令和 6 年度　卒 業 研 究 論 文

主論文

切り換え制御を用いた一次および三次調整力の複合約定を可能とする蓄電拠点の分散型運用方策

工学部 工学科 電気電子工学コース

令和 3 年度入学

氏　　名　早野　広佑

指導教員　平田 研二 教授

令和 7 年 3 月 9 日提出

Copyright © 2025 by HAYANO kosuke

©2025
HAYANO kosuke
All rights reserved

目 次

第 1 章　序論 **1**

1.1　本研究の背景 1

1.2　研究の目的と概要 1

第 2 章　電力市場と想定のシステムについて **3**

2.1　電力需給調整市場 3

2.2　調整力の入札のシステム 4

2.3　想定する蓄電ステーション 5

第 3 章　分散型制御方策 **7**

3.1　三次調整力モード 7

3.1.1　蓄電ステーションの集中最適化問題 7

3.1.2　単純に分散化した最適化問題 8

3.1.3　価格提示による分散最適化 8

3.1.4　KKT 条件の比較 8

3.1.5　実時間価格更新則 9

3.1.6　離散時間実装 9

3.2　一次調整力モード 10

3.3　モード切り換えのアルゴリズム 11

第 4 章　実機実験よる有効性検証 **15**

4.1　実験環境 15

4.2　実験パラメータ 16

4.3　仮想の周波数偏差データを用いた実機実験 16

4.3.1　用意した周波数偏差データ 16

4.3.2　実機実験結果 17

4.4　実際の周波数偏差データを用いた実機実験 21

4.4.1 平成 30 年北海道胆振東部地震時の周波数データ 21
4.4.2 実機実験結果 23

第 5 章 結論 **27**

謝辞 **29**

参考文献 **31**

図 目 次

2.1 各調整力の要件, 概要 3
2.2 各調整力市場の状況 4
2.3 Battery Storage Station 5

3.1 Closed-loop system 10
3.2 Speed-rate of each PCS 11
3.3 Closed-loop system for the composite contract of Frequency Containment and Replacement Reserve. 13

4.1 Environment of Experiment 15
4.2 step(inc) 17
4.3 step(dec) 17
4.4 lamp(inc) 17
4.5 lamp(dec) 17
4.6 noise(2s) 17
4.7 noise(1s) 17
4.8 Experimental result: Step change(inc) 18
4.9 Experimental result: Step change(dec) 19
4.10 Experimental result: Lamp change(inc) 19
4.11 Experimental result: Lamp change(dec) 20
4.12 Experimental result: Noise(2s) 20
4.13 Experimental result: Noise(1s) 21
4.14 平成 30 年北海道胆振東部地震時の周波数データ 22
4.15 3:18:00∼3:20:30 22
4.16 3:18:00∼3:20:30(平均化) 22
4.17 3:10∼3:20: scale-down 23

4.18 3:10∼3:20: scale-down(平均化) 23
4.19 Experimental result: 3:18:00∼3:20:30 24
4.20 Experimental result: 3:18:00∼3:20:30 (平均化) 24
4.21 Experimental result: 3:10∼3:20 scale-down 25
4.22 Experimental result: 3:10∼3:20 scale-down(平均化) 25

表 目 次

4.1 Parameters of Utility 16
4.2 Parameters of PCS 16

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

現在, 日本では化石燃料中心の産業や社会構造を太陽光などのクリーンエネルギー中心の産業や社会構造に転換していく取り組みである GX(グリーン・トランスフォーメーション) の実現が目指されている. そのため, 太陽光発電設備や風力発電設備などの再生可能エネルギー機器が分散型電源として電力系統に投入され, その数は段々と増加している. しかしこのような分散型電源は多種多様であり, 日射量や風速の違いなど電源の種類によっては出力の安定性が懸念されている. これら不安定な電源の投入, 拡大によって電力系統の需給バランスの調整は今まで以上に難しくなると予想される. このような背景から 2021 年度に需給バランスの調整のための電力を調整力として取引する電力需給調整市場という市場が開設された. [1]

電力需給調整市場では時間スケールの長い経済負荷配分制御 (EDC : Economic load Dispatching Control) に相当する三次調整力や時間スケールの短いガバナフリー制御に相当する一次調整力などのメニューがあり, それら調整力の広域調達がすでに始まっている. また, それらの調整力を組み合わせた複合約定というメニューも存在する. その中で蓄電池を用いた蓄電設備は太陽光や風力などの再生可能エネルギーを用いた発電設備と比較すると安定的な電源としての運用が可能であり, 調整力の安定的な電源としての利用が期待されている. [2, 3] また, 文献 [4] では, 電力市場を考慮した計画 (入札) に関する研究が報告されている. 一方で, 三次調整力および一次調整力の複合約定を想定した, 実時間における制御方策については検討, 検証がされていない.

1.2 研究の目的と概要

本論文では, 複数の蓄電池によって構成された蓄電ステーションにおいて三次調整力および一次調整力の複合約定を可能とする分散型の運用方策を提案し, 提案した運用方策を用いた実機実験を行い, 運用方策の有効性を検証する. また, 全ての実機実験においてシミュレーションとの比較も行う.

以下に本論文の概要を示す.

2 章では本論文で対象としている電力需給調整市場の説明, 想定している蓄電ステーションの構成シ

ステムなどについて述べる．3 章では各調整力用モードでの分散型の出力目標値決定方法, 各モードの切り換えアルゴリズムについて述べる．4 章では提案した運用方策についての実機実験を行った結果とそれに伴った有効性の確認について述べる．5 章では本論文の統括をおこなう．

第 2 章

電力市場と想定のシステムについて

本章では, 対象としている電力需給調整市場についてと, その中での各調整力の定義や入札方法などのシステムの説明, また本論文で想定している蓄電ステーションのシステムについても説明する.

2.1 電力需給調整市場

過去, 一般送配電事業者は電力供給区域の周波数制御, 需給バランス調整のために自社の発電機を余分に動かすことによって必要な調整用の電力 (調整力) を確保していた. しかし, このような余分な電力の発電をすることは非効率であるため, 2017 年度より一般送配電事業者が確保する調整力は原則として公募で調達することとなった. その後, 多くの電源等への参加機会の公平性確保, 調達コストの透明性および適切性の確保, 調整力の効率的な確保の観点から 2021 年度に電力需給調整市場が創設された. この電力需給調整市場の取引商品としては一次調整力, 二次調整力①, 二次調整力②, 三次調整力①, 三次調整力②がある. 各商品の要件, 概要を Fig. 2.1 に示す.

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)
指令・制御	オフライン（自端制御）	オンライン（LFC信号）	オンライン(EDC信号)	オンライン(EDC信号)	オンライン
監視	オンライン（一部オフラインも可※1）	オンライン	オンライン	オンライン	オンライン
回線	専用線のみ（オフライン監視の場合は不要）	専用線のみ	専用線 または（簡易指令システム）※2	専用線 または 簡易指令システム	専用線 または 簡易指令システム
入札時間単位	3時間※3	3時間※3	3時間※3	3時間※3	3時間※4
応動時間	10秒以内※7	5分以内	5分以内	15分以内	45分以内※5
継続時間	5分以上※7	30分以上※3	30分以上※3	3時間※3	3時間※4
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	－（自端制御）	0.5～数十秒	専用線：数秒～数分（簡易指令システム※2：5分）	専用線：数秒～数分 簡易指令システム：5分	30分
監視間隔	1～数秒※1	1～5秒程度	専用線：1～5秒程度（簡易指令システム※2：1分）	専用線：1～5秒程度 簡易指令システム：1分	1～30分※6
供出可能量（入札量上限）	10秒以内に出力変化可能な量（機器性能上のGF幅を上限）	5分以内に出力変化可能な量（機器性能上のLFC幅を上限）	5分以内に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）	15分以内に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）	45分以内※5に出力変化可能な量（オンラインで調整可能な幅を上限）
最低入札量	1MW	1MW	1MW	1MW	1MW
刻み幅（入札単位）	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW
上げ下げ区分	上げ／下げ	上げ／下げ	上げ／下げ	上げ／下げ	上げ／下げ

※1 事後に数値データを提供する必要あり（データの取得方法、提供方法については今後検討）
※2 休止止時間を反映した簡易指令システム向けの指令値を作成するための中給システム改修の完了後に開始
※3 2026年度より「30分」に変更予定。システム改修内容を踏まえ、2026年度変更を目指し検討中
※4 2025年度より「30分」に変更予定
※5 2025年度より「60分」に変更予定
※6 30分を最大として、事業者が収集している周期と合わせることも許容
※7 2025年度にオフライン監視の場合、応動時間「30秒以内」、継続時間「設定なし」に変更予定

出所）第44回需給調整市場検討小委員会（2023.12.21）資料2をもとに作成
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2023/files/jukyu_shijyo_44_02.pdf

Fig. 2.1: 各調整力の要件, 概要

なお, 本論文で扱う一次調整力は商品概要において一次調整力, 三次調整力は商品概要において三次調整力①を想定している. 一次調整力とは応動時間が 10 秒以内の時間スケールの短い調整力であり, 三次調整力は応動時間が 15 分以内と時間スケールの長い調整力となっている. この一次調整力と三次調整力は実際に Fig. 2.2 に示すように 2024 年度以降ではどちらも広域調達が開始している.

また, 各調整力の必要量のピークとなる地点が必ずしも同時に発生するものではないという不等時性を踏まえ, さらなる調整力確保の効率化の観点から, 1 つのリソースが同時に複数商品に入札することが可能である場合, その入札方法を許容する複合約定というものも存在する.

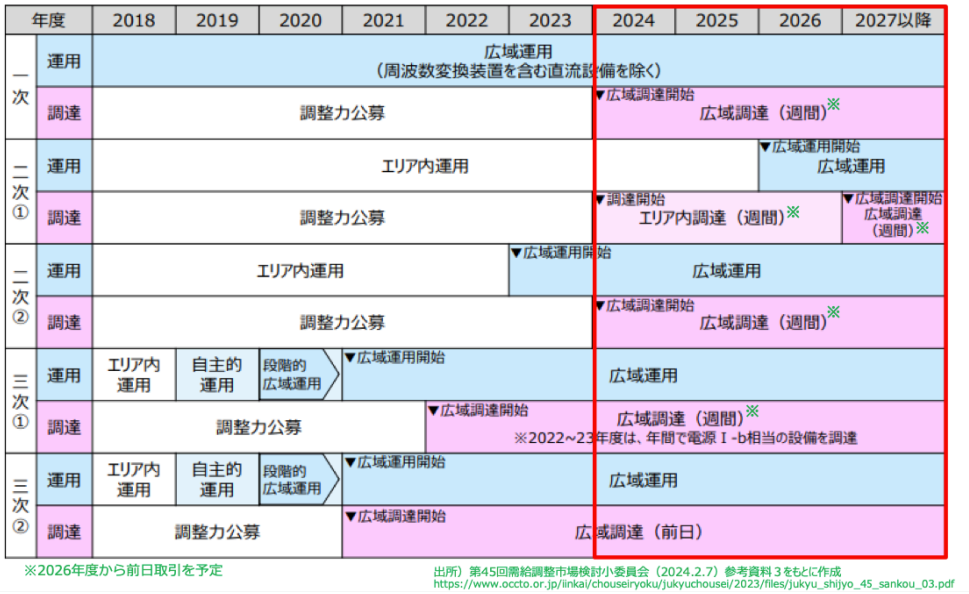


Fig. 2.2: 各調整力市場の状況

2.2 調整力の入札のシステム

本節では対象としている一次調整力や三次調整力①などの週間商品である調整力の入札システムについて説明する.

電力需給調整力取引所は取引対象の週の土曜日から金曜日までの 1 週間分の必要な調整力を予想し, 取引会員との入札規模を決定, 取引対象の前週の月曜日の 14 時に取引会員に公表される. 取引会員は火曜日の 14 時までに

自身の設備の出力量を考慮し, 各調整力の入札時間単位ごとに入札の応募をする. 電力需給調整力取引所は各取引会員の入札の応募に対して調整力の出力可能量と金額から必要量分の調整力の約定を 15 時までにおこなう. 取引対象当日に約定した調整力の中で実際に必要になった調整力は約定した取引会員に出力の要請をして取引会員の設備から調整力が出力される. もし約定していた出力量が出力できない場合や応動時間以内に出力できない場合は罰金などの措置が取られる. そのため約定した取引会員は自身の設備が揚力発電であれば約定量の発電ができるほどの揚水, 蓄電ステーションであ

れば約定量分の充電量など約定量分の電力を確保しておく必要がある.

2.3 想定する蓄電ステーション

三次調整力は 2.1 節でも説明した通り時間スケールの長い調整力であり, 水力や揚力発電といった発電システムによる電源でも対応できるが一次調整力のような時間スケールの短い調整力には対応することが難しい. しかし蓄電池は時定数が短く一次調整力のような時間スケールの短い調整力にも対応することができ, 天候などによる出力変化も少ないため安定した電源である. そのため本論文では蓄電池を用いた蓄電ステーションを想定し一次調整力と三次調整力の複合約定を可能とする.

想定する蓄電ステーションのシステムを Fig. 2.3 に示す. 蓄電ステーションは n 台の蓄電池が配置されており, 各蓄電池は蓄電池用 PCS(Power Conditioning System) を通して電力系統に接続されている. 蓄電池から出力された電力は各 PCS で交流電力に変換され電力系統に流れる. この蓄電ステーションで達成すべき運用目標は電力系統との接続点での出力 P(=各 PCS から出力される電力の合計出力値) を基本的には三次調整力指令値 P^{I3} に一致させ, 周波数変動があった場合には一次調整力として必要に応じて出力 P を調整することである. 各 PCS は出力目標値 P_i^{r}, $i \in N = \{1, 2, \ldots, n\}$ を自身で決定しながらも, 運用目標の達成を可能とする分散型の出力目標値決定方策を本論文では考える. 三次調整力での出力目標値を P_i^{r3}, 一次調整力での出力目標値を P_i^{r1} とすると各 PCS が自身で決定する出力目標値 P_i^{r} は

$$P_i^{\mathrm{r}} = P_i^{\mathrm{r3}} + P_i^{\mathrm{r1}} \tag{2.1}$$

として決定する.

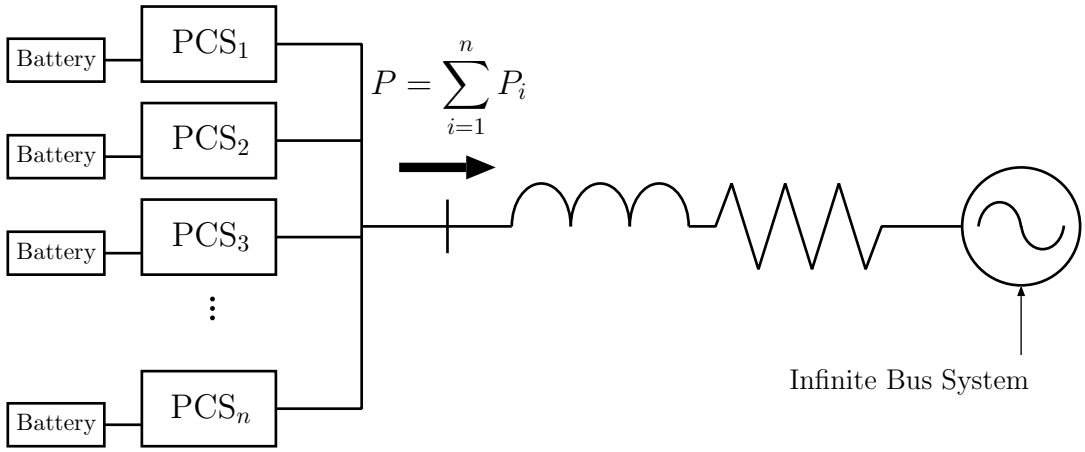


Fig. 2.3: Battery Storage Station

第 3 章

分散型制御方策

本章では, 提案する分散型の制御方策において各調整力へ対応するモードと各モード切り換えのアルゴリズムについて説明する.

3.1 三次調整力モード

本論文では三次調整力モードとして価格提示による分散最適化 [5] を用いた制御系によって三次調整力に対応する. 本節ではその分散最適化を用いた制御方策について説明する.

3.1.1 蓄電ステーションの集中最適化問題

本論文で想定している蓄電ステーションには PCS のほかに, システム全体の管理者であるユーティリティーが存在するとする.

そのユーティリティーは蓄電ステーション全体としての損失の最小化と運用目標である蓄電ステーション全体としての出力 P(=各 PCS の出力合計 $\sum_{i=1}^{n} P_i$) と三次調整力指令値 P^{I3} の一致を達成するため, 以下の集中最適化問題を解き, 各 PCS の出力目標値 P_i^{r3} を決定する.

$$\min_{P_i^{\mathrm{r3}}} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i (P_i^{\mathrm{r3}})^2 \tag{3.1a}$$

$$\text{subject to} \quad -P_i^{\mathrm{lim}} \leq P_i^{\mathrm{r3}} \leq P_i^{\mathrm{lim}} \tag{3.1b}$$

$$P - P^{\mathrm{I3}} = 0 \tag{3.1c}$$

ここで, w_i は各 PCS の出力調整のための重み係数であり, (3.1a) 式は各 PCS の出力の合計の最小化を表している. 不等式制約 (3.1b) 式の P_i^{lim} は各 PCS の定格容量を表し, 等式制約 (3.1c) 式は 全体としての出力が三次調整力指令値 P^{I3} に一致させることを表している. (3.1) 式の最適解を $(P_i^{\mathrm{r3}})^*$ と表す.

これはユーティリティーが集中最適化問題 (3.1) 式を解き, その最適解 $(P_i^{\mathrm{r3}})^*$ を各 PCS へ提示するような中央集中型の運用である. しかしこのような中央集中型の運用は今後の蓄電拠点の需要増加に伴う拠点の拡大などによりユーティリティーの計算量が増大し対応することが困難となる可能性が高い. そのため, 各 PCS が自身の出力目標値を決定する分散型の運用を考える.

3.1.2 単純に分散化した最適化問題

(3.1) 式のユーティリティーが解くべき最適化問題を単純に分散化し, 各 PCS が解くとすると以下の式のようになる.

$$\min_{P_i^{\mathrm{r3}}} \quad w_i(P_i^{\mathrm{r3}})^2 \tag{3.2a}$$

$$\text{subject to} \quad -P_i^{\mathrm{lim}} \leq P_i^{\mathrm{r3}} \leq P_i^{\mathrm{lim}} \tag{3.2b}$$

(3.2) 式の最適化問題の解を $(P_i^{\mathrm{r3}})^{\#}$ であらわす. (3.2) 式は各 PCS が自身の出力目標値を最適化することを意味しており, 全体としての最適化となっていない. また, (3.1c) 式での等式制約による全体としての出力値を三次調整力指令値に合わせていたことができないため, $(P_i^{\mathrm{r3}})^{\#}$ が $(P_i^{\mathrm{r3}})^*$ と一致することは期待できない.

3.1.3 価格提示による分散最適化

そこで, ユーティリティーが各 PCS に対して付加的な価格信号 p_i を提示し, 各 PCS は提示された価格を考慮した自身の出力目標値の最適化問題を解くことでその最適解が $(P_i^{\mathrm{r3}})^*$ と一致するように誘導することを考える. 各 PCS が新たに解くユーティリティーから提示される価格 p_i を含む 1 次項を追加した最適化問題は

$$\min_{P_i^{\mathrm{r3}}} \quad w_i(P_i^{\mathrm{r3}})^2 + p_i P_i^{\mathrm{r3}} \tag{3.3a}$$

$$\text{subject to} \quad -P_i^{\mathrm{lim}} \leq P_i^{\mathrm{r3}} \leq P_i^{\mathrm{lim}} \tag{3.3b}$$

となり, この最適化問題を解くことで各 PCS は自身の出力目標値を決定する. (3.3) の最適解を $(P_i^{\mathrm{r3}})^{\flat}(p_i)$ であらわす.

3.1.4 KKT 条件の比較

この分散最適化を達成するためにはユーティリティーは $(P_i^{\mathrm{r3}})^{\flat}(p_i) = (P_i^{\mathrm{r3}})^*$ となるような適切な価格信号を提示しなければならない. そこで, もとの集中最適化問題 (3.1) 式と新たな分散最適化問題 (3.3) 式の Karush-Kuhn-Tucker(KKT) 条件を比較する.

$$2w_i(P_i^{\mathrm{r3}}) + \lambda - \mu_i^1 + \mu_i^2 = 0 \tag{3.4a}$$

$$-P_i^{\mathrm{lim}} - P_i^{\mathrm{r3}} \leq 0, \quad \mu_i^1(-P_i^{\mathrm{lim}} - P_i^{\mathrm{r3}}) = 0, \quad \mu_i^1 \geq 0 \tag{3.4b}$$

$$P_i^{\mathrm{r3}} - P_i^{\mathrm{lim}} \leq 0, \quad \mu_i^2(P_i^{\mathrm{r3}} - P_i^{\mathrm{lim}}) = 0, \quad \mu_i^2 \geq 0 \tag{3.4c}$$

$$i = 1, \ldots, n$$

$$P - P^{\mathrm{I3}} = 0 \tag{3.4d}$$

$$2w_i(P_i^{\mathrm{r3}}) + p_i - \mu_i^1 + \mu_i^2 = 0 \tag{3.5a}$$

$$-P_i^{\mathrm{lim}} - P_i^{\mathrm{r3}} \leq 0, \quad \mu_i^1(-P_i^{\mathrm{lim}} - P_i^{\mathrm{r3}}) = 0, \quad \mu_i^1 \geq 0 \tag{3.5b}$$

$$P_i^{\mathrm{r}} - P_i^{\mathrm{lim}} \leq 0, \quad \mu_i^2(P_i^{\mathrm{r3}} - P_i^{\mathrm{lim}}) = 0, \quad \mu_i^2 \geq 0 \tag{3.5c}$$

(3.4) 式が (3.1) 式の KKT 条件であり, (3.5) 式が (3.3) 式の KKT 条件である. ここで, μ_i^1, μ_i^2 は不等式制約 (3.1b) 式及び (3.3b) 式における Lagrange 乗数であり, λ は等式制約 (3.1c) 式における Lagrange 乗数である.

2 つの KKT 条件の比較より,

$$p_i = \lambda \tag{3.6}$$

として価格提示をすることで $(P_i^{\mathrm{r3}})^\flat(p_i) = (P_i^{\mathrm{r3}})^*$ を達成することができることがわかる.

3.1.5 実時間価格更新則

本節ではユーティリティーが適切な価格 $p_i = \lambda$ を提示するために λ の実時間更新則を導出する. まず, 集中最適化問題 (3.1) 式の双対問題を考える. 不等式制約 (3.1b) 式を $h_i(P_i^{\mathrm{r3}})$ であらわすと,

$$\max_{\lambda} \min_{\substack{P_i^{\mathrm{r3}} \\ h_i(P_i^{\mathrm{r3}}) \\ i=1,\ldots,n}} \sum_{i=1}^{n} w_i \left(P_i^{\mathrm{r3}}\right)^2 + \lambda \left(P - P^{\mathrm{I3}}\right) \tag{3.7}$$

ここで最適解 $(P_i^{\mathrm{r3}})^\flat$ は各 PCS によって決定されるとすると

$$\max_{\lambda} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i \left((P_i^{\mathrm{r3}})^\flat\right)^2 + \lambda \left(P - P^{\mathrm{I3}}\right) \tag{3.8}$$

となり, λ に対する最大化問題となる. この最大化問題に勾配法を適用することで λ の実時間更新則

$$\dot{\lambda}(t) = \epsilon(P(t) - P^{\mathrm{I3}}(t)), \quad \epsilon > 0 \tag{3.9}$$

を得ることができる. なお, $\epsilon > 0$ は本論文で構成したフィードバック制御系の帯域幅を決定するパラメータであり, 適切な値を設定することで定常状態での $P = P^{\mathrm{I3}}$ が達成できる.

この更新則に従いユーティリティーが価格信号を提示し, 各 PCS が (3.3) を解き自身の出力目標値を決定することで $(P_i^{\mathrm{r3}})^\flat(p_i) = (P_i^{\mathrm{r3}})^*$ となる.

3.1.6 離散時間実装

前節までで説明した制御系を実装に伴いサンプリング時間 t_s の離散時間系で表現すると各 PCS が解く分散最適化問題, ユーティリティーが行う価格更新式はそれぞれ (3.10), (3.11) となる.

$$\min_{P_i^{\mathrm{r3}}[k]} \quad w_i(P_i^{\mathrm{r3}}[k])^2 + p_i[k]P_i^{\mathrm{r3}}[k] \tag{3.10a}$$

$$\text{subject to} \quad -P_i^{\mathrm{lim}} \leq P_i^{\mathrm{r3}}[k] \leq P_i^{\mathrm{lim}} \tag{3.10b}$$

$$p_i[k] = \lambda[k] \tag{3.11a}$$

$$\lambda[k+1] = \lambda[k] + \epsilon\left(P[k] - P^{\mathrm{I3}}[k]\right) \tag{3.11b}$$

三次調整力モードでは (3.10) 式, (3.11) 式に従って三次調整力に対応する．全体としては Fig. 3.1 に示すフィードバック制御系となり, ユーティリティーはステーションの出力 $P[k]$ と三次調整力指令値 $P^{\mathrm{I3}}[k]$ から (3.11) 式で価格信号 $p_i[k]$ を更新, 各 PCS へ送信する．各 PCS は送信された価格 $p_i[k]$ を考慮して (3.10) 式に従い, 自身の出力目標値を決定, 出力する．この制御系により分散的に三次調整力に対応する．

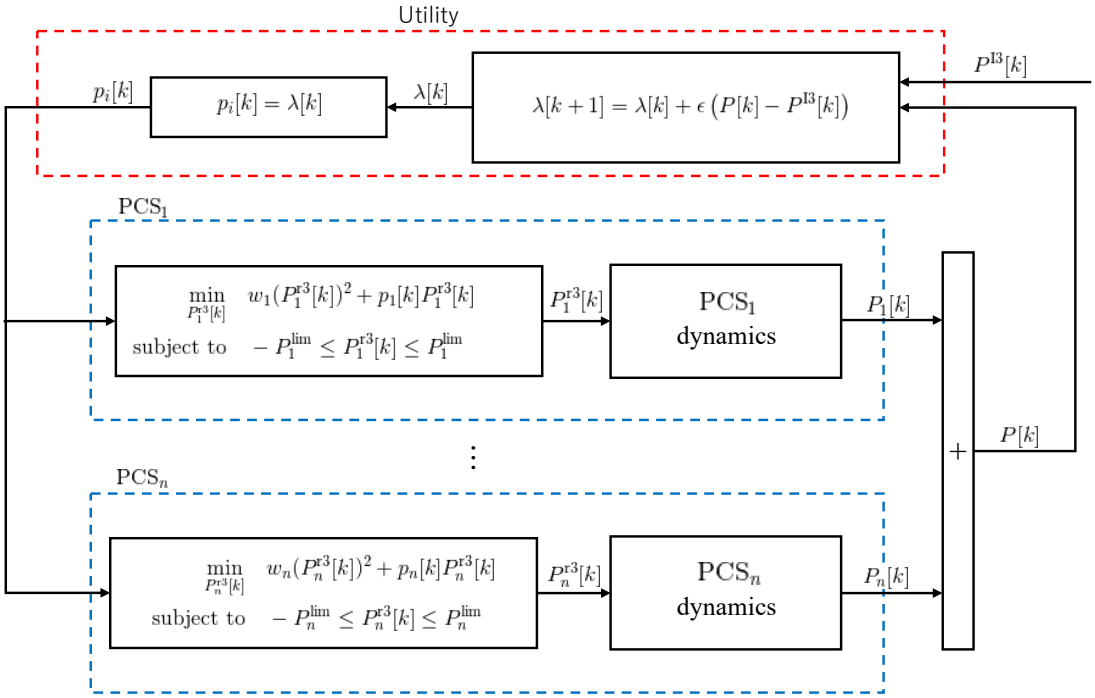


Fig. 3.1: Closed-loop system

また, 三次調整力モード中は一次調整力を無視するため, 一次調整力用の出力目標値 $P_i^{\mathrm{r1}}[k]$ は以下の式となる．

$$P_i^{\mathrm{r1}}[k] = 0 \tag{3.12}$$

3.2 一次調整力モード

一次調整力モードでは, 数秒スケールでの周波数変動に対応した出力調整をすることが目的となる．本論文では電力需給調整市場の規定 [6] に従い, 各 PCS が各自で周波数変動を観測し, 自身の出力目標値を決定することを想定している．

一次調整力モードで対応する基準周波数との偏差に対する各 PCS の一次調整力用の出力目標値

$P_i^{\mathrm{r1}}[k]$ は

$$P_i^{\mathrm{r1}}[k] = -\frac{P_i^{\mathrm{lim}} \times dF[k]}{F^{\mathrm{r}} \times R} \tag{3.13}$$

に従って決定する．ここで, F^{r} [Hz] は基準周波数, dF [Hz] は基準周波数との偏差, R は速度調定率である．速度調停率とは周波数変化の割合と出力の割合を比で表したもので, (3.13) 式は $-F^{\mathrm{r}} \times R$ の周波数変動が起こった際に, P_i^{lim} [kW] の放電となるような関係となっている．(3.13) を図で表すと (Fig. 3.2) のようになる．なお実際の運用において, ±0.2 Hz の周波数変動に対して応答すること, 出力を調定率直線の ±10% 以内 (Fig. 3.2 中の赤紫色の範囲) とすること, 調定率 R は 0.05 (5%) 以下に設定することが求められる．

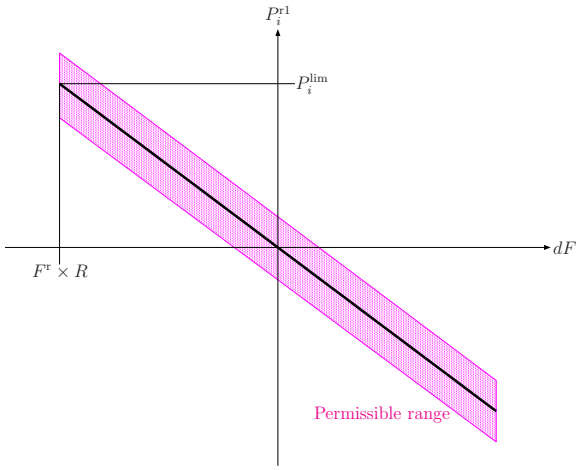


Fig. 3.2: Speed-rate of each PCS

また, 一次調整力モード中は時間スケールの短い周波数変動に対応するため, ユーティリティーは価格更新を行わない．よって価格の更新則は以下のようになる．

$$p_i[k] = \lambda[k] \tag{3.14a}$$

$$\lambda[k+1] = \lambda[k] \tag{3.14b}$$

3.3 モード切り換えのアルゴリズム

本論文では時間スケールが長い三次調整力には 3.1 節の三次調整力モードで対応し, 時間スケールの短い一次調整力には 3.2 節の一次調整力モードで対応することを考えている．つまり, 蓄電ステーション全体としての出力 $P[k]$ が三次調整力指令値 $P^{\mathrm{I3}}[k]$ に追従するまでは三次調整力モードとして動作させ, 追従したのち一次調整力モードとなり周波数変動に対応, その後また三次調整力指令値 $P_i^{\mathrm{r3}}[k]$ が変化すると三次調整力モードになり, 三次調整力に対応する．という制御が理想となる．その制御実現のために本論文では, Algorithm 1 によりユーティリティー側でのモード切り換えを行う．モードの切り換えの信号は価格信号と同様に各 PCS に送信され, その信号により各 PCS もモードを

切り換える．蓄電ステーション全体としての出力 $P[k]$ が三次調整力指令値 $P^{\mathrm{I3}}[k]$ に追従したと判断する許容誤差を δ, モードの変数を $m[k]$ とし, $m[k]=3$ は三次調整力モードを, $m[k]=1$ は一次調整力モードを表している．

Algorithm 1 mode decision

```
if m[k] = 3 then
    if |P[k] − P^I3[k]| < δ then
        m[k+1] = 1
    else
        m[k+1] = 3
    end if
else
    if P^I3[k] ≠ P^I3[k−1] then
        m[k+1] = 3
    else
        m[k+1] = 1
    end if
end if
```

また, 三次調整力モードでは (3.11) 式, 一次調整力モードでは (3.14) 式によって価格を更新する．そのため制御系全体としての価格更新の式は

$$p_i[k] = \lambda[k] \tag{3.15a}$$

$$\lambda[k+1] = \lambda[k] + \Delta\lambda[k] \tag{3.15b}$$

$$\Delta\lambda[k] = \begin{cases} 0 & \text{if } m[k]=1 \\ \epsilon\left(P[k] - P^{\mathrm{I3}}[k]\right) & \text{if } m[k]=3 \end{cases} \tag{3.15c}$$

となる．以上より, 一次および三次調整力モードの切り換えを考慮したフィードバック制御系を Fig 3.3 に示す．

ユーティリティーはシステム全体での出力 $P[k]$ を観測, 三次調整力指令値 $P^{\mathrm{I3}}[k]$ と比較し, モード $m[k]$ の決定と価格の更新, 各 PCS への信号の送信をおこなう．各 PCS は受信したモード $m[k]$ と価格 $p_i[k]$ を元に自身の出力目標値 P_i^{r} を計算し, 出力する．このフィードバック制御系により, 本論文で提案する．短い時間スケールの一次調整力と長い時間スケールの三次調整力の複合約定を可能とする分散型の制御が可能となる．

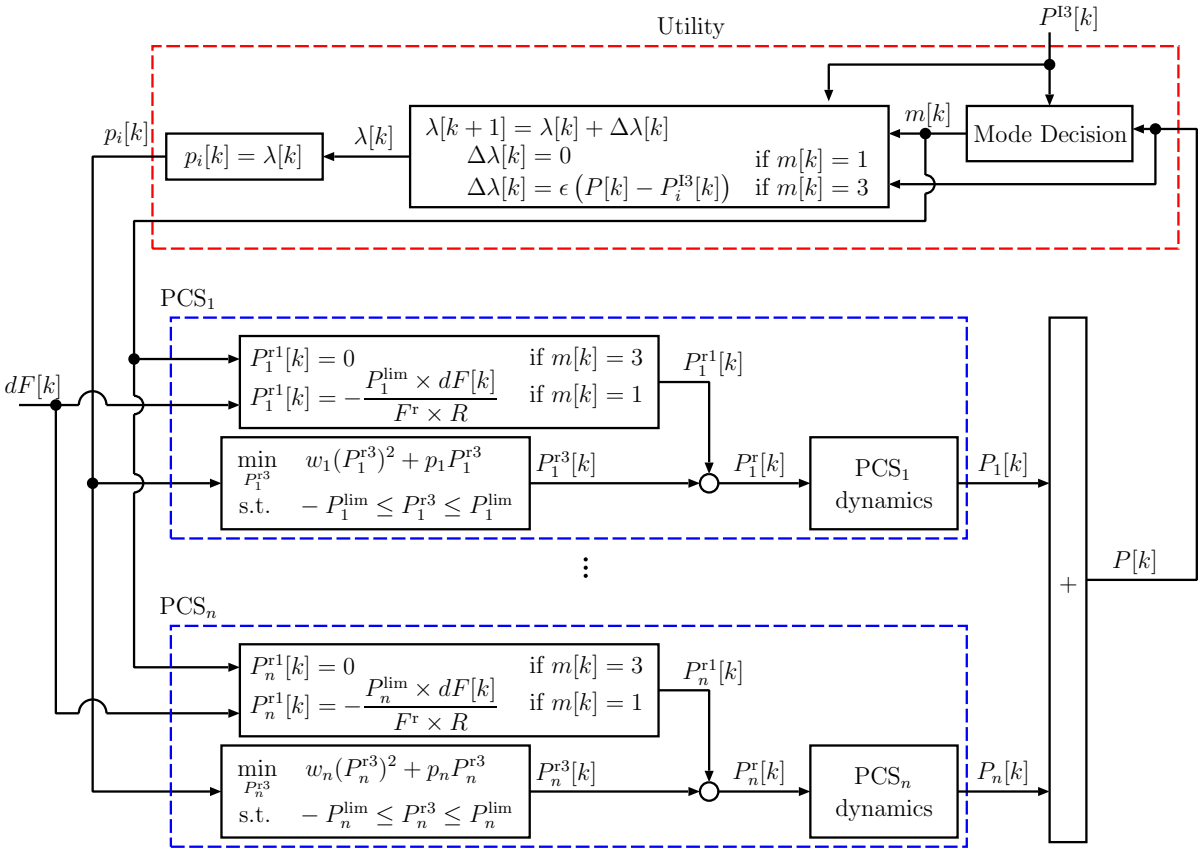


Fig. 3.3: Closed-loop system for the composite contract of Frequency Containment and Replacement Reserve.

第 4 章

実機実験よる有効性検証

本章では 3 章で示した制御系において一次調整力と三次調整力のどちらにも対応する電力調整が達成可能であることを実機を用いた実験において検証する.

4.1 実験環境

本実験では, 2 つの蓄電池用 PCS から構成される蓄電ステーションを想定し, 実験を行う. その構成を Fig 4.1 に示す.

実験環境の主な構成要素は, 蓄電池用 PCS, PCS が連系した系統を模擬するための交流電源, PCS に接続された蓄電池を模擬するための直流電源, 実験用 Simulink モデルを動作させる試験用 PC である.

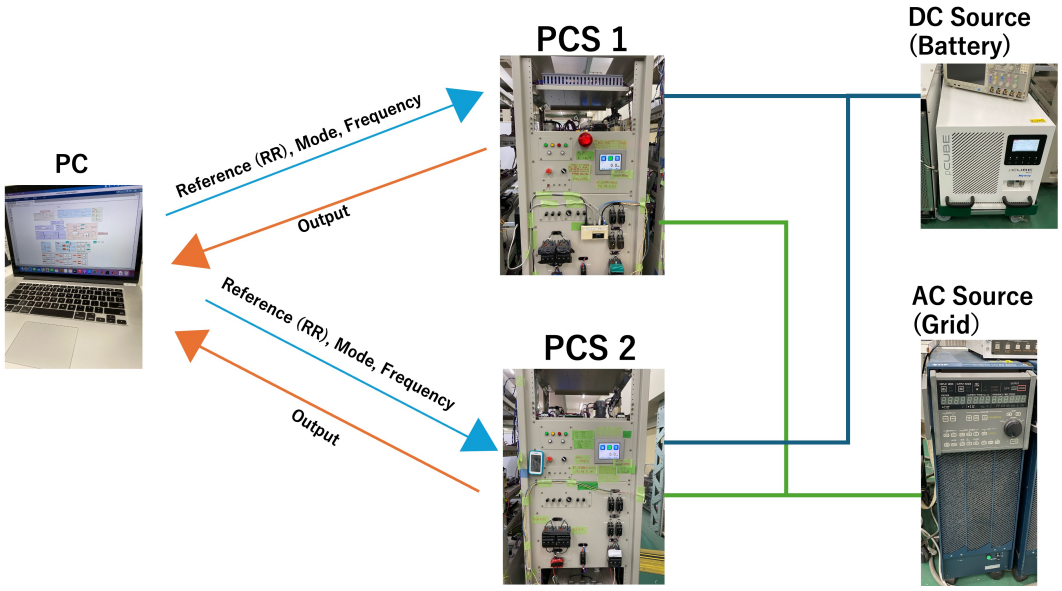


Fig. 4.1: Environment of Experiment

試験用 PC 内の Simulink モデルでは各 PCS の出力 $P_i[k]$ を TCP/IP 通信を使用し取得し, モードの切り換えと価格 $p_i[k]$ の更新をおこなう. このようなユーティリティーの働きを担うことに加えて今回の実験環境では環境構築の簡略化のために下記も試験用 PC にて実行する.

- PCS の三次調整力目標値 $P_i^{\mathrm{r3}}[k]$ の計算 (ただし, Simulink 上にて分散計算)
- 周波数偏差 $dF[k]$ の模擬信号の作成

そして, 周波数偏差 $dF[k]$, モード $m[k]$, 三次調整力目標値 $P_i^{\mathrm{r3}}[k]$ を各 PCS へ TCP/IP 通信により送信する. TCP/IP 通信の通信部も試験用 PC の Simulink モデル内に実装している.

各 PCS 上では試験用 PC から受信した周波数変動から一次調整力目標値 $P_i^{\mathrm{r1}}[k]$ を計算し, 受信した三次調整力目標値 $P_i^{\mathrm{r3}}[k]$ と足し合わせて最終的な各 PCS の出力目標値 $P_i^{\mathrm{r}}[k]$ を決定, 実際に電力を出力する. 本実験で各 PCS は, 定格容量 250[kW] の機体と同一の制御回路と同等の変換特性を有した電気回路により構成された, 1[kW] のスケールダウンモデルを使用する.

4.2 実験パラメータ

実験用 PC と各 PCS の通信に関するサンプリング時間は 0.5[s] とし, フィードバック制御系のサンプリング時間 t_s を 1[s] として実験を行う. ユーティリティーの各パラメータを Table 4.1, 各 PCS のパラメータを Table 4.2 に示す. Table 4.2 に示すように 2 台の PCS は重みの違う 2 台を想定している.

Table 4.1: Parameters of Utility

ϵ	δ
0.35	2.5 [kW]

Table 4.2: Parameters of PCS

No.	P_i^{lim}	w_i
1	250 [kW]	6
2	250 [kW]	4

4.3 仮想の周波数偏差データを用いた実機実験

4.3.1 用意した周波数偏差データ

実験において用意した仮想の周波数偏差はステップ状, ランプ状に 0[Hz] から増加するものと減少するもの, 2[s] 間隔ごとに変動するランダムノイズ, 1[s] 間隔ごとに変動するランダムノイズの 6 種類である. それぞれ Fig. 4.2, Fig. 4.3, Fig. 4.4, Fig. 4.5, Fig. 4.6, Fig. 4.7 に示す. これらの周波数変差に一次調整力として対応する.

また, 三次調整力指令値は全ての場合で $P^{\mathrm{I3}} = \begin{cases} 0\ [kW] & 0[s] \leq t < 50\ [s] \\ 200\ [kW] & 50[s] \leq t < 200\ [s] \\ 300\ [kW] & 200[s] \leq t < 400\ [s] \end{cases}$

としている.

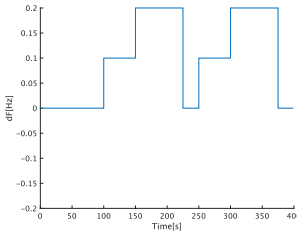


Fig. 4.2: step(inc)

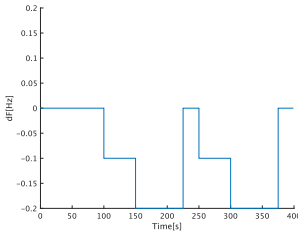


Fig. 4.3: step(dec)

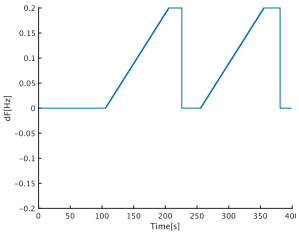


Fig. 4.4: lamp(inc)

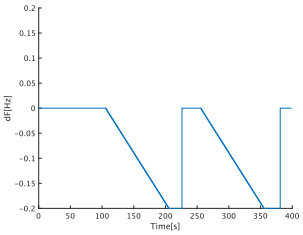


Fig. 4.5: lamp(dec)

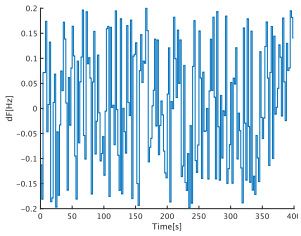


Fig. 4.6: noise(2s)

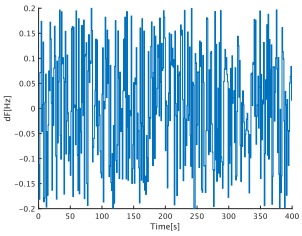


Fig. 4.7: noise(1s)

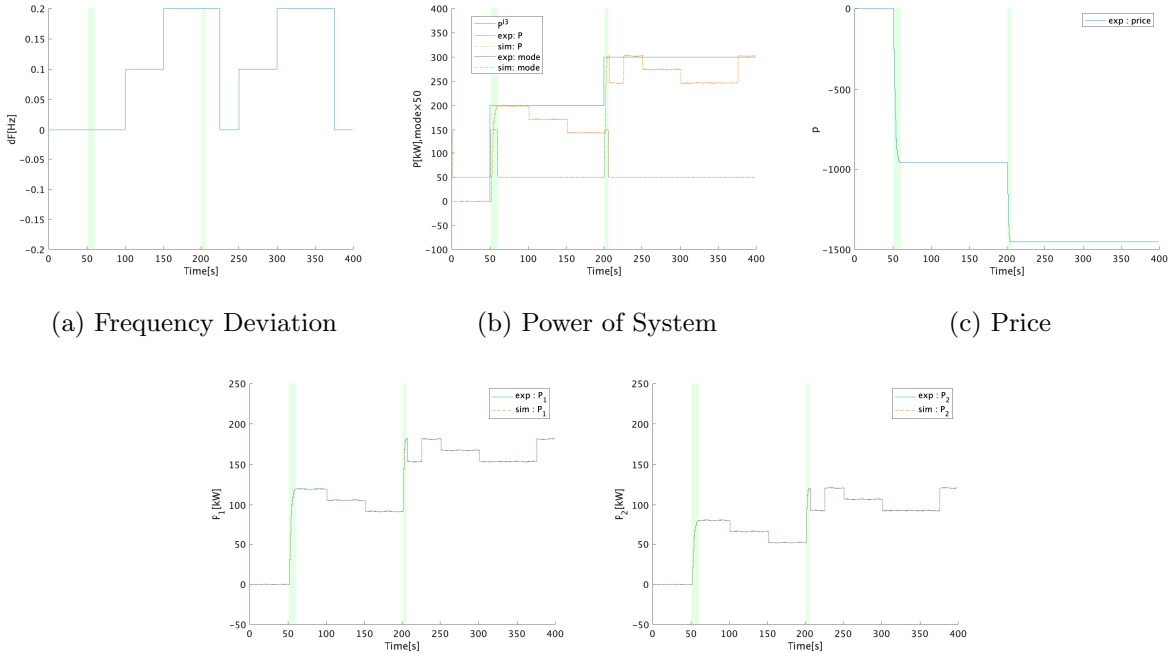
4.3.2 実機実験結果

Fig. 4.8 にステップ状 (増加), Fig. 4.9 にステップ状 (減少), Fig. 4.10 にランプ状 (増加), Fig. 4.11 にランプ状 (減少), Fig. 4.12 に 2[s] 間隔のランダムノイズ, Fig. 4.13 に 1[s] 間隔のランダムノイズの周波数偏差を与えた場合の実機実験結果を示す.

Fig. 4.8(a) に周波数偏差を示す. Fig. 4.8(b) にはシステム全体での三次調整力指令値 $P^{\mathrm{I3}}[k]$, 全体での出力 $P[k]$, モード $m[k]$ を示している. ただし, モード $m[k]$ はモードの変化を明確にするため値を 50 倍している. Fig. 4.8(c) はユーティリティーから送信される価格 $p_i[k]$, Fig. 4.8(d), Fig. 4.8(e) に各 PCS の出力 $P_1[k]$, $P_2[k]$ をそれぞれ示す. また, 実験結果を実線, シミュレーション結果を破線で示す. なお, 各グラフ中において背景が薄緑色の区間は, 三次調整力モード $m[k] = 3$ で動作していることを示している. 一方, 背景が薄緑色ではない区間は一次調整力モード $m[k] = 1$ で動作している. Fig. 4.10, Fig. 4.12, Fig. 4.13 も同様である.

Fig. 4.8(a), Fig. 4.8(b), Fig. 4.8(c) より, 三次調整力指令値 $P^{\mathrm{I3}}[k]$ の変化に伴い三次調整力モードとなり, 価格 $p_i[k]$ の変化によって全体での出力 $P[k]$ が定常状態で $P^{\mathrm{I3}}[k]$ に追従するように変化していることがわかる. その後, 追従すると一次調整力モードに戻り, 周波数偏差が与えられると偏差

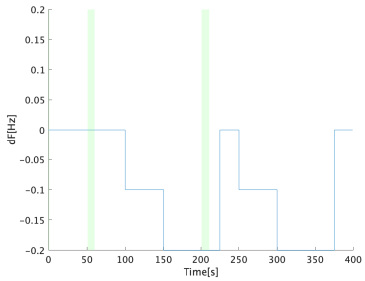
に応じた出力調整をおこなっていることがわかる．さらに $P^{\mathrm{I3}}[k]$ がまた変化するとその区間では三次調整力モードに切り換わり, 周波数偏差を無視し, $P^{\mathrm{I3}}[k]$ に $P[k]$ が追従するように変化する．追従したのちに周波数偏差による出力調整が再び行われていることがわかる．また, 全てのグラフにおいて, シミュレーション結果とほぼ同一の値になっているということも確認できる．これらの結果は他の周波数偏差を与えた場合の Fig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12, Fig. 4.13 においても同様の結果を得られている．



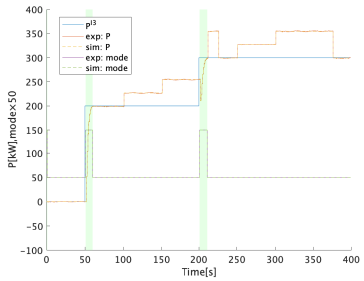
(a) Frequency Deviation (b) Power of System (c) Price

(d) Power of PCS_1 (e) Power of PCS_2

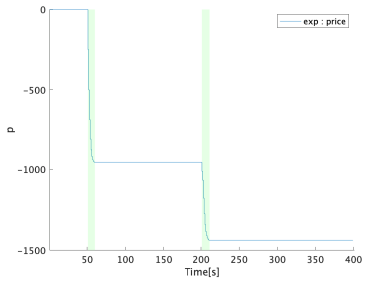
Fig. 4.8: Experimental result: Step change(inc)



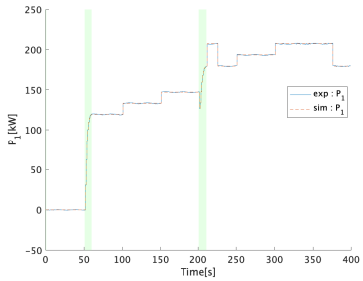
(a) Frequency Deviation



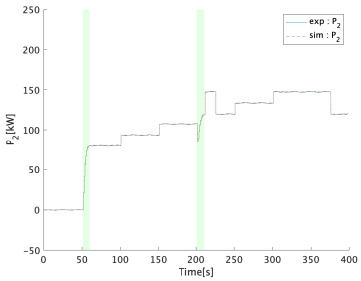
(b) Power of System



(c) Price

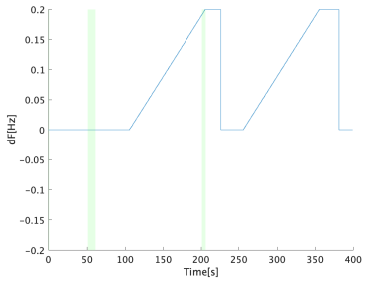


(d) Power of PCS_1

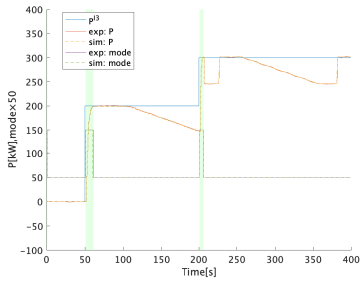


(e) Power of PCS_2

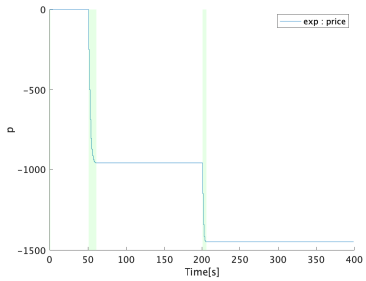
Fig. 4.9: Experimental result: Step change(dec)



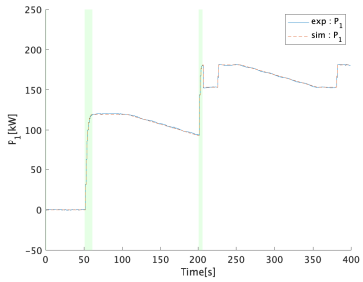
(a) Frequency Deviation



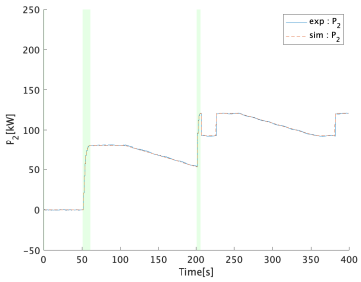
(b) Power of System



(c) Price

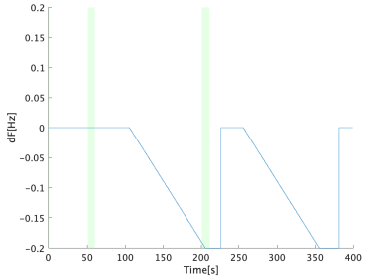


(d) Power of PCS_1

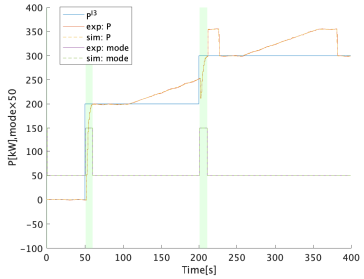


(e) Power of PCS_2

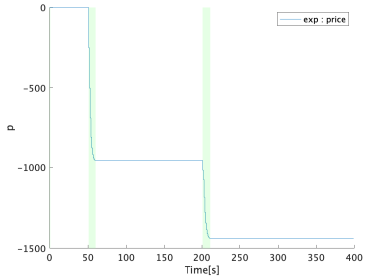
Fig. 4.10: Experimental result: Lamp change(inc)



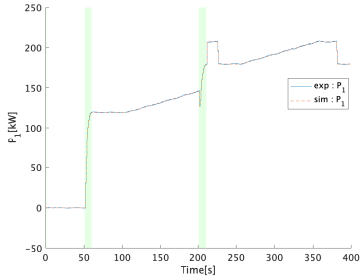
(a) Frequency Deviation



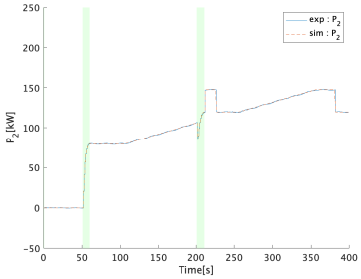
(b) Power of System



(c) Price

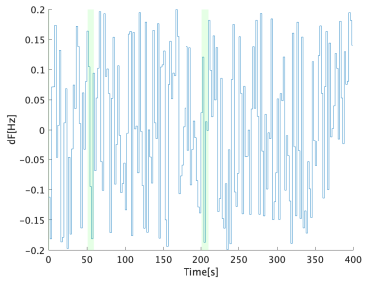


(d) Power of PCS_1

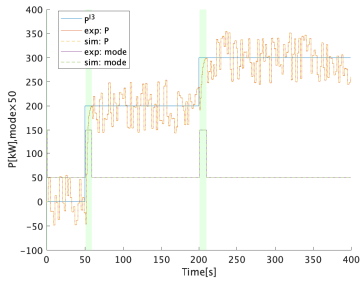


(e) Power of PCS_2

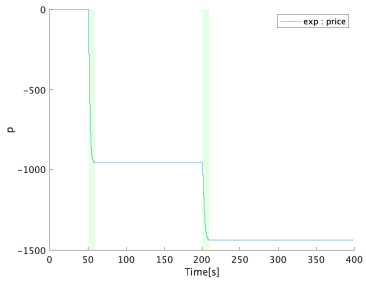
Fig. 4.11: Experimental result: Lamp change(dec)



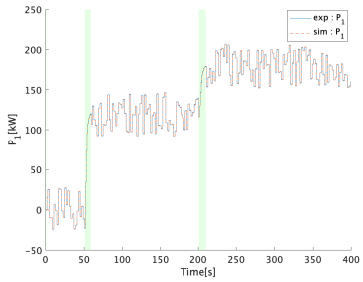
(a) Frequency Deviation



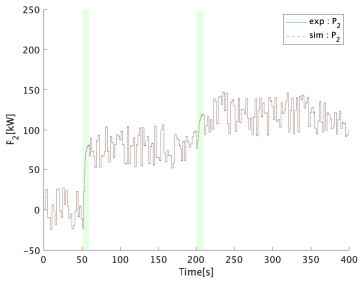
(b) Power of System



(c) Price

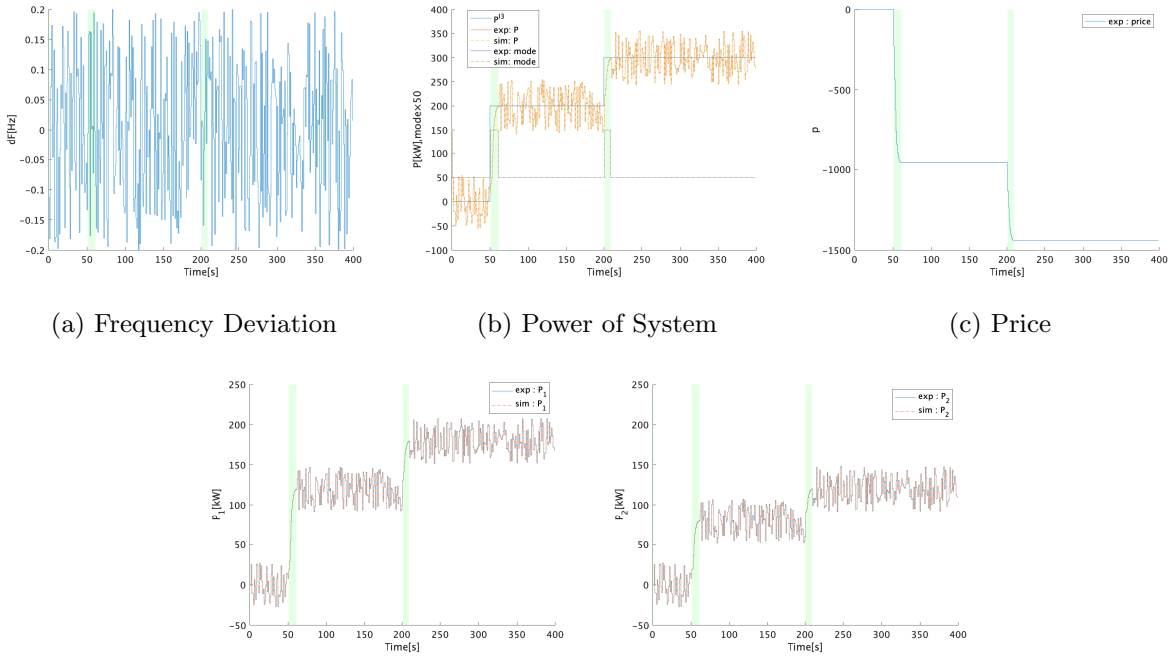


(d) Power of PCS_1



(e) Power of PCS_2

Fig. 4.12: Experimental result: Noise(2s)



(a) Frequency Deviation (b) Power of System (c) Price

(d) Power of PCS_1 (e) Power of PCS_2

Fig. 4.13: Experimental result: Noise(1s)

4.4 実際の周波数偏差データを用いた実機実験

4.4.1 平成 30 年北海道胆振東部地震時の周波数データ

前節の実験では仮想の周波数偏差を与え, 一次調整力で対応してきた. 本節では電力広域的運営推進機関 (OCCTO) のホームページで公開されている北海道胆振東部地震時の実際の周波数変動データ [7] から周波数偏差を取得し, その周波数偏差にも一次調整力で対応できるかを検証する. 公開されている平成 30 年度北海道胆振東部地震時の午前 3 時 5 分から 3 時 30 分までの 20[ms] サンプリングの周波数変動データを Fig. 4.14 に示す. 実験設備の一次調整力での出力の上下限の関係により対応できる周波数偏差は ±0.2[Hz] であるが地震時の周波数偏差は最大で-5[Hz] 程度と非常に大きい. そこで実験に使用する区間は周波数偏差が ±0.2[Hz] を超えない 3:18:00 から 3:20:30 までの 150 秒間 (Fig. 4.14 内で薄緑色の区間) と周波数偏差が ±0.8[Hz] 内に収まっている 3:10:00 から 3:20:00 の 600 秒間 (Fig. 4.14 内で薄青色の区間) の周波数偏差を 0.25 倍してスケーリングしたもので実験をおこなう.

また, 実験設備の通信のサンプル時間が 0.5[s] であるため 20[ms] サンプルの周波数偏差に対応することは難しいそのため実験に使用する区間で 1[s](50 データ) ごとに間引きした. また, それぞれの区間で各時間の前データ 50 個の平均をとり, その後 1[s] ごとに間引きしたデータも用意し, 計 4 種類の実験をおこなう. それぞれの周波数偏差を Fig. 4.15, Fig. 4.16, Fig. 4.17, Fig. 4.18, に示す. な

お, 周波数偏差データは前節までの実験と異なり 2 実験づつ 150 秒間, 600 秒間であるため三次調整力指令値は各実験に合わせてそれぞれ

$$P^{\mathrm{I3}} = \begin{cases} 0\ [kW] & 0[s] \leq t < 50\ [s] \\ 200\ [kW] & 50[s] \leq t < 100\ [s] \\ 300\ [kW] & 100[s] \leq t < 150\ [s] \end{cases}, \begin{cases} 0\ [kW] & 0[s] \leq t < 100\ [s] \\ 200\ [kW] & 100[s] \leq t < 400\ [s] \\ 300\ [kW] & 400[s] \leq t < 600\ [s] \end{cases}$$

とした.

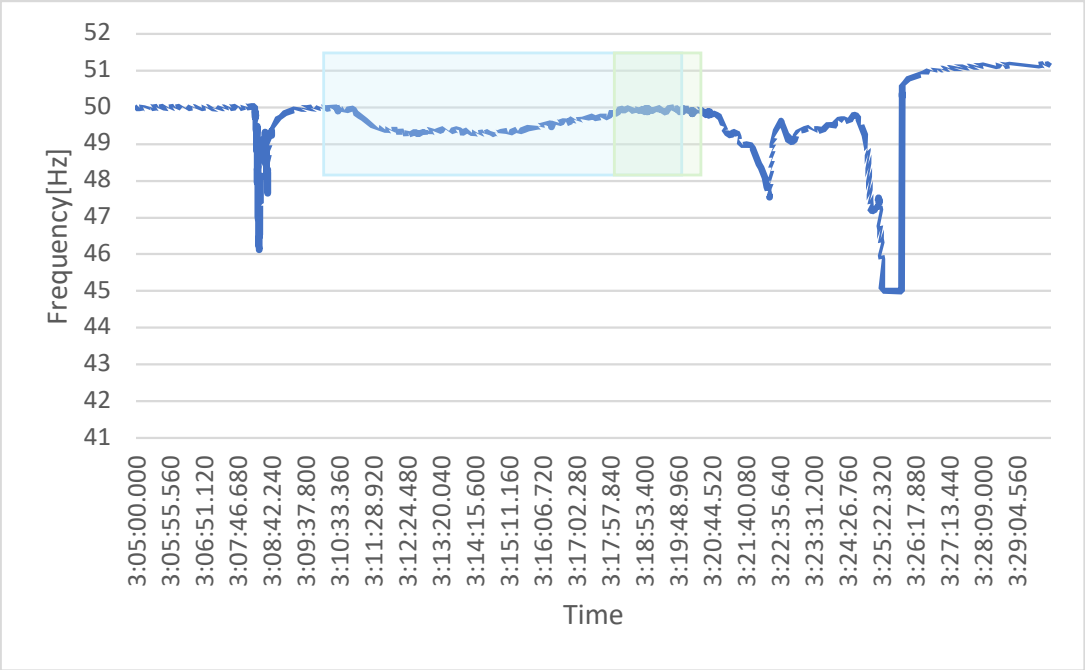


Fig. 4.14: 平成 30 年北海道胆振東部地震時の周波数データ

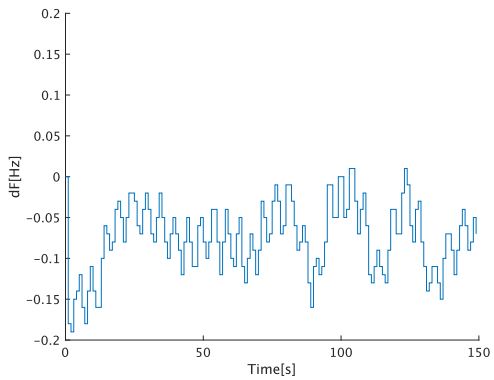


Fig. 4.15: 3:18:00∼3:20:30

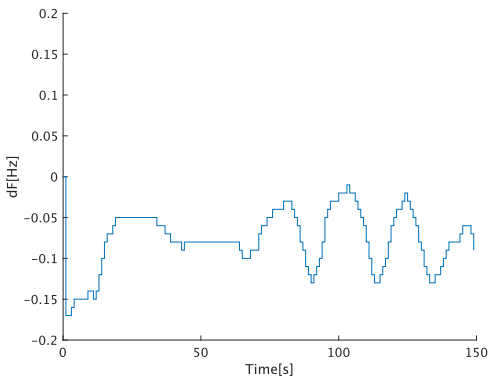


Fig. 4.16: 3:18:00∼3:20:30(平均化)

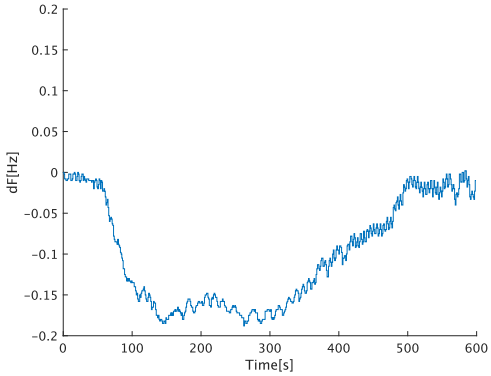


Fig. 4.17: 3:10∼3:20: scale-down

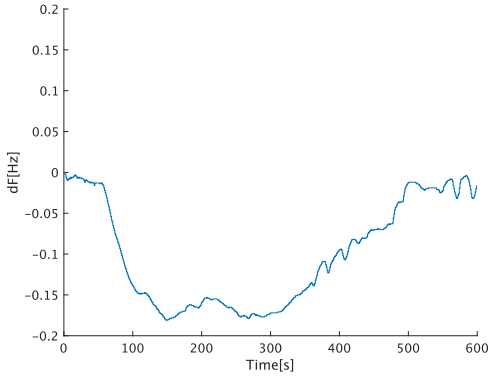


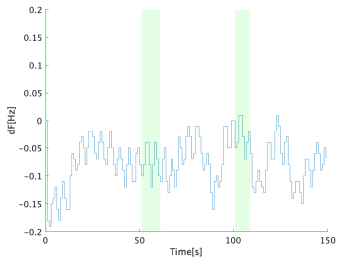
Fig. 4.18: 3:10∼3:20: scale-down(平均化)

4.4.2 実機実験結果

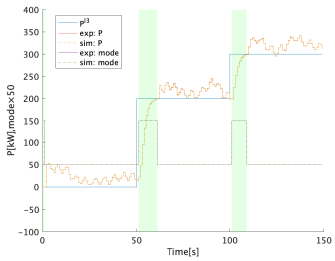
Fig. 4.19 に 3:18:00 から 3:20:30 の 150 秒間の周波数偏差を 1[s] ごとに間引きしたもの, Fig. 4.20 に同じ 150 秒間の周波数偏差を各時間で前データ 50 での平均を取り 1[s] ごとに間引きしたもの, Fig. 4.21 に 3:10 から 3:20 の 600 秒間の周波数偏差を 1[s] ごとに間引きしたもの, Fig. 4.22 に同じ 600 秒間の周波数偏差を各時間で前データ 50 個での平均を取り 1[s] ごとに間引きしたものを周波数偏差として与えた場合の実機実験結果を示す. 示している実験結果の内容は仮想の周波数偏差を用いた場合と同じである.

全ての結果で仮想の周波数偏差を用いた場合の結果と同じように三次調整力指令値が変動するまでは一次調整力モードで周波数偏差に応じた出力調整をおこない, 三次調整力指令値が変動すると三次調整力モードに切り換わり, 周波数偏差を無視し出力が指令値に追従するようにする. 追従次第一次調整力モードに戻り, また周波数変動に応じた出力調整をおこなっていることがわかる.

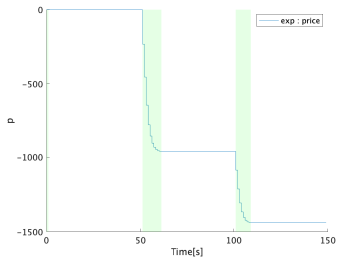
以上の結果から提案方策により各モードが適切に切り換わりながら三次調整力, 一次調整力の双方に対応できていることがわかる.



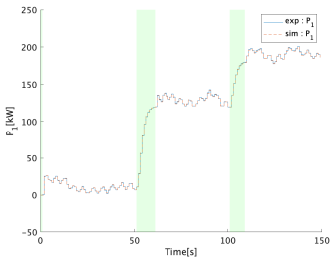
(a) Frequency Deviation



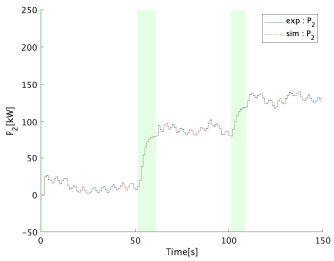
(b) Power of System



(c) Price

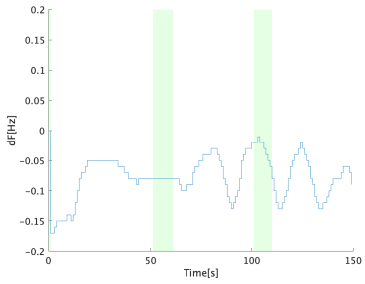


(d) Power of PCS_1

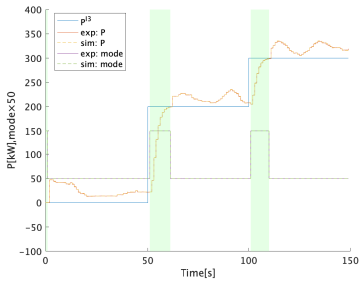


(e) Power of PCS_2

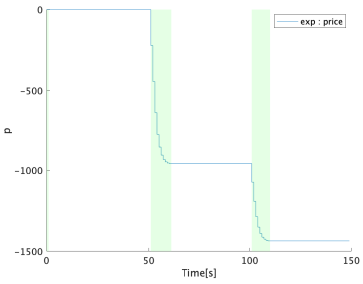
Fig. 4.19: Experimental result: 3:18:00∼3:20:30



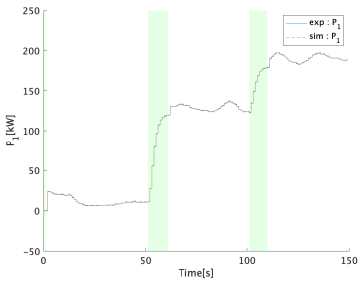
(a) Frequency Deviation



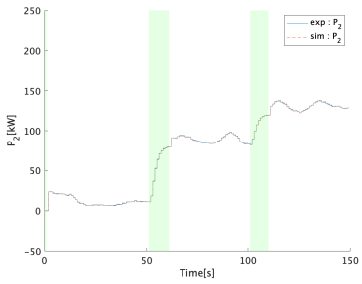
(b) Power of System



(c) Price

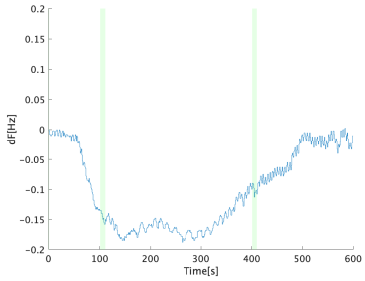


(d) Power of PCS_1

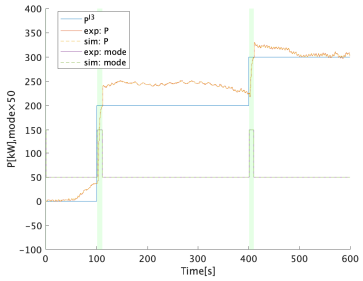


(e) Power of PCS_2

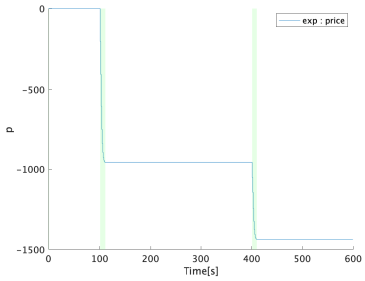
Fig. 4.20: Experimental result: 3:18:00∼3:20:30 (平均化)



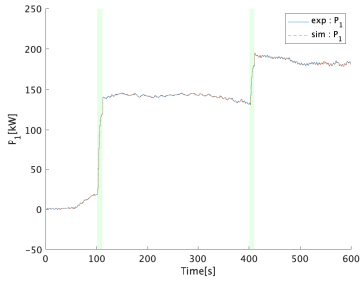
(a) Frequency Deviation



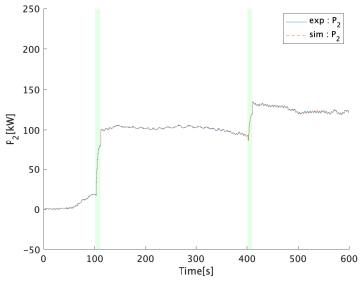
(b) Power of System



(c) Price

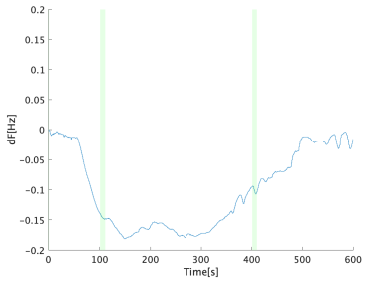


(d) Power of PCS_1

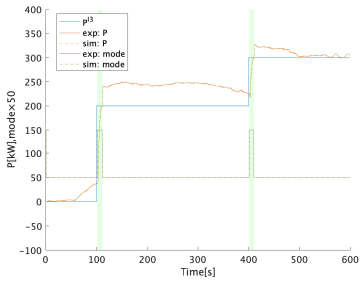


(e) Power of PCS_2

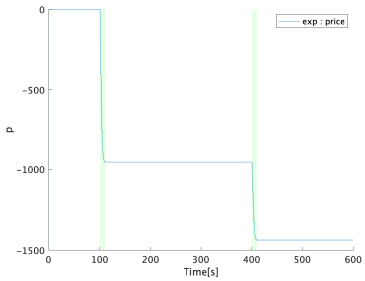
Fig. 4.21: Experimental result: 3:10∼3:20 scale-down



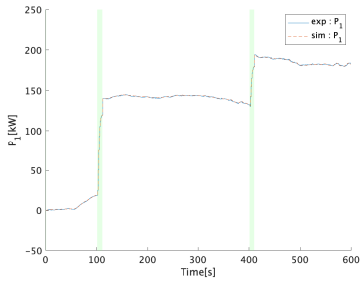
(a) Frequency Deviation



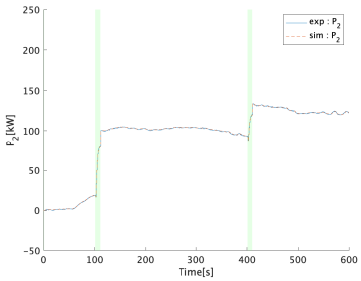
(b) Power of System



(c) Price



(d) Power of PCS_1



(e) Power of PCS_2

Fig. 4.22: Experimental result: 3:10∼3:20 scale-down(平均化)

第 5 章

結論

本論文では, 複数の蓄電池と PCS で構成される蓄電ステーションにおいて, 一次調整力および三次調整力の複合約定を達成できる分散制御方策について検討した. その中で, 早い応答が求められる一次調整力には速度調停率によって出力を決定するモードで対応し, 時間スケールの長い三次調整力には価格提示による分散最適化制御によって全体としての損失が少ない出力の決定をおこなうモードで対応し, それらのモードを自動的かつ適切に切り換えることで複合約定を達成する方策を提案した. また, 提案した方策の有効性について様々な一次調整力で対応する周波数変動のパターンを用意し, MATLAB/Simulink を用いたシミュレーション, スケールダウンモデルの実機器を用いたで実験の結果を比較し検証した. そしてどの実験でもシミュレーションと実機実験の結果はほぼ一致し, 三次調整力モードと一次調整力モードが適切に切り換わり出力調整をおこなっていることが確認できた. そのため提案した方策で三次調整力と一次調整力の複合約定が可能であることを確認した.

今後の展望としては, 実際の運用を考えた各蓄電池の SOC(State of Chage), 劣化などを考慮した運用を組み込むことなどが挙げられる.

謝辞

大学での研究生活において，温かいご指導を賜りました, 富山大学 平田 研二 先生に心より感謝の意を表します.

また, 本研究を進めるにあたり, 多くの手助けをしていただきました, 富山県立大学 阿久津 彗 先生に心より感謝いたします.

本研究におきまして実験のご協力や有益な情報のご提供をいただきました, 株式会社ダイヘン 大堀 彰大 様，北村 高嗣 様に深く感謝いたします.

そして，日頃から様々な面でご協力いただきました, 富山大学 Tam W. Nguyen 先生, 研究室の先輩方, 学友の皆様に心から感謝いたします.

最後に，これまでの学生生活を支え，いつも暖かく見守っていただいた父母や親族をはじめとする多くの皆様に，心より感謝いたします.

2025 年 3 月

参考文献

[1] 一般社団法人 電力需給調整力取引所: 需給調整市場の概要・商品要件, https://www.eprx.or.jp/outline/docs/gaiyoushouhin_ver.4_20240401.pdf

[2] 天野: 電力系統における需給調整・制御の概要, 計測と制御, **63**-1, 9/13 (2024)

[3] 田村: 電力系統の定置用蓄電池の役割が期待される EV, 電気学会論文誌 B, **144**-3, 208/211 (2024)

[4] 岡田ほか: 容量市場・スポット市場・需給調整市場を考慮した発電事業者の電源開発計画の評価手法, 電気学会論文誌 B, **145**-1, 32/45 (2025)

[5] 阿久津ほか: 発電・蓄電・需要機器を有する拠点群により構成される仮想発電所の階層分散型運用と実験検証, システム制御情報学会論文誌, **37**-9, 247/256 (2024)

[6] 一般社団法人 電力需給調整力取引所: 取引ガイド (全商品) (第 6 版) https://www.eprx.or.jp/outline/docs/guide_250314.pdf

[7] 電力広域的運営推進機関: 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会最終報告 https://www.occto.or.jp/iinkai/hokkaido_kensho/hokkaidokensho_saishuhoukoku.html