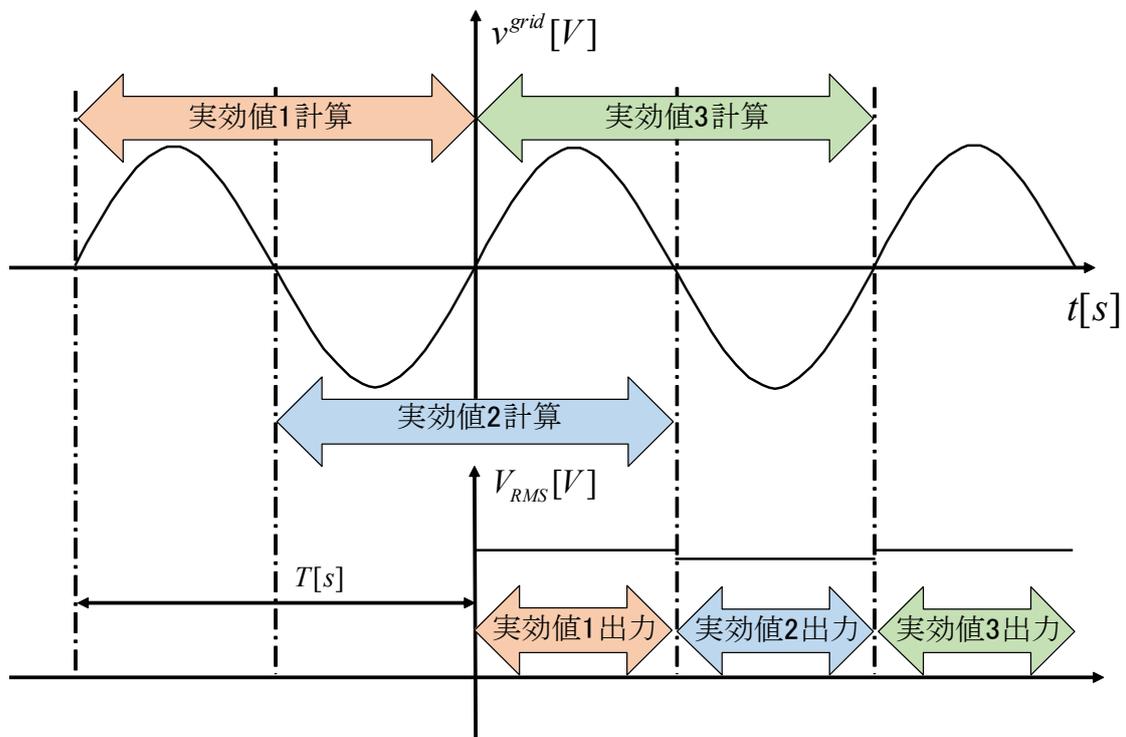


図 2.24 RMS フィルタ

・座標変換

本研究で用いるインバータは、三相インバータを採用しており、出力される電圧・電流は三相波形である。よって、これらを制御する際に、交流波形であるものを直流量に直すことで、扱いを簡素化する。そのための変換法を以下に説明する。

3相2相変換

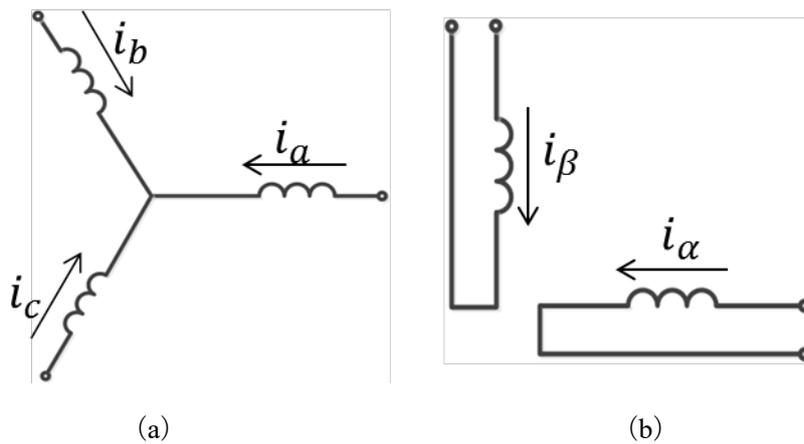


図 2.25 (a) 3相巻線 と (b) 直交2相巻線

以下に説明する座標変換法は、パワーエレクトロニクス分野において有用であり、良く用いられているものである。

図 2.25 (a) に示す 3 相巻線に流れる電流の合成ベクトルは図 2.25 (b) に示す直交 2 巻線に流れる電流で表すことができる。相対変換においては、変換前と変換後の変数の数が等しくなる必要があるため、ここでは図 2.25 (b) の 2 巻線の他に中性点電流

$$i_n = i_a + i_b + i_c \quad (2.16)$$

を考える。3 相巻線に流れる電流の合成ベクトルの α 方向と β 方向の成分は、次式である。

$$i_\alpha = i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \quad (2.17)$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \quad (2.18)$$

よって 3 相 2 相変換行列は以下、式(2.19)で表せる。

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

実際に利用する際には、直交 2 相巻線の量を元の 3 相量に戻す 2 相 3 相変換も必要である。2 相 3 相変換は (2.20) 式の転置行列を変換行列とすれば良い。

よって、3相量に戻す2相3相変換は、

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

以上変換式により、3相量と2相量の変換を行う。

ここで、本研究に用いるTSIはSSIとの連系を見据え、線間電圧で計測を行っている。よって、相電圧での計測より大きさが $\sqrt{3}$ 倍、位相は $\frac{\pi}{6}$ 進んでいる。これにより、(2.21)式を計算し、以下の式に変更して用いている。

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

回転座標変換 (dq 変換)

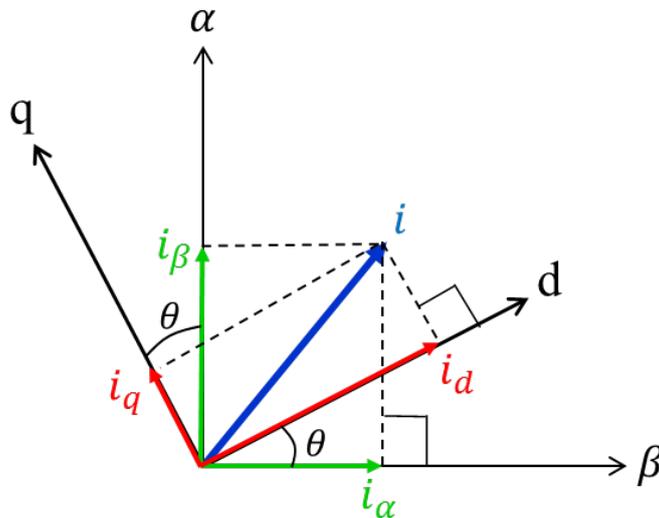


図 2.26 回転座標変換の概念図

直交2軸の座標上の量を図2.26のように角度 θ だけ回転させた軸上に変換することを回転座標変換と呼ぶ。上図は、角速度 ω で回転している回転子巻線に流れる電流を $d-q$ 座標系(回転座標系)で表しており、そしてこの各成分の $\alpha-\beta$ 座標系(静止座標系)を表している。

直角座標における $\alpha - \beta$ 座標系と $d - q$ 座標系との間の交換は、 $\theta = \omega t$ として、静止座標軸上の諸量で回転座標軸上の諸量を表すと式(2.22)のようになる。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

また回転座標軸上の諸量で、静止座標軸上の諸量を表すと、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.23)$$

のように表される。

以上から、3相交流の量を、3相2相変換した後、回転座標変換することで直流量にできる。これにより、制御系での扱いを簡単化できる。

ここでこれまでに述べた SSI と TSI および同期発電機の性能比較表を表 2.4 に示す。

表 2.4 同期化力および慣性力確保技術の比較

	SSI 単相同期化力インバータ	TSI 三相同期化力インバータ	同期発電機
電源仕様	単相100V/200V	三相200V	特別高圧
出力容量	4kVA程度	50kVA以上	GFMよりも大きい 発電設備により容量は異なる
コスト	SSI << GFM << 同期発電機		
主な設置場所	低圧一般需要家	高圧需要家	発電所
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・単相で同期化力と慣性力を確保できる ・他と比べて、設置コストが低く、設置が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・同期化力と慣性力を確保できる。 ・SSIよりも容量が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・SSI, GFMインバータよりも大きな同期化力と慣性力を確保できる
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・同期化力、慣性力は容量依存のため1台当たりの効果は他2つに比べると少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・SSIと比べコスト高となるため、既存のPCSと入替が困難になると予想される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置が発電所単位になるため、新規設置が難しい。 ・新規設置の場合は稼働開始まで時間を要する。

上記表から分かるとおり、SSIは1台当たりの設置時間、コストにメリットがあり、導入への法改正など普及態勢が整えば、急速に導入が進んでいくと予想される。また、TSIはSSIと比較し、容量性のメリットがあるので、こちらも普及態勢が整えば、導入が進むと予想される。同期発電機は設備の準備やコストメリットを精査したのち導入される可能性がある。

2.8 マイクログリッド構想 (MG)

単相マイクログリッド構想 (SMG)

本節では、SSI を用いた単相 MG (SMG) 運用について紹介する。広島大学では、非干渉コア (NIC) の設計コンセプトに基づく GFM の新規設計手法により、SSI を開発している。開発した SSI は、平常時は主電源に接続し、非常時には MG を形成する安定化効果の高い GFM 型インバータである。SSI モデルは、開発した RMS シミュレーション、HIL シミュレーション、および SSI ハードウェアを用いた実験を比較することで検証されており、SSI はグリッドにおいて系統安定化能力を有することが示されている。電力レジリエンスの推進に向け、広島大学ではこの SSI を用いて低圧の単相配電系統 (DS) における信頼性の高い SMG を構築することを提案している。最小単位である SMG を組み合わせることができれば、MG 構築の柔軟性が向上し、災害時の電力レジリエンス向上に寄与できるものとなる。

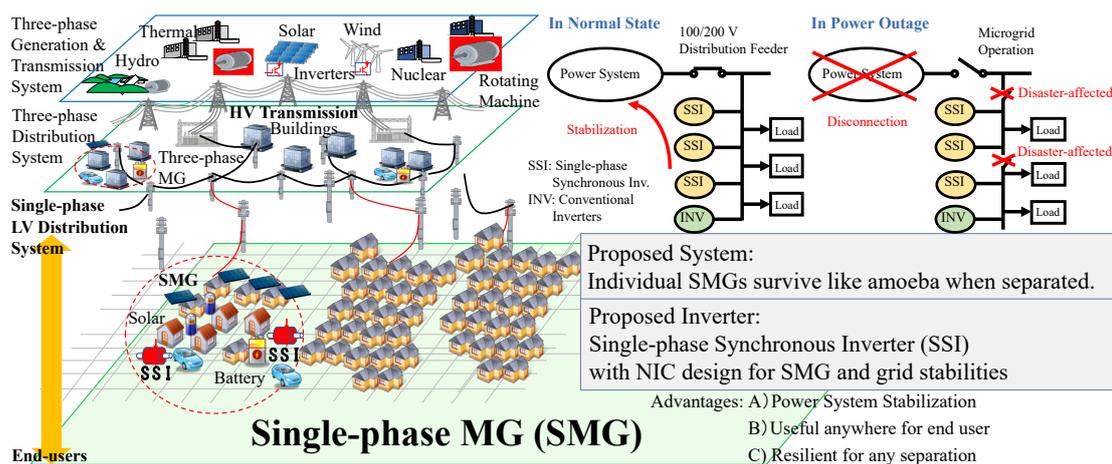


図 2.27 広島大学における MG 構想

[正常状態]現在, IBR の数が大幅に増加し, 同期化力, 慣性力の低下に起因する電力系統の不安定性, 特に過渡時における周波数安定性が問題になっている電力システムに対し, 同期化力, 慣性力を具備した SSI を主電源に接続することで, 正常時の系統安定化を図る。

[緊急時]近年, 日本では大規模な自然災害が増加しており, 非常時の災害復旧のための有効なソリューションとして MG が考えられている。災害時に低圧 DS に小規模な MG を建設することは, 強力な電力レジリエンスの強化策となり得る。

配電マイクログリッド構想

ここまで単相における MG 構想を述べてきたが、三相では需要家負荷や GFM インバータの出力が単相に比べて大きくなる。三相と単相で配電 MG を構築することで、さらなる電力レジリエンスを強化することができ、自然災害などによって電力網から寸断された場合でもより安定した電力供給を可能にする。また、不平衡負荷への対策にもなりうる。

現在、広島大学高層研究棟 4F に SSI の実験設備を構築しており、SSI の制御系改良や SSI を用いた SMG の系統安定化効果を検証している。今後の MG 構想の実現のため、本論文では広島大学地下実験設備に三相インバータを構築し、4F の SSI との連系をする。

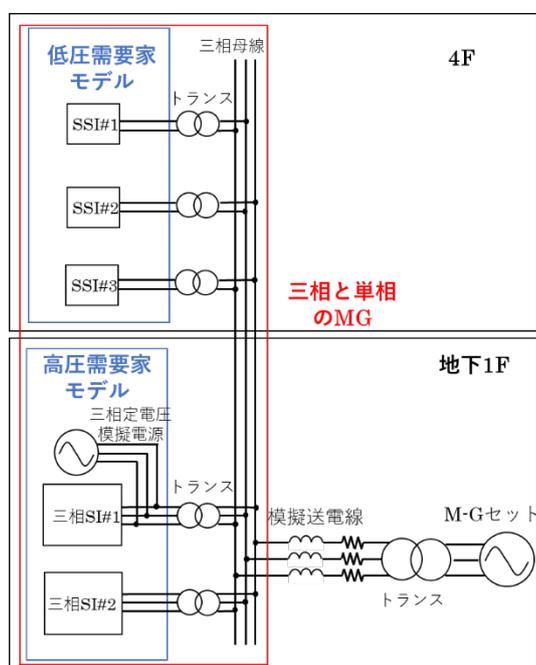


図 2.28 広島大学高層研究棟実験設備

マイクログリッド運用の検討

単相マイクログリッドおよび配電マイクログリッドの実質的な運用には以下の課題があると考えられる。

- ・電力融通可能な場合どのようにして、電気料金を設定していくか
- ・常時の需要家側メリットをどのように出していくか
- ・慣性応答や電力運用のための EMS 運用事業者はどうするか

など課題がある。本論文では上記についての検討は述べないが実際の運用検討時には、これらの課題について、専門家を交えた検討が必要になってくる。

第3章

BCPを考慮した 分散型蓄電システム管理のための マイクログリッド周波数制御

3.1 電気設備のBCP対策

BCP(Business Continuity Plan)とは事業継続計画のことであり、その目的は、地震、豪雨、噴火などの自然災害や緊急時において、組織体制のマネジメントや緊急時の行動指針を明確にしておくことで事業継続を図り、人や事業全体への損害を最小限にとどめることにある。近年、日本で自然災害による甚大な被害が増加しており、災害時に、電気や水、通信などのインフラ設備の確保が求められている。

わが国における自然災害の多くは地震、豪雨（洪水）、台風の大きく3つの災害に分別される（図3.1）。いずれも緊急時の電源確保が重要なBCP対策とされ、レジリエンスの高い電力網が必要であることが明白である。

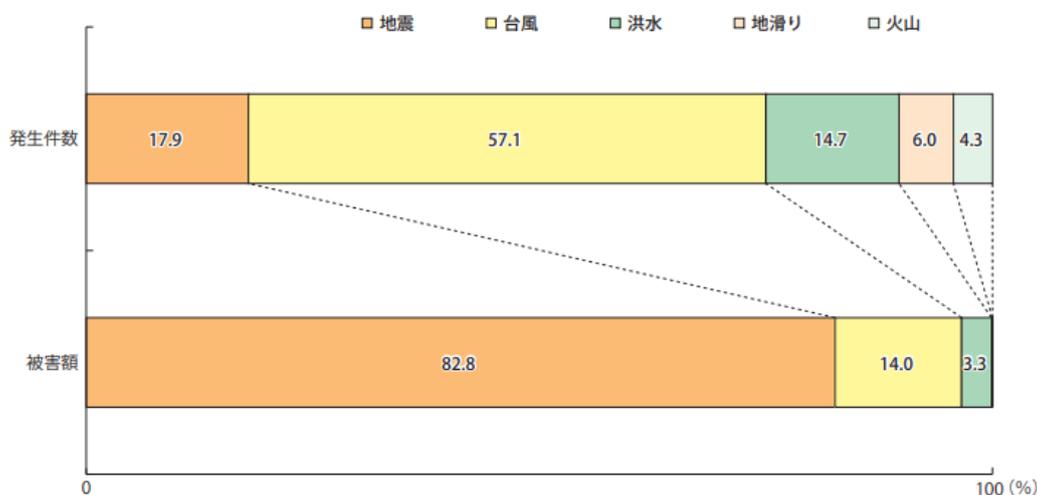


図3.1 日本の災害発生割合

出展：中小企業庁『2019年 中小企業白書』より抜粋

また、電氣的なBCP対策として各事業者が災害時に非常用電源や蓄電池などを用いて電力を確保する計画を立てることで対策を行っている。BCP対策に求められる非常用電源の利用可能時間の目安は72時間とされており、これは人命救助の観点から重要な「72時間」は、非常用電源を外部からの供給なしで稼働可能とすることが望ましいためである。しかし、これを満足するには各事業者が容量の大きな蓄電池や発電機が必要になり、設置スペースの確保、設置費用などが事業者に要求されるため、小規模事業者などでは設置が難しくなる。また、設備化が進み、BCP時に必要な容量が増加傾向にある大規模な企業でも災害時のエネルギー供給量を増やすことは難しい。さらに、非常用電源に用いる蓄電池は、様々な研究が進められているが現時点では技術革新による大幅な機能向上は期待できない。一般的に家庭用にはリチウム電池、産業用にはNAS電池を用いることが主流となっており、その他主な蓄電池を表3.1に示すがコストや性能など様々な課題が残っている。

表 3.1 主な蓄電池の概要

		リチウムイオン電池	ナトリウム硫黄(NaS)電池	レドックスフロー電池	鉛蓄電池
充放電効率	蓄電池	95%	90%	85%	85%
	システム	86%	80%	70%	75%
耐久性(寿命)	カレンダー	10年	15年	20年	17年
	サイクル	15000サイクル	4500サイクル	10万サイクル	4500サイクル
体積エネルギー密度 (括弧内は理論値)		176Wh/L (~3350Wh/L)	83Wh/L (~1000Wh/L)	115Wh/L (~182Wh/L)	62Wh/L (~720Wh/L)
放電レート(実績)		0.50~5.0C	0.13C	0.25C	0.13~0.30C
充電レート(実績)		0.50~5.1C	0.17C	0.25C	0.13~0.43C

そこで、非常用発電機、蓄電池と同期化力インバータ(SI)を使用してBCP対策を行う。系統に非常用発電機、蓄電池とSIを使用した場合、各事業者同士で協調運用が可能になり、各事業者同士でMGを構築することで、蓄電池や発電機の省スペース化やコスト低減につながると考えられる。ただし、自治体や協力企業などに事前に停電時の計画を立てて電力供給対策を練っておくことが必要である。

3.2 地域マイクログリッド構築によるBCP対策

マイクログリッドとは、電力系統から切り離れた独立かつ安定な系統のことである。図3.2のように住宅などの建物と太陽光発電設備と蓄電設備、電力会社の送配電網、通信網およびEMSで構成される。通常時は電力系統に接続された状態で運用され、系統からの電力供給が困難になった場合は自立運転に移行するものである。

これまでに、津波被害を受けた東松島市では自営線により地域マイクログリッドを構築して、災害に強いまちづくりを行っている。台風による被災が多い宮古島市では、蓄電池1台を複数拠点で共有する実証実験を行っている。

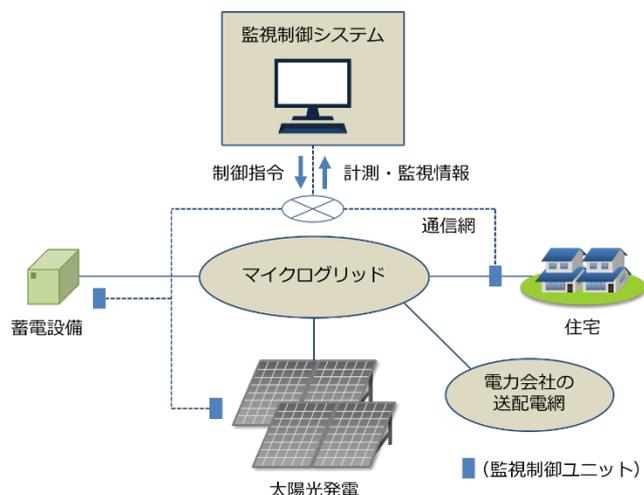


図 3.2 マイクログリッドの構成例

3.3 EMSによる蓄電池制御・管理

エネルギーマネジメントシステム(EMS)と電力制御や電力の見える化により、最適な電力運用を図るシステムのことである。図3.3で示すとおり地域エネルギーを見える化し、デマンドレスポンス機能を有している。本研究ではSSIを使用することで蓄電池の電力融通を可能にした次世代型EMSになる。

経済産業省から実証地域に指定された横浜市の横浜スマートシティプロジェクトにおいて、地域全体のエネルギー管理の実証が行われている。

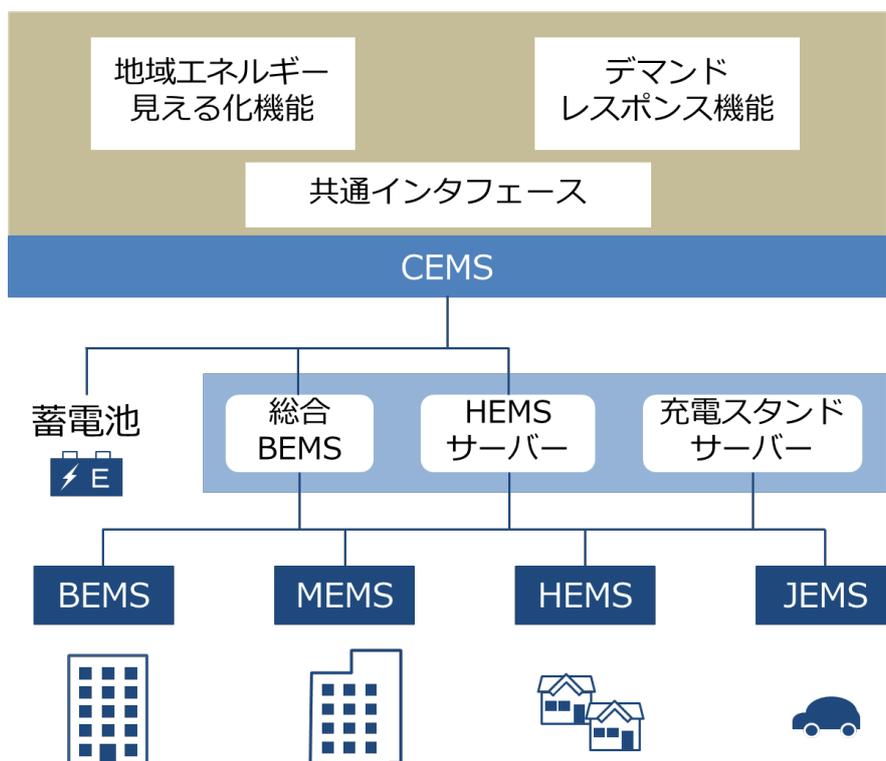


図3.3 地域向けEMSの構成例

3.4 マイクログリッド周波数制御による蓄電池制御・管理の提案

MG はいわゆる小規模な独立システムであり、例えば、電力システムの停電時に電力システムから切り離して、MG 内のエンジン発電機等を自立運転させて MG 運用を行う方式が一般的である。このとき MG 内の 1 台またはそれ以上の発電機群の制御には、通常、エネルギー管理システム(EMS)が必要となり、MG 運用管理のために通信ネットワークが利用される。しかしながら、通信システムの整備にはコストがかかり、さらにサイバーセキュリティを含めて信頼性の課題が付きまとう。この問題に対して、合意形成アルゴリズム(Consensus Algorithm)を用いた DC-MG を対象とした分散型電源の蓄電池協調制御手法等が提案されている。一般論としては、通信システムを用いる際にも、最終的なバックアップ手法として、通信線故障時にも MG 運用を維持できる方式を準備しておくことが望ましい。そこで本論文では、通信に依存せずに、需要家の蓄電設備を含め MG 内に分散する蓄電システムを最大限活用するための新しい制御手法を提案する。提案法は、システムの安定性を維持しながら、交流 MG の蓄電池残存容量(State of Charge : SOC)の運用管理を行う点で、全く新しい手法である。すなわち、MG 内に分散する各蓄電池は SOC 残量に応じて分散型の周波数制御を行い、MG 周波数を許容値以内で変化させて SOC を協調管理する。これより、全ての分散電源の SOC を、通信を利用せず同一の値に維持することが可能となる。提案法は、著者等が開発した単相同期化カインバータ(Single-phase Synchronous Inverter : SSI)に組み込むために開発したものであるが、通常の交流 MG の運用における揚水発電機、エンジン発電機、蓄電池等を含めた全ての分散電源の残存エネルギー管理に用いることができる。なお、提案法においては、通常の負荷周波数制御と同様に、周波数を一定値に維持する運用も可能である。

本論文では需要家の蓄電設備を想定した図 3.4 のシステムを制御対象と考え、SSI を活用して MG を構築・運用し、MG の信頼性を維持する手法を提案する。しかしながら、図 3.4 は需要家の蓄電池や工場等の独立型の蓄電設備など複数のエネルギー貯蔵型分散形電源と負荷および PV 等の再エネ電源を持つ単相交流や三相交流の MG と構造的に同じであるので、提案法は全ての交流 MG に適用できる。以下、本論文では蓄電設備を持つ需要家を発電需要家と呼び、図 3.5 に示す構成モデルとして取り扱う。

ここでは、蓄電池を備えた不特定多数の SSI 群を同期連系させ、これらが相互に、自動的に協調しながら、マイクログリッドの電力供給能力および供給信頼度を最大限に保つ方式を実現する。なお、提案手法の制御は自律分散的な制御であるため、蓄電池や SSI の制御台数に制限はないものと考えることができる。提案技術は、我々がこれまでに開発した SSI を用いてマイクログリッドを構築する際に、SSI が従来の同期発電機の特性を発揮できることに着目したものである。この発電機特性を利用して、MG 周波数を目標値 (50 または 60Hz) に維持、あるいは周波数を許容範囲で変動させながら蓄電池残量を管理する。

これは従来の大規模連系系統における TBC (Tie-line Bias Control) 周波数制御方式におけるバイアスの考え方をを用いた新しい MG 制御方式であり、非常時を含めた MG 独立運転時に周波数を許容範囲内で積極的に変動させ、分散する蓄電池を一括運用する方式である。

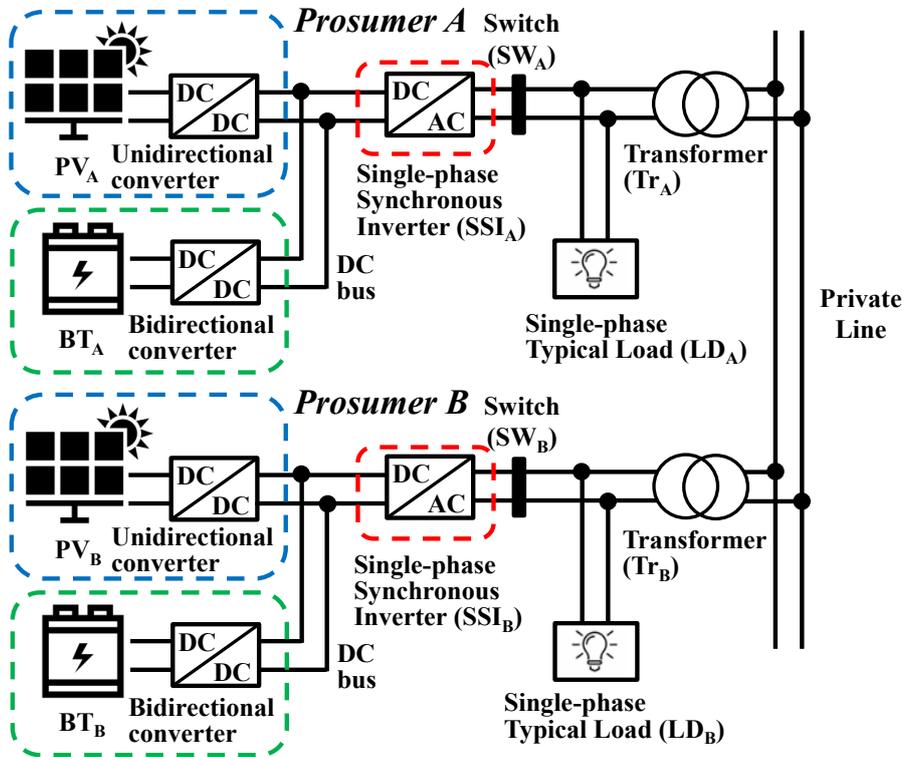


図 3.4 配電システムマイクログリッド共有モデル

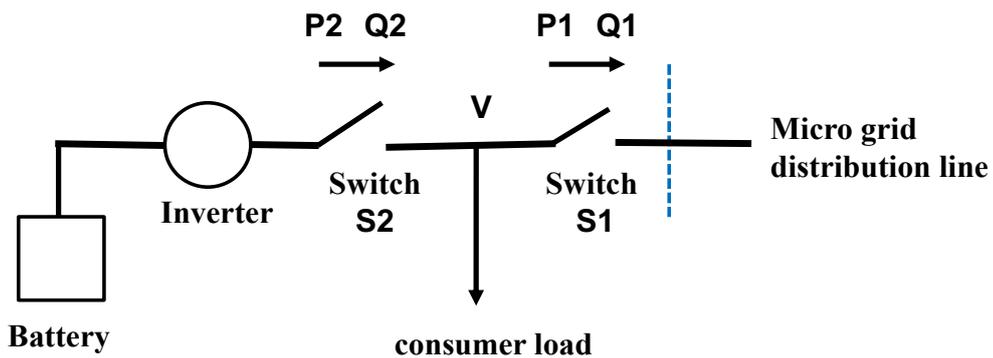


図 3.5 SSI による需要家モデル

・MG 独立運用のための複数ユニット協調方式

提案技術では指定した周波数の上下限範囲において、周波数 f を変動させてよいものとする。このとき、蓄電池制御のために微小変動させてよい周波数上下限値を f_L, f_H とする。

$$f_L \leq f \leq f_H \quad (3.1)$$

その上で、提案方式では上記制御を各個別ユニット i の制御に置き換える。すなわち、ユニット i の蓄電池制御誤差 BCE_{*i*} (Battery Control Error) を以下の式(3.2)で定義し、これをユニット i の制御残差として負帰還させる自動制御方式を提案する。

$$BCE_i = \Delta P_i + K_i(f_i - f_{Ri}) \quad (W) \quad (3.2)$$

ただし、 $\Delta P_i = P_i - P_{schi}$: 出力計画からの偏差、 P_i : ユニット i の現在出力、 P_{schi} : ユニット i の出力計画値、 K_i : ゲイン、 f_i : ユニット i での周波数観測値[Hz]、 f_{Ri} : ユニット i の周波数目標値[Hz]である。

ここでユニット i の現在出力 P_i の計測点としては、マイクログリッドとの連系点の有効電力 (図 3.5 の P1) を想定するが、インバータの出力 (図 3.5 の P2) も使用可能である。

このとき本節の提案法においては、前述の方式と本質的に異なる点として、各ユニットで異なる分散型蓄電池の SOC に基づき、異なる周波数目標値 f_{Ri} を設定する。これより蓄電電力をマイクログリッド全体で共有できるようになる。すなわち、

$$f_{Ri} = func_i(SOC_i) \quad (Hz) \quad (3.3)$$

ここで、 SOC_i : ユニット i の SOC、 $func_i(\cdot)$: ユニット i の SOC 共有関数である。

SOC 共有関数としては、以下の条件を満たす関数を設定する。 $SOC_i = 1$ は上限 (満充電状態)、 $SOC_i = 0$ は下限 (空状態) を意味する。これらの上下限値は、非常時に MG に対して授受される蓄電容量を意味し、ユニット毎に異なってよく、事前に協議して決めておくものとする。すなわち SOC 共有関数は、事前に取り決めた非常時の提供用蓄電容量をマイクログリッド内で公平に共有するためのものである。SOC 共有関数は個々の事情に応じてユニット毎に定義しても良いが、公平性のためには SOC 共有関数は、全てのユニットで同一とする。

$$func_i = func, i = 1 \dots n \quad (3.4)$$

また、後述するようにユニットの蓄電容量(Wh)から決まる等価容量(W)を K_i の値として設定することが推奨される。一般に、SOC 共有関数は下記の条件を満たすよう設定する。

SOC 管理上下限:

$$f_L \leq f_{Ri}(SOC_i) \leq f_H \quad (3.5)$$

ただし, $0 \leq SOC_i \leq 1$, $f_{Ri}(0)=f_L$, $f_{Ri}(1)=f_H$

ここで, f_{Ri} : SOC に関する増加関数である。

なお, 共有関数は2次関数や非線形的なものにしてもよいが, 本手法を使用するユーザー視点では共有関数によって蓄電池の SOC 値を取得できるため線形的に表せることが可能な次式が推奨される。

$$f_{Ri}(SOC_i) = f_L + SOC_i \cdot (f_H - f_L) \quad (3.6)$$

式(3.6)の特性を図 3.6 に示すが, 各ユニットは自身の SOC の状態に応じて, 管理周波数内で個々に目標周波数を変化させる。提案法は以上に述べた設定に基づき, 各ユニット i において(2)式の制御誤差 BCE_i をリアルタイムで監視しながら制御指令値にフィードバックし, 以下の(7)式を制御目標として, 自律分散的にインバータ出力制御を実施する方式である。

$$BCE_i = 0 \quad (3.7)$$

Operating frequency f

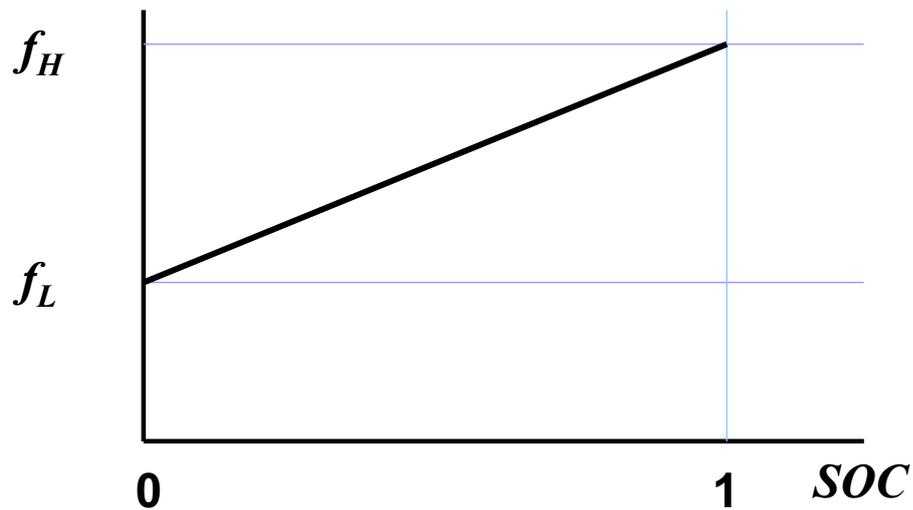


図 3.6 共有関数の設定例 (式 3.6)

・提案法における SOC 協調メカニズム

提案法における蓄電容量の共有メカニズムについて説明する。提案法の制御方式は、前述のように全てのユニットで蓄電池制御誤差 BCE を監視しながら、式(3.7)を制御目標として負帰還させる方式である。したがって、この結果、全てのユニットにおいて(7)式の制御目標が達成された状況を想定する。一般に系統内の周波数は振動成分を排除するとマイクログリッド内で同一となるので、次式が成り立つ。

$$f_1 = f_2 = \dots = f_n = f \quad (3.8)$$

したがって、(2)(7)(8)式より以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= (P_i - P_{schi}) = K_i (f_{Ri} - f) \\ &= K_i (f_L - f + SOC_i \cdot (f_H - f_L)) \end{aligned} \quad (3.9)$$

左辺の ΔP_i はインバータの現在出力から出力計画値を差し引いたユニット i の増分出力である。 ΔP_i はインバータの自動制御によるもので、蓄電池 i の運用において計画値より放電量を増加させることによる増分電力に相当する。また、 f は、すべてのユニットにおいて制御目標式(3.7)が達成された際の周波数の平衡点である。

平衡点 f は(3.9)式よりマイクログリッド内の蓄電池の SOC に依存して決まることがわかる。ただし、MG 管理用発電機を別途設置して、積極的に f を制御することで、管理用発電機から全蓄電池に充電することも可能である。

さて式(3.9)の ΔP_i は SOC_i と周波数 f の関数である。まず、計画値どおり、追加的な充電も放電もされない $\Delta P_i = 0$ となる SOC_i の値を(9)式より求めると以下となる。

$$SOC_i^* = (f - f_L) / (f_H - f_L) \quad (3.10)$$

式(3.10)は提案法におけるユニット i の平衡状態である。全ユニットで共通の SOC 共有関数を使用する場合には、 SOC_i の値は全てのユニットで同一値 SOC^* となる。このとき、上記(10)式の f を(9)式に代入すると次式を得る。

$$\Delta P_i = K_i (SOC_i - SOC^*) \cdot (f_H - f_L) \quad (3.11)$$

上式より、提案法では各ユニットにおいて、上記の SOC^* を境として充電状態 ($\Delta P_i < 0$) あるいは放電状態 ($\Delta P_i > 0$) となることがわかる。すなわち、

$0 < SOC_i < SOC^*$ のとき: $\Delta P_i < 0$ (充電状態)

$SOC^* < SOC_i < 1$ のとき: $\Delta P_i > 0$ (放電状態)

そして、この制御は全てのユニットにおいて以下が満たされるまで継続する。

$$SOC_i = SOC^* \quad (3.12)$$

これは、すなわち全てのユニットで充放電条件が一致し、マイクログリッド内で公平な分担で充放電を実施できることを意味している。言い換えれば、各ユニットで MG の周波数 f を観測することで、管理周波数範囲内で全てのユニットの SOC を同一の値に管理しながら、マイクログリッドの安定運用を実現できる。そして、MG 内全体の蓄電残存量も、(10) 式から監視できる。すなわち、制御残差による誤差があるが、周波数の下限値付近にある場合は、蓄電池群は残量がない状態、上限付近にある場合には満充電状態にある。

図 3.7 に式(3.9)に基づく充放電条件を示した。前述のようにマイクログリッド内で共通の SOC 共有関数を選定すれば、全てのユニットで共通の規準で周波数制御に寄与する制御形態を構築することができる。各ユニットでは SOC 残量に基づいて、充電または放電制御が実施される。この制御によれば全てのユニットで SOC 残量がゼロとなるまでマイクログリッドの安定運用が維持されることになる。

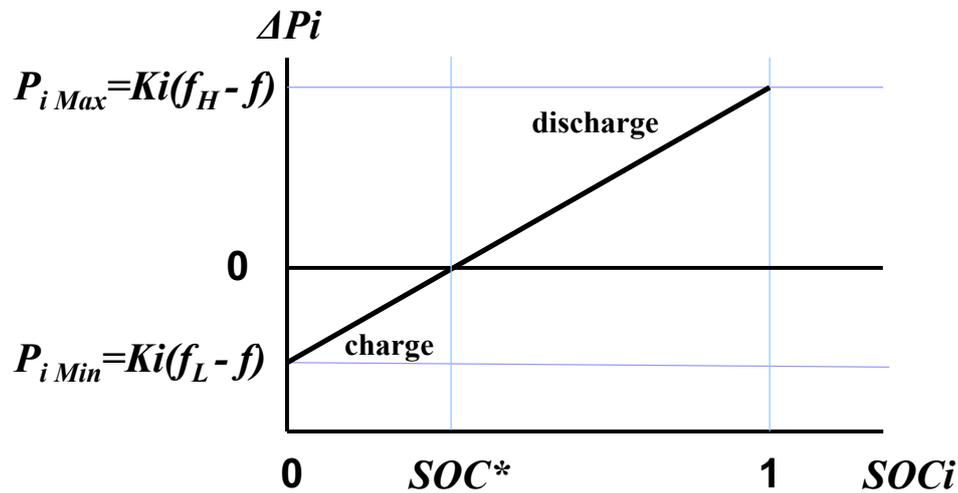


図 3.7 周波数による充放電状態

・ 制御回路の構成例

提案法の具体的な制御回路を図 3.8 に示す。提案法は以下の 3 部分より成る

- ・ 式(3.2)~(3.6)に基づく BCE_i の計算部分 (図 3.8 の点線枠内)
- ・ BCE_i から ΔP_s を生成するコントローラ $H(s)$
- ・ ΔP_s の負帰還による発電機指令値 P_s の生成

ここで $H(s)$ は BCE_i を安定的にゼロ付近に制御するものであればよく、図 5 では一例として PI 制御 (比例・積分制御) を用いた。

上記により生成した発電機指令値信号 P_s は、一般に DG の有効電力出力指令値に加算すれば良い。本論文では SSI を制御対象として、図 3.9 の SSI 制御回路において、SSI 出力指令値 P_m に加算している。

以上の提案法は、周波数を一定値に維持する制御方式としても使用できる。このような従来の考え方で MG 運用を行う場合は、式(3.2), (3.3)で定義した f_{Ri} を運用周波数 60Hz 等に固定すればよい。このような運用方法については、本論文では扱わない。

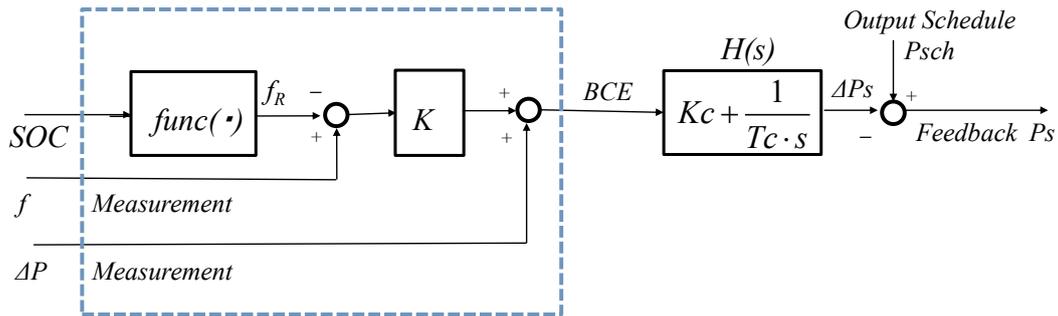


図 3.8 BCE 制御回路

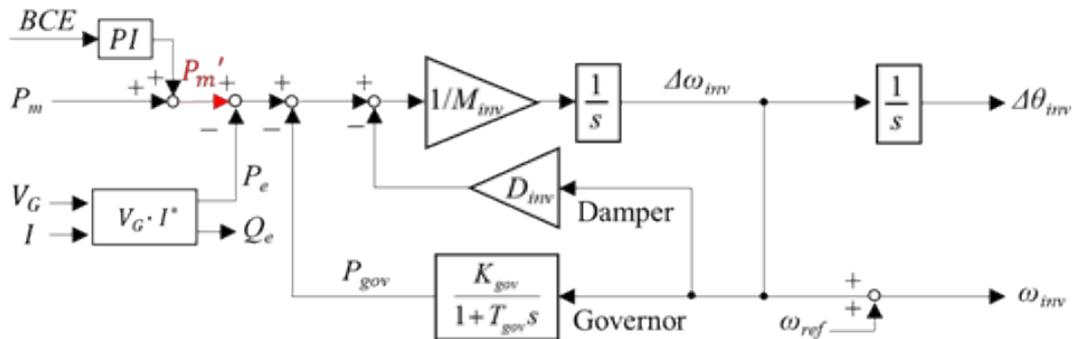


図 3.8 SSI 制御回路

3.5 提案手法によるシミュレーション

・シミュレーション条件

節では、前述の図2に示した3件の発電需要家（SSI、蓄電池、負荷で構成）から成る図7のMGにおいて、実効値シミュレーションを行い、提案法の有効性を示す。ここでは(2)式の計測値 P_i は、図2の発電需要家がMGに供給する電力（P1の電力）と定義し、計画値は $P_{sch,i}=0(i=1,2,3)$ と設定した。制御対象は第1節で述べたSSIとし、SSIのシミュレーションモデルとして、文献(10)(11)で検証した実効値モデルを用いた。付録に、シミュレーションに用いたパラメータ、およびMGの運転状態を示す。ここで用いたシステムモデルは、負荷も含めて負荷周波数制御方式の検討に用いる一般的モデルである。なお、今回のシミュレーションでは1Hzの周波数変動を許容する設定としたが、今後、詳細な上下限値の検討を行う必要があると考えている。

外乱については、突然の過負荷を想定した。具体的には、あるMG内（2回線）において1回線短絡事故が発生し、事故点の切り離しが行われたもの、MG内の発電機が解列する想定したシミュレーションとなる。

表 3.1 シミュレーションパラメータ

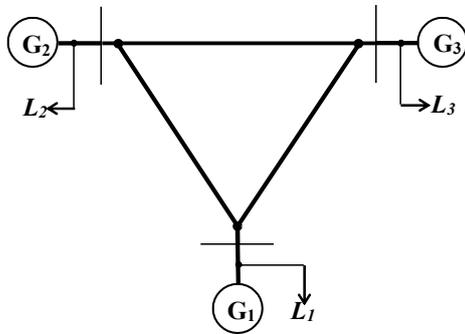
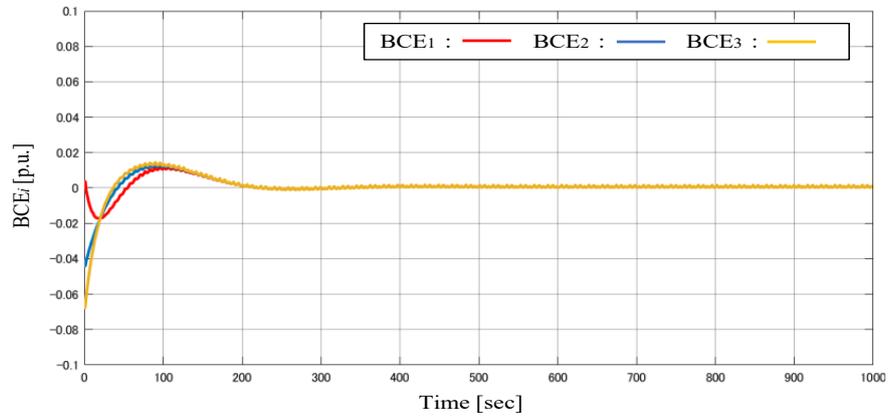


図 3.10 シミュレーション条件

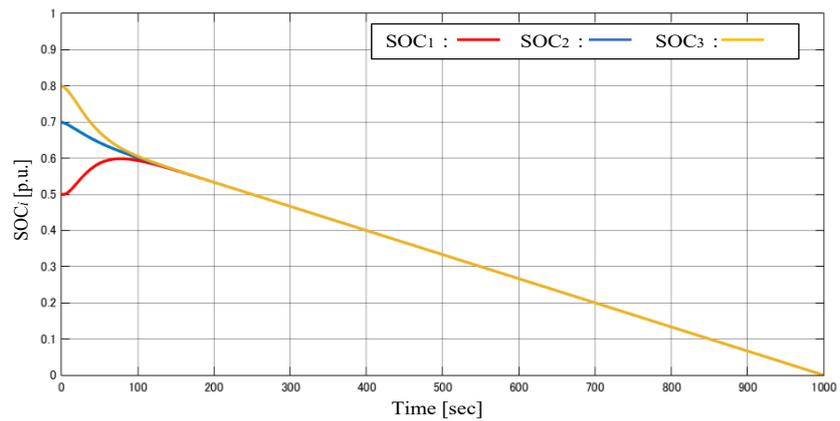
シミュレーションに用いたパラメータ	
BCE 制御系: $K=0.02$, $f_H=61$ [Hz], $f_L=59$ [Hz], $K_c=0.02$, $T_c=10$	
SSI パラメータ(三相平衡配置 3機共通): $M=0.0265$, $D=0.01$, $K_{gov}=0.066$, $T_{gov}=0.02$,	
蓄電池: 容量 100 [p.u.·h], 充放電損失無視 初期状態: $SOC_1=0.5$, $SOC_2=0.7$, $SOC_3=0.8$	
MG 線路定数 (ノードサセプタンス行列 B)	
$B = \begin{bmatrix} 0.1414 & -0.0707 & -0.0707 \\ -0.0707 & 0.1414 & -0.0707 \\ -0.0707 & -0.0707 & 0.1414 \end{bmatrix} \text{ [p.u.]}$	
需要家負荷: $L_1=0$, $L_2=0.01$, $L_3=0.01$, 外乱: $L_{d1}=0$, $L_{d2}=0.1$, $L_{d3}=0.1$ とその発生時間 50 [s]~60 [s], 590 [s]~600 [s]	

・外乱非発生時のシミュレーション結果

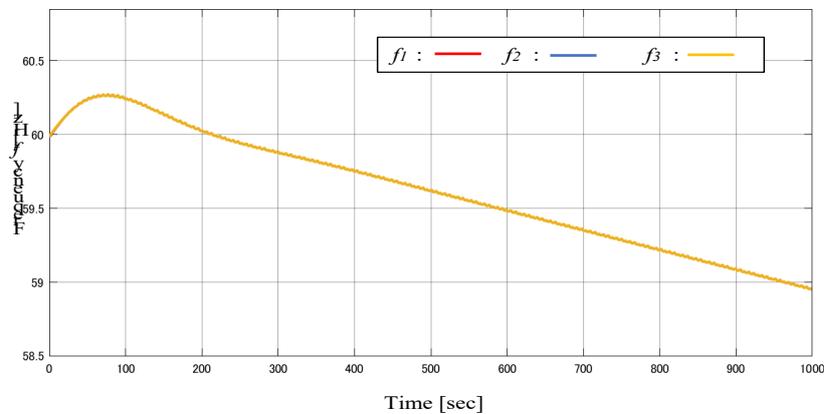
図3.11(a)~(f)にシミュレーション結果を示す。これより以下を確認できる。



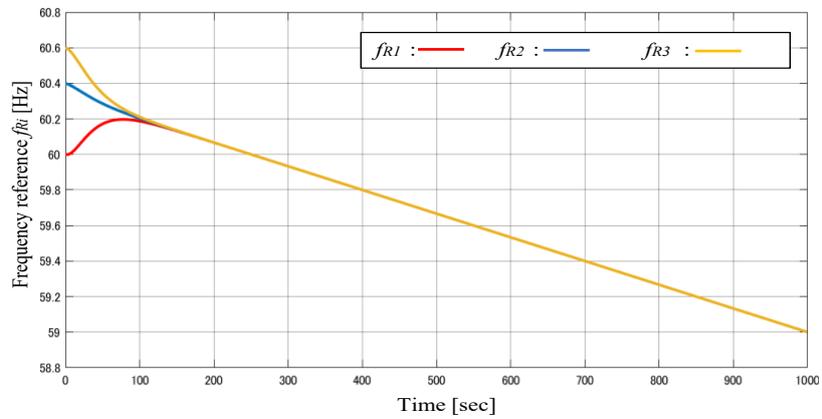
(a) 蓄電池制御誤差 BCE_i



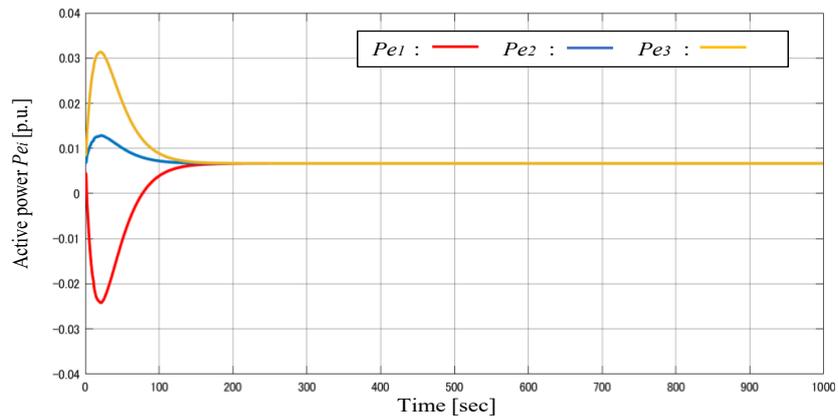
(b) SOC_i



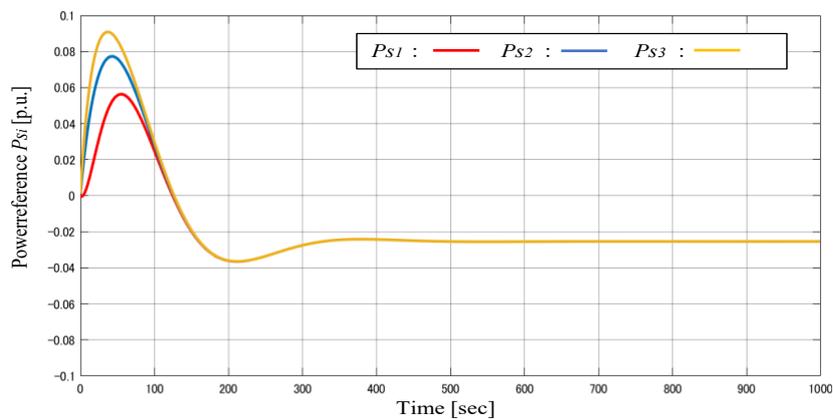
(c) 周波数 f_i



(d) 周波数指令値 f_{Ri}



(f) 有効電力出力 P_{ei}



(e) 発電機指令値 P_S

図 3.11 外乱非発生時のシミュレーション結果

・ 実験考察

図 3.11 (a)から BCE はゼロの値に成功裏に制御されている。

図 3.11 (b)から蓄電池 SOC は負荷消費に伴って低下していくが、自律分散的に全 SOC が同一値になるように制御され、最終的に全蓄電量を使い切るまで MG の安定運転が維持される。

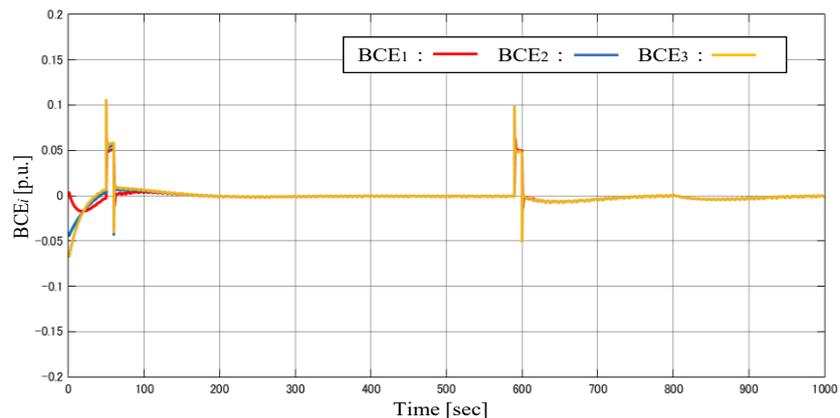
図 3.11(c)から MG 周波数は蓄電池 SOC 平均値により決まり、初期状態から時間経過とともに徐々に低下し、全 SOC がゼロとなった時点で設定周波数 59Hz に到達する。よって周波数を計測すれば、MG 内の全残存エネルギーを推定できる。

図 3.11 は、その他の諸量についても示しているが、成功裏に制御が実施されている。

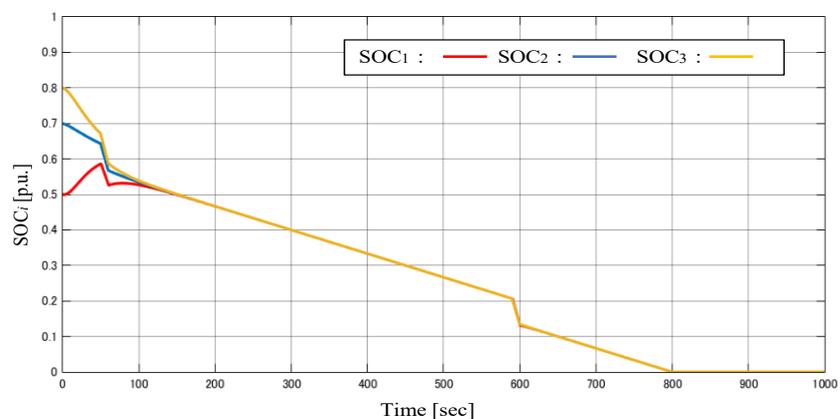
・ 外乱発生時のシミュレーション結果

図 3.12(a)~(f)にシミュレーション結果を示す。これより以下を確認できる。

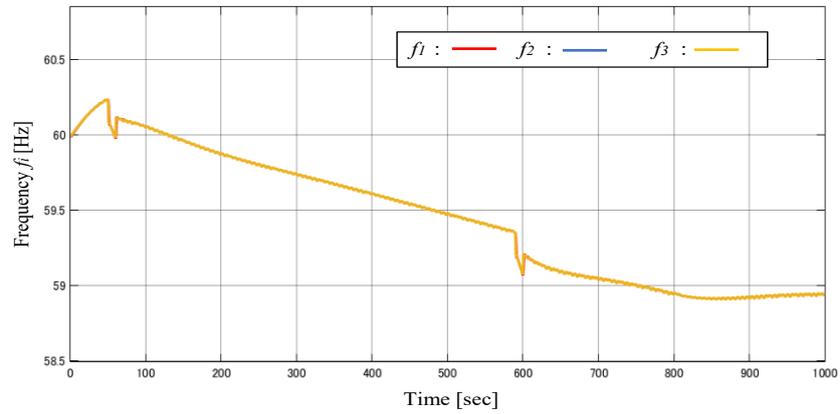
また、図 3.13(a)(b)に外乱発生前後の有効電力結果を拡大した図を示す。



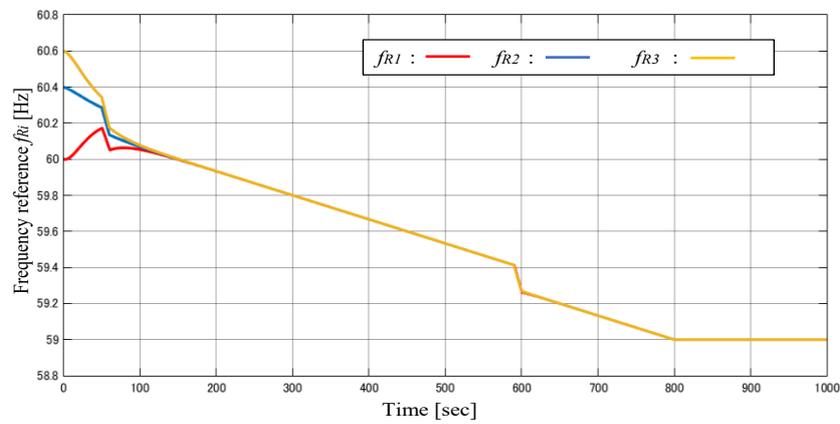
(a) 蓄電池制御誤差 BCE_i



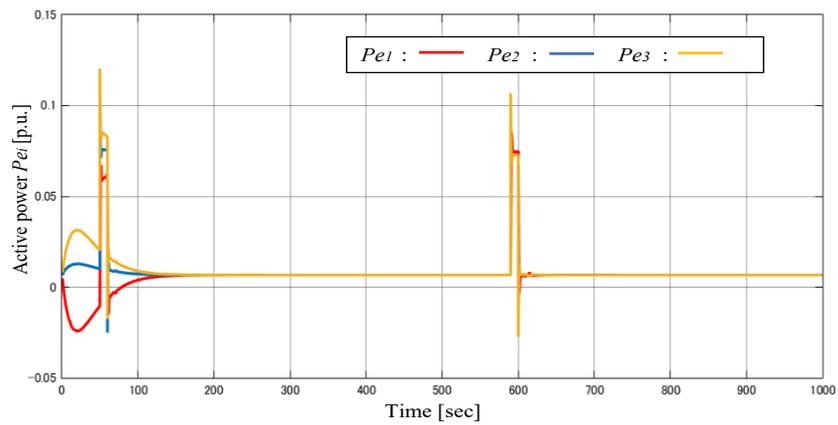
(b) SOC_i



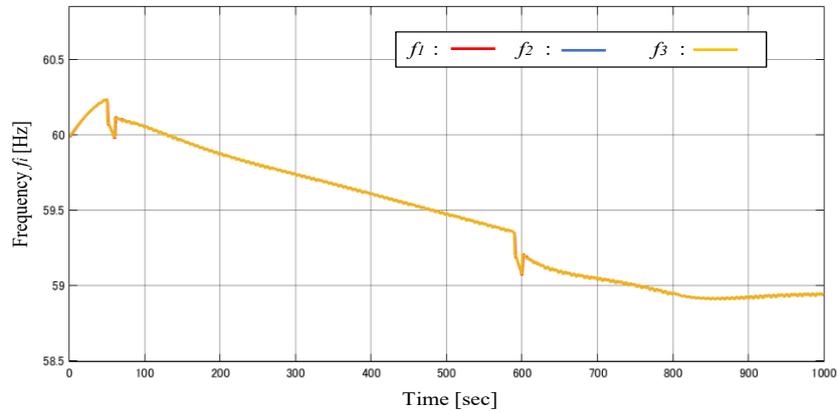
(c) 周波数 f_i



(d) 周波数指令値 f_{Ri}

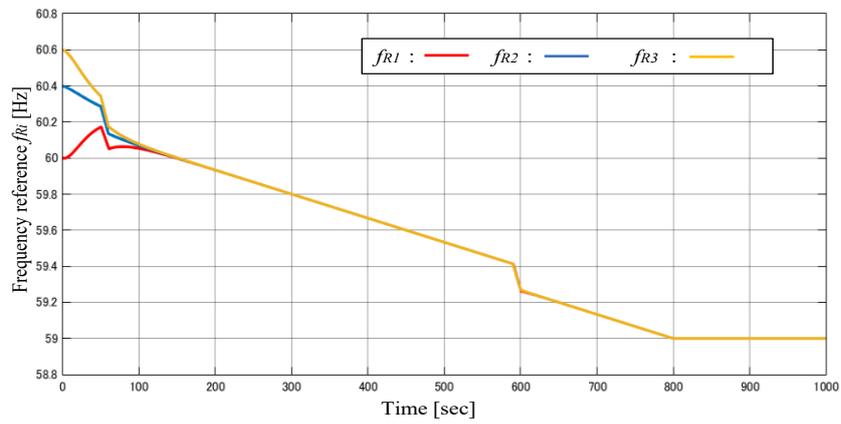


(f) 有効電力出力 P_{ei}

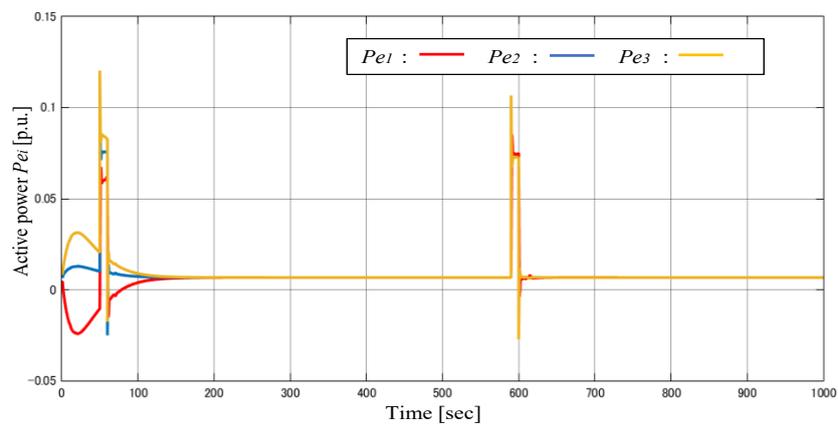


(e) 発電機指令値 P_g

図 3.11 外乱非発生時のシミュレーション結果



(a) 有効電力 P_{ei} (SOC 収束前)



(b) 有効電力出力 P_{ei} (SOC 収束後)

図 3.13 外乱発生前後の有効電力

・ 実験考察

図 3.12 は時刻 50 秒から 60 秒と 590 秒から 600 秒の 2 時点で大きな負荷外乱を加えたケースについてシミュレーションを行った結果である。外乱が生じても安定して動作することが確認できる。

図 3.13(a)(b)は、図 3.12 の外乱時刻 50 秒と 590 秒付近の拡大図である。制御系により過渡的な動揺も安定化されていることが分かる。

・ 提案手法の評価と適用

シミュレーション結果により本提案手法の有効性を確認することができた。本手法は災害時の MG 構築時に蓄電池を制御できるものであり、EMS に比べて以下表○のように評価した。EMS と比べて常時の負荷出力制御やデマンド監視などの機能はないが、災害時の蓄電池管理・制御を通信環境の影響をほぼ受けずに安定稼働できることから、安価かつ安定的なシステムとして、住宅 MG や通信環境の整備されていない山間部や離島において真価を発揮できるものだと評価する。また、災害時の影響を受けづらいため、EMS のバックアップとしての起用も考えられる。

初期パラメータを十分に精査することで、蓄電池の容量に関係なくシステムを適用できる。また、外乱の設定可能範囲については、インバータ側の過電流保護などの制限はあるがシステム側には制限を設けていないため、インバータの稼働可能範囲でのシステム適用が可能である。

・ 結論

本章では、通信を使用せず、需要家の蓄電設備を含め MG 内に分散する蓄電システムを最大限活用するための周波数制御手法を提案した。提案法は、全ての分散電源の SOC を、通信を利用せず同一の値に維持することを可能とする手法である。これにより、交流 MG 内に分散する蓄電資源を一括管理・運用することが可能となり、エネルギー供給のレジリエンス向上に大きな貢献が期待される。

第4章

単相同期化カインバータを用いた 住宅マイクログリッドに関する実験的検討

4.1. 災害対応型住宅マイクログリッドの構築

今後も激甚災害が予想される我が国においては、様々な技術を組み合わせた、低コストで信頼性が高い対策が必要とされるため、これら一連の従来技術との組合せが可能な新技術として、開発した SSI を用いた BCP を提案する。SSI は従来にない思想に基づくインバータである。

- (i) 三相同期発電機と同等の単相同期化力メカニズム
- (ii) 単相・三相系統安定化機能と単相 MG 構築機能

上記(i)は、従来の概念で実現できなかった単相交流での安定な同期方法に関するものである。(ii)は、大規模発電所の三相同期発電機と安定化装置のモデルをインバータ内部に組み込む方式である。家庭や集合住宅などで、単相配線により平常時は PCS として系統に接続し、非常時にはインバータだけによる MG を自由に構築することができる(図1)。SSI の設置により、あるいは従来型 PCS の置き換えにより、以下が期待される。

- ① 系統停電時、SSI は単独運転に加えて複数機での並列運転が可能のため、SSI 同士で電力融通が可能
- ② 将来、電力系統の安定性が低下した場合でも、インバータから同期化力・慣性力を電力系統に供給し、安定性の低下を防ぎ、安定化に寄与する。
- ③ EV等との連携など更なる広範な電気設備への応用展開が可能
- ④ 単相機器であるため、三相・単相の全需要家が対象。

以下の節では、提案するシステムの実現性に関して、基礎技術を提示し、実験を通して基本性能を検証する。

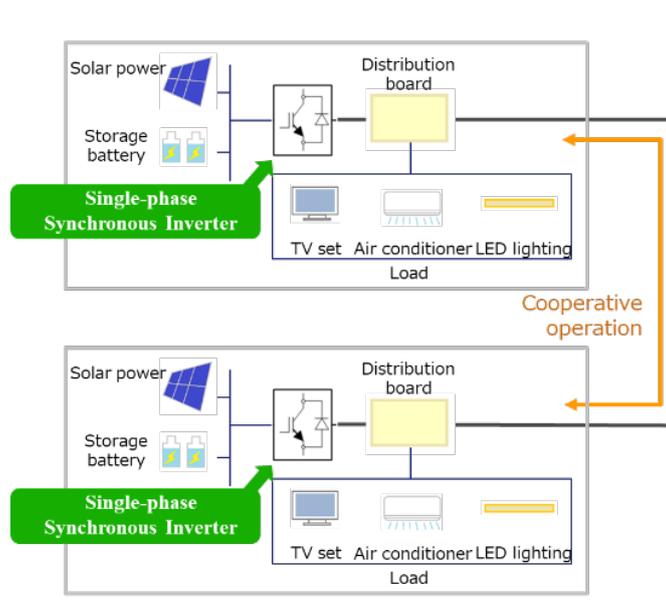


図 4.1 提案システムの構成例

4.2 単相同期化カインバータを用いた蓄電池運用実験

図 4.2 に著者らが開発している単相同期化カインバータ(SSI)の実験環境を示す。SSI は三相同期発電機(同期機)の動揺方程式に基づき慣性を模擬し、SSI 内部の位相変化に対して、同期機のふるまいと同じように有効電力出力が変化する一種の安定化交流電源である。図 4.3 に示す SSI では、動揺方程式を模擬した制御ブロックを単相インバータの制御系に実装することで、図 4.3 の Grid 側の位相変化に対して、インバータ (図 4.2 の SSI) が慣性を持つ同期発電機のように位相(出力)を変化させ、システム全体の安定化に寄与する。このときの位相変化に対する出力特性を同期化力と呼び、著者らは文献でその有用性を瞬時値ベースで検証している。本論文では同期機の機械的入力に相当する部分には市販自動車用蓄電池を接続するが、将来的には太陽光発電(PV)や電気自動車(EV)の接続も検討予定である。

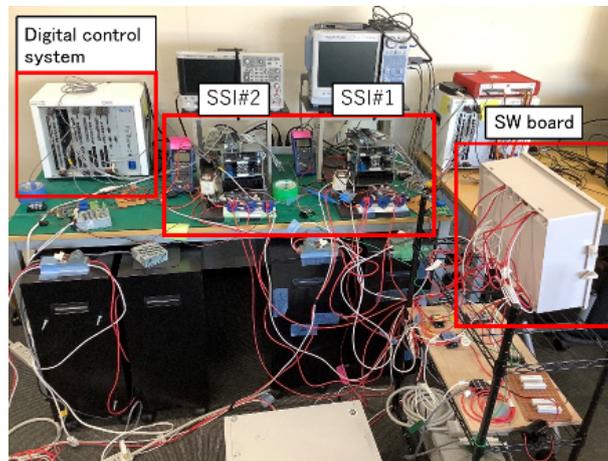


図 4.2 実験写真

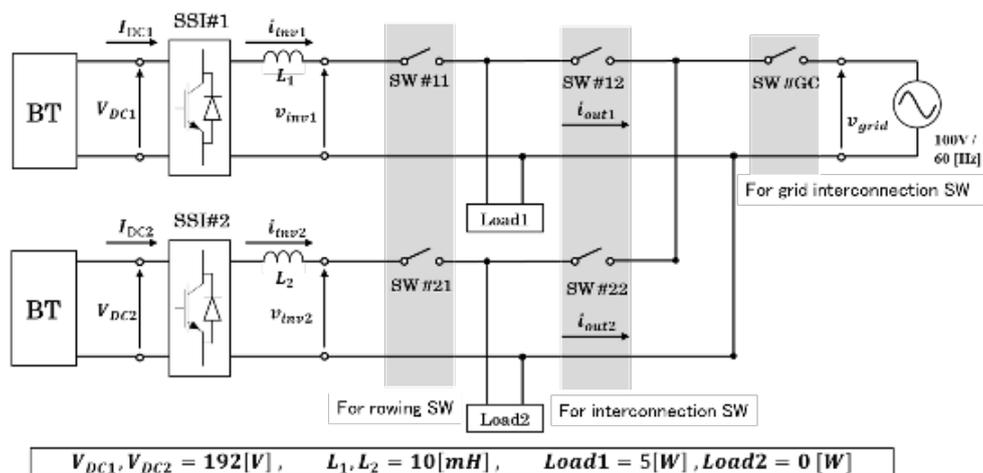


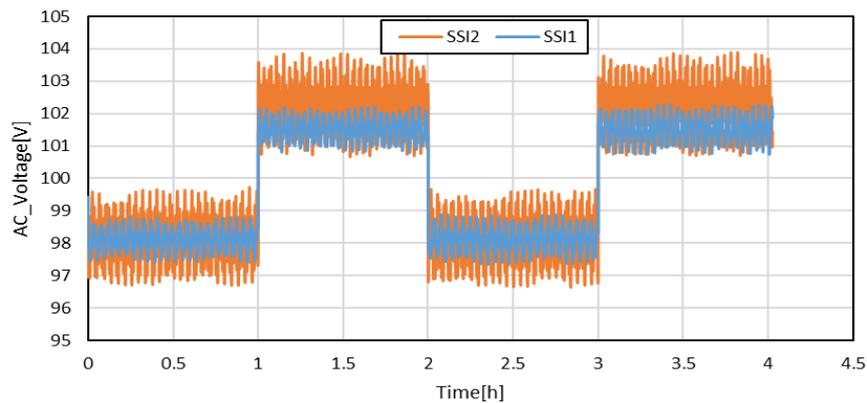
図 4.3 実験回路図

本研究の主目的である、長時間電力融通運転（目標3時間）について、図2の実験回路を用いて検証した。ここでは、SSI#1をV-1L制御、SSI#2をQ-PI制御で、2台の自立マイクログリッド運転を行った。実験方法を以下に示す。

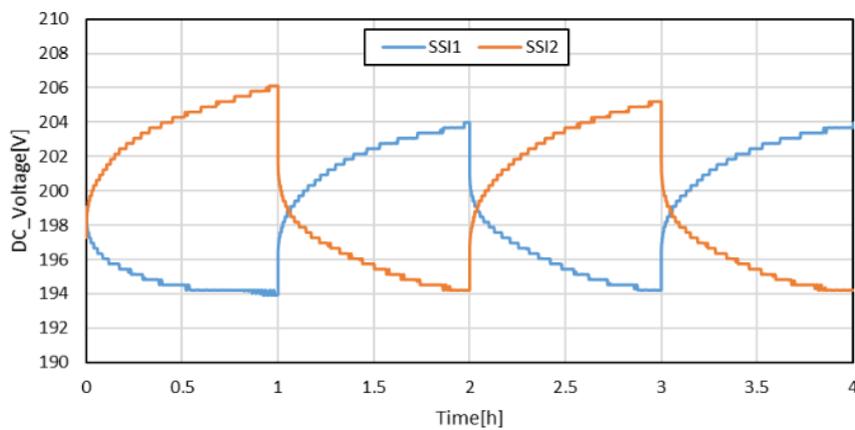
SSI#1とSSI#2を交互に出力した。出力値は以下の通りとする。

SSI#1は出力指令値 $P_{m1} = 100$ [W], SSI#2の出力指令値 $P_{m2} = -100$ [W]にする。

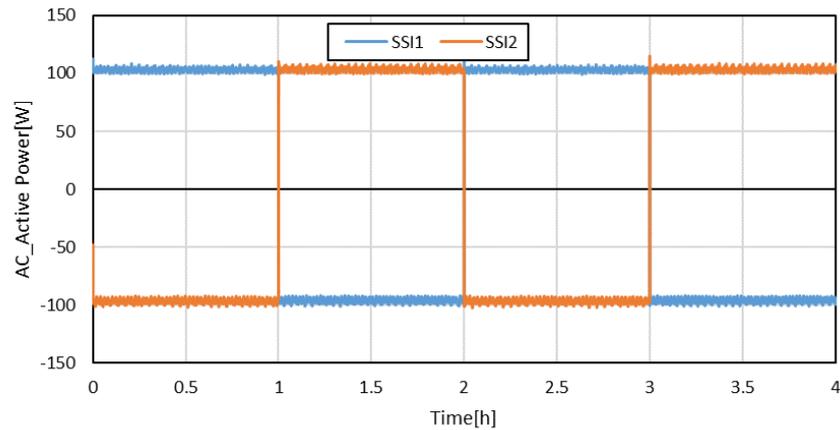
以下を1時間ごとにそれぞれの出力を反転させ4時間実験を行った。実験結果を次の図4.4の(a)~(d)に示す。



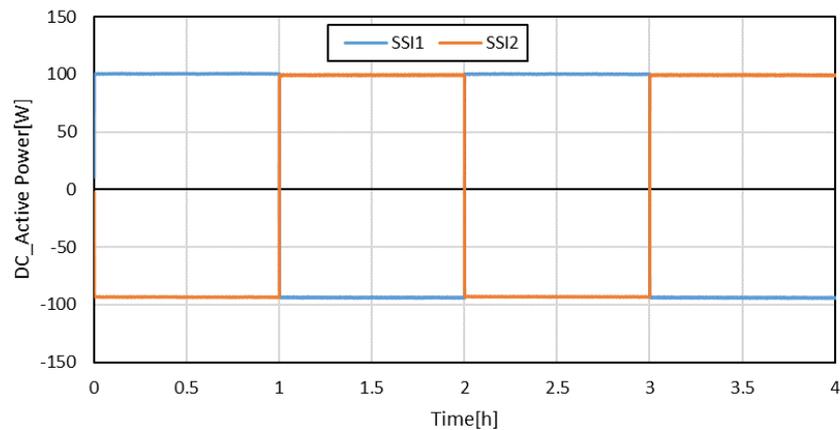
(a) 交流側電圧実効値 V_{AC}



(b) 直流側電圧実効値 V_{DC}



(c) 交流側有効電力 P_e



(d) 交流側有効電力 P_d

図 4.3 実験結果

4.3. 災害対応力向上に対する検討・考察

図 3(a)から、SSI#1 が出力指令値 $P_{m1} = 100$ [W], SSI#2 の出力指令値 $P_{m2} = -100$ [W]の場合、電圧値が低くなり、出力を反転させると高くなった。蓄電池の残容量の違いにより SSI の入力電圧が異なるためだと考えられる。

図 3(b)から、鉛蓄電池の特性で充電側の直流電圧が上昇、出力側の直流電圧が減少している。つまり正常に蓄電池間で電力融通を行えていることが分かる。

図 3(c)から、有効電力に関しては指令値通りの出力を行えていることから、SSI を用いた電力融通による電力ロスは低いものと考えられることができる。

図 3(d)から、すべてのロスがインバータの発熱になったと仮定すると、最大 8W 程度の変換ロスが生じている。100W で充電放電していることから、インバータの変換効率はおおよそ 96%となる。インバータの変換効率は従来のインバータが 95%程度なので同程度となる。

実験結果から、以下のようなことが可能になる。

- ① SSI を用いて MG を構築することが可能
単相の配電網で MG を構築できるということは最小単位での MG が構築できたことになる。そのため、災害時により、住宅街の配電網に事故が発生した場合でも、緊急的に MG を構築することで災害時にも安定して電力を供給することが可能であると考ええる。
- ② 各家庭間における蓄電池を電力融通することが可能
蓄電池の電力融通が可能であれば、MG 単位での蓄電電力量で考えることができる。これにより、MG 単位で蓄電電力量と災害時に使用する負荷量を調査することで、BCP に対応した蓄電池を選定することができる。
- ③ 災害時の長期運用が可能
災害の長期化に関しても考慮する必要があることから、一週間程度連続運用することが想定される。今回は3時間運用であったが、長期的な運用を視野に入れた運転が可能であると示唆した。

課題としては以下のようなことになる。

- ① SSI の出力電圧の安定化
SSI の出力電圧は主にノイズの影響により、電圧が不安定になっている。よって、SSI の電源まわりにフィルターを設計し導入する必要があると考える。
- ② 電力融通時に生じる直交変換ロスの削減
電力融通を頻繁に行うと直交変換による電力ロスが多くなり、実質的に使用には電力融通の充放電回数に制限があると思われる。よって、電力融通を自由に行うためにはインバータの直交変換効率を向上させ、電力融通時に生じる直交変換ロスの削減ことが課題となる。

第 5 章

三相同期化カインバータ導入による 高圧配電系統の系統安定性に関する検討

本章では、4章で行った低圧配電系統とは別に上位の高圧配電系統を構築して三相同期化カインバータを導入し、系統安定性に寄与することを確認する。

5.1. 実験環境

本論文で使用した実験機器を以下にまとめる。

- PE-Expert4 (Myway プラス)
- 標準インバータ MWINV-9R144 (Myway プラス)
- 電圧センサ MWPE-VS-01 (Myway プラス)
- 電流センサ MWPE-IS-03 (Myway プラス)
- 平滑コイル (ユニオン電機)
- コンデンサ
- 鉛蓄電池 12V×16 台 (MonotaRO)
- 配線用遮断器 (テンパール工業)
- 模擬電源 PCR1000LE ×3 台 (菊水電子工業)
- 模擬送電盤
- 直流電動機
- 三相同期発電機
- 総合負荷装置
- 可変抵抗器

● PE-Expert4 (Myway プラス)

本論文では提案制御系を実装する制御機器として Myway の PE-Expert4 を用いている。図 5. 1 に PE-Expert4 本体と各ボードの写真を示し、表 5. 1 にその仕様を示す。図 5. 1 における PEV ボードでアナログ信号の入出力を行い、DSP ボード(C6657)でホスト PC との通信やプログラムの計算を行う。

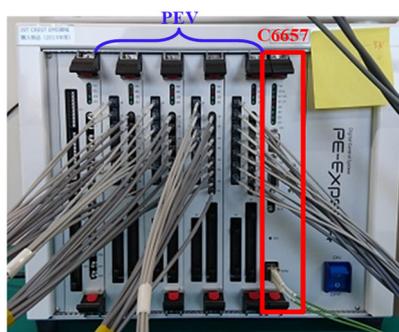


図 5. 1 PE-Expert4

表 5. 1 PE-Expert4

PE-Expert4 (PEV ボード)	
アナログ入力チャンネル数	8ch
光出力チャンネル数	7ch
変換時間	500ns
分解能	14bit
入力範囲	±5V
キャリア周波数	1kHz~500kHz

● 標準インバータ MWINV-9R144 (Myway プラス)

図 5. 2 に回路図を、図 5. 3 に本実験で使用したインバータの実際の写真を、表 4. 2 MWINV-9R144 の電気的仕様を示す。

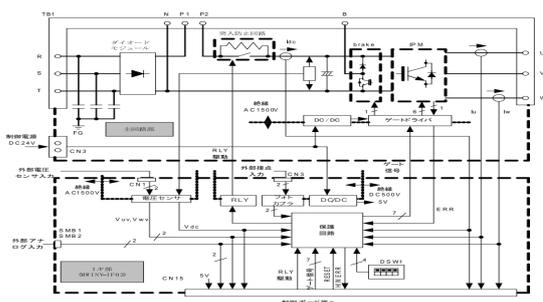


図 5. 2 インバータ回路図

(ユーザーズマニュアルより引用)



図 5. 3 MWINV-9R144

表 4.2 MWINV-9R144

項目		仕様
交流出力	定格容量	9.1kVA (出力 AC400Vrms 時) 10.0kVA (出力 AC440Vrms 時)
	定格電流	AC13.2Arms
	出力電圧範囲	AC0~440Vrms
直流入力	定格電圧	DC700V
	定格電流	DC14.5A
	入力電圧範囲	DC0~700V
交流入力	定格電圧	AC400Vrms
	定格電流	AC14.6Arms
	動作電圧範囲	AC0~440Vrms
スイッチング周波数		~20kHz

● 電圧センサユニット MWPE-VS-01 (Myway プラス)

図 5.4 に電圧センサの回路図を、図 5.5 に本実験で使用した電圧センサの実際の写真を、表 5.3 電圧センサ電気的使用の電気的仕様を示す。

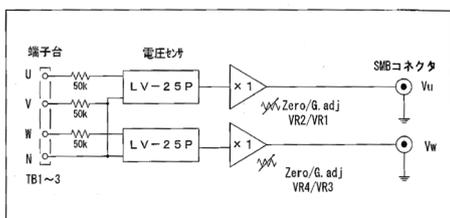


図 5.4 電圧センサ回路図



図 5.5 電圧センサ外観図

表 5.3 電圧センサ電気的使用

項目	仕様
入出力電圧比	±400V
絶縁耐圧	2kV
使用電圧センサ	LV-25P, LEM
リニアリティ	0.2%FS
応答特性	40μs
電源電圧	+15V 0.5A, -15V 0.5A

● 電流センサユニット MWPE-IS-03 (Myway プラス)

図 5.6 に電流センサの回路図を、図 5.7、図 5.8 に本実験で使用した電流センサの実際の写真を、表 5.4 電流センサ電気的の電氣的仕様を示す。

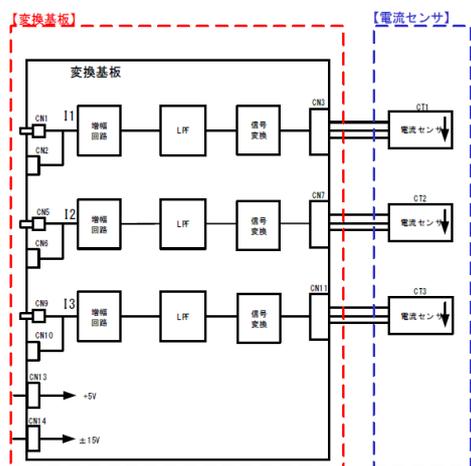


図 5.6 MWPE-IS-03 全体構成図
(Myway プラス ハードウェアリファレンス)



図 5.7 MWPE-IS-03 基盤

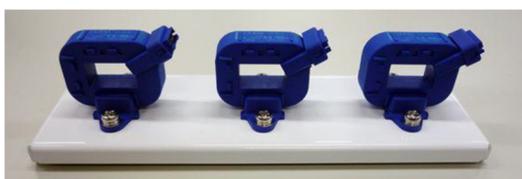


図 5.8 電流センサ外観図

表 5.4 電流センサ電気的仕様

項目	仕様	
入出力	入力電圧	出力電圧
	0A	2.511V
	-50A~+50A	1.7V~3.3V
	-125A~+125A	0.4V~4.6V
入出力比	15.975mV/A	
直線性誤差	±0.8% F.S. (F.S. = ±50A/±0.8V)	
出力電圧精度	±1.25%±2.5% F.S. (F.S. = ±50A/±0.8V)	
応答時間	50A/μs	
測定範囲	DC~200kHz	
電源容量	+5.0V/0.5A	

● 平滑コイル (ユニオン電機)

図 5.9 に本実験で使用するフィルタインダクタの実際の写真を、表 5.5 に電氣的仕様を示す。



図 5.9 フィルタインダクタ外観図

表 5.5 フィルタインダクタ仕様

項目	仕様
インダクタンス	10mH / 5A

● コンデンサ

図 5.10 に本実験で使用するフィルタインダクタの実際の写真を、表 5.6 に電氣的仕様を示す。



図 5.10 コンデンサ外観図

表 5.6 コンデンサ仕様

項目	仕様
キャパシタンス	3.3 μ F

● 鉛蓄電池 (株式会社 MonotaRO)

図 5.11 に本実験で使用する鉛蓄電池の実際の写真を、表 5.7 に電氣的仕様を示す。



図 5.11 鉛蓄電池の外観図

表 5.7 鉛蓄電池の仕様

適合	42B19R
容量	28(5 時間率)Ah
定格電圧	12V
本体質量	8.5kg
総高さ	227mm
CCA	300

● 遮断器 (テンパール工業)

図 5.12 に本実験で使用する配線用遮断器の実際の写真を、表 5.8 に電気的仕様を示す。



図 5.12 配線用遮断器の外観図

表 5.8 遮断器の仕様

項目	仕様
定格電流	5A
定格電圧	AC220V
極数	2P
素子数	2E

● 模擬電源 PCR1000LE (菊水電子工業)

図 5.13 に本実験で使用する模擬電源の実際の写真を、表 5.9 に電気的仕様を示す。



図 5.13 鉛蓄電池の外観図

表 5.9 PCR1000LE の電気的仕様

項目	仕様
直流電圧(L/H レンジ)	$\pm 1.4 \sim \pm 212V$ / $\pm 2.8 \sim 424V$
直流電流(L/H レンジ)	7 / 3.5A
交流電圧(L/H レンジ)	1~150 / 2~300V
交流電流(L/H レンジ)	10 / 5A
出力電力容量(DC)	700W
出力電力容量(AC)	1000VA
出力周波数	1~999.9Hz

● 模擬送電盤

図 5.14 に本実験で使用する総合負荷装置の実際の写真を、表 5.10 に仕様を示す。



図 5.14 模擬送電盤の外観図

表 5.10 模擬送電盤の電気的仕様

項目	仕様
容量	2kVA
定格電圧	220V
定格電流	5.25A
周波数	60Hz
相	3相4線式

● 直流電動機 (SEIKOSHA)

図 5. 15 に本実験で使用する直流電動機の実際の写真を，表 5. 11 に電氣的仕様を示す。



図 5. 15 直流電動機

表 5. 11 直流電動機の電氣的仕様

容量	2.2kW
電圧	DC 100V
回転数	1800/min
電流	27.0A

● 三相同期発電機 (SEIKOSHA)

図 5. 16 に本実験で使用する三相同期電動機の実際の写真を，表 5. 12 に電氣的仕様を示す。



図 5. 16 三相同期発電機

表 5. 12 三相同期発電機の電氣的仕様

容量	2.00kVA
電圧	AC 220V
回転数	1800/min
電流	5.25A

● 総合負荷装置 (山菱電機株式会社)

図 5. 17 に回路図を、図 5. 18 に本実験で使用する総合負荷装置の実際の写真を、表 5. 13 に電氣的仕様を示す。

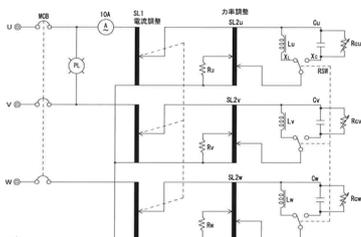


図 5. 17 総合負荷装置の回路図



図 5. 18 総合負荷装置の外観図

表 5. 13 総合負荷装置の電氣的仕様

容量	3kVA
電圧	AC 200V
相数	三相
周波数	60Hz
力率	0.1~0.98 (遅れ及び進み)
電流	0~9A

● 可変抵抗器 (山菱電機)

図 5. 19 に本実験で使用する可変抵抗器の実際の写真を、表 5. 14 に仕様を示す。



図 5. 19 可変抵抗器の外観図

表 5. 14 PCR1000LE の電氣的仕様

項目	仕様
抵抗値	240 / 60Ω

・実験の模擬高圧配電システムモデル

図 5.20 に広島大学の高層研究棟に構築した実験環境を，図 5.21 に実際の三相同期化カインバータの外観図を示す。今回行った実験においては，12 V の鉛蓄電池を 16 台直列に繋ぐことで 192V の直流電圧源とした。C 言語により 3 章で述べた制御系をコード化したものを DSP ボードへ組み込んだ。PWM 変調の搬送波周波数は 15 kHz であり，PE-Expert4 の演算周波数は 1.25GHz である。電圧センサおよび電流センサから測定された値は A/D 変換されたのちに PE-Expert4 に送信される。提案制御系は測定値に基づき，ゲート信号を生成して PWM 変調によってインバータを制御する。また，電流センサによって過電流を検出した場合，変調波を制御して電流を抑制する。実験データは Myway プラス社の PE-View X を使用し，サンプリング周波数を 15kHz で計測した。表 5.15 に回路パラメータを，表 5.16 に SSI 内部パラメータを示す。

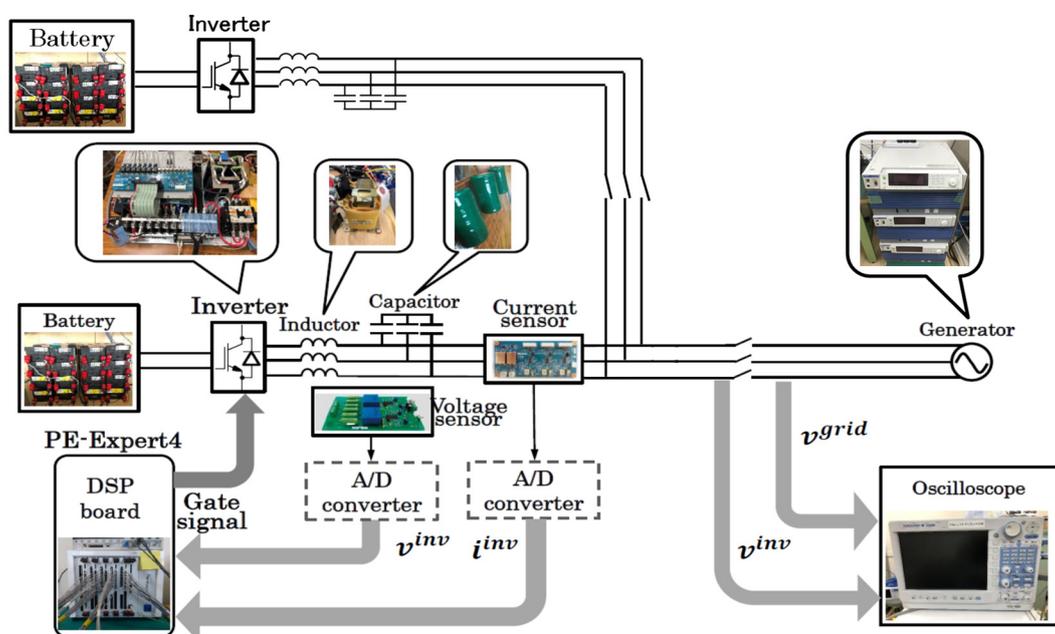


図 5.20 構築した実験環境モデル



図 5.21 TSI 外観図

表 5.15 回路パラメータ

設計パラメータ	値
直流リンク電圧 V_{DC}	192V
フィルタインダクタ L	10mH
模擬電源	100V / 60Hz

表 5.16 SSI 内部パラメータ

設計パラメータ	値
擬似慣性定数 M_{inv}	1.0
擬似ダンピング係数 D_{inv}	100
AVR/AQR ゲイン K_a	1
AVR/AQR 時定数 T_a	0.1
変換定数 K_Q	0.05
擬似機械入力 P_m	-100~100W
無効電力指令値 Q_{ref}	0var
周波数指令値 ω_{ref}	377rad/s
キャリア周波数	15kHz
出力電圧指令値 V_{ref}	100V
PR 制御比例ゲイン K_{pi}	10
PR 制御積分ゲイン K_{ii}	5000

5.2. 三相同期化カインバータを用いた負荷投入実験

5.2.1 実験方法

- ① 三相同期化カインバータと同期発電機をそれぞれ単独運転し、100V, 60Hz の三相交流を出力させる。
- ② 三相インバータは擬似機械入力 P_m を調整することで同期機と同様に加速/減速することを確認する。
- ③ 図 5.22 のように結線し、三相同期化カインバータと同期発電機 A の電圧の大きさ、周波数、位相を一致させる。
- ④ 同期検定器 1 により周波数、電圧計により電圧の大きさを確認する。
- ⑤ オシロスコープを図 4 の発電機端子とインバータ端子に接続し、位相を確認する。
- ⑥ それぞれの u, v, w 相が一致した瞬間に連系 Switch 1 を on に切り替える。
- ⑦ 図 4 において三相同期化カインバータと三相同期発電機(発電機 A)の同期連系運転を行う。この際、発電機 B の連系スイッチはオフにする。

t = 0 [s]: 三相インバータを線間電圧 100[V], 60[Hz] 運転。

t = 20[s]: 発電機 A とインバータを連系する。

t = 40[s]: 負荷を投入する(力率=1.0)。

t = 60[s]: インバータの出力 P_m を 100[W] に変更する

t = 80[s]: インバータの出力 P_m を -100[W] に変更する

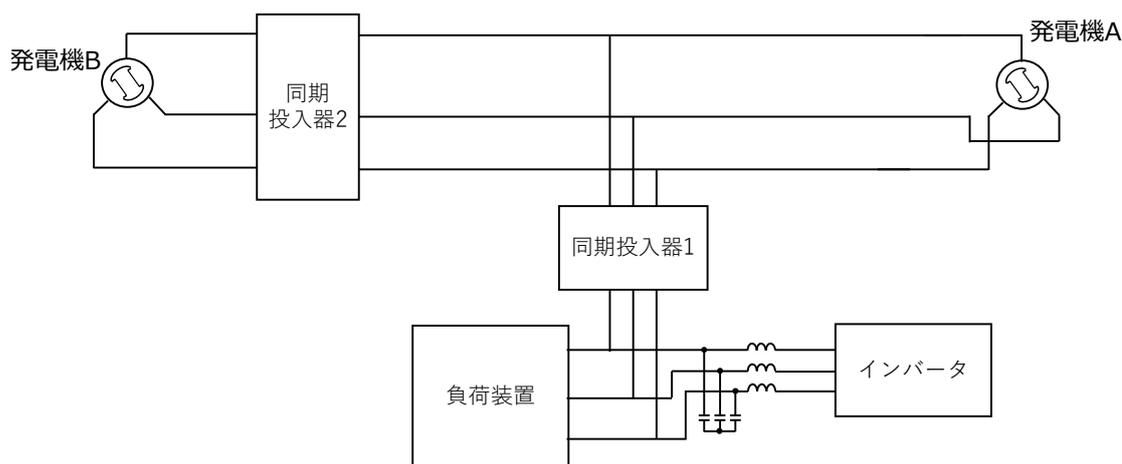


図 5.22 連系スイッチを含む結線図

5.2.2 負荷投入実験に対する考察

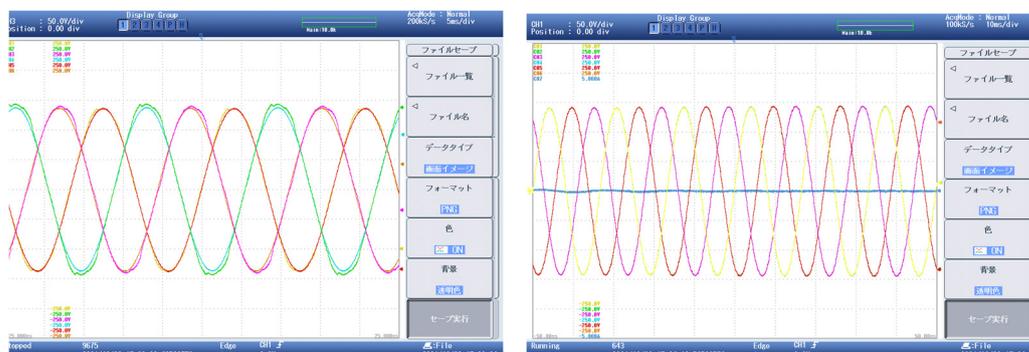


図 5.23 同期連系運転(左:連系前, 右:連系後)

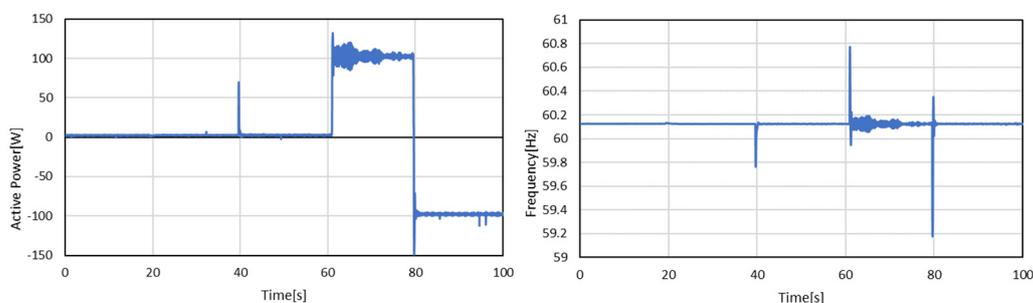


図 5.24 負荷運転(左: 有効電力, 右: 周波数)

実験結果

・同期連系に対する考察

実験結果を図 5 に示す。画面左上のチャンネル表示 1~6 は、インバータの u, v, w 相電圧、発電機の u, v, w 相電圧を示している。同期連系前のインバータ電圧波形には多少の乱れがあるが、停止することなく同期連系運転が可能であった。連系後も過電流や脱調せずに安定していることを確認した。

・負荷運転に対する考察

実験結果を図 6(左: 有効電力, 右: 周波数)に示す。連系時は大きなショックを検出することなく運転できた。負荷投入直後は瞬間的に出力変化があったが、即座に一定出力となり安定した。インバータの出力指令値 P_m を変更した際は電力や周波数の擾乱が確認されたため、今後、無効電力制御の実装などを検討していきたい。

5.3. 1回線地絡事故における三相同期化カインバータの動作検証

5.3.1 実験方法

図3の模擬送電線路にて片側2線短絡故障(2LS)を発生させ、このときのSSI#1および#2の過渡応答を観測した。

- ① インバータおよび同期機を起動し、スイッチ S1, S2, S3, S4 を投入して同期運転を行う。
- ② S5 を投入し、三相電力負荷を接続する。
- ③ 図3において、 $t=0s$ で2LSを発生させる。
- ④ 0.07s後に1線開放、同時に故障除去、 $t=1s$ に再閉路を実施する。

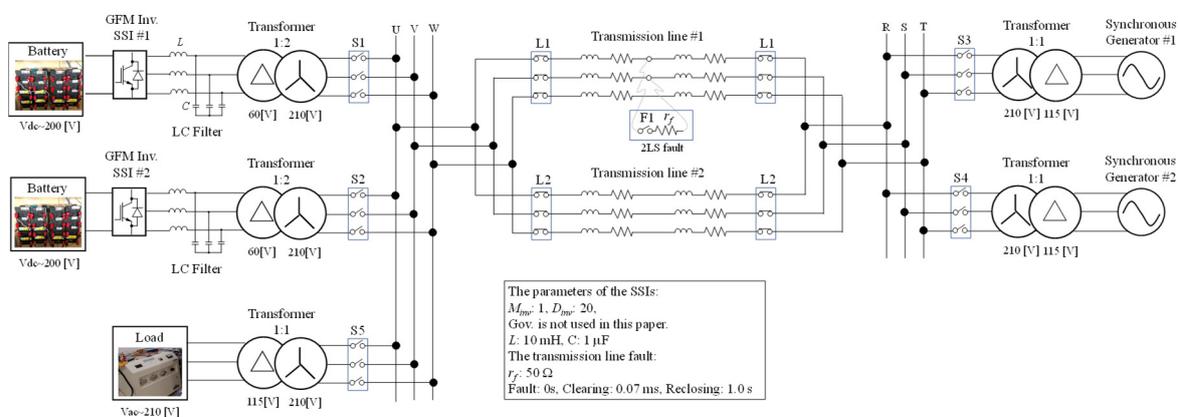


図 5.25 実験回路図

5.3.2 1回線地絡事故実験に対する検討・考察

以下、図 5.26(a)~(d)に実験結果を示す。

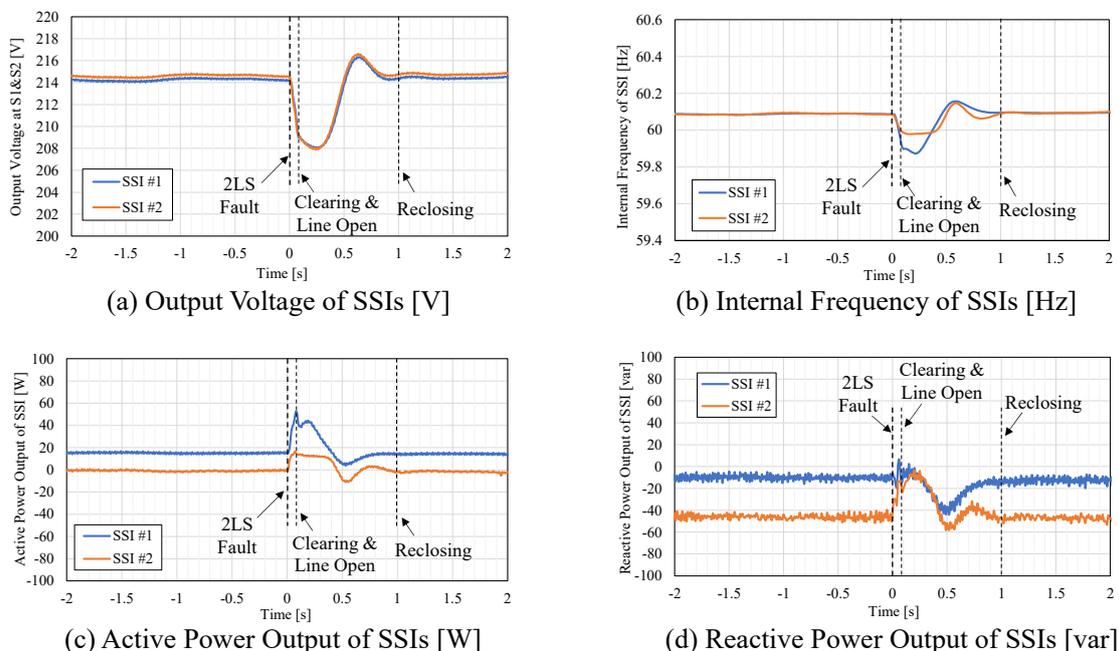


図 5.26 実験結果

- ① 図 5.26(a)から故障発生とともに減少しているが、一線解放後は電圧が制御され、一秒後には電圧が元の値に戻っている。
- ② 図 5.26 (b)から周波数については、電圧同様に故障発生とともに周波数が低下し、一線解放後は周波数が制御され、一秒後には周波数が元の値に戻っています。
- ③ 図 5.26 (c)から有効電力ですが、これもさきほどと同様の動きになっています。ただし、先ほどの周波数もそうですが、SSI#2のほうが数値の変動割合が低くなっています。これらは、有効電力の出力割合に依存しているため、片側負担が大きくなります。また、有効電力を出力しきれていないのは蓄電池劣化の可能性も考えられる。
- ④ 図 5.26 (d)から無効電力では故障発生時については0に近づき一線解放後は制御され元に戻っている。

これらから故障発生時においても動作し、故障除去後も正常状態に戻ることができることが確認できた。

5.4. 同期発電機脱落事故時の三相同期化カインバータの動作検証

5.4.1 実験方法

負荷変動や発電機の脱落を想定し、系統の周波数変動を想定し、場合でも継続して運行を行うことを確認する。以降で2つの実験について具体的に説明する。以下、図5.27に実験回路図を示す。

・負荷試験

- ① スイッチ S1, S2, S3, S4, S5 を閉じ、三相同期化カインバータ G1, G2 と発電機 MG1, MG2 と連系運転する。
- ② スイッチ S6 を閉じ、負荷を接続する。
- ③ 負荷電流を 1A, 2A, 3A に調整し、周波数を測定する。

・発電機脱落実験

- ① スイッチ S1, S2, S3, S4, S5 を閉じ、三相同期化カインバータ G1, G2 と発電機 MG1, MG2 と連系運転する。
- ② 発電機 MG1, MG2 から三相同期化カインバータ G1, G2 に一台当たり 300W ずつ給電する。
- ③ 発電機 MG1 を脱落させる。つづいて、発電機 MG2 を脱落させ、最後に、三相同期化カインバータ G2 を脱落させる。
- ④ それぞれの状態における系統周波数を測定する。

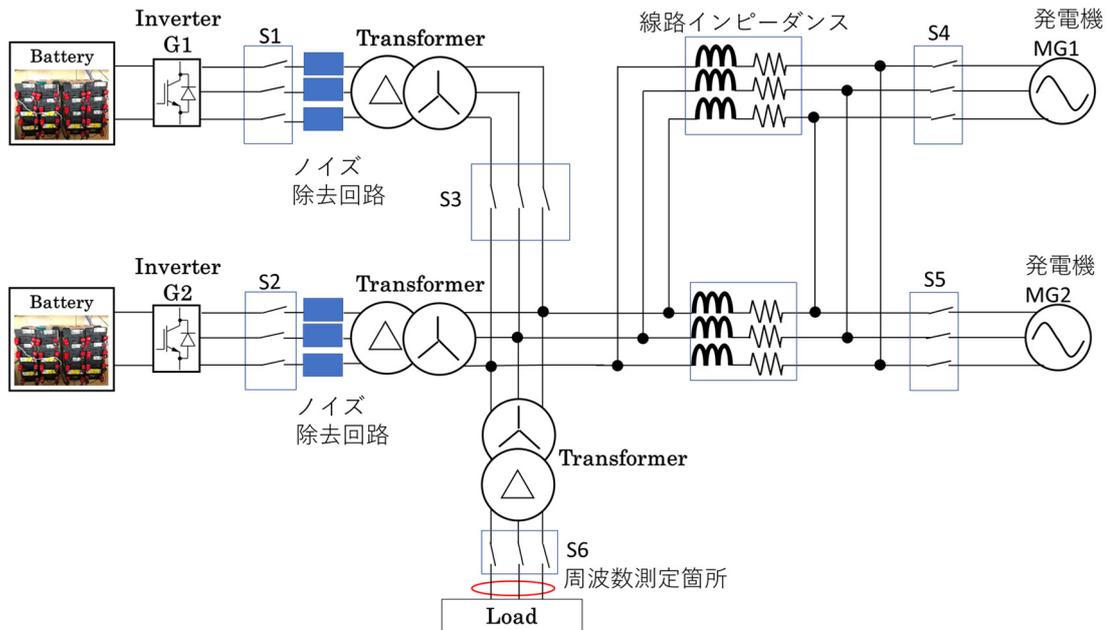
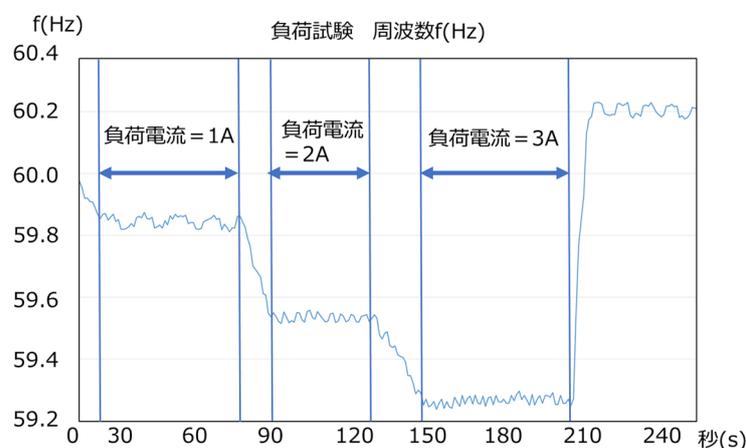


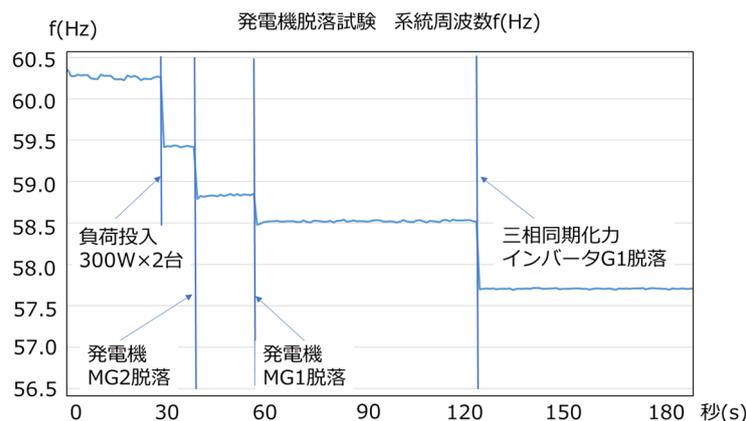
図 5.27 実験回路図

5.4.2 発電機脱落試験に対する検討・考察

以下、図 5.28(a)(b)に実験結果を示す。



(a) Load test frequency f(Hz)



(b) Generator dropout test frequency f(Hz)

図 5.26 実験結果

・負荷試験

実験結果を図 5.26(a)に示す。負荷電流が増加するにつれ周波数が低下しているが、三相インバータは問題なく動作している。また、負荷電流が変動すると急激に周波数は変動するがその変動値が 0.2~0.3(Hz)であった。

・発電機脱落実験

実験結果を図 5.26(b)に示す。負荷試験よりも周波数が低下しているが、脱落が発生した場合でも問題なく動作した。周波数は最大で瞬間的に 0.8Hz ほど低下し、初期値 60.3Hz から最終値 57.7Hz まで低下した。

第6章

単相および三相同期化カインバータを活用した 配電システムモデルに関する実験・検討

6.1. 単相，三相同期化カインバータ活用した配電系統モデルの形成

以下，図 6.1 に，単相回路および三相回路で構成される配電系統モデルを示す。

なお，本モデルでは，三相回路に高圧需要家，単相回路に低圧需要家を想定し，それぞれ系統内に複数の需要家が存在する場合を想定している。また，常時運用において蓄電池はデマンド対策などに使用されるものとし，災害発生時には，MG を構築し，MG 内の蓄電池で負荷供給を行うものとする。

本章では，この MG 内において事故発生時に SSI と TSI が協調して動作し，系統安定性に寄与できるか確認する。事故については，5 章同様に短絡事故と発電機脱落事故を行った。

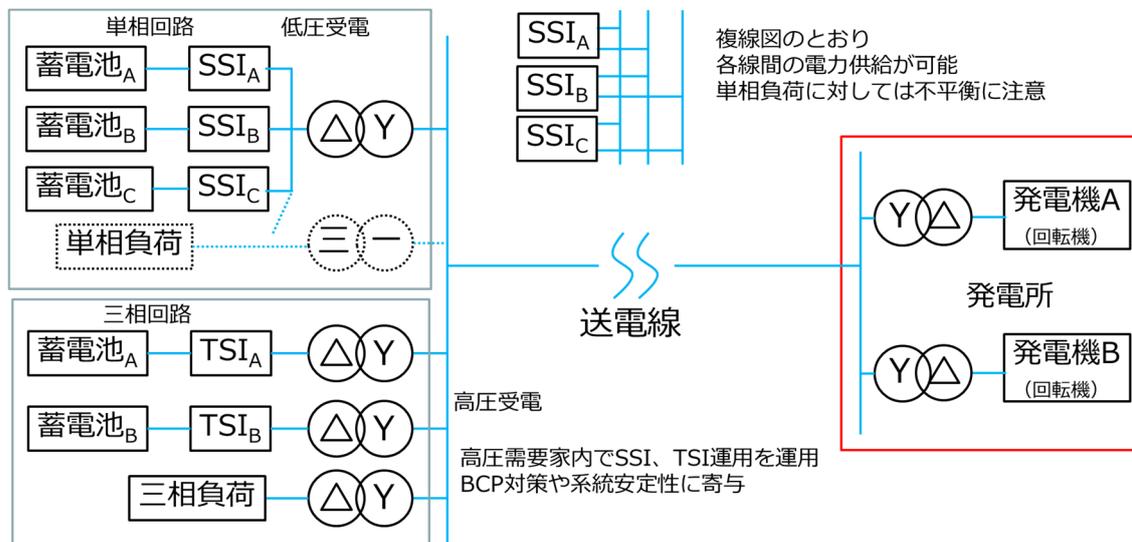


図 6.1. 配電系統モデル

以下、図 6.2 に、配電系統事故実験のため構成した、実験回路図を示す。

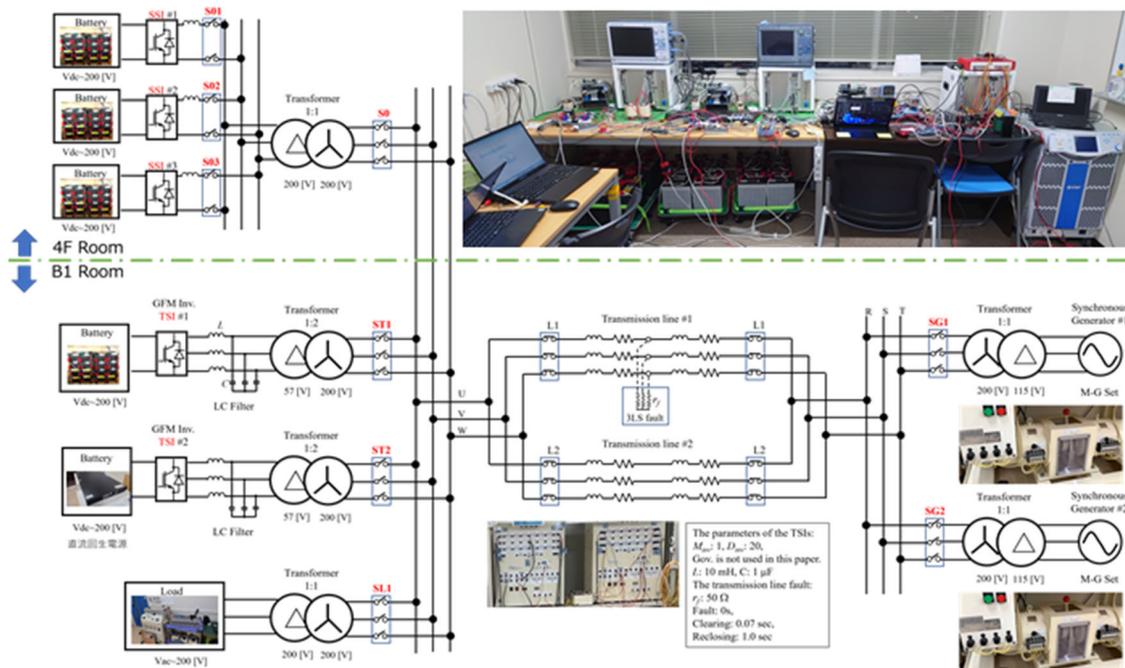


図 6.2. 配電系統事故実験 構成図

<実験方法>

- Step①: $t=0[s]$,各スイッチ ST1,2,SG1,SG2 を投入して,TSI#1,#2, M-G set2 台を同期運転する。その後, SL1 を投入し, 三相電力負荷を接続する。
- Step②: 図 6.2 において, $t=0s$ で 3LS を発生させ, 0.07s 後に 1 線遮断, 同時に故障除去, $t=1s$ に再開路を実施する。
- Step③: 再開路実施後 $t=00s$ で MGset#1 を脱落させる。
- Step④: MGset#1 脱落后 $t=00s$ で MGset#2 を脱落させる。その後 $t=00s$ までデータ計測する。
- Step⑤: Step①において S01,S02,S03 を投入して,TSI#1,#2,SSI#1,SSI#2,SSI#3,SM-G set2 台を同期運転し, SL1 を投入し, 三相電力負荷を接続する。この状態で Step②~④同様に試験を行いデータ計測する。

6.2 配電系統事故時の動作検証

実験結果を図 6.3 および図 6.4 に示す。

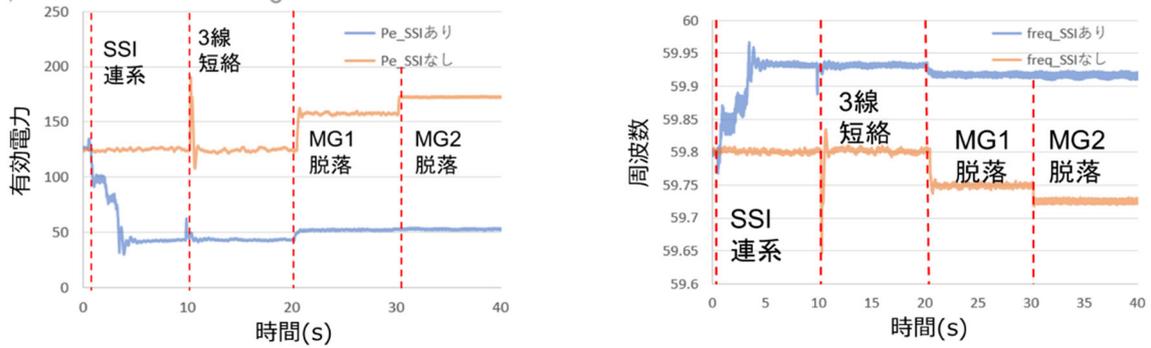


図 6.3 実験結果 有効電力 (左図) および周波数 (右図) : TSI

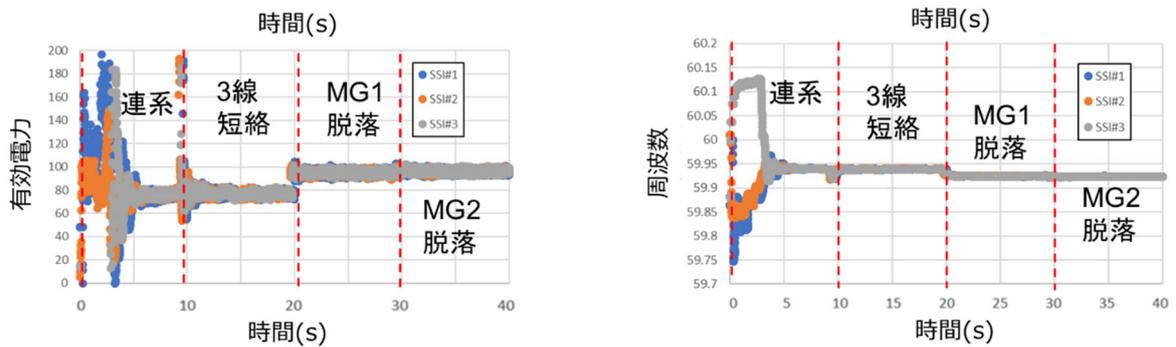


図 6.4 実験結果 (周波数) TSI

6.3 配電系統事故発生時に対する検討・考察

・ 図 6.3 より SSI を接続することで TSI について各事故発生時の有効電力の低下および周波数低下を軽減できている。そのため SSI が系統に接続されていれば, TSI と協調して配電系統事故発生時に有効電力を出力することが分かる。

・ 図 6.3 より SSI を接続することで TSI の内部周波数は SSI がいない時と比べると事故発生時の周波数低下量が抑えられていることが分かる。そのため SSI が系統に接続されていれば, TSI の周波数低下を防止でき、低圧領域においても SSI を導入することで上位系統の負担を軽減できることが分かった。

・図 6.4 より SSI は連系時に有効電力および周波数が変動しているが、これらの変動が発生しても止まることなく動作し、TSI と協調運転を行うことが可能である。また、これらの変動の発生原因は TSI と SSI の周波数偏差が主な原因となりうる。同図からもわかるように連系開始時 TSI は 59.8Hz であるのに対して、SSI は 60Hz であった。

・3 線短絡事故発生時は、SSI 未接続時の有効電力はおよそ 200W、瞬間的な増加量は 70W あるのに対して、SSI 接続時の有効電力はおよそ 60W、瞬間的な増加量は 20W 程度に抑えられている。また、周波数に関しても、SSI 未接続時の周波数低下量は 0.15Hz であるのに対して、SSI 接続時の周波数低下量は 0.05Hz 程度に抑えられていることが分かる。また、周波数の過渡的な偏差が少なく、安定した制御となっている。

・MG セット脱落事故発生時は、SSI 未接続時の有効電力はおよそ 175W、瞬間的な増加量は 50W あるのに対して、SSI 接続時の有効電力はおよそ 50W、瞬間的な増加量は 10W 程度に抑えられている。また、周波数に関しても、SSI 未接続時の周波数低下量は 0.75Hz であるのに対して、SSI 接続時の周波数低下量は 0.025Hz 程度に抑えられていることが分かる。

考察

SSI を低圧システムに使用することでシステム安定化に寄与できると考える。また、SSI と TSI が各事故に対して、停止せず動作していることから、事故の規模にもよるが事故時にシステム周波数維持にも期待できると考える。この結果からもマイクログリッド運用において、SSI と TSI を入れることのメリットは大きい。

ただし、ここで触れていない電圧安定化や最適動作点については別途検討する必要がある。また、有効電力の負担量に対する調整も別途必要になると考える。

第 7 章

結論

結論

SSIとTSIを活用してマイクログリッドの構築および新たな蓄電池管理方法に関して研究を行った。その結果、通信を必要とせず、自律分散的な蓄電池を効率よく使用できる新たな蓄電池管理方法を提案できた。またSSI、TSIを活用することで系統安定性が向上し、今後の再生可能エネルギーの増加に対する問題を解決できる可能性を示唆できた。

今後の社会情勢として、再生可能エネルギーの増加に対する慣性力不足等の問題が顕在化することは明白である。この問題に対する一つの対策として研究結果まとめることができた。この問題の顕在化は、2030年程度を想定されているものであるが、早期に検討することが重要である。

また、今後も広島大学と私の所属する株式会社中電工でSSIと引き続き実証検証に向けた研究を続けていく予定である。

参考文献

1. 単相安定化インバータの機能検証に関する研究
佐々木 豊，足立虹太，松本宗一郎，関崎真也，造賀芳文，餘利野直人，網本和也，大地秀二，伊東 仁，間屋口信博
2020年（第38回）電気設備学会 全国大会 講演番号：G-8 2020年8月1日 発行
2. 単相同期化カインバータを用いた災害対応力を向上させる住宅マイクログリッドに関する実験的検討
網本 和也，餘利野 直人，佐々木 豊，関崎 真也，造賀 芳文，田中 敬太，島田 拓也
2021年（第39回）電気設備学会 全国大会 講演番号：112 2021年8月1日 発行
3. 分散型蓄電システム管理のためのマイクログリッド周波数制御
餘利野 直人，網本 和也，佐々木 豊，造賀 芳文
令和3年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 講演番号：PE-21-094/PSE-21-107 2021年9月22日 発表
4. GFMインバータを用いた三相同期運転および負荷試験
網本 和也，田中 敬太，餘利野 直人，関崎 真也，佐々木 豊，造賀 芳文
令和4年電気学会全国大会 講演番号：6-211 2022年3月1日 発行
5. 系統故障時におけるグリッドフォーミングインバータの動作検証
網本 和也，田中 敬太，餘利野 直人，佐々木 豊，関崎 真也，造賀 芳文
2022年（第40回）電気設備学会 全国大会 講演番号：E-18 2022年8月1日 発行

6. グリッドフォーミングインバータにおける AVR 機能の動作検証
田中敬太, 網本和也, 餘利野直人, 佐々木豊, 関崎真也, 造賀芳文
2022年(第40回)電気設備学会 全国大会 講演番号:P-2 2022年8月1日 発行

7. GFM インバータを用いた負荷試験および発電機脱落試験
網本 和也, 田中 敬太, 餘利野 直人, 佐々木 豊, 関崎 真也, 造賀 芳文
令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会 講演番号117:2022年8月26日 発行

8. GFM インバータにおける AVR 機能の動作検証
田中敬太, 網本和也, 餘利野直人, 佐々木豊, 関崎真也, 造賀芳文,
令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会 講演番号:101 2022年8月26日発行

9. グリッドフォーミングインバータを用いたマイクログリッドの構築と同期機脱落試験
網本和也, 田中敬太, 餘利野直人, 佐々木豊, 関崎真也, 造賀芳文
2022年度(第73回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
講演番号:R22-06-13 2022年10月17日 発行

10. BCP を考慮した分散型蓄電システム管理のためのマイクログリッド周波数制御
網本 和也, 餘利野 直人, 佐々木 豊, 造賀 芳文
令和5年電気学会全国大会 講演番号:6_166 2023年3月1日 発行

謝辞

末尾ではありますが本研究を遂行するにあたりまして、お世話になりました電力・エネルギー工学研究室の方々に謝辞を述べさせていただきます。

本研究は、広島大学先進理工系科学研究科、餘利野 直人 特任教授、造賀 芳文 教授、佐々木 豊 助教の御指導もとに遂成されたものであり、私が研究を進めるにあたり丁寧に、そして熱心に助け、導いてくださりました。ここに厚く御礼申し上げます。また、高い見識に基づく御教授と心ある御配慮を賜りました関崎 真也 助教に厚く感謝申し上げます。本研究を遂行する中で、貴重な御助言、ご支援を賜りました渡辺 文雄 氏に深く感謝の意を表します。また、数々の知見をご教示賜りました清水 敏久 教授（東京都立大学）に深く感謝いたします。

研究チームとして大変お世話になりました田中 敬太 氏、菊池 岳人 氏、西中 郁人 氏、小川 翔也 氏、島田匠 氏、に感謝申し上げます。

私が学生として電力・エネルギー工学研究室に配属されてから3年間、苦楽を共にして研究を進めてきた、島田 拓也 氏、上杉 友輝 氏、河野 直生 氏、佐藤 素成 氏、中野 湧斗 氏、横田 浩輝 氏、Ahmed Bedawy 氏とに厚く御礼申し上げます。

私が学生として広島大学博士後期課程を支援いただいた株式会社中電工の技術開発部の西花 聡一 氏、伊東 仁 氏、大地 秀二 氏、加村 敦 氏、庄野誠 氏、に厚くお礼申し上げます。

最後に研究のみならず生活面でもアドバイスを頂いた本研究室の先輩方、並びに電力・エネルギー工学研究室の皆様にご心より感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

令和5年7月1日

網本 和也