

博士学位論文

自然変動電源統合型電力システムの実現を目的とした
電力貯蔵装置による周波数安定化能力向上制御
に関する研究

平成 29 年 2 月 17 日

東北大学大学院工学研究科

電気エネルギーシステム専攻

斎藤(浩)・飯岡研究室

B4TD2101 織原大

Improving Frequency Control Performance by Energy Storage Utilization for Integration of Intermittent Renewable Energy Sources to Power Systems

ABSTRACT: In recent years, the introduction of Renewable Energy Sources (RES) such as PhotoVoltaic power generation (PV) and Wind Power generation (WP) is being promoted with the background of global environmental problems and energy problems. PV and WP are called as “Intermittency” RES (IRES) since its output fluctuates uncertainly depending on solar radiation and wind speed. In order to supply stable power to load demands, frequency of electricity is kept constant by controlling outputs of generation power plants such as thermal power plants so as to follow the load demand. The output control is called as frequency control and operated by Transmission System Operator (TSO). To keep supply-demand balance in IRES-penetrated power system, the thermal power plants need to supply power to residual load which is difference between load demand and IRES output. However, the thermal power plant cannot absorb the fluctuation of the residual load completely since the outputs of thermal power plant are delayed from the control signal and the change rate of the output is constrained for the protection of the turbine and the boiler.

One of the effective solution for the problem is battery utilization. Since the battery can response quickly to the control signal, the battery can absorb the fluctuation which cannot be responded by thermal power plant. The Filter-Based LFC (FBLFC) is a representative battery utilization method. The method makes the battery contribute to improve the performance of Load Frequency Control (LFC), which is a part of frequency control and has a role of absorbing the short-period residual load fluctuation. In this paper, short-period fluctuation means fluctuation whose fluctuating period is less than 20 minute. In the conventional method, estimated short-period residual load fluctuation is divided to the fluctuation with period of 10 minutes or less and the others. The former component is called as short (M) fluctuation, and the latter component is called as short (L) fluctuation. The short (M) fluctuation is used as a control signal for battery and the short (L) fluctuation is used for the thermal power plant. Since the battery absorb the short (M) fluctuation which is difficult to absorb for the thermal power plant, LFC performance is expected to be improved. However, the author pointed out a disadvantage of the conventional method through analysis of output characteristic of the thermal power plant. It is that the change rate constraint of the output prevents the thermal power plant from absorb a part of the short (L) fluctuation. In other words, the battery does not absorb completely the residual load fluctuation which cannot be absorbed by the thermal power plant.

Then, this paper proposed the Battery-Assisted LFC (BALFC) as a novel battery utilization method. The BALFC drives battery to absorb components of the residual load fluctuation exceeding the maximum output change rate of the thermal power plant. The BALFC does not need parameter tuning since there are not any variable parameters while the conventional method needs to adjust time constant of the filter to obtain good performance. In order to evaluate the validity of the BALFC, a time domain simulation was carried out by using the model assuming the power system in Tohoku area in Japan with high penetration of the wind power generation. As a result, it is clarified that the BALFC can reduce the

maximum value of frequency fluctuation by 6.5% and reduce the amount of charge-discharge loss by 78.5% compared with the conventional method. The result is an important achievement showing that the BALFC is highly efficient method.

In addition, eigenvalue analysis was carried out to investigate whether the introduction of the BALFC deteriorate asymptotic stability of the frequency control system. However, it is impossible to calculate eigenvalue of BALFC-applied system directly because the BALFC is based on the nonlinear component of the change rate constraint. In order to linearize the BALFC-introduced system, describing function method is applied. As a result of the eigenvalue analysis, the asymptotic stability of the system was rather improved by the introduction of the BALFC.

In order to evaluate the validity of the BALFC from another aspect, the author carried out the calculation of battery kW capacity and kWh capacity required to keep the frequency within the target range. The required capacity is calculated in 4 cases in which the amount of wind power generation is changed from 14% to 23% by 3% of the system capacity. The result shows that required kW and kWh capacity in the BALFC was small regardless of the amount of wind power generation compared with the conventional method. In order to clarify the reason why the required capacity of the battery can be reduced by using the BALFC, the result of time domain simulation is analyzed. As a result, in the conventional method, the phase delay caused by the filter deteriorates the load following capability of the thermal power plant, and so large capacity battery is needed to compensate the deterioration. This result shows the validity of the simple configuration of the BALFC which does not include the filter.

And at last, the author changed the structure of the BALFC so as to contribute to absorb long-period components of the residual load fluctuation with the period of 20 minutes or more. In the current power system, the long-period fluctuation is absorbed by Economic Dispatching Control (EDC) which is a part of frequency control. The output signal of the thermal power plant controlled by LFC and EDC is given as a summation of control signals from both controls. Since the output change rate constraint of the thermal power plant is taken into consideration separately in LFC and EDC, there is possibility that the output signal exceeds the maximum change rate of thermal power plant. Therefore, the author extended BALFC so that the battery compensates for excess component of change rate constraint included in the output signal. This expansion is based on the change rate constraint, and so it is difficult to apply to the conventional method. The result of time domain simulation for the validity evaluation shows that frequency fluctuation with the period of 20 minutes or more can be suppressed by using the extended BALFC without reducing contribution to LFC performance.

In summary, this paper proposed novel battery utilization method for maintaining frequency stability in power system integrated with large amount of the IRESs, and indicated the validity of the method in various consideration. All of achievements obtained in this research contributes to promote the introduction of the IRESs and to develop the advanced control system for the future power system in which the IRESs are main power sources.

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	10
1.3 論文の概要	12

第2章 自然変動電源統合型電力システムの実現課題

2.1 まえがき	15
2.2 電力システムの周波数安定化システム	16
2.3 周波数安定性を維持するために解決すべき課題	23
2.4 太陽光・風力発電導入時の周波数安定化方策とその課題	32
2.5 あとがき	34

第3章 最大出力変化速度を考慮した火力電源と電力貯蔵装置の協調による周波数安定性の向上

3.1 まえがき	35
3.2 バッテリーアシスト型負荷周波数制御の提案	35
3.3 提案制御の導入による周波数安定性向上効果の検証	40
3.4 記述関数法に基づく提案制御の安定性解析	56
3.5 あとがき	73

第4章 提案法による電力貯蔵装置の所要容量低減効果

4.1	まえがき	74
4.2	電力貯蔵装置の所要容量の定義および評価手法	74
4.3	自然変動電源の導入量と所要電力貯蔵装置容量の関係	77
4.4	あとがき	87

第5章 数時間周期の周波数変動抑制への貢献を目的とした提案法の機能拡張

5.1	まえがき	88
5.2	負荷の長周期変動を考慮した提案制御手法の機能拡張	89
5.3	拡張バッテリーアシスト型LFCの有効性評価	92
5.4	あとがき	104

第6章 結論

謝辞	109
----	-----

付録	110
----	-----

参考文献	114
------	-----

発表論文	121
------	-----

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 持続可能な電力システムの実現に向けた取り組み

2000年代以降の原油価格高騰および環境問題深刻化を受けて、世界のエネルギー安全保障の考え方は化石燃料の生産量増加から、再生可能エネルギーの活用、エネルギー使用量の低減へと転換してきている^[1]。再生可能エネルギーとは、太陽光、風、水、地熱といった半永久的に利用可能なエネルギーを指し、これらを積極的に活用することは、将来にわたって“持続可能な”エネルギーシステムを構築することに繋がる。化石資源の乏しい日本も当然この潮流の中にあり、電力システムにおいては太陽光発電、風力発電を中心とする再生可能エネルギー電源の導入が急速に進んでいる。2015年末時点における太陽光、風力発電の導入量はそれぞれ3,000万kW、312万kWであり^{[2][3]}、これらは日本の総発電設備容量(23,156万kW)の12.9%、1.3%に相当する。政府により設定された2030年における導入目標量は、太陽光発電で6,400万kW、風力発電で1,000万kWとなっており^[4]、将来的にこれらの再生可能エネルギー電源が火力、水力発電と並ぶ主要な電力供給源となることが期待されている。

電力システムは、国民の生活に欠かせないインフラシステムの一つであり、安定かつ低廉な電力を供給することが使命である。これは、再生可能エネルギー電源が主体となる持続可能な電力システムにおいても変わることはない。しかし現状、2011年に起きた東日本大震災をはじめとする自然災害の頻発により、電力供給の安定性への不安は高まっており、原子力発電停止の影響で電力料金は増加傾向にある^[5]。これを受けて政府は、将来に渡って経済性、安定性を確保できるようなエネルギー政策の構築を目的とした、電力システム改革^{[6][7]}を進めている。

本改革は、(1)広域系統運用の拡大、(2)電力市場の全面自由化、(3)送配電事業の法的分離による中立性確保の3本の柱からなる。

電力系統では、総需要電力と総発電電力が同量となる需給平衡の状態が維持されるように、不確実に変動する需要に電源の出力を追従させている。これは需給制御と呼ばれ、系統内の同期発電機の回転周波数を一定に保ち、安定な電力供給を行う目的で行われる。これまでは各一般電気事業者が、自身が管轄する地域内での需給平衡に責任を負ってきたが、全国大での需給制御能力を増強させることを目的に、中立機関「電力広域的運営推進機関(OCCTO : Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators)」が設置された^[8]。OCCTOは2015年4月より運用を開始しており、実際にOCCTOの指示で電力融通を行うケースも発生している^{[9][10]}。以上が(1)広域系統運用の拡大に関する改革内容である。

続いて(2)電力市場の全面自由化について述べる。電力市場は元来、一般電気事業者による独占状態であったが、競争原理の導入による電力料金の低減を目的に自由化が開始された。1995年にまず発電市場が自由化され、小売市場は2000年に特別高圧(20[kV]以上)受電の部門が自由化されると、2004年、2005年と自由化の範囲が拡大されてきた^[11]。そして、2016年4月の低圧(100[V]または200[V])受電の部門の自由化を最後に完全自由化されている。小売事業者の登録数は2016年7月末時点で318者となっており、低圧部門における一般電気事業者からの契約先切り替えの申込件数は148万件に上った^[12]。しかしこの数は、全需要家の2.4%程度であり、現段階では依然として多くの需要家が一般電気事業者から電力を購入している。

以上のように、発電市場、小売市場は自由化されたが、一般電気事業者は発電、送配電、小売事業のすべてに参画しており、自由化されていない送配電事業の中

立性が不透明な状況にあった。そのため、一般電気事業者の形態を改め、各事業を法的に独立させることで、他の発電、小売事業者が公平に送配電網を利用できるようにするのが(3)送配電事業の法的分離である。法的分離は2020年に行われる予定であり、系統の安定運用の責任は送配電事業者に課されることとなる。

1.1.2 電力システムの構造および運用の変化が電力の安定供給に与える影響

電力システムの安定性は、同期発電機の同期運転の維持、同期周波数の維持、適正電圧の維持によって実現されている。これらは同期安定性、周波数安定性、電圧安定性とそれぞれ呼ばれる^[13]。後述するように、同期発電機が持つ出力調整機能及び回転慣性は、それぞれ周波数安定性および同期安定性の維持に大きく貢献している。その一方で、導入が進められている太陽光発電は、出力が不確実に変動する日射量に依存するため、系統運用者からの指令通りに出力を変更することはできず、また、直流電源であるため慣性も持たない。風力発電では風車が慣性を持つが、同期発電機を用いるタイプはインバータを介して電力系統に連系されており^[14]、系統側からは直流電源に見えるため、一般的なインバータ制御法では風車の慣性を電力系統の安定化には活用できない。また、太陽光発電同様、出力が気象条件に依存するため、需給制御用の電源としての活用は難しい。以上より、太陽光、風力発電が大量に導入されて同期発電機を持つ火力発電と置き換わると、電力系統の同期安定性および周波数安定性が低下する恐れがある。

同期安定性とは、送電線の地絡故障や線路断線などの系統擾乱に対して、系統内のすべての同期発電機が同期運転を維持する能力を指す。正常時の運用では、各同期発電機への機械的な入力と電気的な出力は平衡状態にあり、その回転速度は一定に保たれているため、すべての同期発電機が同期して運転されている。しかし、擾乱の発生に伴う電圧の低下などにより電気出力が短時間でも変動す

ると、入出力のバランスが崩れ、差分のエネルギーが発電機に回転エネルギーの増分として吸収される。その結果、発電機の回転速度が変動し、同期状態が崩れる。擾乱発生箇所が保護リレーシステムにより一定時間内に分離されれば、同期発電機自身が持つ同期状態に戻ろうとする特性や制動巻線、励磁制御系などの働きによって、同期運転への復帰が可能である。しかし分離が遅れば、発電機間の回転速度の差が大きくなりすぎてしまい、同期運転に復帰することができずに回転周波数の発散現象である脱調現象が起こり、系統解列へと至る。このとき、慣性を持つ電源が多く運転されていれば、各発電機の回転速度の増減を抑えることができるため、擾乱除去後に同期運転に復帰しやすくなる。太陽光、風力発電は、同期発電機のように系統擾乱のインパクトを慣性によって吸収する動特性を持たない。そのため、導入量が増加して同期発電機と置き換わると、脱調が起こりやすくなると考えられる^[15]。

また、太陽光、風力発電の導入は、周波数安定性にも悪影響を及ぼしうる。周波数安定性とは、同期発電機の回転周波数が基準値から一定の範囲内に維持されている事を要件とする安定性である。交流電力の品質は、電圧および周波数によって決まっており、これらが標準の値からずれると、電気機器の動作に不具合を起こす場合がある。例として、回転機負荷を使用する繊維産業では、周波数が基準値から 0.4%程度変動しただけで製品にムラが生じることが報告されている^[16]。この周波数安定性は、上述の通り、需要の変動に対して電源の出力を追従させる需給制御によって維持されている。需給制御を行うためには発電機が出力調整機能を持つ必要があるが、太陽光、風力発電は出力調整機能を持たないどころか出力が不確実に変化するので、むしろ周波数を変動させてしまう。要するに周波数変動抑制における同期発電機の負担を増加させる要因となる。そのため、太陽光、風力発電が増加し、同期発電機が減少した将来系統では周波数安定性の

確保が困難になると考えられる。特に、日本は島国であり、凹凸の激しい地形であることから風況が欧州に比べ安定しないことや、北米や欧州に比べて電力系統の規模が小さいことから周波数が変動しやすいなど、太陽光、風力発電の増加による周波数安定性の問題が顕在化しやすく、安定化方策の確立は重要な課題となっている。

最後に電力システム改革による周波数安定性への影響について述べる。電気事業が、発電事業、送配電事業、小売事業に法的に分離された後は、需給制御は送配電事業者によって実施されることになっている。送配電事業者は自身で電源を保有できないため、電力市場を通して需給制御用の電力(調整容量と呼ぶ)を、電源を保有する発電事業者等から調達することになる。この取引には専用の市場が設置され^[17]、電気エネルギーの取引ではなく、電源出力の最大変化速度や最大変化幅、電源の起動時間などを加味した出力調整能力が取引される。送配電事業者が十分な調整容量を確保するためには、市場への活発な入札が必要となるが、発電事業者にとって、調整容量のための発電余力を残した運転は一般に不経済となるため、市場の設計の仕方によっては十分な調整容量を確保できず、周波数安定性の維持が困難になってしまう可能性がある。

1.1.3 系統安定性問題への対策とその問題点

前項で述べた通り、太陽光、風力発電の導入量増大および電力システム改革による、系統慣性の減少および需給制御能力の低下は、系統の同期安定性、周波数安定性を悪化させる恐れがある。本研究ではこのうち、周波数安定性への影響に着目し、太陽光、風力発電が大量に導入された電力系統における周波数安定化方策の確立を目指す。そこで本項では、現在考えられている周波数安定化方策について一例を示す。

太陽光、風力発電が大量導入された電力系統では、出力制御可能な電源、例えば現在、需給制御を担っている火力電源は、需要の変動に加え太陽光、風力発電の出力変動も吸収しなくてはならない。そのため、より多くの調整容量が必要になるが、火力電源が減少した状況下では確保が困難になると考えられる。この問題を解決するため、既存電源以外の機器を需給制御に活用する研究が多く進められている。そのうちの代表的なものとして、需要家所有の負荷機器の消費電力制御、太陽光、風力発電の出力抑制制御、蓄電池の充放電制御が挙げられる。以下に各手法の概要を説明する。

負荷機器の制御は一般に負荷制御と呼ばれ、電源が需要に追従できない場合に、需要自体を抑制することで需給平衡を実現するという考え方である。実際に需要を調整する方法としては、電気料金を変化させることで需要の変化を誘導する間接負荷制御と、スマートメータやエネルギーマネジメントシステムを通じて直接的に負荷機器の消費電力を調節する直接負荷制御とがある。前者においては、系統運用者が対象需要家に対して個別に指令を出す必要が無いため、通信にかかるコストを低減できる。しかしその一方で、電気料金の変化に対する需要変化は不確実な要素を含むため、料金設定を誤れば需給不平衡の原因になってしまう可能性もある。そのため、実験に基づく料金変化による負荷制御効果

の分析^[18]や、需要の応答モデルの構築^[19]などが行われている。後者の直接負荷制御においては、負荷機器を直接制御することができるため、確定的な消費電力調整が可能であるが、個別の需要に対し制御指令を送る必要があるため、通信コストがかかる。また、需要家の意志に関係なく消費電力を変更できるため、需要家の利便性を損なう可能性がある。これらのことから、多数の負荷機器を一括に制御するためのシステムに関する研究^[20]や、需要家の利便性維持を制約とした制御手法^[21]に関する研究が進められている。

続いて、太陽光、風力発電の出力抑制制御について述べる。これらの電源は上述の通り、現状では既存の出力制御可能な電源のような出力調整機能を持たないため、需給不平衡の拡大を招く要因となりうる。これは、太陽光、風力発電が与えられた気象条件下で出力を最大化する制御である最大出力点追従（MPPT：Maximum Power Point Tracking）制御を行っているためである。MPPT制御では原理上、最大出力点以外を目標値とすることも可能であるため、最大出力を上限として任意の値に出力を調整することができる。このような機能拡張を行えば、太陽光、風力発電を需給制御に活用することも可能である。そのため、周波数安定化のための出力制御手法に関する研究^[22]が行われるとともに、出力調整機能を持った製品の開発も行われている^[23]。ただし、電源が出しうる最大出力は天候に依存して不確実に変動するため、出力調整可能な容量を確定することが困難であるという欠点がある。

そして現在、最も期待されている対策が蓄電池活用である。蓄電池は、自身の容量の範囲内で高速に有効電力を吸収（充電）及び放出（放電）可能であるため、需給制御に適している。負荷制御では負荷を減少させることは容易であるが、増加させることは難しいことから、充電機能については他の機器では代えが効かない重要な機能と言える。また、電力系統へは交直変換器を介して連系され、高

速なスイッチング制御によって既存電源よりも遥かに速い出力応答が得られる。そのため、既存電源が追従できないような速い需要変動に対しても反応できるという利点がある。蓄電池活用に関する研究では、この高速な出力応答性に着目し、電源が追従できない負荷変動成分を蓄電池によって吸収することで需給制御能力を向上させる手法が多く提案されている^{[30][31][32]}。蓄電池が充電できる電力量には限界があり、満充電および充電切れの状態では充放電能力が制限されてしまう。そのため、用途に応じた適切な容量の選定^[24]や、運用中の充電電力量の管理手法^[25]についても検討が進められている。

日本では特に、この蓄電池活用に期待が高まっており、世界最大クラスの容量を持つ蓄電池を用いて複数の実証試験が行われている。表1-1にその一例を示す。これらの蓄電池はそれぞれ用途が異なっており、用途に合わせた容量が選択されている。例えば、東北地域の蓄電池は、周波数の短周期変動成分の抑制への貢献を目的としており、短時間で充放電を繰り返すような使用をするため、最大充電電力量 (MWh 容量) に比べて相対的に最大充放電電力 (MW 容量) が大きい仕様となっている。一方で、北海道地域や九州地域の蓄電池は、日中の太陽光、

表1-1. 実証試験用蓄電池の容量及び用途^{[26][27][28]}

地域	最大充放電電力 (MW 容量)	最大充電電力量 (MWh 容量)	用途
東北	40	20	短周期変動補償
北海道	15	60	短周期変動補償, 下げ代不足対策
九州	50	300	下げ代不足対策, 電圧制御

風力発電の過剰発電を揚水発電の揚水運転や既存火力電源の出力減少だけでは吸収しきれずに「下げ代不足」が発生しそうになる場合に、その過剰発電分を吸収する役割を持たせることが想定されている。この下げ代不足対策では、長時間の充電を必要とするため、MW 容量に比較して相対的に MWh 容量が大きい仕様となっている。

以上のように、蓄電池は太陽光、風力発電が大量に導入された電力系統において、需給制御能力の向上に大きく貢献することが期待されている。しかしその一方で、蓄電池は既存電源に比べて高コストであり、コスト回収が極めて難しいことが欠点となっている。既存電源の中で蓄電池と同じく電力貯蔵機能を有する揚水発電と建設コストを比較してみると^[29]、揚水発電が 2.3 万円/kWh のところを、NAS 電池で 4.0 万円/kWh、リチウムイオン電池で 20.0 万円/kWh など、大きな差があることが分かる。将来蓄電池活用を需給制御のための主要な方策とするために、技術革新による蓄電池コストの低減や、制御手法の改善による蓄電池導入効果の向上が望まれている。

1.2 研究の目的

本研究では、太陽光、風力発電導入時の周波数安定性劣化問題を解決する蓄電池活用方策の確立を目指す。

従来では、蓄電池の高速な出力応答性に着目し、既存電源に優先して積極的に蓄電池を活用することで需給制御能力の向上を図る研究が多く行われていた[30][31][32]。しかし、上述したように、蓄電池は高コストな機器であるため、制御性能のみでなく、効率が高い使い方をすることが望ましい。ここでの効率とは、蓄電池の充放電に対する周波数変動の抑制効果の高さを意味する。以上より、本研究では、周波数変動抑制能力の向上と効率性の向上を両立する蓄電池制御手法を確立する事を主たる目的とする。この目的が達成されれば、蓄電池の運用コストが低減できるため、コスト回収が容易になり、蓄電池導入のボトルネックの解消へとつながることが期待される。蓄電池による需給制御能力の増強が現実的な選択肢となれば、太陽光、風力発電のさらなる導入が可能となる。

蓄電池を周波数安定化に効率的に活用するため、本研究では2つの方針を定める。一つは、蓄電池でなければ吸収できない変動のみを充放電指令値として与えることで、充放電電力の価値を高めることである。既存電源でも追従できる変動に蓄電池を応答させた場合、周波数変動抑制能力の向上効果を得る事はできない。むしろ、充放電ロスが存在する分、蓄電池を用いる方が不経済である。したがって、既存電源が吸収できない変動を正確に蓄電池に配分することができれば、効率よく周波数変動を抑制することができる。このために、まずは既存電源の出力特性に着目し、既存電源が吸収できない成分の解析を行う。その上で、追従できない成分を吸収するための蓄電池制御手法を提案する。そして、提案法の有効性を評価するため、時間領域シミュレーションに基づく周波数安定化効

果の検証、周波数安定化に必要な蓄電池容量の算定を行い、従来法との比較検討を行う。

また、蓄電池の効率的活用を実現するためのもう一つの方針として、多目的活用を考える。蓄電池は高速な出力応答性と、有効電力、無効電力を独立に制御できるという長所を持っていることから、様々なデバイスの代替が可能であり、複数の機能を同時に実行することもできる。つまり、蓄電池を多目的に活用すれば、その分他のデバイスの起動もしくは導入が必要なくなるため、全体の運用コストが低減できる。需給制御は、複数の制御機構からなる階層的な制御システムであるため、本研究では複数の制御機構に貢献しうる蓄電池制御手法を確立する。その際、上述した効率的制御の考え方をベースにし、各制御機構において既存電源が吸収できない成分をまとめて蓄電池によって補償することで、多目的活用を実現する。

1.3 論文の概要

本論文は、出力が不確実に変動する自然変動電源が大量に導入された系統において、需給平衡を維持し、周波数安定性を確保するための、新しい電力貯蔵装置の活用手法を提案し、その有効性を評価するものであり、全編 6 章からなる。以下にその概要を示す。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、自然変動電源が大量に導入された自然変動電源統合型電力システムを構築するために解決すべき課題を示している。自然変動電源が導入された電力系統では、既存電源は需要から自然変動電源の出力を差し引いた正味の需要である残余需要に対し出力を追従させ、全体の需給平衡を保つ事になる。自然変動電源の導入量が増加すれば、残余需要に含まれる変動成分も増大し、既存電源にはより高い出力調整能力が求められる。しかし、需給制御を主として担う火力電源は、指令値に対して出力が追従するまでに数十秒から数分の時間遅れがあることや、機器保護のために出力の変化速度に上限を設けていることなどから、残余需要に含まれる周期 20 分程度以下の短周期変動成分を吸収しきれない可能性がある。この領域の変動は、階層的な構造を持つ需給制御のうちの、負荷周波数制御(Load Frequency Control, LFC)によって吸収される変動であり、LFC の周波数変動抑制能力の向上が重要な課題となる。

電力貯蔵装置の一つである蓄電池は、火力電源と比較して指令値に対する応答が極めて速く、火力電源では吸収できない短周期需要変動の吸収に有効であるとして、従来から活用法が検討されている。LFC への活用を考えた代表的な従来手法として、周期 20 分程度以下の需要変動を表す信号を、フィルタを用いて更に周期 10 分程度以下の変動と、周期 10 分程度以上の変動に分離し、前者を応答

が速い蓄電池への制御信号、後者を火力電源への制御信号とすることで LFC の周波数変動抑制能力を向上させる手法がある。

本章では、火力電源の出力特性を詳細に考察し、出力変化速度制限の影響によって従来法で火力電源に配分される周期 10 分程度以上の変動にも、火力電源が吸収できない成分があることが明らかにし、従来法では、十分に火力電源の出力調整能力の不足を補償できないことを指摘している。

第 3 章では、新しい蓄電池活用手法として、需要変動に含まれる火力電源の出力変化速度制限を超過する成分を、蓄電池に吸収させることで、LFC の性能向上を図るバッテリーアシスト型 LFC(Battery-Assisted LFC, BALFC)という制御法を提案している。BALFC の特徴は、従来法のようなフィルタを用いずに、出力変化速度制限という非線形要素を利用して火力電源と蓄電池の制御分担を決めている点にある。このような構造とすることで、蓄電池が火力電源では吸収できない需要変動成分を過不足無く吸収できる。

BALFC の有効性を評価するために、風力発電が導入された東北地域の電力系統を模擬したモデルを用いて時間領域シミュレーションを行い、BALFC は従来法に比べ少ない充放電で高い周波数変動抑制効果を得ることができる手法である事を明らかにしている。

また、BALFC の導入による周波数制御システムの構成の変化が、システムの漸近安定性に悪影響を与えないかを検討するために、固有値解析による安定性判別を実施している。BALFC は、非線形要素である出力変化速度制限に基づいた手法であるため、直接固有値を求めることはできない。そこで、記述関数法を用いて線形近似を行い、固有値を算出している。その結果より、BALFC の導入によってシステムの漸近安定性はむしろ向上し、不安定化を引き起こす可能性は低いということを明らかにしている。

第4章では、BALFC と従来法に関して、周波数変動を目標範囲内に収めるために必要な蓄電池の kW 容量と kWh 容量を、時間領域シミュレーションを用いて算定している。所要容量の算定に当たっては、系統容量に対する風力発電の導入量の割合が、14%から 23%まで 3%刻みで増加していく 4 ケースを想定しており、算定の結果、風力発電の導入量に依らず、BALFC を用いることで従来法よりも少ない kW 容量、kWh 容量の蓄電池で周波数変動を目標範囲内に収められることを明らかにしている。

また、BALFC を用いることで蓄電池の所要容量を低減できる理由を明確にするために、時間領域シミュレーションの結果を分析し、従来法では、フィルタで生じる位相遅れが、火力電源の負荷追従能力を低下を招き、蓄電池がその能力低下分を補償するために所要容量が増加する事を明らかにしている。

第5章では、BALFC を、残余需要に含まれる周期 20 分を超える長周期変動成分の吸収にも貢献できるような手法に拡張している。この長周期の需要変動成分は現状、電源運用の経済性を考慮して出力を調整する経済負荷配分制御 (Economic Dispatching Control, EDC)によって吸収されている。LFC と EDC の両方の制御対象となっている電源では、LFC 指令値と EDC 指令値の和が最終的な出力指令値となる。電源の出力変化速度制約は、従来、LFC と EDC 別々で考慮されているため、それらの和である出力指令値が制限を超過する可能性があった。そこで、最終的な出力指令値に含まれる変化速度制限の超過成分を蓄電池が補償するように BALFC の拡張を行った。

時間領域シミュレーションによる有効性評価の結果、周期 20 分以下の周波数変動抑制能力を劣化させることなく、周期が 20 分よりも長い周期の周波数変動を抑制できることを明らかにしている。

第6章は結論である。

第2章 自然変動電源統合型電力システムの実現課題

2.1 まえがき

電力システムでは、時々刻々と変動する電力需要に電源の総出力を追従させる需給制御によって需給平衡を維持し、同期発電機の平均的な回転周波数(以下、系統周波数と呼ぶ)を一定値に保っている。本章ではまず、この需給制御の仕組みについて説明する。そして、太陽光、風力発電といった出力が不確実に変動する自然変動電源の導入が、需給制御用電源の負担を増大させ、周波数安定性に関して種々の問題を引き起こし得る事を指摘する。最後に、本研究で取り上げる課題に対する従来の解決方策について紹介し、その問題点を述べる。

なお、本章以降では太陽光発電を PV(Photovoltaic Generation)、風力発電を WP(Wind Power Generation)と表記することにする。

2.2 電力システムの周波数安定化システム

2.2.1 周波数安定化の必要性

本項ではまず、現状の電力システムにおける主たる電力供給源である同期発電機の動特性を基に需給バランスと周波数の関係性を示す。その次に、周波数の変動が発電機および電気機器に与える影響から、周波数安定化の重要性について述べる。

図2-1は同期発電機の入出力の関係を示している。同期発電機は、タービンから得られる機械入力 P_m によって発電機を回転させ、電気出力 P_e を得るための機器である。このとき、入出力が釣り合っていれば、発電機の回転周波数 f は一定になる。この性質は、式(2-1)に示す同期発電機の運動方程式によって示される^[33]。本式は動揺方程式とも呼ばれる。式中、 M は慣性定数であり、発電機に蓄える事ができる慣性エネルギーの大きさを意味している。

$$M \frac{df(t)}{dt} = P_m(t) - P_e(t) \quad (2-1)$$

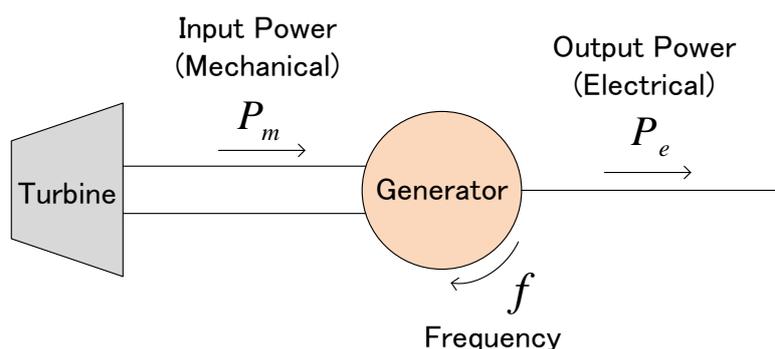


図2-1. 同期発電機の入出力関係

電力システムには同期発電機が多数台連系されている。全ての発電機が同期して運転しているとすれば、これらは等価な1台の発電機としてみなすことができる。この等価発電機の動揺方程式は次式で示される。

$$\sum_i M_i \frac{df(t)}{dt} = \sum_i P_{mi}(t) - \sum_i P_{ei}(t) \quad (2-2)$$

式中、添字*i*は発電機を区別する記号である。本式より、発電機の同期周波数(以下、系統周波数と呼ぶ)は各発電機の機械入力 P_m の総和と電気出力 P_e の総和の釣り合いを取ることで一定値に維持される。発電機で発電された電力は、図2-2に示すように送配電ネットワークを通して需要家の電気機器まで送られる。このとき、送配電線に含まれる抵抗成分によりジュール損失 P_{LOSS} が生じるため、全ての発電電力を需要家に届けることはできない。ここで、 P_{LOSS} が十分小さいと仮定すると、電気出力は需要電力の総和 P_L と等しくなり、式(2-3)が成り立つ。

$$\sum_i M_i \frac{df(t)}{dt} = \sum_i P_{mi}(t) - P_L(t) \quad (2-3)$$

本式より、総需要 P_L の変動に発電機の機械入力 P_m の総和を追従させることで、系統周波数を一定にできることがわかる。以上が需給バランスと周波数の関係である。

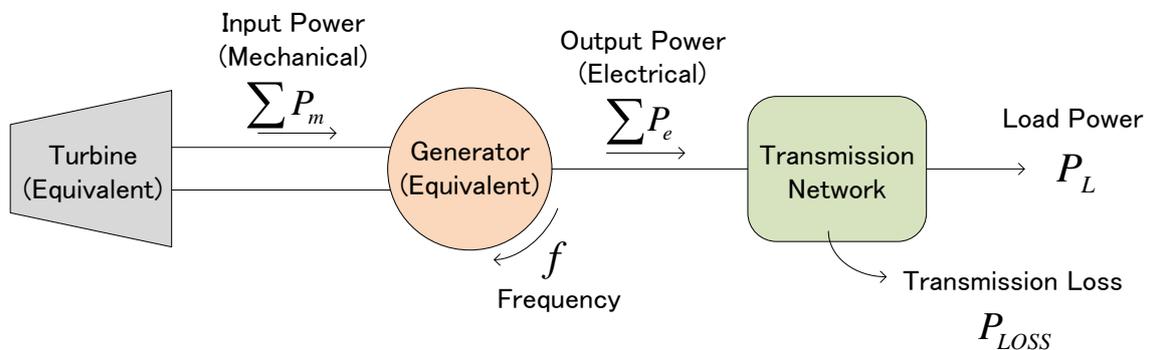


図2-2. 発電機から需要までの電力の流れ

続いて、系統周波数の変動が発電システムおよび電気機器に与える影響について述べる。まず発電システムについて、系統周波数の変動は発電機の主軸の回転速度が一定でなく加減速することを意味する。これにより、タービン翼が振動し、タービンの破損を招く場合がある。次に需要について、系統周波数は交流電力の品質を決定するパラメータであるため、これが変動することは電力品質の劣化を意味し、電気機器の動作に影響を及ぼす。特に、電動機負荷は回転数が系統の周波数に依存するため、影響を大きく受ける。繰り返しになるが、実際に、電動機を使用する繊維産業において、周波数が基準周波数から 0.4 [%]程度増減しただけでも製品にムラが生じることが報告されている^[16]。この 0.4 [%]の周波数変動は、一般的な電力システムの電力-周波数特性(5 [%MW/%Hz]^[16])からすると、需要と供給が2 [%]ずれるだけで生じる変動である。以上より、需要と供給のバランスをとって系統周波数を一定値に維持することは発電システム、負荷機器を健全に使用する上で極めて重要であると言える。

2.2.2 周波数安定性維持のための電源出力制御

電力システムでは、時々刻々と変動する電力需要に電源の総出力を一致させつつ、電源運用コストが最小となるように、電源の稼働台数および出力が調整されている。これを需給制御もしくは需給運用と呼ぶ^{[13][34]}。需給制御はオフラインで行われる需給運用計画の策定と、オンラインで行われる周波数制御の2段階で実施される。図2-3に、ある1日の電力供給について行われる需給運用計画と周波数制御の概要を示した。需給運用計画では、当日の需要の予測値を用いて、それを満たすような電源の起動および停止のタイミング、そして出力が決定される。計画の策定には、電源の運用コスト最小化を目的関数とした数理計画が用いられ、前日までに行われる。当日は、各電源が需給運用計画で決められた出力で運転を行うが、実際の需要と需要予測は完全には一致しないため、計画通りの運転では需給インバランスが発生し、周波数が変動してしまう。そのため、オンラインで需給インバランスを解消するように電源の出力を調整する必要があり、この役割を周波数制御が担っている。以下では需給運用計画および周波数制御についてより詳細に説明する。

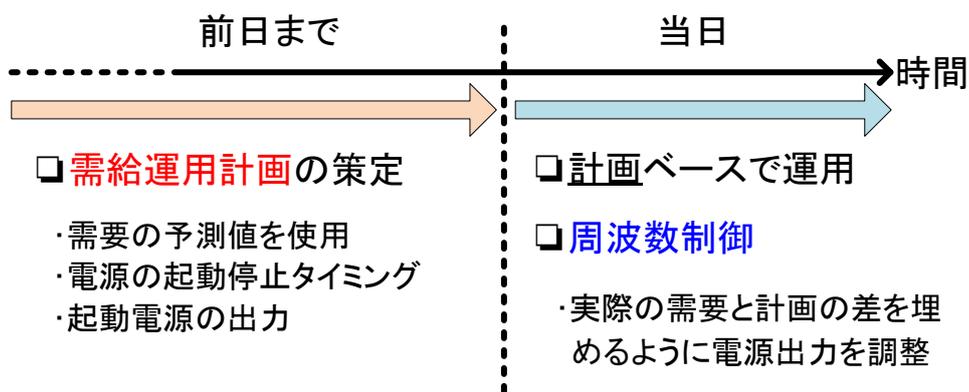


図 2-3. 需給制御の概要^[34]

(a) 需給運用計画の策定

需給運用計画ではまず、年間の需要予測に基づいて最初の計画が策定される。策定に用いられる数理計画では、電源の燃料費、起動費によって決まる運用コストの最小化が目的関数として設定される。制約条件には電源の出力に関する制限や、周波数制御で必要な調整容量の確保制約などが考慮される。計画の策定に使用される需要予測は、電力を供給する日が近づくと連れて予測精度が増すため、月間、週間そして前日と、複数回に渡って計画の修正および詳細化が行われ、最終的な需給運用計画が策定されていく^[34]。

本論文では、周波数制御に主眼を置いており、次章以降では需給運用計画が問題なく策定されていることを前提とした検討を行うため、需給運用計画についての詳細な説明は割愛することとする。

(b) 周波数制御

周波数制御では、需給運用計画で立てられた電源出力の計画値と実際の需要の差が解消されるように電源の出力を調整する。本制御は複数の制御機構からなる階層的な制御システムである^[16]。図2-4に制御機構の種類とそれぞれの制御分担を示す。図中の実線は需要のパワースペクトルを示している。横軸は変動周期である。需要は同図に示すように、長周期の変動ほど大きいことが分かっている。変動周期が数時間以上の変動は前もって精度よく予測できるため、需給運用計画によって吸収される。周波数制御が受け持つ需要変動はそれよりも短い周期の変動成分である。本論文では頻繁に需要の変動周期に関する記述が登場するため、ここで各領域の名称を定義する。まず、数時間以下、20分以上の領域を長周期領域と呼ぶ。長周期領域の需要変動は、経済負荷配分制御(Economic Dispatching Control, EDC)によって吸収される。次に、10分以上20分以下の

領域を短周期(L)領域、数分以上10分以下の領域を短周期(M)領域と呼ぶ。これらの領域の需要変動はどちらも負荷周波数制御(Load Frequency Control, LFC)によって吸収される。最後に短周期(M)より短い領域を短周期(S)領域とした。この領域の需要変動はガバナフリー運転(Governor Free, GF)や負荷の周波数特性によって吸収される。

図2-5には、周波数制御システムの構造を示した。最も短い周期の需要変動を吸収するGFは、発電機単位で行われる分散的な制御であり、それよりも長い周期の需要変動を担うLFCのおよびEDCは系統運用者によって行われる集中的な制御である。以下に各機構の詳細を述べる。

■ガバナフリー運転(Governor Free : GF)

同期発電機を持つ発電プラントの多くは、タービンへの入力を一時的に変化させることができるガバナ(調速機)が備え付けられている。ガバナは発電機の回転周波数を計測し、それが基準周波数となるようにタービン入力を調整する。ガバナを制限なく動作させることから、ガバナフリー運転と呼ばれる。発電機単位で行われることから通信遅れの影響がなく、速応性に優れるため、短周期(S)領域の需要変動吸収を担っている。ガバナは一時的な出力調整機能しか持たないため、より長い周期の変動を吸収する能力は低い。

■負荷周波数制御(Load Frequency Control : LFC)

系統の代表点で計測される平均的な周波数より、系統全体の需給インバランスを推定し、それが解消されるように電源の出力を調整している。ガバナと異なり火力電源であれば燃料流量や水の流量、水力電源であれば水の流量を変更して出力を調整するため、出力が変化するまで比較的時間がかかる。また、集中制

御であることから情報の収集に時間がかかる。これらの理由から GF よりも応答が遅く、短周期(M)および(L)領域の需要変動吸収を担っている。

■経済負荷配分制御(Economic Dispatching Control : EDC)

周波数制御を主として担う火力電源の燃料費は出力に依存する。そのため、需給運用計画の段階では電源の総燃料費が最小となるように電源の出力配分が決定されている。しかし、実際の運用では、電源の出力は LFC によって時々刻々と変化するため、最経済な出力配分から離れていく恐れがある。EDC は、出力配分を最経済の状態に保とうとする制御である。基本的に、LFC が出力を変更した後に、その変化分を EDC で受け持つことになるため、長周期領域の需要変動を吸収していることと等価である。

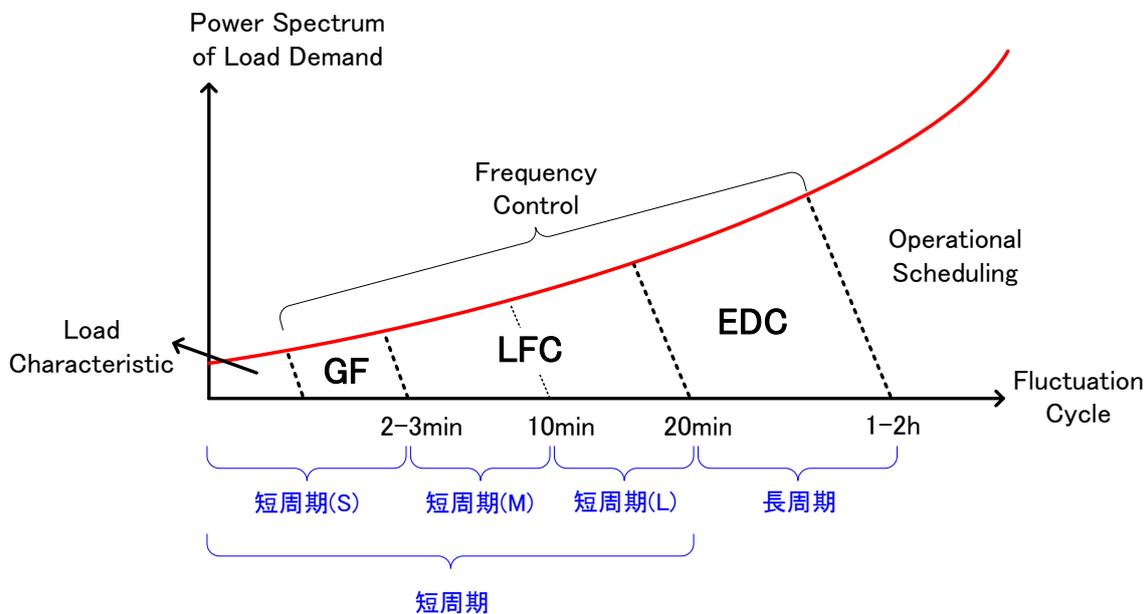


図 2-4. 周波数制御システムにおける制御分担

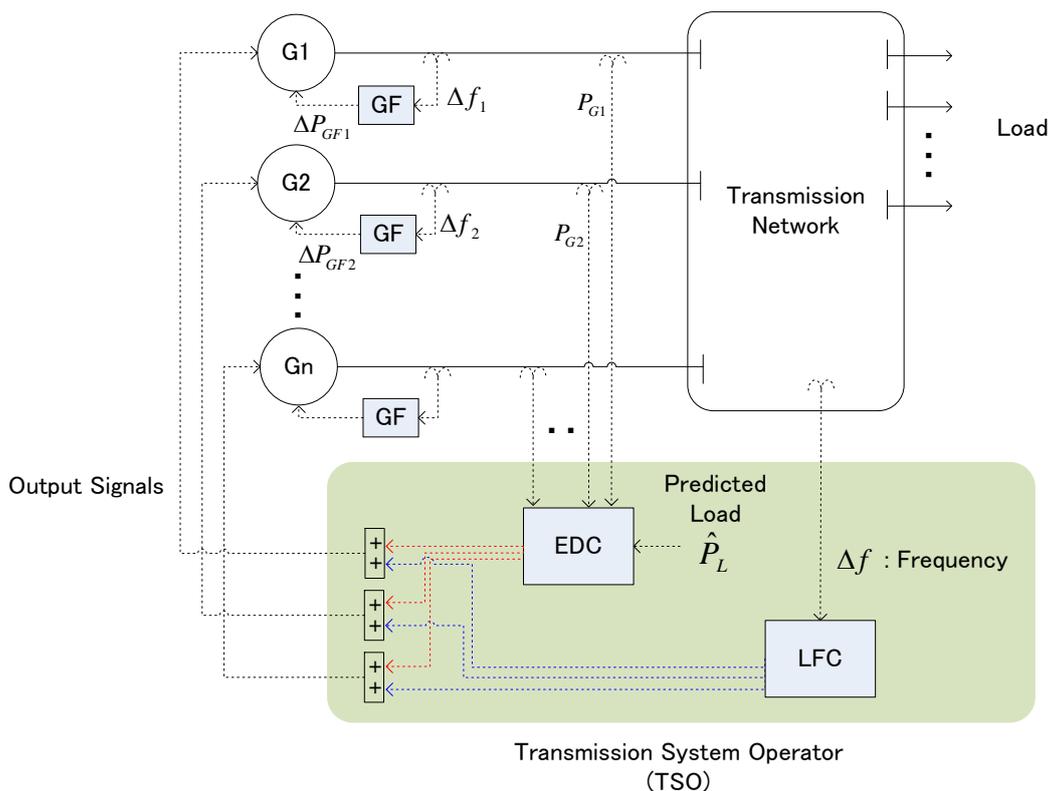


図 2-5. 周波数制御システムの概要

2.3 周波数安定性を維持するために解決すべき課題

近年導入が進められている PV、WP のほぼ全ては、設置点における日射量、風速の下で発電し得る最大電力を出力するように設計されているため、需給制御において需給バランスの維持に貢献させることができない。それどころか、需給制御が、需要の変動に加えて PV、WP の出力変動も吸収しなくてはならなくなるため、火力、水力発電の負担は増大する。更に、PV、WP の導入量が増大していけば、長期的には既存電源の台数が減少していくと考えられるため、需給制御用電源の確保が困難になり、周波数安定性が低下する恐れがある。本節では、PV、WP が大量に連系された電力システムにおいて、周波数安定性を維持するために解決すべき課題を示す。

2.3.1 太陽光・風力発電の利用率の高い需給運用計画の策定

需給運用計画では、予測された需要に対して、電力供給の過不足が生じないように電源の運用パターンを決定する。PV、WP が導入された系統において、最大限 PV、WP を活用するには、需要予測から PV、WP の予測出力を差し引いた残りの需要(以下、残余需要と呼ぶ)に対して電源の運用パターンを決定すればよい。

例として PV が導入された電力システムを考える。需要予測と PV 出力予測から算出される残余需要の予測のイメージを図 2-6 に示した。同図(a)は日間の需要予測及び PV 出力予測を示しており、これらの差分として計算されるのが同図(b)の残余需要である。PV は、快晴日には同図(a)に示したように山なりの出力波形となるため、残余需要は同図(b)に示すように昼間に大きく低下する。この残余需要に対して需給運用計画を策定しようとする、昼間の火力、水力電源の稼働台数を大きく低減させなくてはならなくなるため、系統慣性の低下、周波数制御用の調整容量の確保不足となる可能性がある。その場合、現状では、PV を一部系統から切り離し、火力、水力電源の台数を増加させる必要がある。自然変動電源の利用率が高い運用計画を策定するには、火力、水力電源が少ない状態でも安定な運用が行えるような手法を考案しなくてはならない。

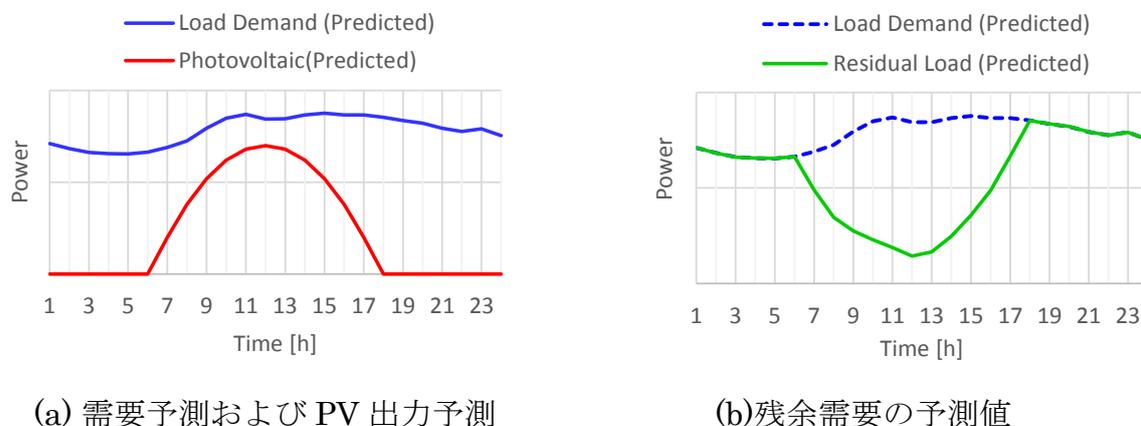


図 2-6. 太陽光発電導入系統における残余需要

2.3.2 太陽光・風力発電の出力予測精度向上による電源運用コストの低減

PV、WP の出力予測には需要予測と同じく予測誤差が含まれるため、導入が進むに連れて誤差の吸収を担う周波数制御の負担は増大すると考えられる。ここでは PV を例にとって問題点を示す。図 2-7 には、日間の運用において PV の出力予測の予測誤差が残余需要に与える影響を示している。同図(a)に示すように、快晴として予測した PV 出力が天候の急変により昼過ぎに急落する場合を考える。このとき、残余需要は同図(b)のように予測よりも早く立ち上がることになる。そのため、元々夕方に予定されていた電源の起動もしくは出力上昇を早める必要がある。しかしながら、電源の起動は最も速いものでも 40 分程度かかり [35][36]、その後の出力上昇にも時間がかかるたえ、このような突発的な予測誤差の発生に対して需給バランスを維持し続けることは難しい。待機状態の電源を増加させることで、予測誤差の補償は可能であるが、待機運転にもコストが掛かるため、不経済である。以上より、PV、WP の出力予測の精度向上は重要な課題である。

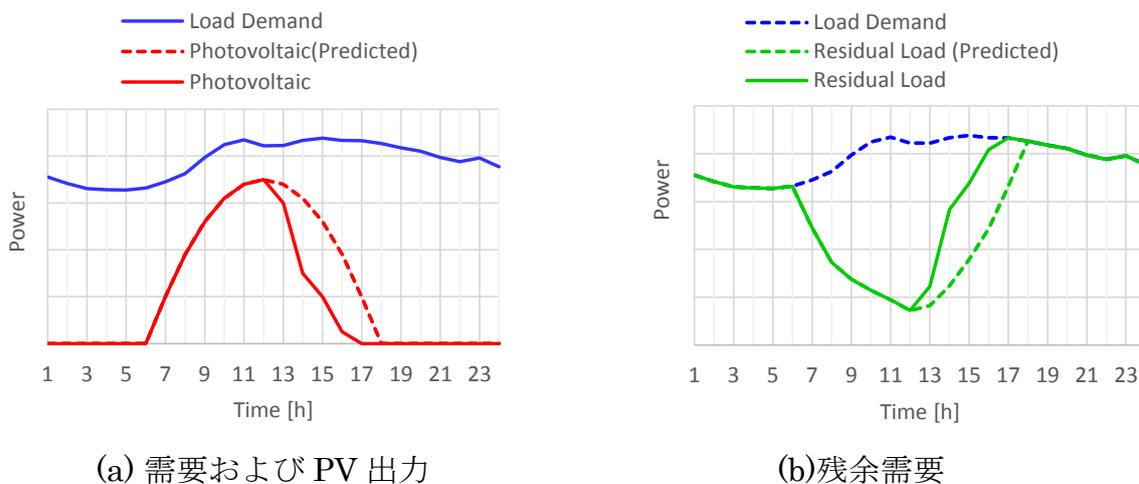


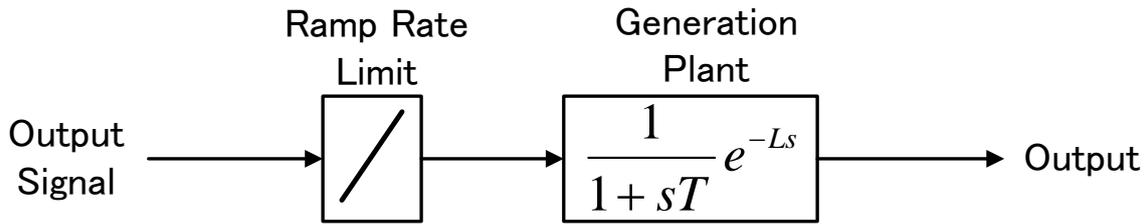
図 2-7. 太陽光発電の出力予測の誤差による残余需要の変化

2.3.2 太陽光・風力発電出力の短周期変動吸収による周波数安定化

PV、WP の出力には、図 2-7 に示したような数時間周期(長周期およびそれ以上)の変動だけではなく、短周期領域の変動も含まれている。自然変動電源の連系量が増大すれば、残余需要に含まれる短周期変動成分も増大するため、周波数制御用の調整容量をより多く確保しなくてはならなくなる。しかし、自然変動電源が増加し、既存電源に置き換わった将来の電力系統では、調整容量の確保は容易ではない。また、火力、水力電源は指令値を受け取ってから出力が追従するまでに時間遅れがあることや、短時間で変化させることができる出力の幅に制限を設けていることなどから、短周期の需要変動を吸収する能力は元々高くない。以上より、PV、WP の導入量増大は、残余需要の短周期変動を増大させ、周波数安定性を著しく低下させる恐れがある。

短周期領域の需要変動は、図 2-4 に示すように様々な周期変動の合成である。既存電源の出力調整能力の不足を補償するためには、既存電源が吸収できない需要変動成分をより明確に把握することが重要である。そこで、電源の特性および需要変動の統計的特性より、既存電源での吸収が困難な需要変動成分の周期の範囲を考察する。

周波数制御を主として担う火力電源の基本的な応答は図 2-8 に示すモデルで表現される^[37]。電源の急激な出力変化は、構成機器の機械的劣化を早めるため、出力指令値に対して変化速度制限が設けられている。また、応答遅れのブロックは燃料調節系、燃焼系そしてタービンと各段階で生じる時間遅れをまとめて表現したものであり、一次遅れ要素とむだ時間要素で近似表現できる。

図 2-8. 火力電源の近似モデル^[37]

応答遅れは、一次遅れ要素を含むことから、短周期領域の需要変動の吸収を妨げる要素であることは明らかである。一方、出力変化速度制限は、指令値の変化速度が制限値を超過していなければ指令値をそのまま出力し、超過する場合にのみ指令値が制限される非線形な要素であるため、その特性は一次遅れ要素ほど単純ではなく、どの周期領域の需要変動の吸収を妨げるかは明らかではない。そこで、需要および PV、WP 出力の変動の統計的な特性から、出力変化速度制限によって吸収が困難になる需要変動成分を分析した。以下ではその詳細を述べる。まず、需要の変動は、以下の式(2-4)に示すパワースペクトル密度の式で表される周波数特性を有することが統計データの分析によって明らかにされている^[38]。

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^n} \quad (2-4)$$

ここで、

$S(\omega)$: 負荷変動のパワースペクトル密度 [$\text{MW}^2 \cdot \text{s}$]

A : 比例係数

ω : 各周波数 [rad/s]

である。分母の次数 n については、1 から 2 の間の数を取り、高周波成分ほど変動が小さい特性となる。図 2-9 に文献^[38]に記載された実測データの特性を示す。

実際の需要変動が概ね式(2-4)の特性を満たしていることが確認できる。また、文献[56]、[57]では、実測データの解析により、PV、WP についても短周期領域の変動ほどレベルが小さいことが示されている。以上より、本節では将来の残余需要も、式(2-4)で示される特性を有するものと仮定し、電源が追従できない需要変動成分の分析を行う。

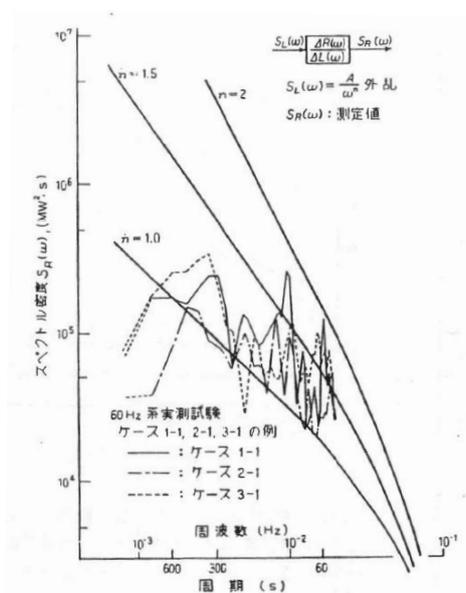


図 2-9. 需要変動のパワースペクトル密度[38]

続いて、式(2-4)に示した負荷変動のパワースペクトル密度から、各周期成分の最大変化速度の算出を試みる。負荷変動の時系列データを $x(t)$ とすれば、そのフーリエ変換 $X(\omega)$ は式(2-5)で与えられる^{[39][40]}。ここで、 T はデータ長である。

$$X(\omega) = \int_0^T x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-5)$$

パワースペクトル密度 $S(\omega)$ とフーリエ変換 $X(\omega)$ の関係は式(2-6)で表されるため、式(2-4)と対応させることでフーリエ変換 $X(\omega)$ を式(2-7)のように求めることができる。

$$S(\omega) = \frac{|X(\omega)|^2}{T} \quad (2-6)$$

$$X(\omega) = \sqrt{\frac{TA}{\omega^n}} = \sqrt{TA} \omega^{-\frac{n}{2}} \quad (2-7)$$

需要変動に含まれる角周波数 ω を持つ変動成分を正弦波に近似したときの振幅を $C(\omega)$ とすると、 $C(\omega)$ はフーリエ変換 $X(\omega)$ の性質から式(2-8)のように求めることができる。

$$C(\omega) = \frac{2}{T} |X(\omega)| = 2 \sqrt{\frac{A}{T}} \omega^{-\frac{n}{2}} \quad (2-8)$$

また、角周波数 ω 、振幅 $C(\omega)$ の正弦波の最大変化速度 $R(\omega)$ は、正弦波の微分量の最大値であるため、角周波数と振幅の積 $\omega C(\omega)$ となる。したがって、式(2-8)で求めた振幅 $C(\omega)$ に ω を掛けることで、周波数 ω を持つ変動成分の最大変化速度 $R(\omega)$ を式(2-9)のように求めることができる。

$$R(\omega) = \omega C(\omega) = 2 \sqrt{\frac{A}{T}} \omega^{-\frac{n-2}{2}} \quad (2-9)$$

上述した通り、式(2-4)中の n は1から2の間の実数となる。ここでは、 n に1と2を代入した時の $C(\omega)$ および $R(\omega)$ を計算し、その特性を示す。まずは両ケー

スにおける $C(\omega)$ および $R(\omega)$ の式を式(2-10)から式(2-13)に示す。また、各特性のグラフを図2-10に示した。

$$(n=1) \quad \left\{ \begin{array}{l} C(\omega) = 2 \sqrt{\frac{A}{T}} \omega^{-\frac{1}{2}} \end{array} \right. \quad (2-10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R(\omega) = 2 \sqrt{\frac{A}{T}} \omega^{\frac{1}{2}} \end{array} \right. \quad (2-11)$$

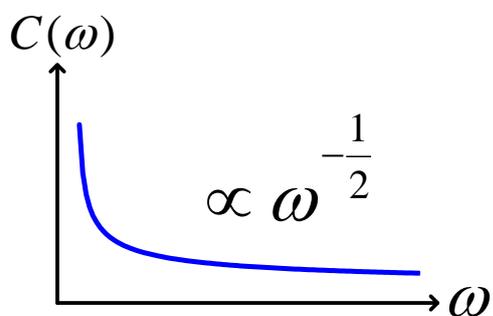
$$(n=2) \quad \left\{ \begin{array}{l} C(\omega) = 2 \sqrt{\frac{A}{T}} \omega^{-1} \end{array} \right. \quad (2-12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R(\omega) = 2 \sqrt{\frac{A}{T}} \omega^0 \end{array} \right. \quad (2-13)$$

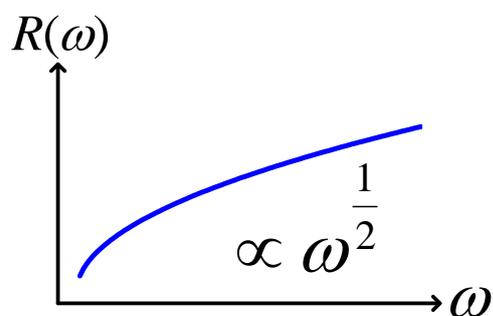
図2-10(b)より、 $n=1$ のときは、短周期領域の変動の最大変化速度が大きく、変化速度制限に起因して電源での吸収が困難になるのは短周期の需要変動成分であることが分かる。要するにこの場合は、出力変化速度制限は応答遅れと同様の特性を有すると言える。一方、 $n=2$ の場合は、図2-10(d)より、需要変動に含まれる各周期変動成分の最大変化速度は、その変動周期に依らず一定値になった。これは、既存電源が出力変化速度制限によって吸収できない需要変動成分には、短周期変動だけでなく長周期変動も含まれることを意味している。以上より、既存電源による吸収が困難な需要変動成分は、需要の変動特性によって変化し、場合によっては長周期の需要変動成分が含まれることが分かった。

本節では、需要変動成分に含まれる各周期変動の最大変化速度を基に、既存電源が吸収できない需要変動成分の分析を実施した。しかし、変化速度制限は非線形な要素であるため、周期別に制限を超過する成分を分析しても、合成変動に変

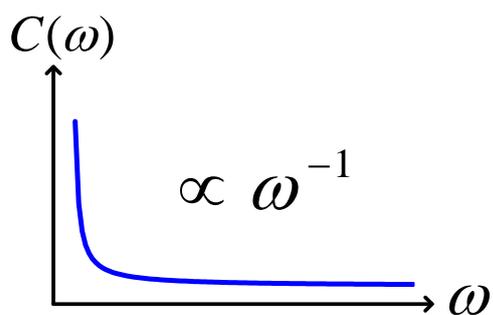
化速度制限を作用させたときに得られる超過成分とは一致しない。そのため、本節で得られた知見は近似的な要素を多分に含んでいる点に注意されたい。



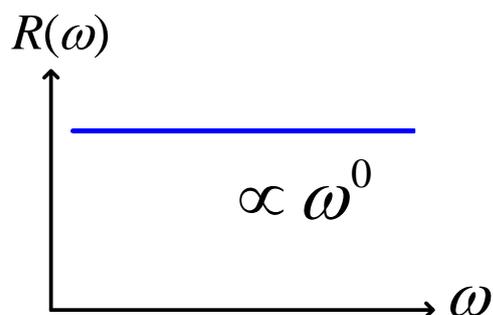
(a) $n=1$ における振幅の特性



(b) $n=1$ における最大変化速度の特性



(c) $n=2$ における振幅の特性



(d) $n=2$ における最大変化速度の特性

図 2-10. 負荷変動に含まれる周期変動成分の振幅および最大変化速度の特性

2.4 太陽光・風力発電導入時の周波数安定化方策とその課題

本研究では、前節で示した PV、WP の導入拡大のために解決すべき周波数安定性に関する課題のうち、2.3.2 項で述べた残余需要の短周期変動成分増大への対策を主たる研究課題とする。本節では、本課題の対策として現在提案されている手法を紹介するとともに、その問題点を示す。

PV、WP の導入拡大によって増大する残余需要の短周期変動を吸収し、需給平衡を維持するためには、周波数制御に活用できる調整容量を増加させる必要がある。通常、周波数制御は一部の既存電源によって行われているため、周波数制御で制御対象とする電源を増加させることで調整容量を増加させることができる。しかしながら、PV、WP が大量に導入された電力系統では、既存電源の台数は減少すると考えられるため、現実的な方策とはいえない。このため、既存電源以外の機器を周波数制御に活用するための検討が多く行われている。周波数制御に活用可能な機器としては、蓄電池や PV、WP、負荷機器などが挙げられる。しかし序論で述べた通り、PV、WP は調整可能な出力の幅が日射量、風速によって不確実に変動するため、常時の周波数安定性を維持するための機器に適しているとは言い難い。また、負荷機器についても応答が速い直接負荷制御を採用すれば、機器を所有する需要家の利便性を損ねてしまう可能性がある。一方、蓄電池は充電電力量の管理が必要である^[25]ことや、充放電ロスが伴う^[41]といったデメリットはあるものの、比較的安定して電力の吸収、放出を行えるため、短周期の需要変動吸収への活用に適している。

蓄電池の代表的な活用手法として、残余需要に含まれる既存電源では吸収できない変動成分をフィルタによって抽出し、それを蓄電池に配分するという手法がある^{[30][31][42]}。図 2-11 には、文献[30]で提案されている手法の構造を示す。文献[30]では、短周期(M)、(L)領域の変動吸収を担う LFC に蓄電池を活用する手

法が提案されている。本手法では、周波数変動より推定した需給インバランスを、ローパスフィルタを用いて短周期(M)領域以下の周期を持つ変動と、短周期(L)領域以上の周期を持つ変動に分離し、前者を応答が速い蓄電池に、後者を既存電源に配分する。そして、それぞれの機器が配分された需給インバランスが解消されるように出力を調整する。この方法はフィルタに基づいた手法であることから、フィルタベース型 LFC(Filter-Based LFC, FBLFC)と呼ばれている。文献[42]では、外乱オブザーバを用いて推定した需要変動を、蓄電池と出力調整可能な WP で分担する制御が提案されているが、分担割合は同図のようなフィルタを用いた構造が採用されている。また、文献[31]では、電源に推定需給インバランスを配分し、蓄電池にハイパスフィルタで抽出した推定需給インバランスに含まれる短周期(M)領域の変動成分を配分している。この手法は図 2-11 と構造が若干異なるが、蓄電池に短周期(M)領域の変動を吸収させるという考え方は同様である。フィルタの構造としては、一次遅れ要素が用いられるケースが多い。

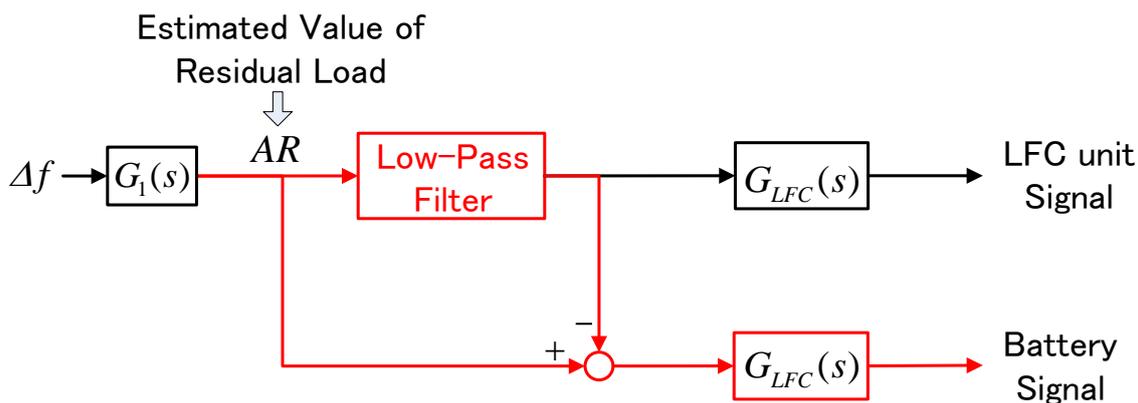


図 2-11. 従来の蓄電池活用手法の構造

これらの手法は、既存電源が応答遅れや出力変化速度によって短周期(M)領域の変動を吸収しきれないため、その変動を蓄電池に吸収させることで需給平衡維持能力を向上させるという考え方に基づいた方法である。しかし、前節で指摘したように、出力変化速度制限は、既存電源の比較的長い周期の変動を吸収する能力を低下させる可能性があるため、短周期(M)領域の変動のみを蓄電池で吸収するだけでは不十分であると考えられる。既存電源が吸収できない需要変動成分を蓄電池によって補償するには、既存電源の出力変化速度制限の影響を考慮することが重要である。

2.5 あとがき

本章ではまず、電源運用計画と周波数制御からなる需給制御について説明し、PV、WP の大量導入が電源運用計画、周波数制御に与える影響をそれぞれ考察した。その中で、本研究で取り上げる課題として、残余需要の短周期変動増大による周波数安定性の低下に着目し、既存電源だけを用いた周波数制御では需給平衡を維持していくことは困難である事を論じた。そして、蓄電池を活用した従来の代表的な解決方策として、短周期(M)領域の需要変動を応答が速い蓄電池によって吸収し、それよりも周期が長い短周期(L)領域の変動を既存電源が吸収するフィルタベース型 LFC を紹介し、その問題点として、既存電源は出力変化速度制限によって、短周期(L)領域の変動の全てを吸収できない可能性があり、十分に既存電源の出力調整能力の不足を補償できないことを指摘した。

第3章 最大出力変化速度を考慮した火力電源と電力貯蔵装置の協調による周波数安定性の向上

3.1 まえがき

従来の LFC 性能向上を目的とした蓄電池活用手法では、LFC 指令値をフィルタによって短周期変動成分と長周期変動成分に分離し、それぞれを蓄電池と既存電源に配分することで需給平衡維持能力を向上させている。しかしながら、前章で指摘したとおり、既存電源は、出力変化速度制限によって長周期変動成分を吸収する能力が低下する可能性があるため、従来手法では蓄電池が十分に既存電源の出力調整能力の不足を補償できない。

本章では、既存電源の最大出力変化速度を超過する LFC 指令値成分を補償する蓄電池制御手法を提案する。そして、その有効性を評価するため、時間領域シミュレーションによる周波数変動抑制能力の検証、固有値解析による安定性判別を実施し、従来手法との比較検討を行った。

3.2 バッテリーアシスト型負荷周波数制御の提案

本節では、出力変化速度制限によって火力電源が吸収できない残余需要変動成分を吸収し、周波数安定性の維持に貢献する電力貯蔵装置制御を提案する。ここでは特に、第2章で紹介した従来法と同じ短周期(M)および(L)領域の変動を吸収する LFC への電力貯蔵装置の活用を考える。

まずは、火力電源の出力変化速度制限が LFC の性能に与える影響を考察する。図3-1には、周波数制御システムの構成を示している。ここでは、LFC に着目するため、GF、EDC については簡略に示している。同図、右反面は発電プラント、負荷、送電線からなる物理的なシステムを意味し、残りの左反面はプラント制御の

構造を意味している。LFC では、計測された系統周波数の基準値からの偏差 Δf を用いて、需要と供給のインバランス量を推定する。この推定値は地域要求量 (Area Requirement, AR) と呼ばれ、式(3-1)によって計算される。式中、 K_B は系統定数であり、系統の電力-周波数特性を表している。

$$AR(t) = -K_B \Delta f(t) \quad (3-1)$$

LFC では、この AR が 0 に収束するように制御指令 S_0 が生成される。内部構造としては、積分制御もしくは比例積分制御が用いられることが多い。

LFC の対象となる電源では、LFC によって出力を変更できる容量(以下、LFC 調整容量)があらかじめ決められており、その中で出力の調整が行われる。制御指令 S_0 が全電源の LFC 調整容量の総和を超える場合、超過成分は除去される事になる。この操作を式(3-2)に示している。式中、 \bar{S} および \underline{S} は、全 LFC 電源の出力上昇方向、出力減少方向の LFC 調整容量の総和である。

$$S_{UL}(t) = \begin{cases} \bar{S} & (\bar{S} \leq S_0(t)) \\ S_0(t) & (\underline{S} < S_0(t) < \bar{S}) \\ \underline{S} & (S_0(t) \leq \underline{S}) \end{cases} \quad (3-2)$$

この出力上下限に加え、出力変化速度制限が課される。変化速度制限は信号の時間微分量を制限する要素であるため、最終的な LFC 指令値 S_{LFC} の挙動は式(3-4)に示す微分方程式によって与えられる。式中、 \bar{R} および \underline{R} は、全 LFC 電源の上昇方向および減少方向の最大出力変化速度の総和である。このように、LFC では、制御指令値が対象電源の調整容量および最大出力変化速度の総和を超過しない

ように制限を設けている。そのため、制御指令値を各電源に配分する際の比率によっては、出力調整能力を超過する指令を受け取る電源が生ずる恐れがある。LFC 電源の出力調整能力を最大限活用するためには、最大変化速度に応じた LFC 調整容量の確保や、配分比の最適化が必要である。

$$\frac{dS_{LFC}(t)}{dt} = \begin{cases} \bar{R} & \left(\bar{R} \leq \frac{dS_{UL}(t)}{dt} \right) \\ \frac{dS_{UL}(t)}{dt} & \left(\underline{R} < \frac{dS_{UL}(t)}{dt} < \bar{R} \right) \\ \underline{R} & \left(\frac{dS_{UL}(t)}{dt} \leq \underline{R} \right) \end{cases} \quad (3-4)$$

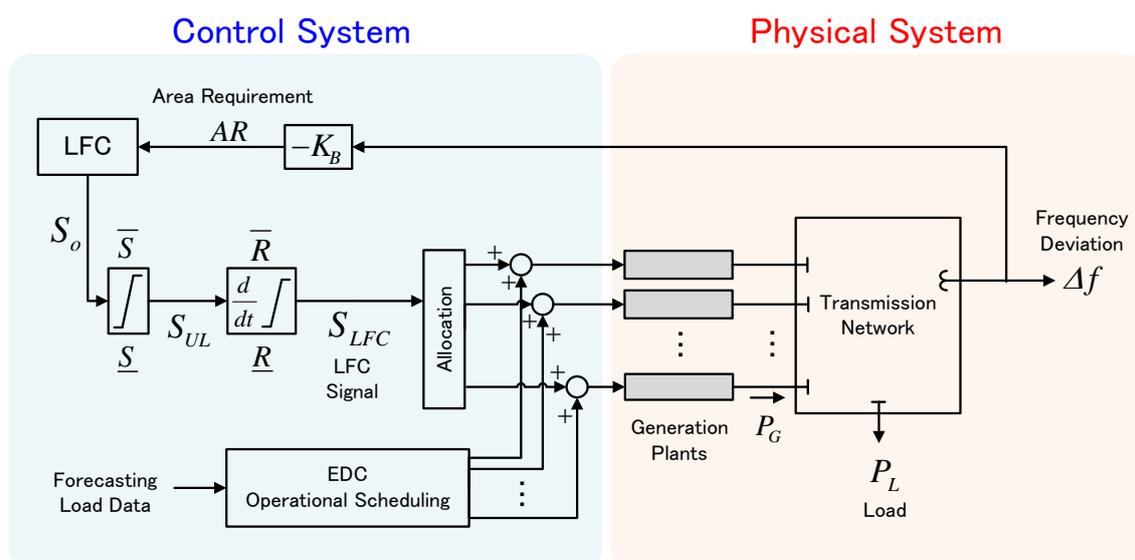


図3-1. 火力電源の出力変化速度による LFC の性能低下

以上のように、LFC 指令値が出力上下限、出力変化速度制限による制限を受けると、電源出力は LFC 指令値に追従できないため、短周期(M)(L)領域の残余需要変動を吸収しきれず、周波数変動の増大を招くことになる。出力上下限は、電源の運用者が LFC による出力調整を許容する範囲を設定しているものであり、増加させることは可能であるが、最大出力変化速度は電源に固有の値であり、それ以上高くすることはできない。LFC 電源の台数を増加させれば、最大出力変化速度の総和を増加させることは可能であるが、自然変動電源が増加していくと、火力電源の台数は減少していくものと考えられるため、現実的ではないと思われる。そこで本研究では、蓄電池を活用して変化速度制限超過成分を補償することで、周波数安定性の向上を図る。提案する活用手法を図3-2に示した。本手法は、式(3-5)に示すように、出力変化速度制限にて除去される LFC 指令値成分を、蓄電池への充放電指令値 $S_{BT,0}$ とするものであり、これにより出力変化速度制限に起因する LFC の性能劣化を防ぐことが可能となる。

$$S_{BT,0}(t) = S_{LFC}(t) - S_{UL}(t) \quad (3-5)$$

蓄電池にも出力の上下限が存在するため、最大充放電電力を P_{BT}^{MAX} とすれば、最終的な蓄電池の充放電指令値 S_{BT} は式(3-6)として表される。

$$S_{BT}(t) = \begin{cases} P_{BT}^{MAX} & (P_{BT}^{MAX} \leq S_{BT,0}(t)) \\ S_{BT,0}(t) & (-P_{BT}^{MAX} < S_{BT,0}(t) < P_{BT}^{MAX}) \\ -P_{BT}^{MAX} & (S_{BT,0}(t) \leq -P_{BT}^{MAX}) \end{cases} \quad (3-6)$$

提案手法では、出力変化速度の不足が無く、LFC がその性能を十分に発揮できている間は蓄電池を動作させず、出力変化速度の不足により LFC の性能が低下したときに、不足分を補償するだけの充放電を実行する。言い換えれば、提案手法は蓄電池を LFC の補助に利用するような手法であるため、本手法をバッテリーアシスト型 LFC(Battery-Assisted LFC, BALFC)と呼ぶこととする。

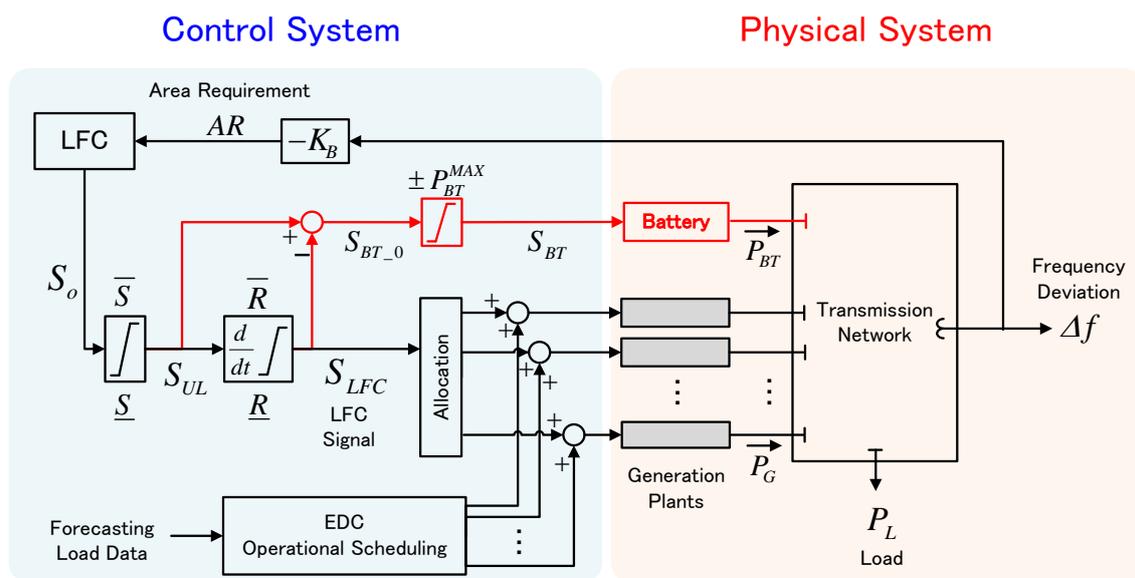


図 3-2. 提案するバッテリーアシスト型 LFC

3.3 提案制御の導入による周波数安定性向上効果

提案するバッテリーアシスト型 LFC の導入による周波数安定性の向上効果を検討するため、時間領域シミュレーションを実施した。提案法の有効性を明確にするため、第2章で紹介した従来手法との比較検討を行う。

3.3.1 評価用モデル

検討に用いた電力系統モデルについて説明する。本検討では、自然変動電源として風力発電が導入された東北地域の電力系統を対象とする。東北地域は風況のよい地域が多く、今後風力発電の大量導入が期待されており、この地域の系統を運用する東北電力(株)では、2020年までに200万kWの風力発電を導入することを目標として掲げている。この目標量は東北地域の需要の約12%程度に相当する。

東北地域の電力系統モデルは、電気学会が公開している標準モデルの一つである EAST30 機系統モデル^[46]を元に構築した。EAST30 機系統モデルを図3-3に示す。本モデルは系統周波数 50[Hz]で運用される東日本の電力系統を、30機の同期発電機とそれらを結ぶ送電線、需要、変圧器などで表現したモデルである。対象とする東北地域のモデルを構築するため、発電機 G1、G2、…、G8 の8台を抽出した。これらの電源を選択したのは、定格容量の合計値が 15500[MW]であり、実際の東北地域の電源の総定格容量である 18000[MW]に近い値となるためである。

続いて、より単純な構成のモデルとするために、以下の2点の仮定を設けた。

(仮定 1) 燃種・発電方式・ボイラの種類が等しい電源同士は、それぞれの容量の和に等しい容量を持つ1台の電源に集約できる

(仮定 2) 送電線での電力損失を無視する

同じタイプの電源同士であっても、定格容量の違いや構成機器の種類の違い等によって、指令値応答、周波数応答は異なると考えられる。このような違いを無視するというのが(仮定 1)である。実際に同タイプのプラント同士での応答比較等を行ったという報告は無いものの、プラントモデルを提案する文献や、各種プラントの制御定数の設定を調査した文献では、燃種、発電方式、ボイラの種類によって分類される場合が多く、このことから類推するに(仮定 1)は概ね妥当であると考えられる。(仮定 1)に基づけば、同じタイプの電源はそれらの定格容量の和に等しい容量を持つ1台の電源としてみなすことができるため、電源台数を低減したモデルを構築できる。また、(仮定 2)について、実際の電力系統では、送電線における電力損失は総発電電力の 5%程度である。この数値は十分小さいとは言えないが、ここでは無視することとした。送電損失を無視するという事は送電線そのものを無視することと等価であり、全ての電源および需要が同一の母線に接続されている状態になる。つまり、(仮定 2)に基づけば、送電ネットワークを無視することができる。

以上2点の仮定のもとで構築したモデルを図 3-4 に示す。電源は4台まで集約し、送電線ネットワークを無視している。東北地域の電力系統と東京地域の電力系統の連系線には、常時、東北から東京に向かって電力潮流が流れている。こ

のため、連系線潮流を負荷として残している。また、自然変動電源として風力発電が導入され、周波数安定化対策として蓄電池が導入される状況を想定する。

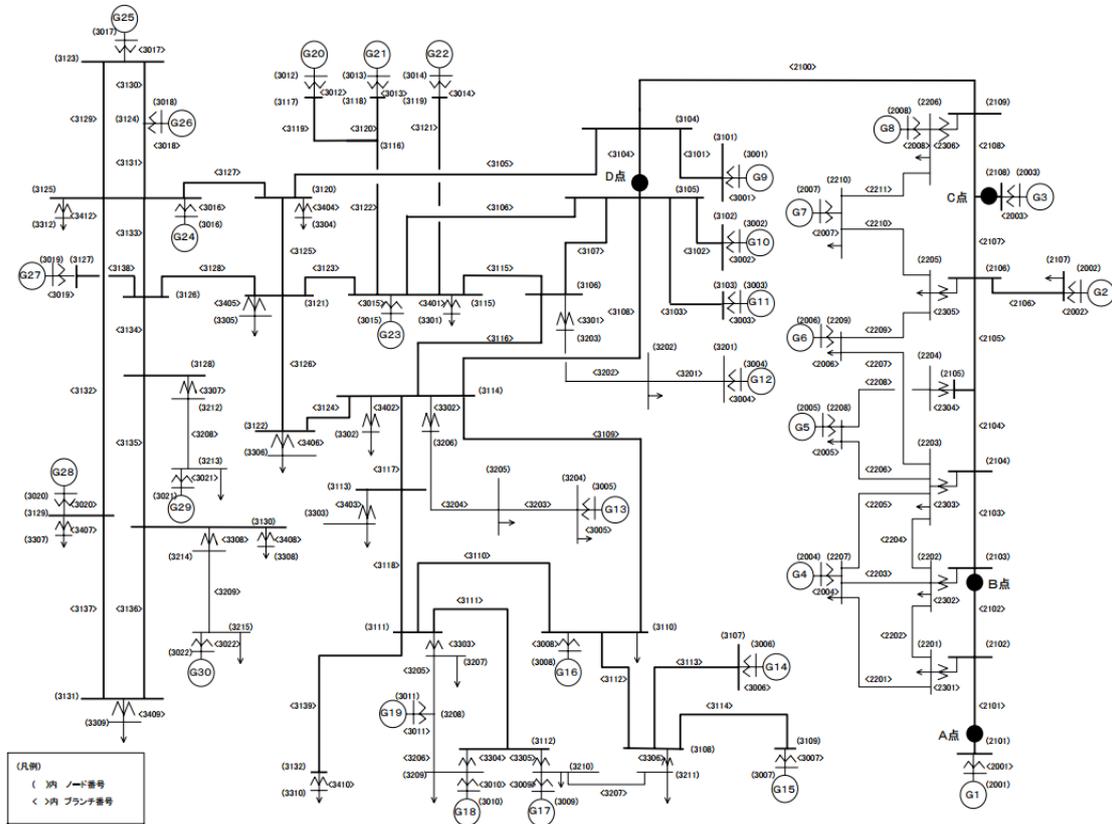


図 3-3. EAST30 機系統モデル[46]

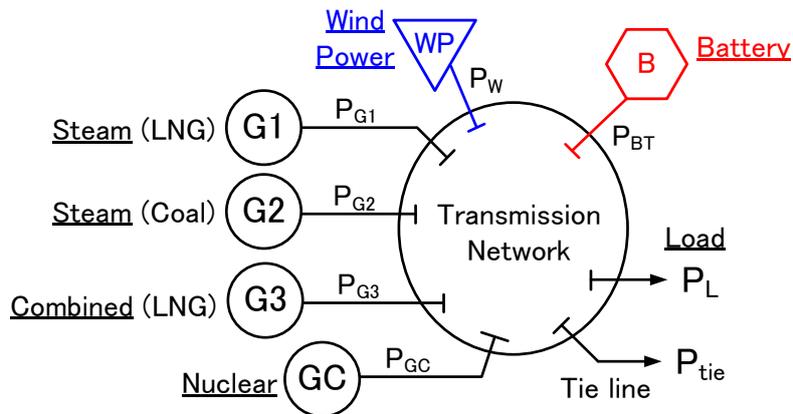


図 3-4. 電力系統モデル

構築したモデルにおける同期発電機および風力発電機の定格容量を表3-1に示す。風力発電の定格容量は東北地域における2020年の導入目標量にほぼ等しい1800[MW]とした。火力電源の容量は標準モデルに基づいて決定した。次に、各電源のLFC調整容量および最大出力変化速度を表3-2に示す。本検討では火力電源G1、G2およびG3をLFCの対象電源としている。同表には、蓄電池の最大充放電電力および最大出力変化速度も示した。電源の最大出力変化速度は、文献[16]を参考に各電源のプラントの特性を考慮して決定した。調整容量については、火力電源の総設備容量の3[%]を各電源が出力変化速度比で確保するものとした。これは、最大出力変化速度の高い電源の性能を十分に活用するためである。蓄電池の最大充放電電力は、東北地域で行われている実証試験で使用されている機器と同じ値に設定した。また、蓄電池の最大出力変化速度に関しては任意に設定しており、10秒間で最低出力から最大出力まで変化できるものとして、その時の速度を最大値とした。

表3-1. 電源パラメータ^[46]

Plant	Type	Rated Capacity
G1	Thermal (Oil/LNG, Steam)	3500 [MW]
G2	Thermal (Coal, Steam)	2700 [MW]
G3	Thermal (LNG, Combined)	3300 [MW]
GC	Nuclear Power	6000 [MW]
WP	Wind Power	1800 [MW]

表3-2. LFC調整容量および出力変化速度の設定^[16]

Plant	Reserve Capacity [MW]	Generation Rate [MW/min]
G1	± 92.5	± 47.3
G2	± 47.5	± 24.3
G3	± 145.0	± 74.3
Battery	± 40.0	± 240.0

図3-5にシミュレーションモデルを示した。本モデルは、負荷 P_L や風力発電出力 P_W の変動に対する周波数 Δf の挙動を解析するモデルとなっている。周波数が変動すると、それを制御量とする周波数制御によって電源の出力が調整される。同図左部のLFCブロックでは、LFC電源への出力指令(LFC指令)と蓄電池の充放電指令が生成される。各電源の最終的な出力指令値は、LFC指令値と、EDC指令値の和として決定される。本検討では、LFCの性能変化の解析を目的としているため、EDCは詳細には模擬しておらず、指令値は一定値とするようなモデルとしている。

図の中央部に位置する火力プラントモデルには、文献[47]で提案されている需給制御シミュレーション用のプラントモデルを使用した。本モデルは出力指令値と周波数偏差を入力とし、発電機の機械入力を出力とするモデルである。周波数偏差を入力信号としているのは、プラントモデル内部にあるガバナへの入力に用いるためである。本検討では、G1およびG3を、GFを行う電源として設定した。モデルの詳細については付録に付すこととする。

また、本シミュレーションモデルの構築において、更に仮定を追加している。それは、系統内の同期発電機が全て同期して運転するという仮定である。同期発電機同士には、同期運転を維持しようとする同期化力が働くため、常時の運用においては全電源が同期運転しているとみなせる。この仮定に基づけば、全発電機は巨大な慣性を持つ1台の等価な発電機としてモデル化することができる。この等価発電機は図中右部のブロックで表している。

蓄電池のモデルについては、出力指令値に対して出力が一次遅れで追従するような単純なモデルとし、充放電効率の考慮や充電電力量の挙動の解析などは含めていない。本検討では、蓄電池のエネルギー容量は十分大きいものとし、充電切れや満充電には至らないものとした。

続いて、図3-6(a)および図3-6(b)に、提案法、従来法を用いた場合のLFCブロックを示す。図3-6(a)に示した提案法の構造は、概ね前節で説明した構造に等しい。異なる点は、蓄電池に出力変化速度制限を設けている点と、積分ブロックにおいてワインドアップを避けるためのアンチワインドアップ制御を付与している点である。図3-6(b)に示した従来法の構造を説明する。従来法は、ARをローパスフィルタを用いて短周期(M)領域の変動成分と短周期(L)領域の変動成分に分離し、前者を応答が速い蓄電池に、後者を応答が遅い火力電源にそれぞれ配分する方法である。これにより火力電源での吸収が困難な需要の短周期変動成分を蓄電池によって吸収できるため、周波数安定性の向上が期待できる。積分制御部の構造は提案法を用いる場合と同様である。モデルのパラメータは表3-3に示した。

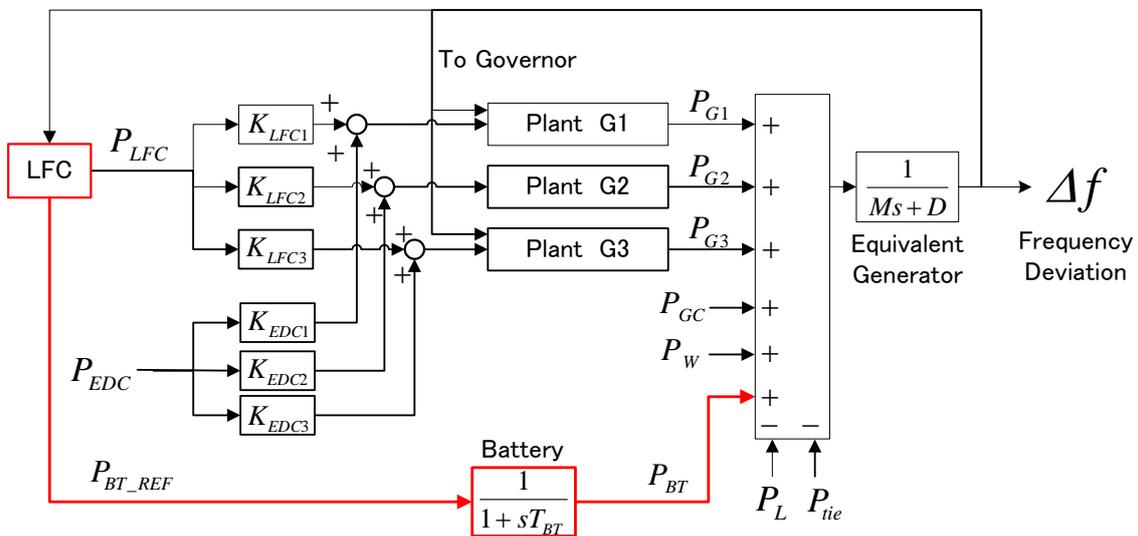
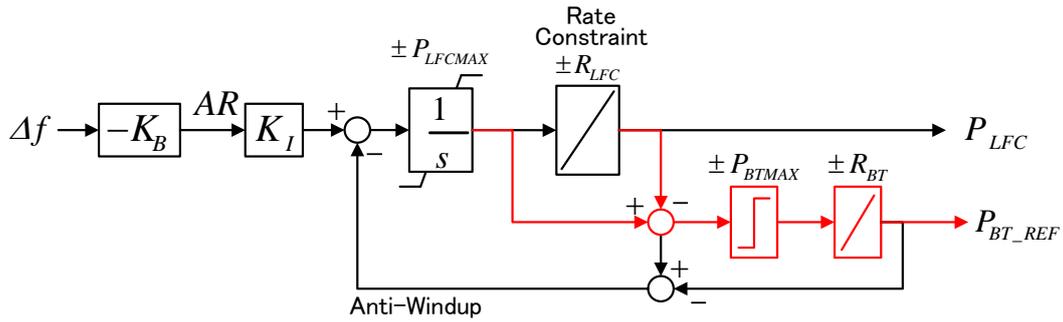
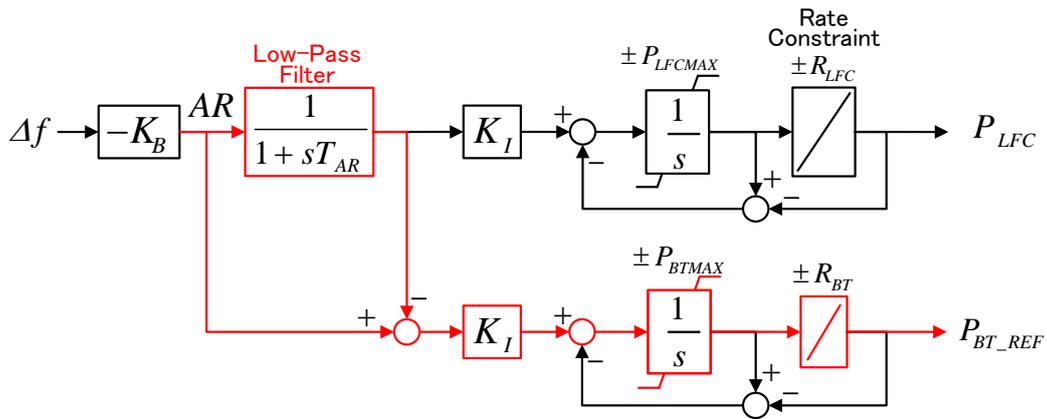


図3-5. シミュレーションモデル



(a)提案法



(b)従来法

図3-6. LFCモデル

表3-3. モデルパラメータ[16][46]

System Frequency	f_0	50.0 [Hz]
Inertia Constant *	M	9.06 [sec· puMW/puHz]
Load Damping Constant **	D	2.00 [puMW/puHz]
LFC Coefficient (Generation Rate Ratio)	K_{LFC1}	0.30
	K_{LFC2}	0.20
	K_{LFC3}	0.50
EDC Coefficient (Capacity Ratio)	K_{EDC1}	0.37
	K_{EDC2}	0.28
	K_{EDC3}	0.35
Integral Gain	K_I	0.01 [1/s]
System Constant *	K_B	7.0 [puMW/puHz]
Battery Time Constant	T_{BT}	5.0 [sec]

*総発電設備容量ベース, **火力電源総発電設備容量ベース

3.3.2 シミュレーション条件

シミュレーションの条件設定について述べる。本シミュレーションでは、負荷変動および風力発電の出力変動の時系列データを入力にし、周波数、発電機出力および蓄電池出力を含む状態変数の挙動を解析する。以下では、シミュレーション時間等の設定、擾乱として用いたデータ、シミュレーションケースについて説明する。

- ・シミュレーション時間：28800[s](=8[h])
- ・計算刻み時間：0.1[s]
- ・負荷変動：

使用した負荷変動データを図3-7に示す。本データは、負荷の変動特性を模擬するために正規乱数に時定数300[s]のローパスフィルタを作用させることで作成している^[48]。

- ・風力発電出力：

シミュレーションで用いた風力発電出力データを図3-8に示す。本データは定格出力150[MW]の風力発電所で計測した出力の1時間データを定格出力1800[MW]の風力発電所の出力へと拡張し、それを8時間分つなぎ合わせることで作成した。拡張する際には、ならし効果による短周期変動成分の減少も考慮している^[48]。

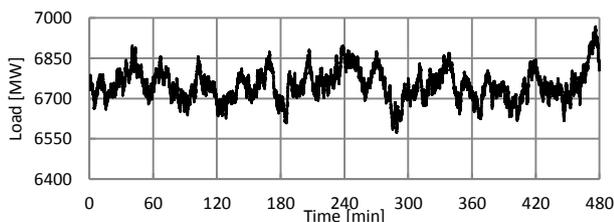


図3-7. 負荷変動データ

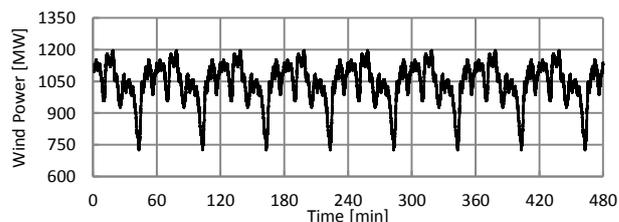


図3-8. 風力発電出力データ

・シミュレーションケース：

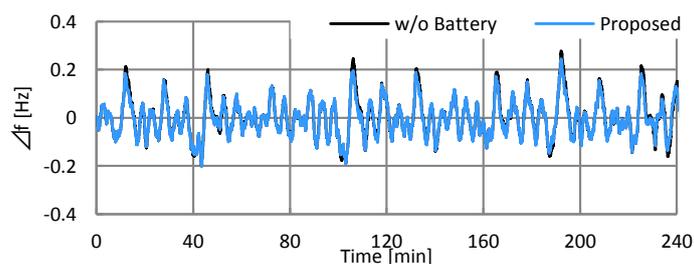
- (1) 【w/o Battery】 : 蓄電池を使用しないケース
- (2) 【Proposed】 : 蓄電池を使用し、提案制御手法を実装するケース
- (3) 【Conventional】 : 蓄電池を使用し、従来制御手法を実装するケース

3.3.3 提案制御手法の周波数安定化能力の評価

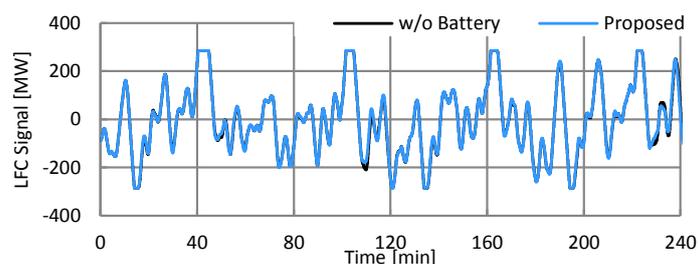
各ケースのシミュレーション結果について説明する。まずは、w/o Battery ケースと Proposed ケースにおけるシミュレーション結果を図 3-10 に示す。ここでは波形を見やすくするために時刻 240[min]までの結果を示している。図 3-10(a)より、周波数変動は提案手法の導入によって減少していることがわかる。各ケースにおける最大、最小値および標準偏差を表 3-4 に示した。全ての指標において減少が見られ、提案法の導入によって周波数変動の抑制が可能であることが分かる。特に最大値の減少幅が大きく、13.6[%]の低減効果が得られた。一方で、最小値についてはほとんど変化が見られなかった。この理由については後述する。続いて、図 3-10(b)に LFC 指令値を示す。こちらは蓄電池の導入前後で大きな違いは見られない。これは、提案手法では電源が追従できない指令値成分のみを蓄電池で補償するため、電源自体の挙動が大きく変化しないことが要因になっていると考えられる。図 3-10(c)には蓄電池出力を示しており、蓄電池が断続的に充放電を行っていることが確認できる。

周波数変動の最大値と最小値とで蓄電池の導入による抑制効果に差が出た理由を考察する。表 3-4 より、w/o Battery ケースにおける最大値と最小値の絶対値を比較すると、最大値の方が大きい。提案制御手法では、電源の指令値追従性が低下して周波数変動が増大する時間帯で蓄電池を動作させるため、絶対値の大きい最大値の抑制効果が高くなったものと考えられる。一方、最小値では周波

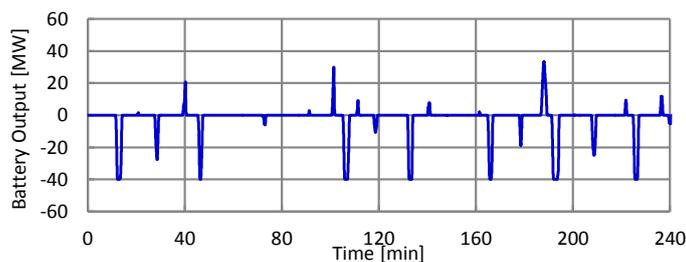
数変動が比較的小さいことから、蓄電池があまり動作せず、抑制効果が得られなかったと考えられる。このように、提案制御手法では周波数変動の大きさに応じて適切な充放電が行われるため、蓄電池の動作を必要最小限に止め、エネルギー効率の向上への貢献が期待できる。この点については次節で詳細に検討を行う。



(a)周波数



(b)LFC 指令値



(c)蓄電池出力

図 3-10. シミュレーション結果(w/o Battery、Proposed)

最後に、提案手法によって抑制される周波数変動成分を明らかにするため、スペクトル解析を実施した。図 3-11 に周波数変動のパワースペクトルを示す。提

案手法は蓄電池を用いて LFC の支援を行うような構造となっているため、LFC の対象領域である数分から十数分の周期成分が大きく抑制されていることが確認できる。特に 16 分付近の比較的長い周期の変動成分において抑制効果が高い。これは、負荷変動に含まれる長周期成分にも出力変化速度制限を超過する成分が含まれている事を示しており、提案法の有用性を表す結果として見る事ができる。

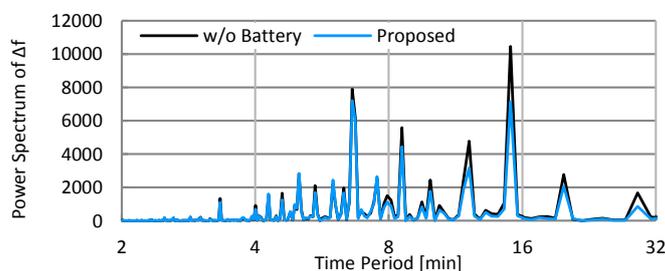


図 3-11. 周波数変動のパワースペクトル(w/o Battery、Proposed)

表 3-4. 周波数偏差の最大、最小値及び標準偏差

	w/o Battery	Proposed
max. [Hz]	0.3348	0.2894 (-13.6%)
σ [Hz]	0.0817	0.0751 (-8.1%)
min. [Hz]	-0.2013	-0.2012 (-0.0005%*)

*絶対値の変化率

3.3.4 従来手法との比較検討

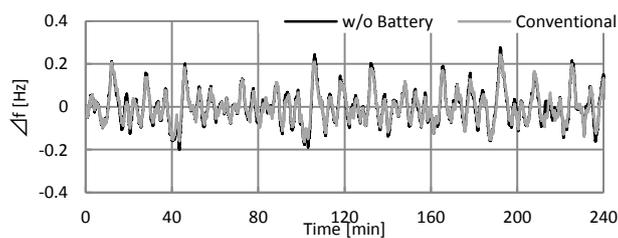
次に、提案法と従来法の周波数安定化能力を比較する。図 3-12 に Conventional ケースのシミュレーション結果を示す。図には適宜比較用として w/o Battery ケースもしくは Proposed ケースの結果も合せて表示している。図 3

図 3-12(a)に示した周波数偏差の時間変化より、従来法を導入した場合も周波数変動の抑制が可能であることが分かる。表 3-5 に全ケースの周波数変動の標準偏差、最大値、最小値をまとめた。従来法では提案法と異なり、最大値だけでなく最小値も抑制されており、その抑制幅も 0.03[Hz]程度で概ね等しくなった。これは、従来法では蓄電池が常時動作しており、提案法のように周波数変動の大きさによって蓄電池動作に違いがでることが無いためであると考えられる。しかしながらこの場合、最大値の絶対値は最小値に比べ大きいため、周波数を基準値近傍に維持するという周波数制御の目的を達成するには、最大値の抑制を優先すべきである。その点、提案法は最大値の抑制効果が高いため、従来法よりも有用である。

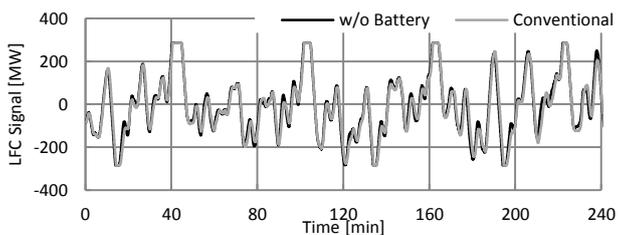
図 3-12(b)には LFC の指令値を示した。従来法では、LFC の電源に AR の長周期成分が配分されるため、LFC 指令値は短周期成分が除去されたような波形となっている。分離された AR の短周期成分は蓄電池に配分されるため、図 3-12(c)に示すように蓄電池は短周期的な充放電を持続的に行う。提案法における充放電電力と比較すると、提案法では充放電頻度が極めて低いことが分かる。蓄電池における充放電には、エネルギー変換に伴う損失が発生するため、充放電頻度が低いことは損失が少ないことを意味する。また、動作頻度が少なければ、蓄電池そのものの劣化も抑えることができる。

以上より、提案法は従来法と比較して周波数変動を基準値近傍に維持する能力に長けている上に、蓄電池の充放電頻度も少なくなるため、周波数安定化用蓄電池に適した制御手法であると考えられる。

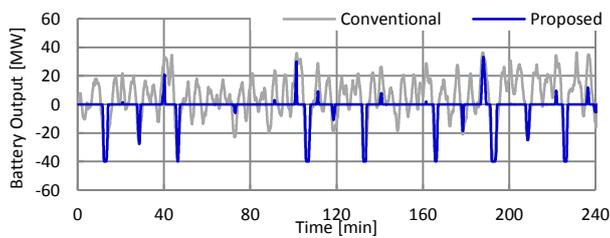
最後に、従来法と提案法における周波数変動抑制領域の違いを確認するため、前項と同様にスペクトル解析を行った。



(a)周波数



(b)LFC 指令値



(c)蓄電池出力

図 3-12. シミュレーション結果(Proposed、Conventional)

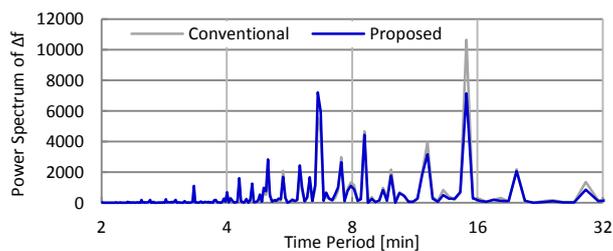


図 3-13. 周波数変動のパワースペクトル(Proposed、Conventional)

表 3-4. 周波数偏差の最大、最小値及び標準偏差(*絶対値の変化率)

	w/o Battery	Proposed	Conventional
max. [Hz]	0.3348	0.2894 (-13.6%)	0.3063 (-8.5%)
σ [Hz]	0.0817	0.0751 (-8.1%)	0.0747 (-8.6%)
min. [Hz]	-0.2013	-0.2012 (-0.0005%*)	-0.1669 (-17.0%*)

3.3.5 提案法有効性の出力変化速度への依存性

提案するバッテリーアシスト型 LFC では、出力変化速度を超過した指令値成分を蓄電池が補償するため、性能は出力変化速度に大きく依存する。出力変化速度は、LFC 調整容量を確保する LFC 電源の台数や種類によって変わりうる値であるため、周波数安定化能力の出力変化速度への依存性を明らかにしておく必要がある。そこで、出力変化速度を一定の割合で変化させて、周波数変動や蓄電池出力への影響を解析した。

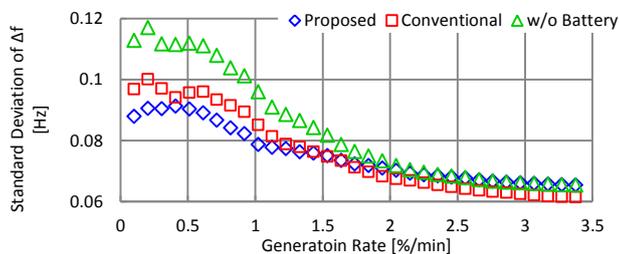
具体的には、表 3-2 に示した発電機 G1、G2 および G3 の出力変化速度を中心に、0.1%刻みで増減させながら時間領域シミュレーションを繰り返し行った。その他の条件は変えていない。

図 3-14(a)には出力変化速度と周波数の標準偏差の関係を示した。傾向として、出力変化速度が上昇すると周波数変動が低減されることがわかる。従来法と提案法の結果を比較すると、出力変化速度が高い領域では従来法の方が周波数の標準偏差が小さく、逆に出力変化速度が低い領域では提案法の方が周波数変動が小さいことが分かる。これは、出力変化速度が高いと、提案法では蓄電池がほとんど動作せず、周波数安定化能力に変化が現れないためである。逆に、出力変化速度が低い領域では、提案法は蓄電池を頻繁に動作させるため、その分周波数変動抑制効果も高まったと考えられる。これは、図 3-14(b)に示した蓄電池出力の標準偏差と出力変化速度との関係にも表れている。また、提案法と異なり、従来法では蓄電池出力の標準偏差は出力変化速度によらずほぼ一定となっていることもわかる。以上より、提案法の有効性は出力変化速度に強く依存しており、出力変化速度が一定の値よりも高い場合は、従来法を用いる方が高い周波数安定化能力を得られることが分かった。

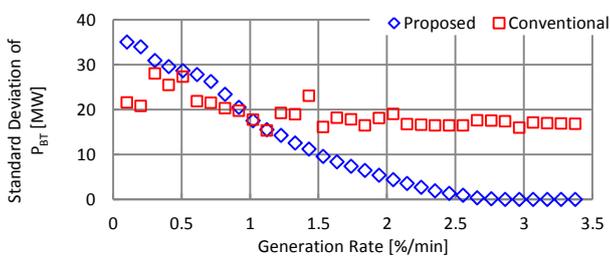
続いて、各手法のエネルギー効率の比較を行った。これは、蓄電池は充放電の際にエネルギー損失を伴うため、導入により得られる効用の大小だけでなく、損失の大小も併せて評価する必要があるためである。そこで、本検討では、以下の式で定義する効率係数 C_η を用いて、提案手法と従来手法のエネルギー効率の比較を行った。

$$C_\eta = \frac{\sigma_{f \text{ No Battery}} - \sigma_{f_i}}{\sigma_{BT_i}} \quad (i = \text{Proposed, Conventional}) \quad (3-7)$$

効率係数 C_η は、蓄電池の導入によって得られた周波数変動の標準偏差の減少幅を、蓄電池出力の標準偏差で除した値として定義している。充放電に伴うエネルギー損失は、蓄電池の出力が大きいほど、また、動作頻度が高いほど大きくなるため、蓄電池出力の標準偏差と等価的であると考えた。この考えの下では、効率係数 C_η は単位損失あたりの周波数変動抑制効果を表しており、エネルギー効率の評価指標として用いることができる。図3-14に示したデータを用いて算出した効率係数 C_η を図3-15に示す。本図より、出力変化速度が著しく高い場合と低い場合を除けば、提案法の方が C_η が大きいことが分かる。したがって、提案法と従来法で同等の周波数変動抑制効果を得る場合、提案法の方が損失を抑えることができるため、エネルギー効率が高いことが分かった。



(a) 周波数変動の標準偏差と出力変化速度の関係



(b) 蓄電池出力の標準偏差と出力変化速度の関係

図 3-14. 提案法有効性の出力変化速度への依存性

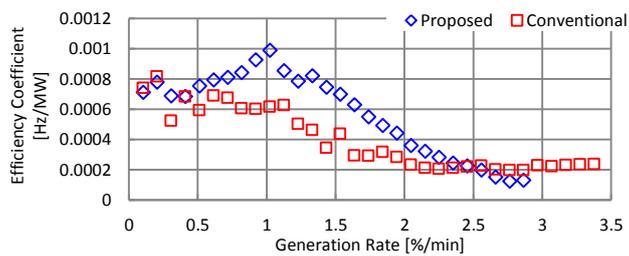


図 3-15. 効率係数 C_η を用いたエネルギー効率の比較

3.4 記述関数法に基づく提案制御の安定性解析

システムの構造変化は、システムの安定性に影響を与える。本節では、提案するバッテリーアシスト型LFCの導入によるシステムの構造的変化が安定性に与える影響を解析する。安定性解析手法として、ここでは固有値解析を用いる。しかしながら、提案法は非線形要素である出力変化速度制限に基づいた手法であるため、直接固有値を計算することはできない。そこで、記述関数法を用いてシステムの線形近似を行った後、固有値解析により安定性を評価する。

3.4.1 記述関数法による変化速度制限要素および上下限要素の線形化

記述関数法とは、非線形要素を線形要素として扱えるように等価的な伝達関数を求める方法である^{[49][50][51]}。今、入力 $x(t)$ 、出力 $y(t)$ の非線形要素を考える。入力 $x(t)$ を式(3-18)に示すようなある振幅 A 、角周波数 ω を持つ正弦波振動とすると、出力 $y(t)$ も同じ角周波数を持つ周期信号になると考えられる。出力 $y(t)$ のフーリエ級数展開は式(3-19)のように示される。ここで a_k 、 b_k はフーリエ係数であり、式(3-20)、式(3-21)で示される。

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (3-18)$$

$$y(t) = f(x(t)) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \sin(k\omega t) + b_k \cos(k\omega t)) \quad (3-19)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(A \sin(\omega t)) \sin(k\omega t) d\omega t \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (3-20)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(A \sin(\omega t)) \cos(k\omega t) d\omega t \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (3-21)$$

入力は直流成分を持たない正弦波信号であり、出力も性質を維持すると仮定すれば、直流成分 a_0 はゼロである。また、基本波成分に対して高調波成分は十分小さいとすれば、出力 $y(t)$ は式(3-22)に示されるように基本波成分だけで表すことができる。

$$y(t) = a_1 \sin(\omega t) + b_1 \cos(\omega t) = B \sin(\omega t + \phi) \quad (3-22)$$

$$B = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad , \quad \phi = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (3-23)$$

式(3-18)及び式(3-22)より、非線形要素の入出力関係は式(3-24)のように書くことができ、このときの $N(A, \omega)$ が記述関数である。

$$Y(j\omega) = \frac{B}{A} e^{j\phi} X(j\omega) = N(A, \omega) X(j\omega) \quad (3-24)$$

$$|N(A, \omega)| = \frac{B}{A} \quad , \quad \text{arg } N(A, \omega) = \phi \quad (3-25)$$

ただし、

$$Y(s) = L[y(t)] \quad , \quad X(s) = L[x(t)] \quad (3-26)$$

である。ここで注意したいのは、記述関数が周波数伝達関数として得られており、正弦波入力に限った場合の伝達特性を意味しているという点である。

○変化速度制限ブロックの記述関数

対象とする変化速度制限ブロックを図 3-16 に示す。変化速度の制限値は R [1/s]とした。入力 $x(t)$ を式(3-18)に示した振幅 A 、角周波数 ω の正弦波信号とすると、出力は図 3-17 に示すような信号となる。出力 $y(t)$ は式(3-27)およびのように表記される。

$$y(t) = \begin{cases} \frac{R}{\omega}(\omega t) + \frac{R(2\varphi - \pi)}{2\omega} \quad , (2n\pi \leq \omega t + \varphi < (2n+1)\pi) \\ -\frac{R}{\omega}(\omega t) - \frac{R(2\varphi - 3\pi)}{2\omega} \quad , ((2n+1)\pi \leq \omega t + \varphi < 2(n+1)\pi) \end{cases} \quad (3-27)$$

ただし、

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{R\pi}{2\omega A} \quad (3-28)$$

である。この出力信号 $y(t)$ についてフーリエ係数を計算し、式(3-22)、式(3-23)に基づいて式(3-29)に示す記述関数を算出した。

$$\begin{cases} |N_{RT}(A, \omega)| = \frac{4R}{\pi\omega A} \\ \arg N_{RT}(A, \omega) = -\tan^{-1} \sqrt{\frac{4\omega^2 A^2}{R^2 \pi^2} - 1} \end{cases} \quad (3-29)$$

式(3-29)より、制限速度 R とゲインは比例関係にある。また、 R が大きくなると遅れは小さくなるという性質も確認できる。これらから、記述関数は変化速度の制限値の変化による出力信号の変化を捉えられているものと考えられる。

得られた記述関数の妥当性を時間領域シミュレーションによって確認した。入力信号の振幅を A 、角周波数を $2\pi/600[\text{rad/s}]$ とし、変化速度の制限値 R を $0.5[1/\text{s}]$ としたときの、記述関数を用いて出力信号を計算した結果を図 3-18 に示した。本図より、非線形要素の出力と記述関数を用いて計算した出力信号はおおむね一致しているが、誤差は大きいところで 15%程度まで上った。

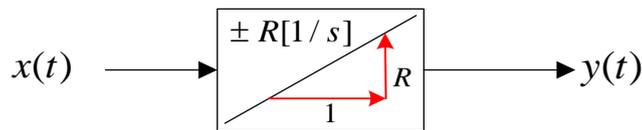


図 3-16. 変化速度制限ブロック

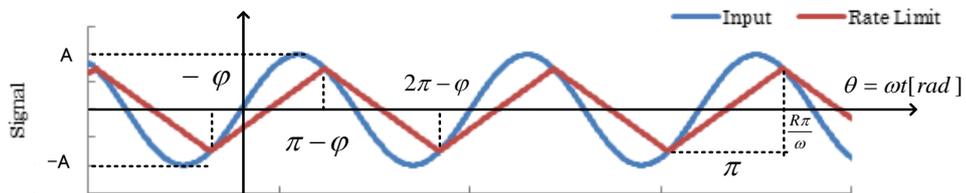
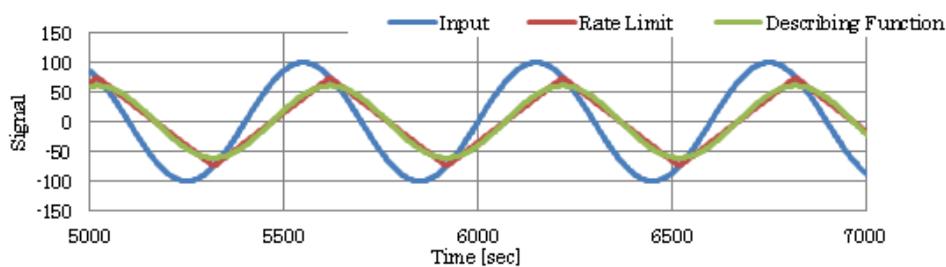
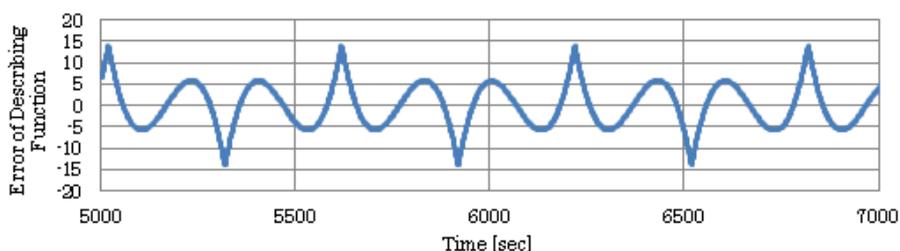


図 3-17. 変化速度制限ブロックの入出力信号



(a)変化速度制限ブロックの出力応答



(b)線形近似によって生じた誤差

図3-18. 記述関数法による変化速度制限ブロックの線形近似

○上下制限要素の記述関数

次に上下制限に関して同様の手続きによって記述関数を求めた。対象とする上下制限ブロックを図3-19に示す。本ブロックは、入力信号 $x(t)$ が制限値 $\pm P$ を超える際に、出力を上下制限 P に固定する。正弦波入力に対する応答を図3-20に示す。出力信号 $y(t)$ は式(3-30)のように表現できる。本式に対してフーリエ係数を求め、記述関数を計算すると、式(3-31)のように求まった。本式より、上下制限は比例要素として表現でき、遅れがないことがわかる。また、記述関数には角周波数 ω が含まれておらず、入力の振幅 A にのみ依存することがわかる。

記述関数より求めた上下制限の出力信号 $y(t)$ を図3-21に示す。本図より、記述関数では、入力信号の振幅が低下したような波形となっており、また、制限値 P を超過するような信号となった。

$$y(t) = \begin{cases} P & (2n\pi + \varphi \leq \theta < (2n+1)\pi - \varphi), (n = 0, 1, \dots) \\ A\sin(\omega t) & (n\pi - \varphi \leq \theta < n\pi + \varphi), (n = 1, 2, \dots) \\ -P & ((2n-1)\pi + \varphi \leq \theta < 2n\pi - \varphi), (n = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (3-30)$$

$$\begin{cases} |N(A, \omega)| = \frac{2}{\pi} \left(\sin^{-1} \frac{P}{A} + \frac{P\sqrt{A^2 - P^2}}{A^2} \right) \\ \arg N(A, \omega) = 0 \end{cases} \quad (3-31)$$

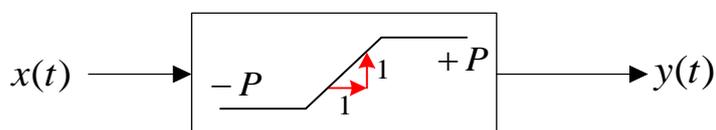


図3-19. 上下制限ブロック(飽和特性)

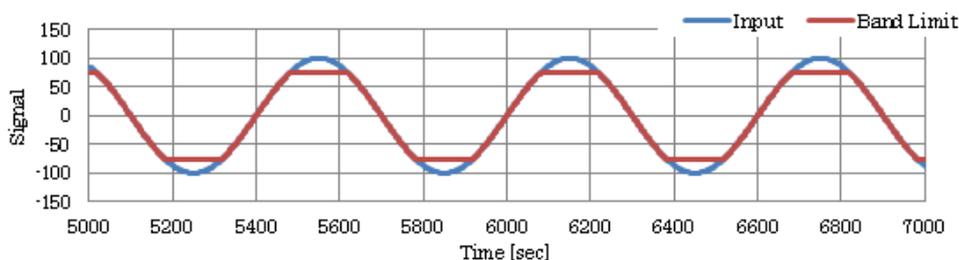
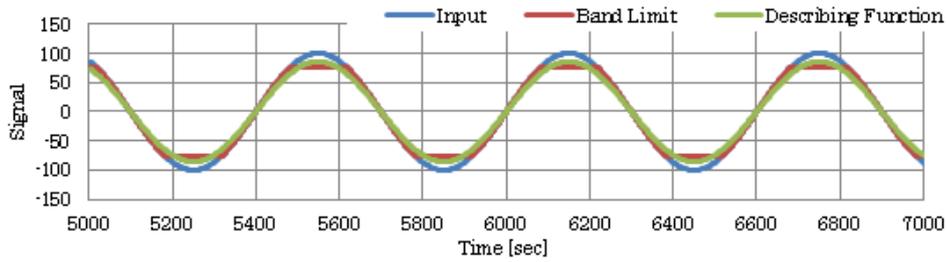
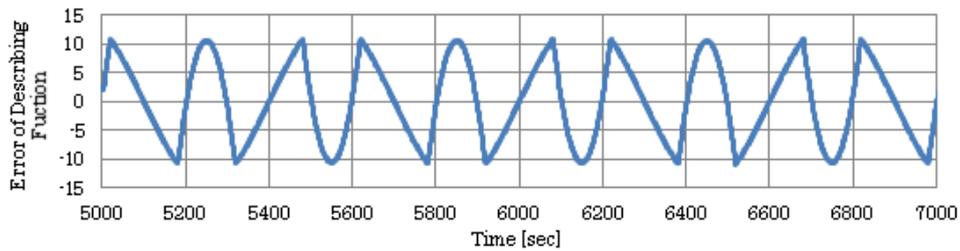


図3-20. 変化幅制限ブロックの出力信号



(a)変化幅制限ブロックの出力応答



(b)線形近似によって生じた誤差

図 3-21. 記述関数を用いて算出した上下制限ブロックの出力信号

○非線形要素の線形要素への近似

以上で求めた変化速度制約の伝達関数は、周波数伝達関数となっており、そのままの形では、 s 領域で表現されたシステムに組み込むことができない。そこで本章では、変化速度制限の記述関数を s 領域の伝達関数で近似する。

式(3-29)より、変化速度制限の記述関数は、信号の大きさを減衰させ、位相を遅らせる性質を持っており、この点は一次遅れ要素に似ている。そこで、変化速度制限を図 3-22 に示すような一時遅れ要素で近似することを試みた。方法としては、一次遅れの係数 K および時定数 T を調整し、ゲインおよび位相を記述関数のものと同じになるように設計した。一次遅れ要素のゲインおよび位相は以下の式(3-32)で示される。

$$\begin{cases} \text{ゲイン: } |G(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \\ \text{位相: } \arg G(j\omega) = -\tan^{-1} \omega T \end{cases} \quad (3-32)$$

式(3-29)及び式(3-32)より、記述関数と一次遅れ要素のゲイン、位相が等しくなるような K_{RT} および T_{RT} は式(3-33)のように求まる。

$$\begin{cases} K_{RT} = \frac{8}{\pi^2} \\ T_{RT} = \sqrt{\frac{4A^2}{R^2\pi^2} - \frac{1}{\omega^2}} \end{cases} \quad (3-33)$$

近似した一次遅れ要素の入力 $x(t) = A\sin(\omega t)$ に対する応答を図 3-23 に示す。記述関数と一次遅れ要素の応答はよく一致していることがわかる。本章以降、変化速度制限は(3-33)式で示される一次遅れ要素として扱うことにする。

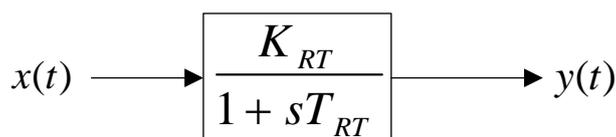
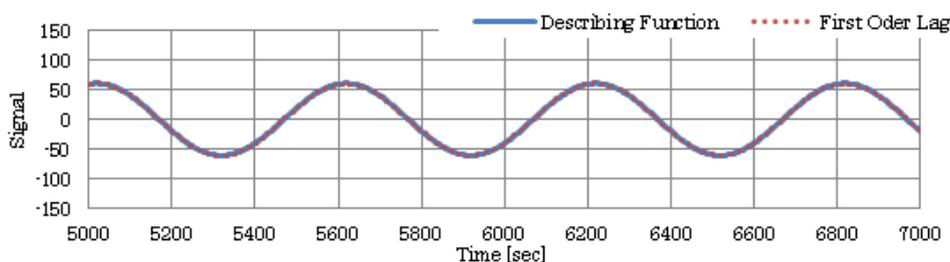
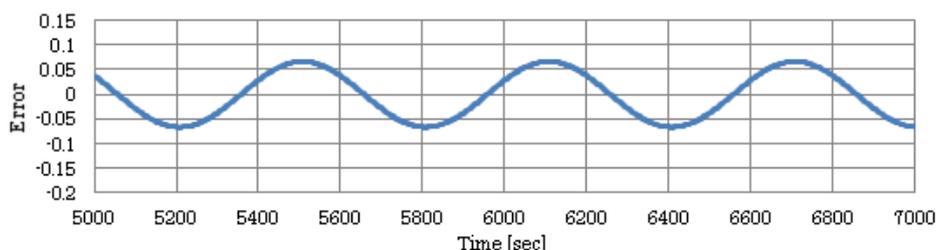


図 3-22. 一次遅れ要素



(a)等価伝達関数と一次遅れ要素の応答



(b)近似誤差

図 3-23. 等価伝達関数とそれを近似した一次遅れ要素の応答比較

3.4.2 線形化システムモデルを用いた提案手法の安定性評価

本節では、前節で求めた変化速度制限要素および上下限要素の等価伝達関数によって周波数制御システムを線形化し、固有値解析によって提案法及び従来法の安定性解析を行った。

○周波数制御システムの線形化

図 3-24 に解析対象とする周波数制御システムモデルを示す。ここでは、前節で用いたものよりも単純なモデルを使用する。これは、元モデルでは電源の出力変化速度制限、電源と蓄電池の出力上下限以外にも多くの非線形要素が含まれており、これら全てを線形近似すると、近似精度が著しく悪化する恐れがあるためである。モデルのパラメータは表 3-5 に示した。

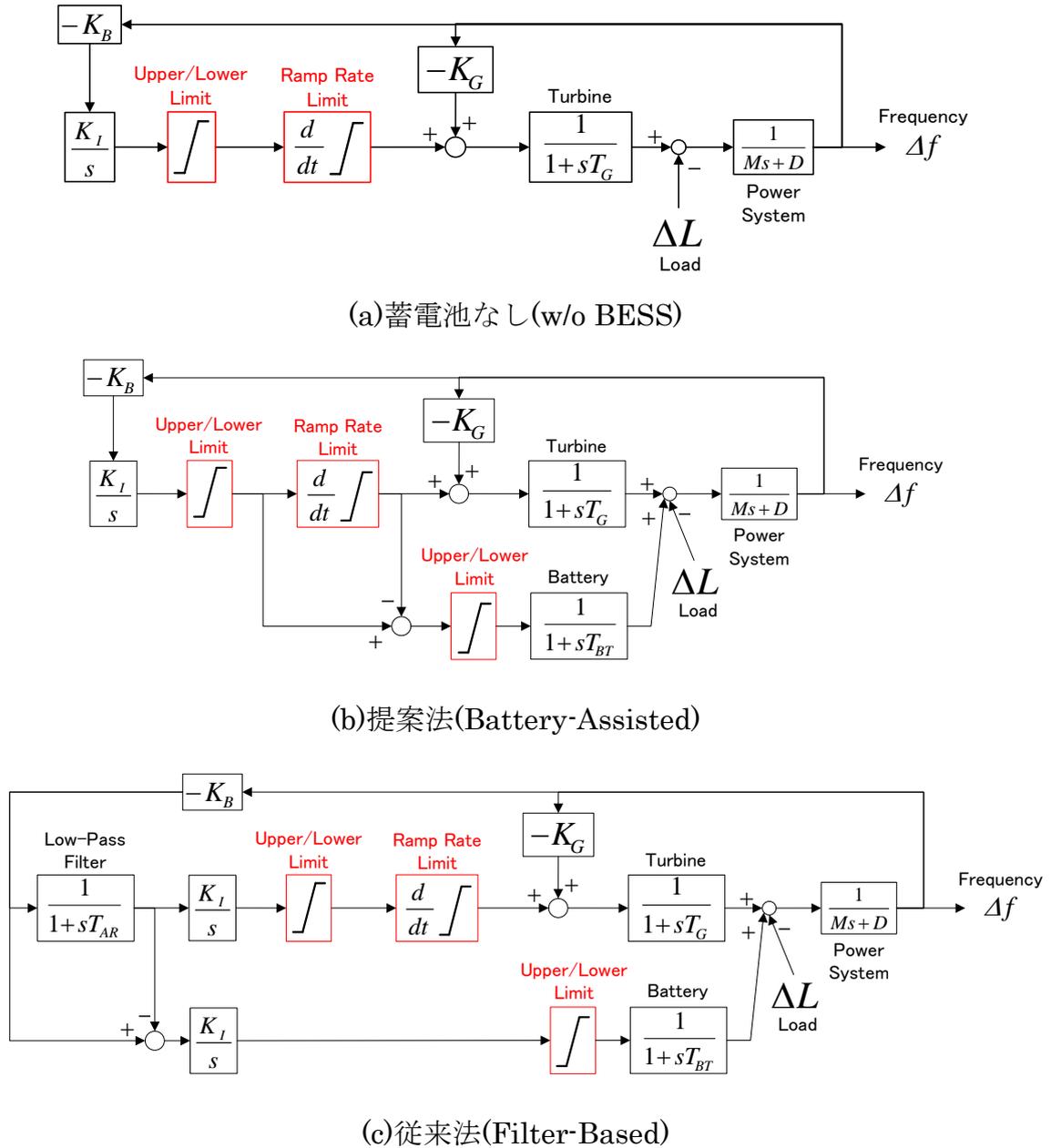
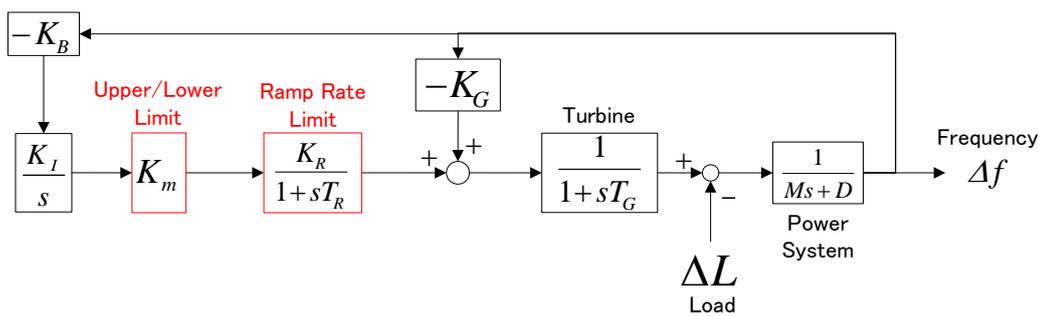
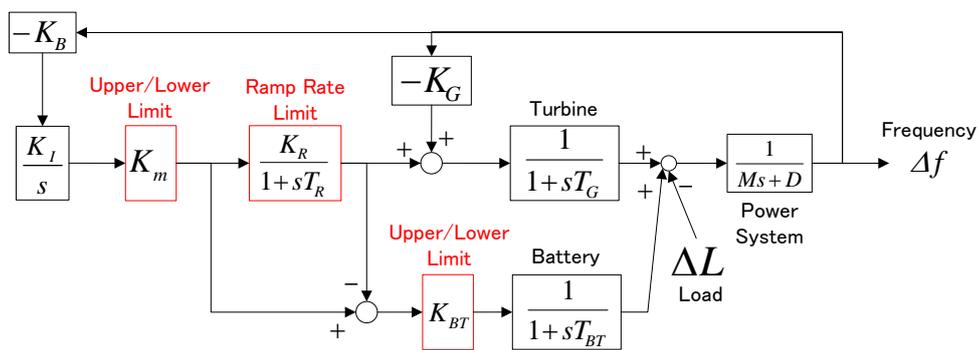


図 3-24. 固有値解析の対象とする周波数制御システムモデル

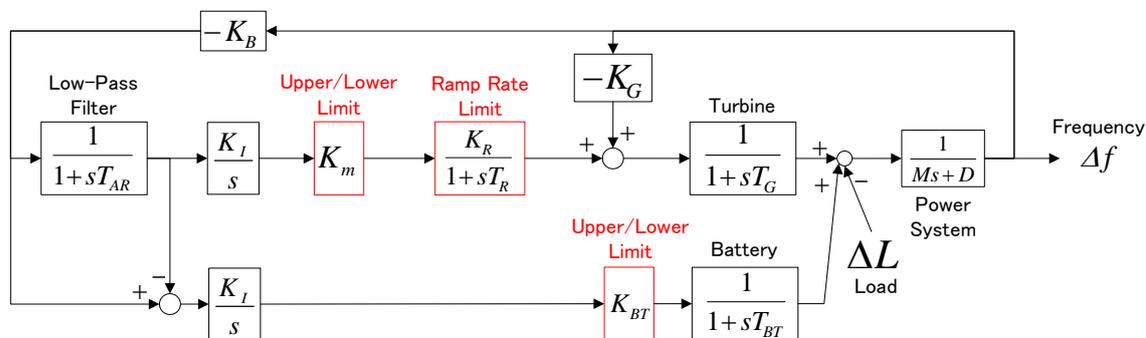
図 3-24 のモデルにおいて、前節の計算結果に従って上下限要素を比例要素に、変化速度制限を一次遅れに近似すると、図 3-25 に示すモデルが得られる。線形要素のみのシステムでは、ワインドアップ現象は起こらないため、本モデルではアンチワインドアップ制御は除いている。



(a)蓄電池なし(w/o BESS)



(b)提案法(Battery-Assisted)



(c)従来法(Filter-Based)

図 3-25. 線形化した周波数制御システムモデル

表 3-4. 安定性解析用モデルのパラメータ [16][46]

Inertia Constant M	9.00 [puMW · s/puHz]
Load Characteristic Constant D	2.00 [puMW/puHz]
Governor Gain K_G	12.5 [puMW/puHz]
System Constant K_B	14.5 [puMW/puHz]
Integral Control Gain K_I	0.04 [1/s]
Turbine Time Constant T_G	9.00 [s]
Battery Time Constant T_B	0.10 [s]
Time Constant of LPF T_{AR}	20.0 [s]

線形化したモデルを用いて、システム行列から固有値計算を行った。近似要素のゲイン及び時定数の計算には、前節で導いた数式を用いることが望ましいが、システムへの入力信号である負荷変動 ΔL を正弦波信号とした場合の各要素の入力信号の振幅を求めることは難しく、該当式の適用は困難である。そこで本検討では、それらのパラメータを適当な範囲内で変化させて、各制限要素がシステムの安定性に与える影響を解析することとする。

○蓄電池を導入しない場合の周波数制御システムの安定性

まずは、図 3-25(a)に示した蓄電池を導入していないケースで、制限要素がシステムの安定性に与える影響を解析する。各要素の線形化要素のパラメータ設定について述べる。上下限要素は、入力信号が制限値を超過しない場合、ゲインは1となり、制限値が小さくなるにつれてゲインも低下する。最小値は0である。変化速度制限要素は、入力信号が制限にかからない場合、ゲインが1、時定数が0となり、最大変化速度が小さくなるとゲインは低下し、時定数は大きくなる。式(3-29)より、ゲインの最小値は0よりも大きい一定の値となる。本検討では以上を踏まえ、以下の3ケースで安定性解析を実施した。

(K_m ケース)

- ・線形化 LFC 上下限要素のゲイン K_m を 1 から 0.5 まで 0.1 刻みで変化
- ・ゲイン K_r は 1、時定数 T_r は 0.01[s]

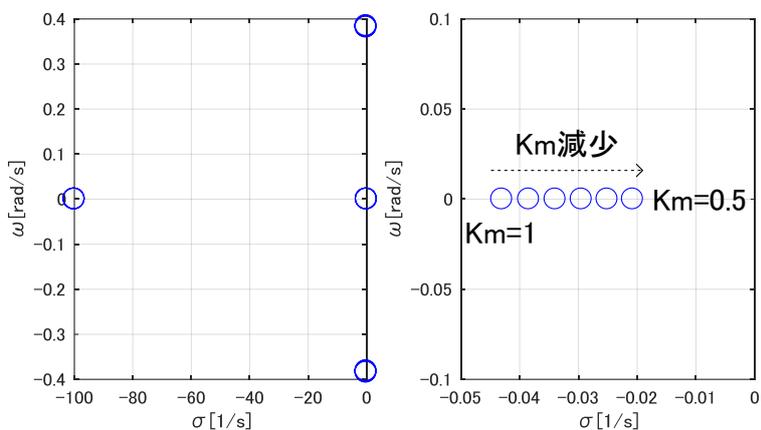
(K_r ケース)

- ・線形化出力変化速度制限要素のゲイン K_r を 1 から 0.5 まで 0.1 刻みで変化
- ・ゲイン K_m は 1、時定数 T_r は 0.01[s]

(T_r ケース)

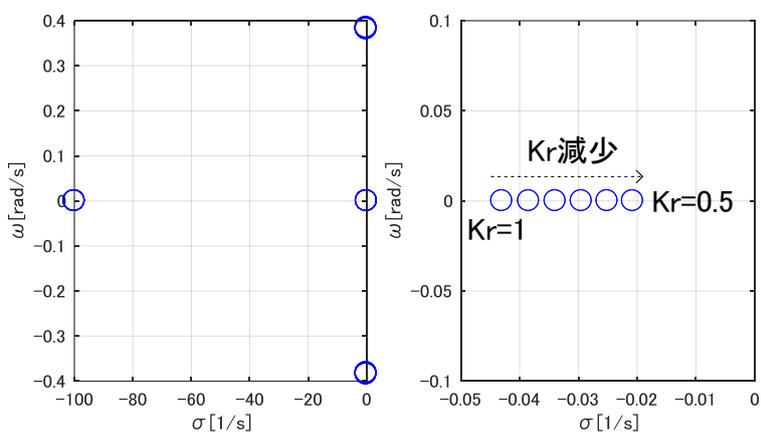
- ・線形化出力変化速度制限要素の時定数 T_r を 5[s]から 30[s]まで 5[s]刻みで変化
- ・ゲイン K_r および K_m は 1

図 3-26 は計算した固有値を複素平面上にプロットしたものである。同図より、まず、計算した固有値の実部は全て負となり、各制限要素によってシステムが不安定化することはないことが分かった。以下では、パラメータ変化に対する固有値の推移に着目し、安定性の変化について論じる。図 3-26(a)、(b)、(c)、(d)より、ゲイン K_r および K_m の変化に対して固有値は同様の変化を示しており、最も虚軸に近い固有値はゲインが減少すると虚軸に近づき、ダンピングが悪化している。これは、上下限要素の制限値が小さくなると周波数変動が増大する事を意味しており、現実の現象と合致した結果である。また、図 3-26(e)、(f)より、時定数 T_r が長大化すると、虚軸に最も近い固有値のダンピングは悪化し、また、途中から振動モードになる。以上のように、上下限、変化速度制限が厳しくなると、システムの安定性は低下する。



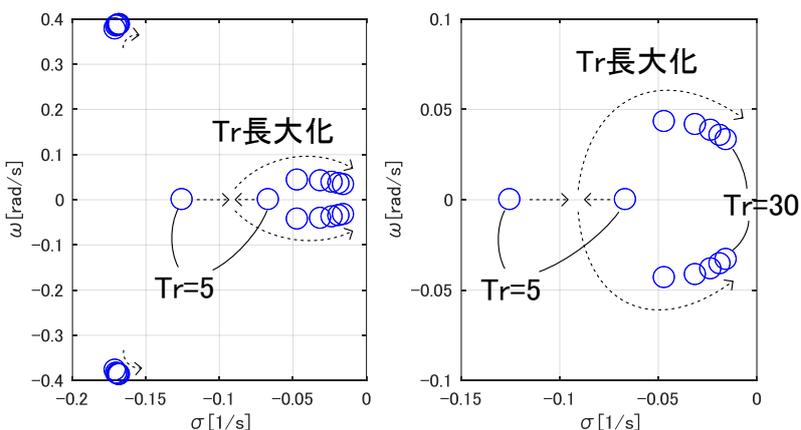
(a) K_m ケース

(b) K_m ケースの減衰が最も悪い固有値



(c) K_r ケース

(d) K_r ケースの減衰が最も悪い固有値



(e) T_r ケース

(f) T_r ケースの減衰が最も悪い固有値

図 3-26. 非線形要素が周波数制御システムの安定性に与える影響

○蓄電池導入時の周波数制御システムの安定性

続いて、蓄電池を導入した場合の安定性解析を行う。解析は以下の3ケースで実施した。

(調整容量充足ケース)

- ・LFC容量、出力変化速度、蓄電池容量が十分にある場合を想定
- ・ゲイン K_m 、 K_r および K_{bt} が 1、時定数 T_r が 0.1[s]

(変化幅不足ケース)

- ・LFC容量のみが不足するケース： K_m を 0.8 に設定
- ・他のパラメータは調整容量充足ケースに倣う。

(変化速度不足ケース)

- ・電源の出力変化速度が不足するケース： $K_r=0.8$ 、 $T_r=30$ [s] に設定
- ・他のパラメータは調整容量充足ケースに倣う。

(蓄電池容量不足ケース)

- ・蓄電池容量が不足するケース： K_{bt} を 0.8 に設定
- ・他のパラメータは変化速度不足ケースに倣う。

各ケースの計算結果を図3-27に示す。図3-27(a)、(b)より、LFC調整容量が十分にある場合は、提案法では蓄電池が動作しないため、蓄電池を導入しない場合と固有値が重なっている事がわかる。一方で、従来法ではLFC調整容量によらず蓄電池が短周期変動成分を吸収するため、ダンピングが向上している事がわかる。従来法では振動モードとなっている。これは、従来法ではARを周期成分に分解するフィルタを挿入するため、電源出力の位相遅れが大きくなり、図3-26(f)で示した変化速度制限が厳しくなった際に振動モードになる現象と等価な現象であると考えられる。

図 3-27(c)、(d)より、調整容量が不足した場合は、充足ケースに比べ虚軸最近接固有値のダンピングが悪くなっていることが分かる。提案法は変化速度制限を超過する成分を吸収する手法であるため、調整容量が不足しても蓄電池導入前と変化がない。

図 3-27(e)、(f)より、変化速度が不足した場合は、提案法を用いることでダンピングを大きく向上できており、システムの安定性から見ても提案法が有効であることが分かる。その一方で、従来法は蓄電池なしの場合よりもダンピングが悪くなっている。この原因は現在詳細には分かっていないが、フィルタ時定数の最適化を行っていないことや、線形化における近似誤差の影響が出ていると考えられる。

図 3-27(g)、(h)より、蓄電池の容量が不足すると、提案法によるダンピング向上効果が低下していることが分かる。しかしながら、蓄電池なしの場合に比べればダンピングは高く、小容量の蓄電池を用いても提案法ではダンピングを向上できることが示された。

本節では、記述関数法に基づいて線形化した周波数制御システムの安定性評価を行い、提案法がシステムの安定性を向上させる効果があることを明らかにした。しかしながら、記述関数法では正弦波入力を前提とした手法であり、ランダムな負荷変動を吸収する周波数制御システムに適用した場合には近似誤差が大きく出る可能性がある。そのため、本検討により得られた知見はあくまで参考的なものとして捉えることが望ましいと考える。

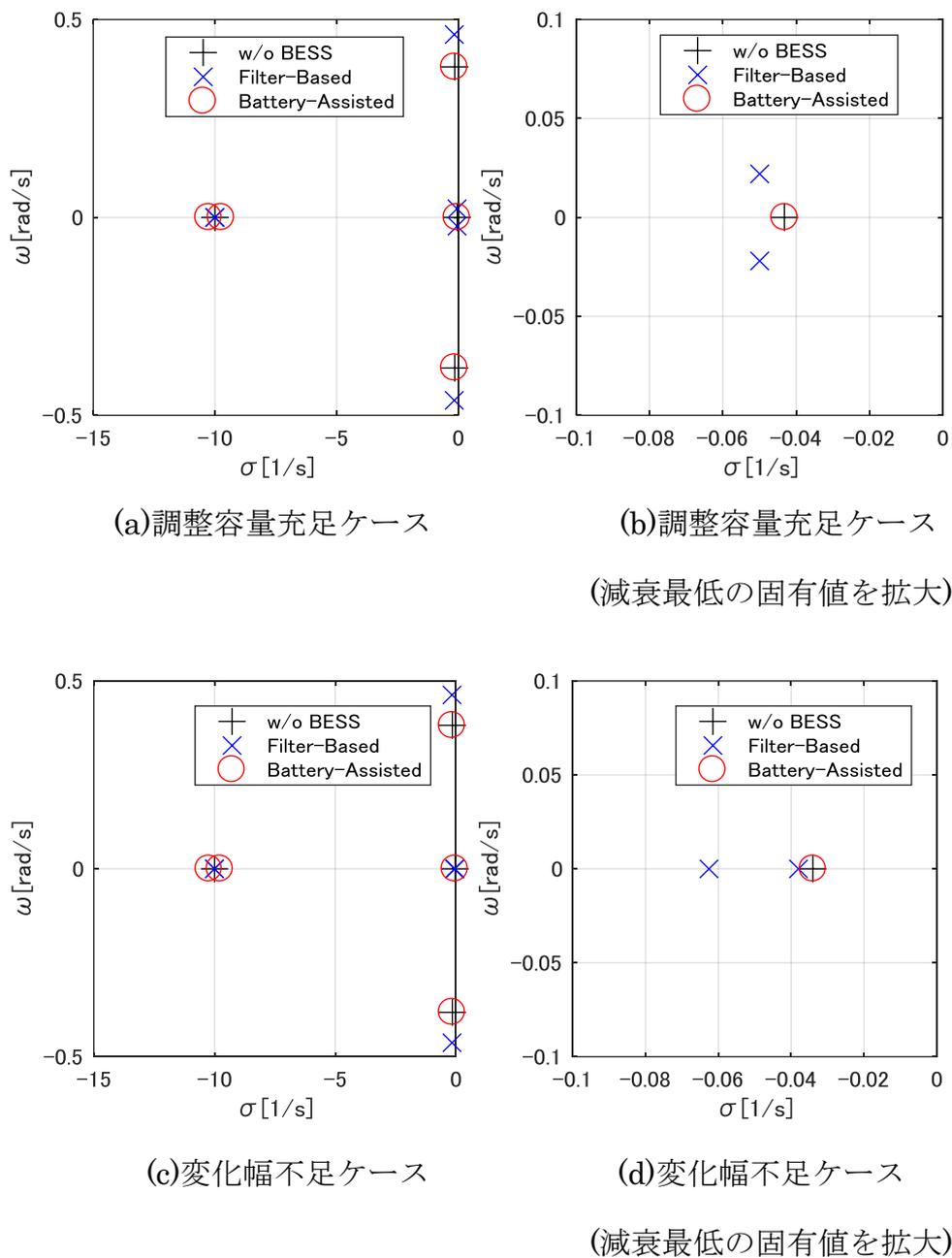
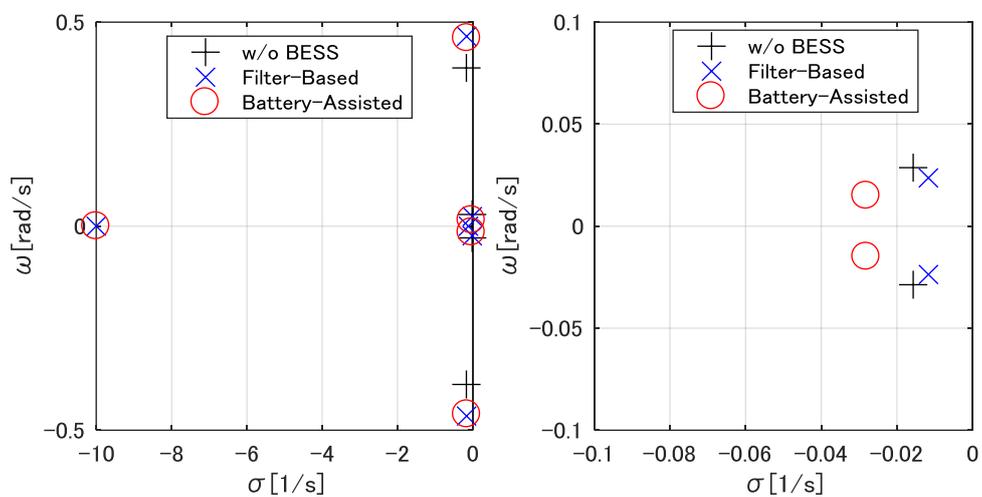


図3-27. 蓄電池導入が周波数制御システムの安定性に与える影響

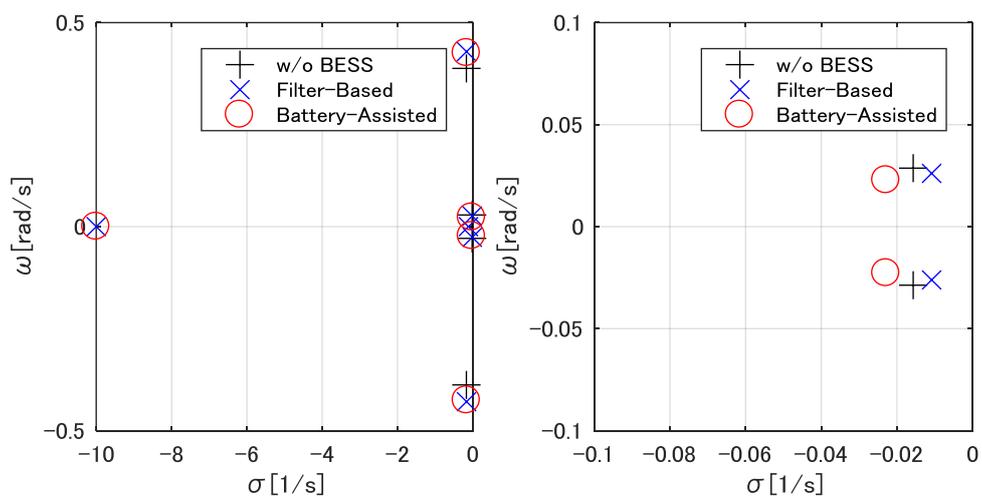
((e)から(h)は次頁に記載)



(e) 変化速度不足ケース

(f) 変化速度不足ケース

(減衰最低の固有値を拡大)



(g) 蓄電池容量不足ケース

(h) 蓄電池容量不足ケース

(減衰最低の固有値を拡大)

図3-27. 蓄電池導入が周波数制御システムの安定性に与える影響

((a)から(d)は前頁に記載)

3.5 あとがき

本章ではまず、LFC に貢献する蓄電池制御手法として、既存電源の出力変化速度制限を超過する LFC の指令値成分を蓄電池によって補償するバッテリーアシスト型 LFC を提案した。

そして、提案手法の有効性を評価するために、時間領域シミュレーションを用いて従来法との比較検討を実施した。その結果、提案法は従来法に比べ、周波数変動の最大値を 5.1%低減し、充放電の頻度を大きく低減する事が分かった。この結果は、提案法の効率性の高さを示す重要な結果である。

また、LFC 用電源の台数が増減し、LFC 電源の最大出力変化速度が変化したときの提案法の性能の変化について検討したところ、最大出力変化速度が低くなるほど提案法による周波数変動抑制効果は向上し、最大出力変化速度が高い場合には、蓄電池が動作しないために周波数変動抑制効果が得られず、その場合には従来法の方が有効となることが分かった。しかしながら、制御の効率に関しては、最大出力変化速度が著しく高い場合と低い場合を除く広い範囲において、提案法が有効となることが明らかとなった。

また、提案法の導入がシステムの漸近安定性に与える影響を明らかにするために、記述関数法に基づいて制御システムを線形近似し、固有値解析を行った。結果として、従来法は AR の周期成分分解に用いるフィルタの時定数を適切に決定しないと、蓄電池導入前よりも安定性が低下する可能性がある一方で、提案法は安定性が向上することが分かった。蓄電池の MW 容量が小さい場合にはこの安定性向上の程度は減少するが、蓄電池導入前よりも低下することはなく、提案法の導入によりシステムが不安定化する可能性は低いことが明らかとなった。

第4章 提案法による電力貯蔵装置の所要容量低減効果

4.1 まえがき

日本の電力系統では、系統周波数は基準値から一定の範囲内に収まるように制御されている。例えば、東日本の系統では、50[Hz]から ± 0.2 [Hz]以内に収めることを制御目標としている。一方、欧米諸国などでは、標準偏差を用いて目標範囲を設定している国もある^[16]。

蓄電池を周波数安定化に用いる際には、これらの制御目標を達成し得るだけの能力を持つ機器を導入する必要がある。そこで本章では、自然変動電源が導入された電力系統において、周波数を目標範囲内に収めるために必要となる蓄電池容量の算定を行った。本検討により、自然変動電源の導入量と、蓄電池の所要容量の関係を明らかにする。また、提案するバッテリーアシスト型LFCだけでなく、フィルタベース型LFCでも同様の検討を行い、蓄電池の所要容量の制御手法への依存性についても明らかにする。

4.2 電力貯蔵装置の所要容量の定義及び評価手法

4.2.1 所要容量の定義

本検討で明らかにする蓄電池の所要容量には一般的な定義が存在しないため、まずは本論文における所要容量の定義を与える。蓄電池は、図4—1に示すようにインバータを介して電力系統に連系される。これは蓄電池が直流機器であるためである。本検討では、蓄電池システムの性能を評価するうえで最も重要となる2つの容量を対象とする。一つはエネルギー容量であり、これは蓄電池本体に充電できる電力量の最大値を示す。そしても一つは、連系用インバータが出力でき

る最大電力を示すパワー容量である。簡単のため、両者をそれぞれ MWh 容量、MW 容量と呼ぶことにする。

続いて、所要容量の定義について説明する。本論文における蓄電池利用の目的は、周波数変動の抑制である。そのため、この目的を達成するのに必要となる MW、MWh 容量を所要量とするのが自然である。しかしながら、MW 容量と MWh 容量は基本的に独立な量であるため、周波数変動レベルの低減効果のみで所要量を定義した場合、解が複数になる可能性が高い。本論文では、評価を簡単にするために、以下に示すように所要 MWh 容量が所要 MW 容量に従属的になるように定義をした。

(1) 所要 MW 容量 $P_{BT_req}^{MAX}$:

周波数の標準偏差 σ_f を目標値 $\sigma_{f-target}$ まで低減するのに必要な MW 容量

(2) 所要 MWh 容量 $W_{BT_req}^{MAX}$:

所要 MW 容量 $P_{BT_req}^{MAX}$ を持つ蓄電池を用いる際に、充電切れもしくは満充電とならないために必要な MWh 容量

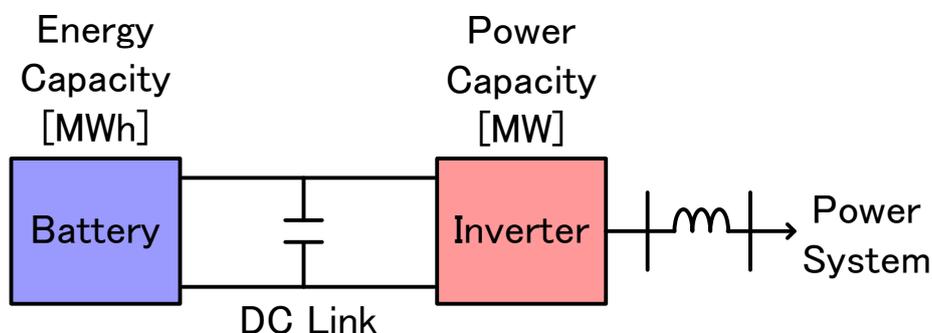


図 4—1. 蓄電池システムの構成

4.2.2 所要 MW・MWh 容量の算定手法

前項で定義した所要蓄電池容量の算定手法について述べる。算定は、3章で行ったような時間領域シミュレーションをベースにして行う。算出フローを図4-2に示す。所要 MWh 容量は所要 MW 容量に従属的であるため、所要 MW 容量を計算した後に所要 MWh 容量を計算する。

まず初期設定として、MW 容量 P_{BT}^{MAX} の初期値を設定する。この初期値は、負荷の変動幅や自然変動電源出力の変動幅に対して十分小さい値を与える。本検討では、後述するように数百 MW の振幅を持つ需要変動を用いるため、MW 容量の初期値は1 [MW]とした。このとき、MWh 容量は無量大として考える。そして、時間領域シミュレーションを実施し、周波数偏差や充電電力量の時間変化を計算する。シミュレーション結果を基に周波数の標準偏差 σ_f を計算し、目標値 $\sigma_{f-target}$ との比較を行う。目標値よりも大きい場合は、 σ_f が目標値以下になるまで MW 容量 P_{BT}^{MAX} を少しずつ増加させながらシミュレーションを繰り返し行う。そして、最終的に得られた MW 容量 P_{BT}^{MAX} を所要 MW 容量 $P_{BT_req}^{MAX}$ とする。その後、得られた所要 MW 容量を用いて再度時間領域シミュレーションを行う。このとき、充電電力量の時間変化 $W_{BT}(t)$ を計算しておき、この最大値と最小値の差を所要 MWh 容量 $W_{BT_req}^{MAX}$ とする。

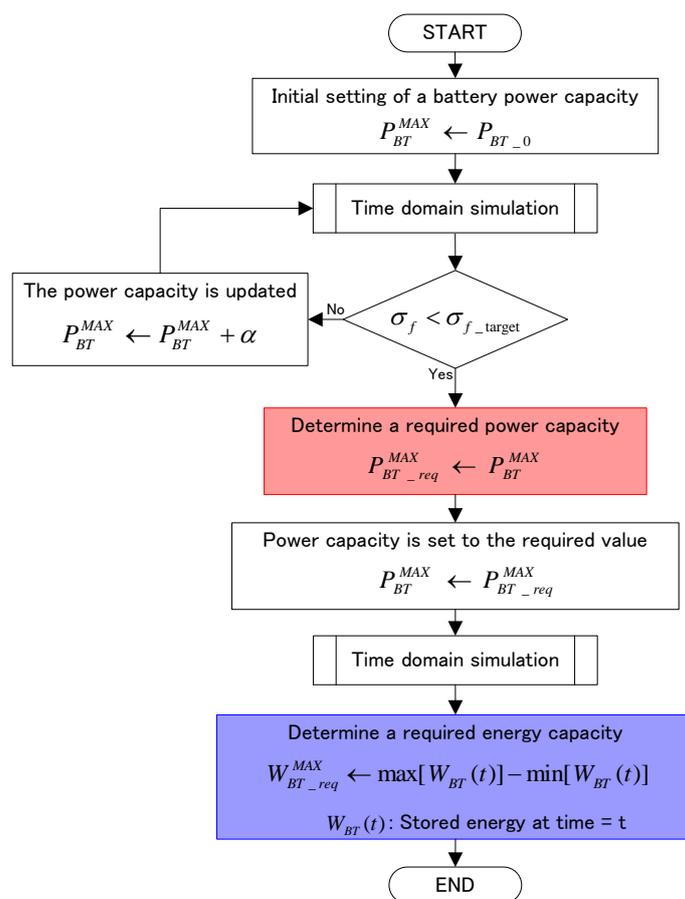


図 4—2. 蓄電池所要容量計算フロー

4.3 自然変動電源の導入量と所要電力貯蔵装置容量の関係

本節では、自然変動電源の導入を想定した電力系統モデルを用いて所要蓄電池容量の算定を行う。複数の導入レベルを想定し、導入量と所要蓄電池容量の関係を明らかにする。また、従来制御手法についても同様に検討を行い、所要容量の制御手法への依存性についても明らかにする。

4.3.1 評価用モデル

評価に用いた電力系統モデルは、前章で用いた図 3—5 に示したモデルと同じである。以下にモデル図を再掲する。前章の検討では、風力発電機の定格容量お

よび蓄電池の容量を固定値としていたが、本章の検討では風力発電の導入レベルが変化した場合の、所要蓄電池容量の変化を解析する。各電源のパラメータは表4-1に示した。

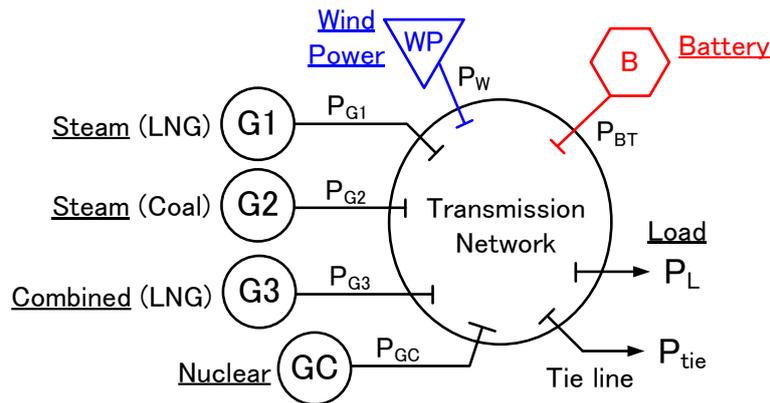


図3-5. 電力システムモデル(再掲)

表4-1. 電源パラメータ[16][46]

Plant	Rated Capacity C_i [MW]	LFC Reserve $\bar{S}_i / \underline{S}_i$ [MW]	Ramp Rate $\bar{R}_i / \underline{R}_i$ [MW/min]
G1	3500	± 47.3	± 31.5
G2	2700	± 24.3	± 16.2
G3	3300	± 74.3	± 49.5
GC	6000		

続いてシミュレーションモデルを図4-3に示す。上述のとおり、電力システムモデルに関しては前章と同じ構造としたが、本章のシミュレーションでは、提案法の構造をわずかに変更しており、また、MWh容量の検討を行うことから蓄電池モデルの詳細化も行ったため、前章のモデルとは異なる。以下で詳細を説明する。

前章で用いた蓄電池のモデルは、一時遅れ要素のみで表現したモデルであり充電電力量や充放電ロスの計算ができないモデルとなっていた。そこで、充放電効率を考慮した上で充電電力量の変化を解析できるように改良を行った。充電電力量 W_{BT} は、基本的には充放電電力 P_{BT} を時間積分することで得られるが、充放電効率 η_{BT} を考慮する場合は、単純な時間積分では計算できない。これは、例えば充電電力が P_{BT} であった場合、充電効率 η_{BT} の影響で実際に蓄電池が充電する電力は $\eta_{BT}P_{BT}$ となりわずかに減少するためである。放電時には逆の事がいえる。この影響を考慮した計算式は式(4-1)のように書くことができる

$$W_{BT}(t) = W_{BT_0} - \frac{1}{3600} \int_0^t \eta_{BT}^{-\text{sign}(P_{BT}(t))} P_{BT}(t) dt \quad (4-1)$$

また、図4-3の左下部分に示すように、充電電力量を初期値近傍に維持するための制御機構を追加している。電池の充電率はSOC(State Of Charge)と呼ばれるため、SOC補正制御と呼んでいる。本制御は単純な比例制御系であり、以下の式(4-2)に示すように、充電電力量の初期値からの偏差に比例ゲインをかけた信号を補正值としている。

$$S_{soc}(t) = K_{soc}(W_{BT}(t) - W_{BT_0}) \quad (4-2)$$

提案蓄電池制御手法にも変更を加えている。変更後の提案法のLFCブロックを図4-4に示す。前章では、電源の出力変化速度制限を超過するLFC指令値成分を蓄電池への充放電指令値としていたが、本章ではLFC上下限を超過する成分についても補償するように改良を行っている。制御パラメータは新しく増えたものも含めて表4-2に示す。

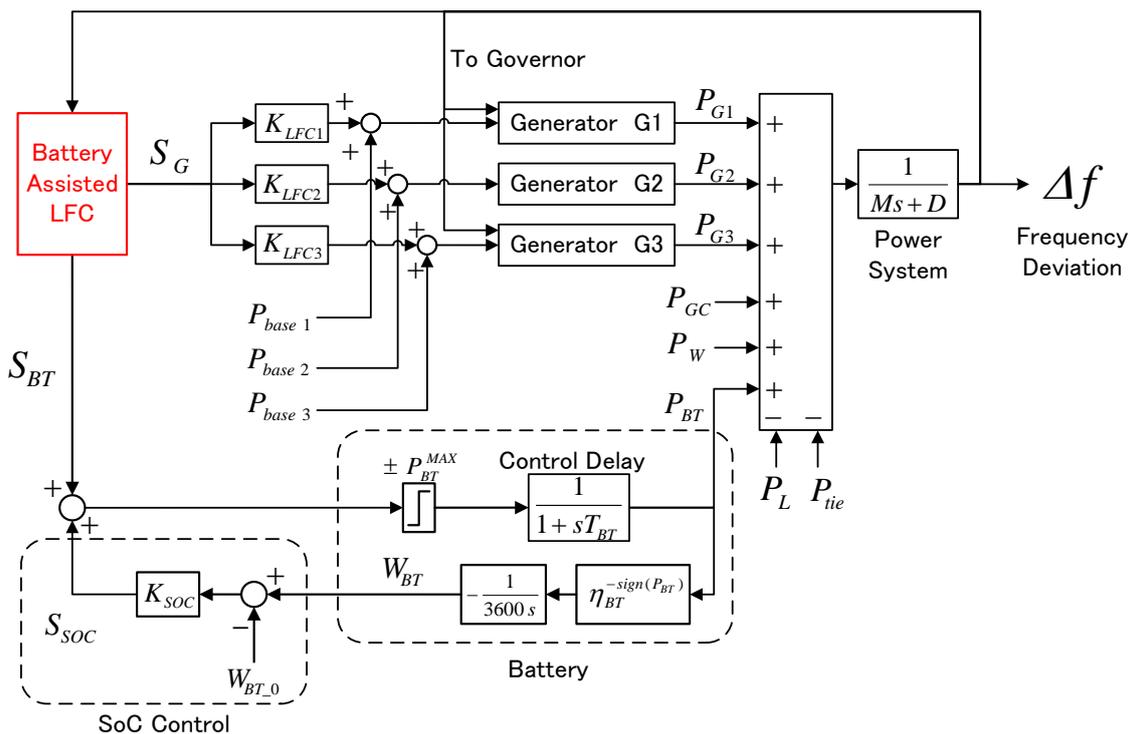


図 4—3. 蓄電池所要容量評価用シミュレーションモデル

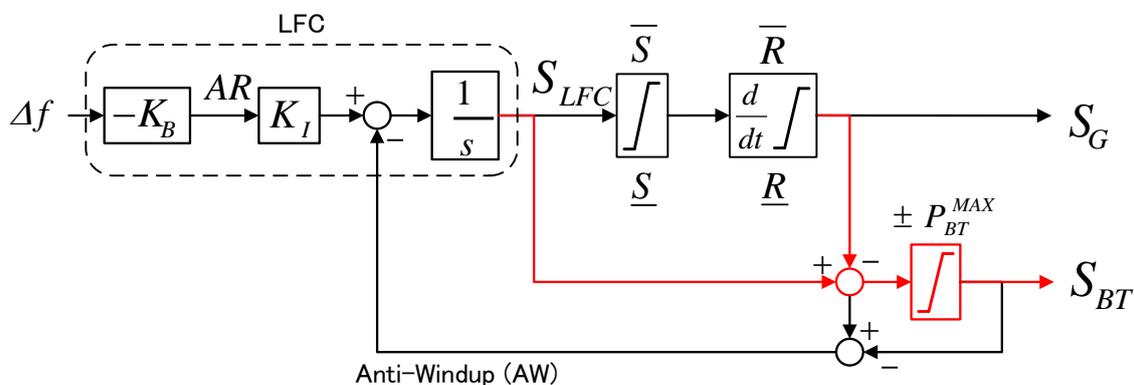


図 4—4. LFC 上下限超過成分の補償機能を追加した
バッテリーアシスト型 LFC の制御ブロック

表 4—2. 蓄電池容量評価用シミュレーションにおける制御パラメータ[16][46]

System Frequency	f_0	50.0 [Hz]
Inertia Constant *	M	9.06 [sec· puMW/puHz]
Load Damping Constant *	D	1.23 [puMW/puHz]
LFC Coefficient (Generation Rate Ratio)	K_{LFC1}	0.32
	K_{LFC2}	0.17
	K_{LFC3}	0.51
Integral Gain	K_I	0.02 [1/s]
System Constant **	K_B	10.5 [puMW/puHz]
Battery Time Constant	T_{BT}	1.0 [sec]
Battery Conversion Efficiency	η_{BT}	0.90
SOC Control Gain	K_{SOC}	4.0 [MW/MWh]

* : 総発電設備容量ベース, ** : 総火力電源容量ベース

4.3.2 シミュレーション条件

ここでは、蓄電池所要容量の算定の際に行う時間領域シミュレーションの条件設定について説明する。また、算定ケースについても示すこととする。

【時間領域シミュレーションの条件】

- ・シミュレーション時間 : 14400[s](=4[h])
- ・計算刻み時間 : 0.1[s]
- ・負荷変動 :

図 4—5 に負荷の変動データを示す。前章と同じく、正規乱数に時定数 300 秒ローパスフィルタを作用させて作成した[48]。

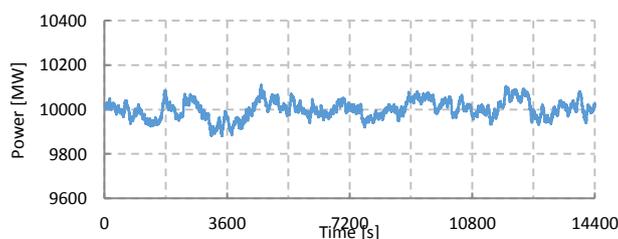


図 4—5. 負荷変動データ

・風力発電出力変動：

図 4—6 に風力発電の出力データを示す。本検討では、風力発電の導入量と蓄電池所要容量の関係を明らかにするため、風力発電の出力データは 4 パターンを用意した。パターンごとに想定した定格出力が異なり、最低が 2250[MW]で、最大が 3600[MW]となっている。これらの出力データは全て、前章と同じく定格出力 150[MW]の風力発電所の 1 時間の実測データを拡張して作成している^[48]。

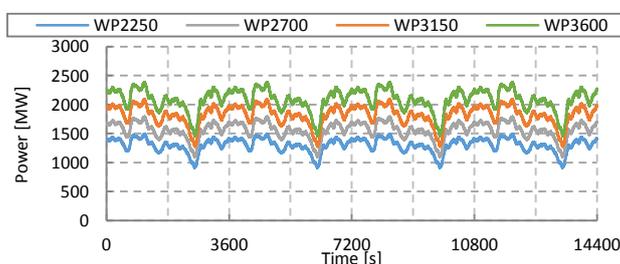


図 4—6. 風力発電出力データ

・周波数変動の標準偏差目標値 σ_f -target：

図 4—7 に周波数標準偏差の目標値と、蓄電池を導入しない場合の周波数標準偏差を風力発電の導入量別に示す。本検討では、目標値は風力発電導入に依らず 0.07[Hz]とした。この値は、東日本の系統における周波数の制御目標が 50 ± 0.2 [Hz]であることから^[16]、 3σ 値が 0.2[Hz]に近くなるように設定した。

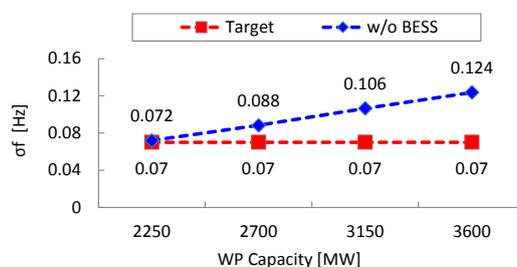


図 4—7. 周波数標準偏差の目標値

【所要蓄電池容量算定ケース】

本検討では、先述したとおり風力発電の導入量が異なる4つのケースで蓄電池所要容量の計算を行う。また、提案法に加え従来法でも同様の検討を行う。その為、検討ケースは全部で8ケースとなる。

4.3.3 自然変動電源導入量と蓄電池所要容量の関係

蓄電池所要容量の算定結果について説明する。図4-8に所要MW容量の結果を示す。全体の傾向として、風力発電の導入量が増加するに連れて所要MW容量も増加しているが、風力発電の導入量別に見ると、すべての場合でバッテリーアシスト型LFCの方が所要量が小さくなっていることが分かる。また、図4-9には所要MWh容量の算定結果を示した。本検討では、所要MWh容量が所要MW容量に対して従属的になる事から、所要MW容量と同様の傾向となった。これらの結果より、提案するバッテリーアシスト型LFCを用いることで、より少ない容量で周波数安定化が可能であると言える。

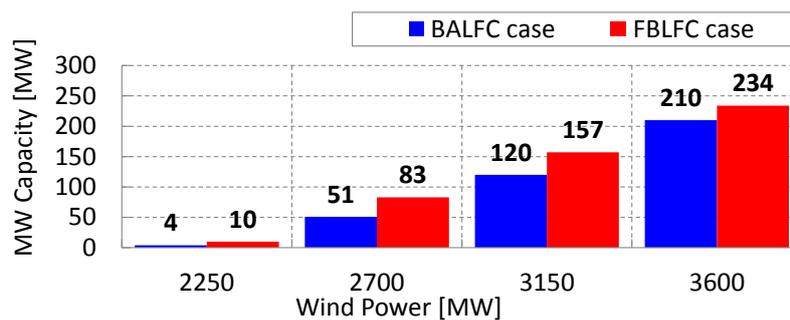


図4-8. 風力発電導入量別の所要MW容量

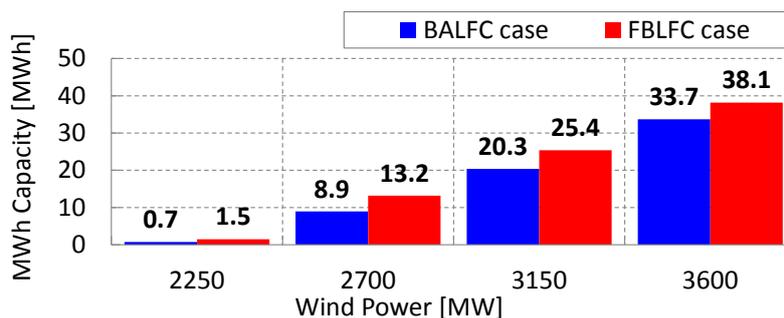


図 4—9. 風力発電導入量別の所要 MWh 容量

提案法を用いることで従来法に比べ蓄電池容量を低減できた理由を考察する。各手法の効果を定性的に解析するために、図 4—10 に示した正弦波状の負荷変動を考える。この負荷変動を入力としたシミュレーションの結果を図 4—11 に示す。なお、蓄電池の容量は 80[MWh]とし、その他の条件は前節で記載したものと同様である。このとき、従来法において、周波数の標準偏差を最小にするローパスフィルタの時定数は 10[s]であった。まず、図 4—11(a)より、周波数の変動は従来法を用いるケースのほうが大きい。図 4—11(b)に示した LFC 指令値は、従来法を用いるケースの波形が、提案法を用いるケースに対して位相が遅れている。この位相遅れは図 4—11(c)に示した電源出力にも現れており、これが原因となって残余需要との乖離が大きくなっていることが確認できる。図 4—11(d)より、従来法では蓄電池が電源出力の位相遅れを補うように動作しており、提案法のケースと比べて出力の振幅は同程度であるものの、動作時間は長くなっており、蓄電池の負担が大きいことがわかる。

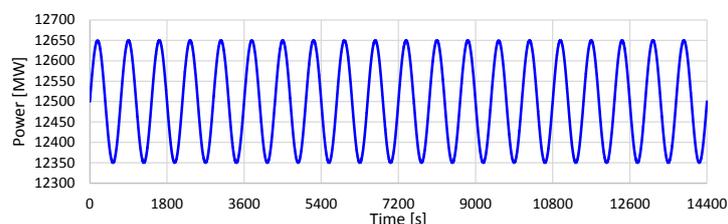
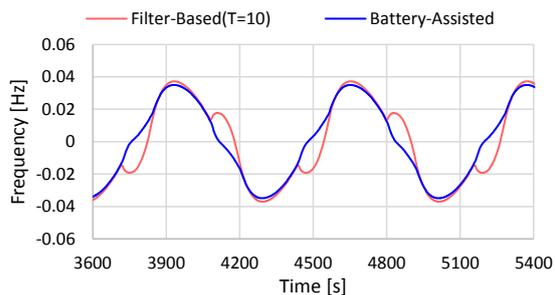
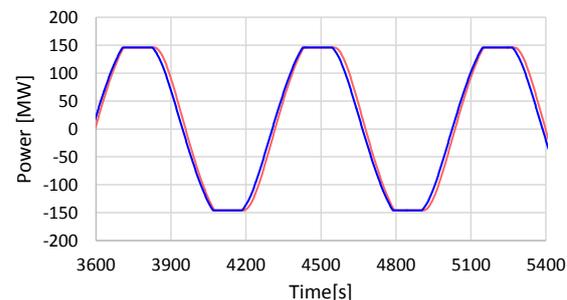


図 4—10. 正弦波負荷変動

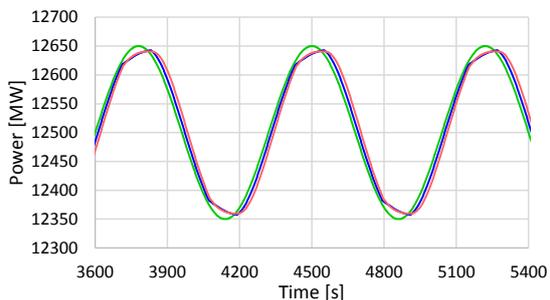
従来法における LFC 指令値、電源出力の位相遅れは、AR を周期成分に分解するローパスフィルタによるものと考えられる。そこで、最適なフィルタ時定数である 10[s]のケースに加え、3[s]および 20[s]としたケースのシミュレーションも行った。その結果を図 4—12 に示す。ここでは、フィルタ時定数変更による影響がわかりやすいように、時刻 5200[s]から 5800[s]の波形を拡大して示している。図 4—12(b)の LFC 指令値および図 4—12(c)の電源出力より、フィルタ時定数が長いほど位相遅れが大きくなっていることから、位相遅れの原因はローパスフィルタである可能性が高いと考えられる。フィルタ時定数が短いほど、LFC 指令値、電源出力の位相遅れは小さくなるため、電源だけに着目すれば負荷追従能力は向上する。しかしながら、図 4—12 に示すように、フィルタ時定数が短くなると、蓄電池に分担される AR が減少し、蓄電池の動作が抑制されるため、結果として蓄電池の導入による周波数変動抑制効果が得られない。したがって、従来法によって周波数変動抑制効果を得るには、電源出力の位相遅れは避けられず、その位相遅れによる負荷追従能力の低下を補うために大容量の蓄電池が必要になる。これが従来法において所要蓄電池容量が増大した理由であると考えられる。一方提案法では、出力変化速度制約をフィルタとして利用するため、新たなフィルタが必要なく、従来法のような位相遅れが発生しない。そのため、蓄電池の負担が軽くなったと考えられる。



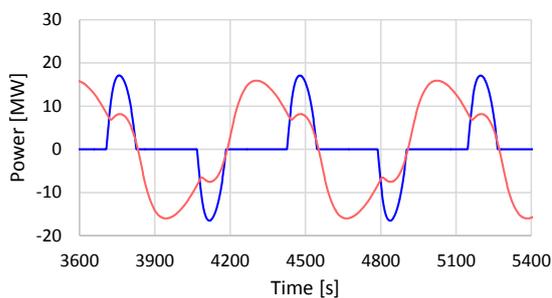
(a)周波数



(b)LFC 指令値

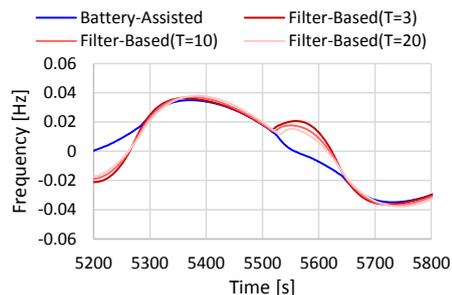


(c)電源出力

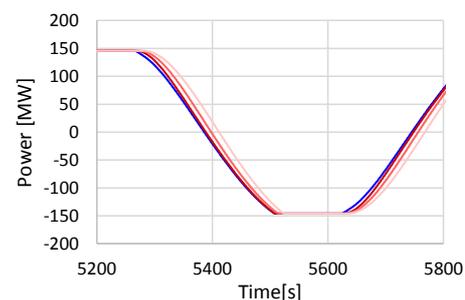


(d)蓄電池出力

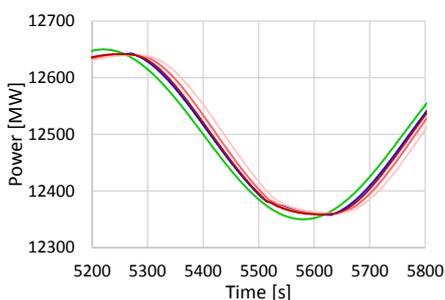
図 4—11. 正弦波負荷変動に対する従来法と提案法の応答の違い



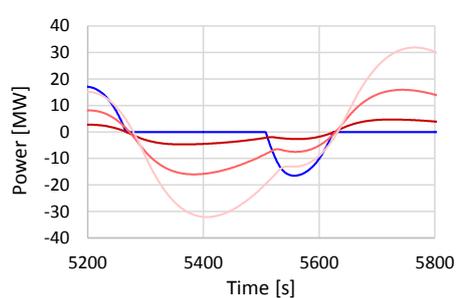
(a)周波数



(b)LFC 指令値



(c)電源出力



(d)蓄電池出力

図 4—12. 正弦波負荷変動に対する従来法と提案法の応答の違い(拡大図)

4.4 あとがき

本章では、自然変動電源の代表格である風力発電が大量に導入された電力系統において、蓄電池を用いて周波数を目標範囲内に収める場合に必要となる蓄電池の所要容量を算定した。東北地域の電力系統を模擬したモデルを用いて、複数の風力発電導入量において算定を行った結果、風力発電の導入量に依らず、提案法の方が従来法に比べ所要 MW、MWh 容量を低減できることが明らかになった。提案法を用いることで所要容量を低減できる原因を考察するために、時間領域シミュレーションの結果を詳細に考察したところ、従来法では、フィルタで生じる位相遅れが電源の負荷追従能力を低下させる原因となっており、この影響を補償するために大容量の蓄電池が必要になってしまうことが明らかとなった。これより、追加要素を必要としない提案法の簡素な構造が、蓄電池の所要量低減に寄与していることが明らかとなった。

第 5 章 数時間周期の周波数変動抑制への貢献を目的とした提案法の機能拡張

5.1 まえがき

本論文ではここまで、LFC の性能を向上させるための蓄電池活用方策について論じてきた。しかしながら、自然変動電源の導入によって変動が拡大するのはこの領域のみではなく、より短周期の変動や、長周期の変動を抑制する方策についても考える必要がある。

そこで本章では、第 3 章で提案したバッテリーアシスト型 LFC に対し、より長周期の周波数変動を抑制する EDC にも貢献するように機能の拡張を行う。EDC を選ぶ理由としては、第 3 章での検討結果より、バッテリーアシスト型 LFC は十数分周期の周波数変動の抑制効果が高く、周期十数分以上の変動を抑制する EDC にも貢献できる可能性があるためである。拡張の方針として、LFC と EDC の両方の対象となっている電源では、出力指令値が両制御の指令値の和となる点に着目し、EDC 指令値の挙動も考慮した上で電源が追従できない成分を抽出し蓄電池に配分するような構造へと拡張を行う。

そして、拡張したバッテリーアシスト型 LFC の有効性評価として、これまでと同様に時間領域シミュレーションを実施し、周波数安定化能力の向上効果や、EDC 領域の変動抑制への貢献度について検討を行う。

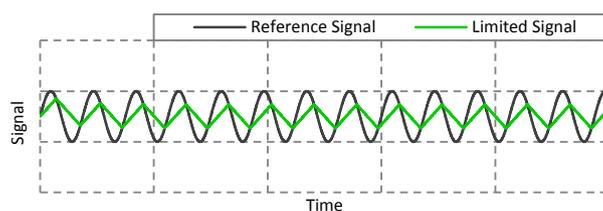
5.2 負荷の長周期変動を考慮した提案制御手法の機能拡張

5.2.1 長周期周波数変動抑制制御が電源の指令値追従性に与える影響

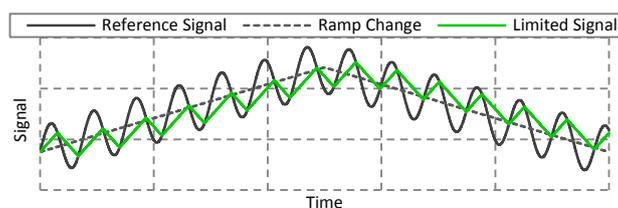
第2章で述べたように、電力系統の周波数安定性は階層的な電源出力制御システムによって維持されている。周波数制御の対象となる電源の中には、この制御システムに含まれる制御機構のうち、複数の対象となっているものも少なくない。例えば、ガバナフリー運転は系統に連系されるほとんどの同期発電機で行われており、LFC 電源、EDC 電源はこれらの同期発電機から選択される。また、LFC と EDC 両者の対象となる電源もある。

LFC と EDC の対象となる電源では、出力指令値が LFC 指令値と EDC 指令値の和で与えられる。この場合、出力変化速度制限は出力指令値に課されるため、他の LFC の電源と同じ LFC 指令値を受け取っていても、追従可能な成分は異なる。簡単な例を図 5-1 に示した。図 5-1(a)には、正弦波状の LFC 指令値に対する LFC 電源の出力指令値を示しており、出力変化速度制限によって指令値が制限されていることが分かる。一方、図 5-1(b)は、LFC と EDC 両方の対象となる電源に対して、同じ正弦波状の LFC 指令値と、図中に点線で示したランプ状の EDC 指令値に対する出力指令値の変化を示している。なお、黒の実線は LFC 指令値と EDC の指令値の和である。この場合も、出力変化速度制限によって指令値が制限されている事がわかる。しかしながら、図 5-1(a)では、出力増加方向と減少方向とで均等に追従できない指令値成分があることが分かるが、EDC 指令値を含める場合は追従できない指令値成分に偏りが見られる。例えば EDC 指令値が出力増加方向の指令値である場合は、増加方向の LFC 指令に対応する余裕が少ないため、出力増加方向の変化速度制限を違反する成分が出やすくなり、EDC 指令値が出力減少方向の場合は減少方向の変化速度違反成分が多くなる。

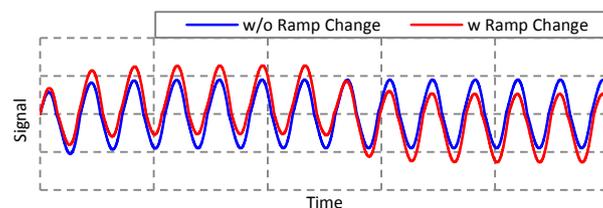
図 5—1(c)に、両ケースにおける電源が追従できない指令値成分を示す。EDC 指令値の挙動を考慮することで異なる超過成分が抽出される事がわかる。両者を比較すると、短周期変動成分には差が見られない一方で、EDC 指令値を含める場合は長周期の変動成分が現れていることが分かる。EDC 指令値自体の変化速度は、電源の出力変化速度と比較して小さいため、EDC 指令値単体では超過成分は発生しないが、LFC 指令値と重畳させると、超過成分に EDC 指令成分が含まれるようになる。この現象は出力変化速度制限が非線形要素であることを示している。また本図より、EDC 指令値が緩やかであっても、LFC 指令値と重畳させると電源は EDC 指令値の一部に追従できなくなることが分かる。



(a)LFC 電源の指令値追従性



(b)LFC および EDC の対象電源の指令追従性



(c)出力変化速度制限超過成分の比較

図 5—1. LFC と EDC の対象電源における出力変化速度制限超過成分

5.2.2 LFC と EDC の対象電源へのバッテリーアシスト型 LFC の適用

バッテリーアシスト型 LFC は、LFC 指令値に課される出力変化速度制限を超過する指令値成分を蓄電池によって補償する手法として提案した。しかし、EDC の対象にもなっている電源では、両制御の指令値和に対して変化速度制限を作用させたときの超過成分を補償しなければ、電源の指令値追従性を補償することにはならない。そこで、バッテリーアシスト型 LFC の構造を一部改変し、LFC と EDC 両方を実施する電源がある場合でも、正確に補償すべき成分を抽出できるようにした。拡張後のバッテリーアシスト型 LFC の構造を図 5-2 に示す。

拡張時の主要な変更点は 2 点ある。1 点目は、出力変化速度制限を LFC 指令値と EDC 指令値の和に対して作用させている点であり、もう 1 点は蓄電池の出力指令を EDC 指令値と LFC 指令値の和から、最終的な電源の出力指令値を差し引いた値として与えている点である。細かな変更点として、出力指令値の制限を電源毎に行えるようにした。これは、電源が実施する制御に違いが見られる場合でも適用可能にするためである。

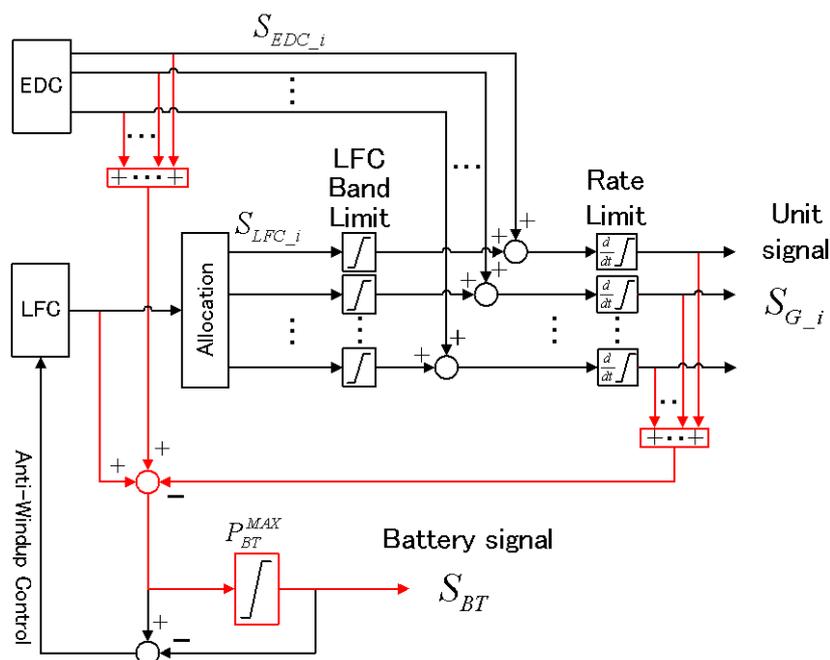


図 5-2. 拡張バッテリーアシスト型 LFC の構造

5.3 拡張バッテリーアシスト型 LFC の有効性評価

拡張バッテリーアシスト型 LFC の有効性を評価するために、時間領域シミュレーションを実施した。電力系統モデルは基本的にこれまでと同じものを用いたが、拡張手法では、EDC 指令値が必要となるため、新たに EDC のモデルを導入した。本節では、手法の拡張前後での性能変化を解析するために、拡張前のバッテリーアシスト型 LFC との比較検討を実施した。

5.3.1 評価用モデル

シミュレーションで用いた電力系統モデルを図 5-1 に示す。基本的な構造は、第 3 章、第 4 章で用いたモデルと同じであるが、本モデルでは風力発電の導入を考えない。この理由については後述することとする。蓄電池については風力の導入を考えない分、比較的小容量に設定し、充放電効率については第 4 章と同じく 90[%]とした。各電源の出力変化速度、LFC 調整容量、EDC で調整可能な出力の範囲を表 5-1 に示した。EDC は指令値の変動が緩やかであることから基本的に電源の最低出力から最大出力までの調整が可能である。

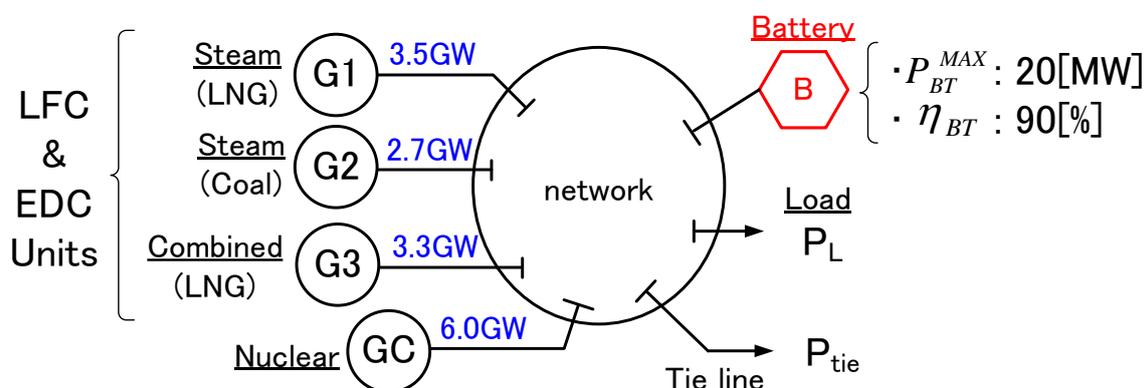


図 5-3. 拡張バッテリーアシスト型 LFC 有効性評価用電力系統モデル

表 5—1. 電源パラメータ [16][47]

Plant	Ramp Rate Limit [MW/min]	LFC Reserve [MW]	EDC Range (min./max.) [MW]
G1	±5.25	±30.8	700/3500
G2	±2.70	±15.8	810/2700
G3	±8.25	±48.4	1320/3300

次に、シミュレーションモデルを図 5—4 に示す。これまでのモデルと大きく異なる点は、EDC のモデルが追加されている点である。EDC モデルの詳細は後述するが、LFC と大きく異なる点として、需要予測値を入力に用いる点と、供給電力の総和をフィードバック量としている点が挙げられる。LFC と EDC で生成された指令値は、図 5—3 に示した指令値配分ブロックに従って電源と蓄電池へ配分される。本モデルでは、系統運用者から各電源、蓄電池への指令値の伝送遅れをむだ時間要素として考慮に入れている。電源および蓄電池のモデルについては変更していない。

LFC モデルを図 5—5 に示す。周波数偏差を制御量とした積分制御という基本構造に変化はないが、実際の制御に近づけるために、系統周波数のサンプリング時間 ΔT_{LFC} を考慮した。

図 5—6 には EDC モデルを示した。本モデルは、文献[37]を参考にして構築したモデルとなっており、主として EDC 電源全体への指令値を決定するブロックと、各電源への配分値を決定するブロックの 2 つに分けることができる。

まず前者から説明する。EDC が対象とする負荷変動成分のうち、長周期的な変動成分については比較的精度良く予測が可能であるため、EDC では需要予測に基づいた制御が行われている。通常、電源の遅れを考慮して現在時刻から数分先の予測値を指令値とする先行的な出力調整を行っている。しかしながら、少なからず予測誤差は発生するため、リアルタイムに予測値を補正する機能も備えて

いる。実運用においては、この予測補正は一日前、数時間前と段階的に行われるが、本モデル上では、一日前に作成した需要予測をリアルタイムに補正するという形でこの機能を模擬している。予測補正值は総需要と等価的な情報である電源出力の総和と、需要予測値の差分として求まる予測誤差に短周期成分を除去するためのフィルタを作用させることで決定している。総需要の代わりに電源出力の総和を用いるのは、実運用では総需要そのものを計測することが困難であるためである。また、予測誤差にフィルタを作用させるのは、EDC 指令値が短周期変動に反応しないようにするためである。

EDC でフィードバックする電源出力には、LFC による調整分も含まれているため、EDC 指令値が需要に追従すると、LFC の負担が一部減少し、制御余裕を維持することができる。これも EDC の役割の一つである。

続いて、EDC 指令値の対象電源への配分について説明する。EDC は、負荷変動の長周期成分を吸収する役割の他に、電源の運用コストが最小となるように電源の出力配分をリアルタイムに調整するという役割も担っている。その為、EDC 対象電源全体への指令値 S_{EDC} の各電源への配分は、以下の式(5-1)から式(5-12)に示した最適化問題を解くことで決定される。式(5-1)は本問題の目的関数であり、各電源の燃料費の総和を示している。ここで、 S_{EDC_i} は各電源への指令値を表している。式の中に示されるように、火力電源の燃料費は S_{EDC_i} の2次関数で近似することができる^[32]。本モデルで用いた各電源の燃料費関数を図 5-7 に示す^[32]。

本問題の制約条件は 3 つあり、1 つ目は式(5-2)に示す需給バランス制約である。これは各電源に配分される指令値の総和が全体への指令値に一致するという等式制約である。2 つ目は出力バンド制約である。これは、各電源への指令値 S_{EDC_i} が出力変更可能な範囲を逸脱しないための不等式制約である。3 つ目は出力変化速度制約である。この制約は、各電源へ配分する指令値 S_{EDC_i} が次のサン

プリング時刻までに到達可能な値になるようにするための不等式制約となっている。

以上が解析に用いたモデルに関する説明である。なお、制御パラメータ等は表 5-2 に示した。

- ・目的関数：総燃料費最小化

$$\text{minimize } \sum_i a_i + b_i S_{EDC_i}(t) + c_i S_{EDC_i}(t)^2 \quad (5-1)$$

- ・制約 1：需給バランス制約

$$S_{EDC}(t) = \sum_i S_{EDC_i}(t) \quad (5-2)$$

- ・制約 2：出力バンド制約

$$\underline{P}_{EDC_i} \leq S_{EDC_i}(t) \leq \overline{P}_{EDC_i} \quad (5-3)$$

- ・制約 3：出力変化速度制約

$$\underline{R}_i \Delta T \leq S_{EDC_i}(t) - S_{EDC_i}(t - \Delta T) \leq \overline{R}_i \Delta T \quad (5-4)$$

$S_{EDC_i}(t)$: EDC 対象電源# i の出力指令値 [MW]

$\overline{P}_{EDC_i}, \underline{P}_{EDC_i}$: 電源# i の出力上限及び下限 [MW]

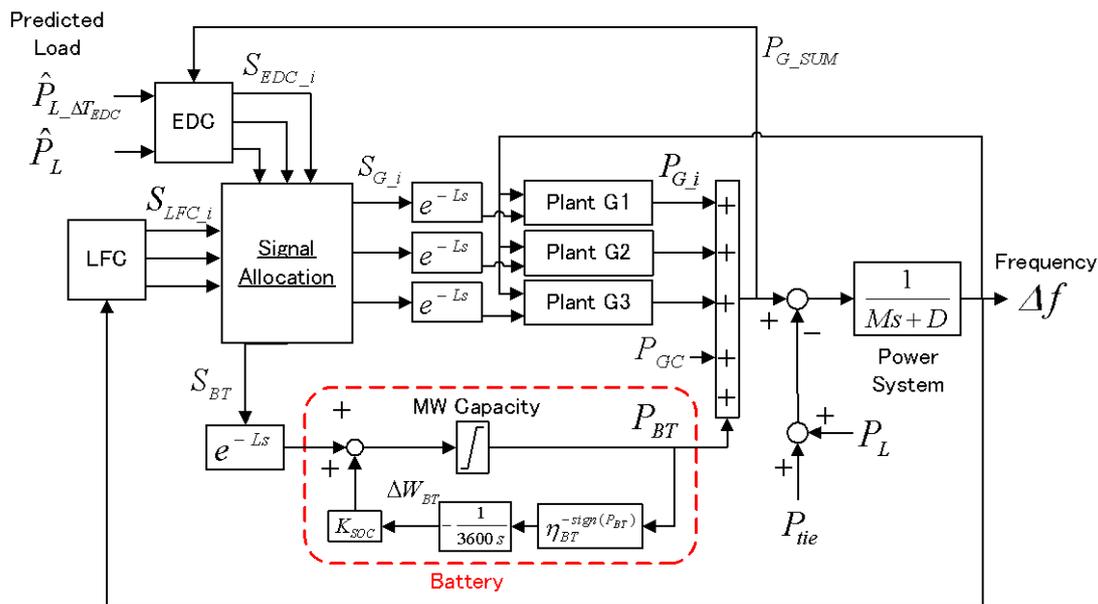


図 5-4. シミュレーションモデル

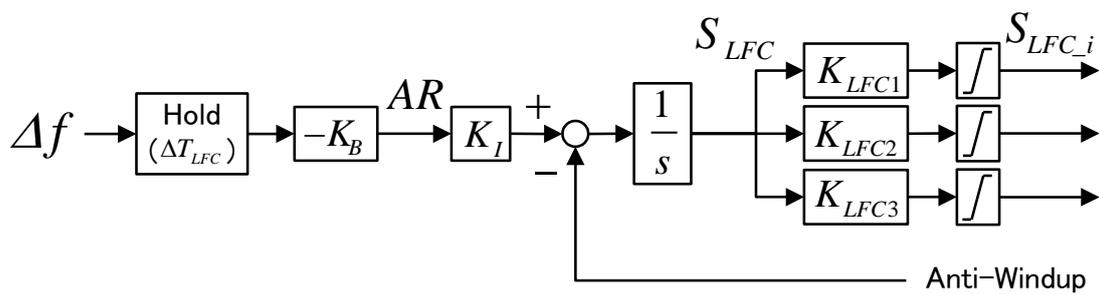


図 5-5. LFC モデル

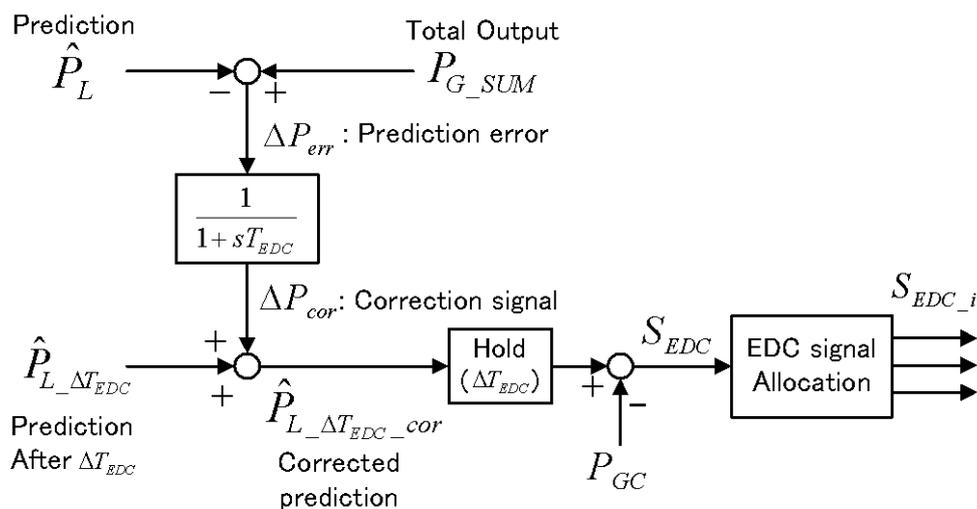


図 5—6. EDC モデル^[37]

表 5—2. 制御パラメータ^{[16][46]}

System Frequency	f_0	50.0 [Hz]
Inertia Constant *	M	9.06 [sec · puMW/puHz]
Load Damping Constant *	D	1.29 [puMW/puHz]
LFC Coefficient (Generation Rate Ratio)	K_{LFC1}	0.32
	K_{LFC2}	0.17
	K_{LFC3}	0.51
Integral Gain	K_I	0.02 [1/s]
System Constant *	K_B	0.036 [puMW/Hz]
Control Cycle of LFC	ΔT_{LFC}	5.0 [sec]
Control Cycle of EDC	ΔT_{EDC}	300.0 [sec]
SOC Control Gain	K_{SOC}	4.0 [MW/MWh]

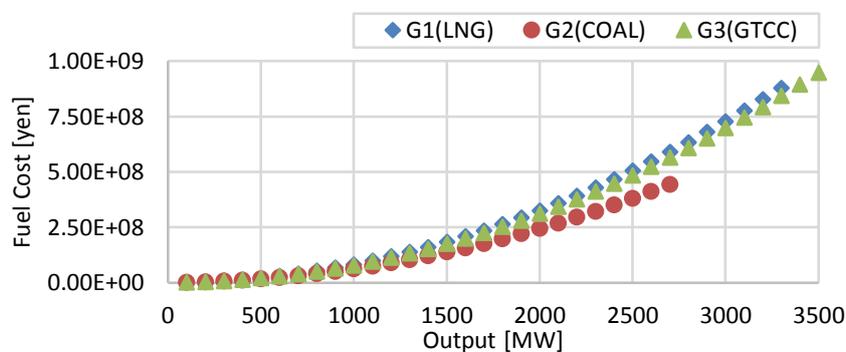


図 5—7. EDC 対象電源の燃料費関数^[52]

5.3.2 シミュレーション条件

本節の検討では、バッテリーアシスト型 LFC の拡張を行うことによる周波数安定化能力の向上効果を時間領域シミュレーションによって明らかにする。本項では、時間領域シミュレーションにおける各種条件および検討ケースを示す。

- ・シミュレーション時間：14400[s](=4[h])
- ・シミュレーション刻み時間：0.1[s]
- ・需要予測・需要変動データ：

シミュレーションに用いた需要予測データおよび需要変動データを図 5-8 に示す。予測データは、東北電力(株)のホームページ^[53]で公開されている 1 時間間隔のデータを線形補間し、更に直流分を 2000[MW] 差し引いたものを使用した。直流分を差し引くのは、本検討で用いた電力システムモデルが 10 年以上前に作成されたモデルをベースに構築している事から、現在の系統よりも小規模となっているため、その差分を調整するためである。実需要データに関しては、同じくホームページ上で公開されている 1 時間間隔の需要実績データを線形補間し、それに乱数から作成した短周期変動成分を重畳させて作成した。こちらに関しても直流分を 2000[MW] だけ差し引いている。なお、用いたデータは 2016 年 7 月 21 日の 14:00 から 18:00 のデータである。

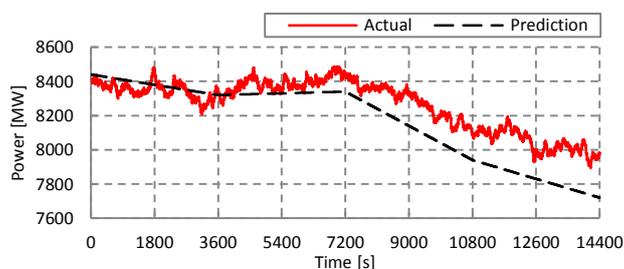


図 5-8. 需要予測・実需要データ

・検討ケース：

本検討では、バッテリーアシスト型 LFC の拡張を行うことによる周波数安定化能力の向上効果を明らかにすることを目的としている。そのため、シミュレーションは以下の 3 ケースで行う。

- (1) **【w/o Battery】**：蓄電池を使用しない
- (2) **【OLD】**：通常のバッテリーアシスト型 LFC を使用
- (3) **【NEW】**：拡張バッテリーアシスト型 LFC を使用

なお、通常のバッテリーアシスト型 LFC とは、第 3 章、第 4 章で用いた構造を意味しており、LFC と EDC を同時に実施する電源であっても LFC の指令値のみを用いて蓄電池の充放電指令を決定するものである。

5.3.1 シミュレーション結果

図 5—9 に w/o Battery ケースと OLD ケースの結果を、図 5—10 に w/o Battery ケースと NEW ケースのシミュレーション結果を示した。図 5—9(a) より、従来型の構造のままでも、周波数変動抑制効果は得られていることが分かる。しかしながら、図 5—10(a) と比較してみると分かる通り、拡張手法を用いることで更に周波数変動抑制能力が向上することが分かる。このときの各ケースにおける周波数の最大、最小値および標準偏差を表 5-3 に示す。全ての指標において、拡張バッテリーアシスト型 LFC を用いることで改善効果が見られ、OLD ケースと比較すると約 2 倍程度の周波数安定化効果が得られていることが分かる。拡張によって新たに抑制された変動成分を確認するために、周波数変動のパワースペクトルを計算した。結果を図 5—11 に示す。拡張バッテリーアシスト型 LFC を用いることで、十数分以上の周期を持つ変動成分が大きく抑制されていることが分かる。

表 5—3. バッテリーアシスト型 LFC の拡張が周波数変動に与える影響

case	w/o BESS	OLD	NEW
max. [Hz]	0.114	0.107 (-6.1%)	0.098 (-14.0%)
σ [Hz]	0.045	0.037 (-17.8%)	0.030 (-33.3%)
min. [Hz]	-0.131	-0.120 (-8.4%)*	-0.102 (-22.1%)*

* : 絶対値の変化率

これより、バッテリーアシスト型 LFC の拡張によって蓄電池が EDC 領域の周波数変動抑制に寄与する事が分かる。

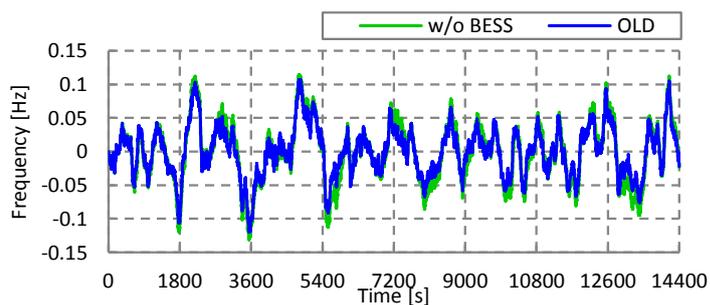
続いて、電源出力や蓄電池出力の挙動を見ていく。図 5—9(b)および図 5—10(b)には LFC 指令値の挙動を示した。両図には、需要の変動も併せて示した。需要の変動が比較的平坦な時刻 120[min]までは、OLD ケースと NEW ケースの LFC の指令値は近い挙動となっている。これは、図 5—9(d)および図 5—10(d)に示すように、需要変動が平坦な時間帯は EDC 指令値も大きく変動しないため、拡張手法を用いても蓄電池が補償する成分に大きな違いが出ないためである。NEW ケースにおける波形が短周期的なのは、LFC のアンチwindアップ制御に EDC 指令値の成分が含まれていることに起因している。一方で、負荷がランプダウンする時刻 120[min]以降においては、LFC 指令値の波形は両ケースで大きく異なっている。負荷がランプダウンするときは図 5—9(d)および図 5—10(d)からも分かる通り、EDC 指令値も減少方向の指令となるため、出力減少方向の指令値違反が頻発する。その為、NEW ケースでは負荷がランプダウンしている間、蓄電池への充電方向の指令が集中する。このように、EDC 指令値の挙動を考慮することで蓄電池出力の挙動は大きく変化する。

図 5—9(c)および図 5—10(c)には LFC 指令値の時間変化を示した。OLD ケースでは、w/o BESS ケースとほぼ同様の挙動となっている。これは、第 3 章でも述べた通り、提案法では電源が指令値に追従できない場合にのみ蓄電池が動作する

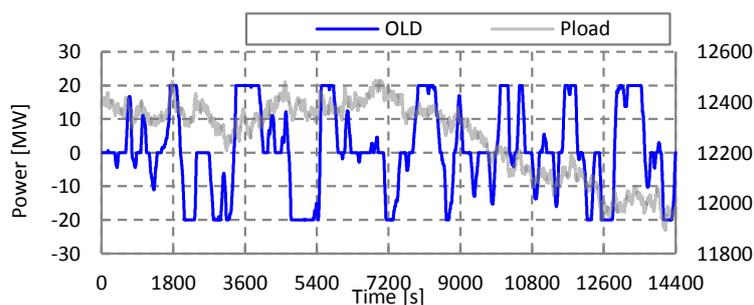
ため、電源の振る舞いは提案法の導入前後で大きく変化しないという性質によるものである。一方、NEW ケースでは、LFC 指令の振幅が減少していることが分かる。これは、拡張バッテリーアシスト型 LFC では、蓄電池が LFC だけでなく EDC にも貢献する事に起因していると考えられる。通常、EDC で取り切れない長周期変動成分は、周波数フィードバック制御である LFC によって吸収されることになる。したがって、LFC 指令値には、EDC 領域の変動成分も含まれることになる。拡張バッテリーアシスト型 LFC では、蓄電池が EDC 領域の周波数変動抑制に貢献するため、LFC の負担を軽減することができたものと考えられる。

最後に EDC 指令値の挙動を考察する。図 5—9(d)より、OLD ケースと w/o BESS ケースでは EDC 指令値に大きな差は無い。これは、LFC 指令値にほとんど差がないため、EDC における制御量である電源出力にも差が現れず、同じような挙動になったと考えられる。図 5—10(d)に結果を示した NEW ケースにおいても、大局的な挙動に大きな変化はないが、NEW ケースでは EDC 指令値に含まれる短周期変動成分が減少していることが読み取れる。これは、図 5—10(c)より、LFC 指令値の変動が減少したことで、電源の出力指令値に含まれる短周期変動成分が減少したことによるものであると考えられる。しかしながら、やはり指令値の大局的な挙動には影響が殆どないことから、EDC 自体の性能は周波数辺度抑制効果、電源の経済的運用の両方の視点においてほとんど差異はないと考えられる。

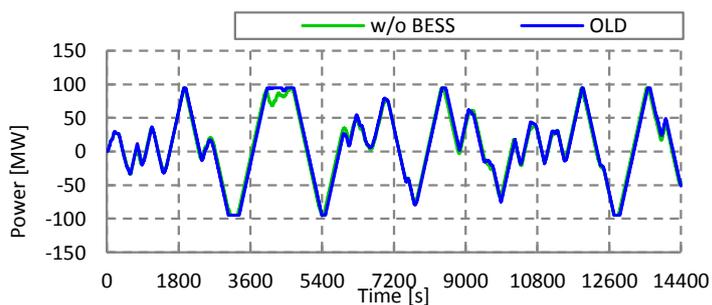
以上より、LFC と EDC の両方の対象となる電源が存在する場合には、拡張バッテリーアシスト型 LFC を用いることで、より精度良く電源が追従できない指令成分を補償することができ、周波数安定化能力が向上することが分かった。また、蓄電池が EDC 領域の変動抑制にも貢献することで、LFC の負担を軽減し、調整容量を低減できる可能性があることが明らかになった。



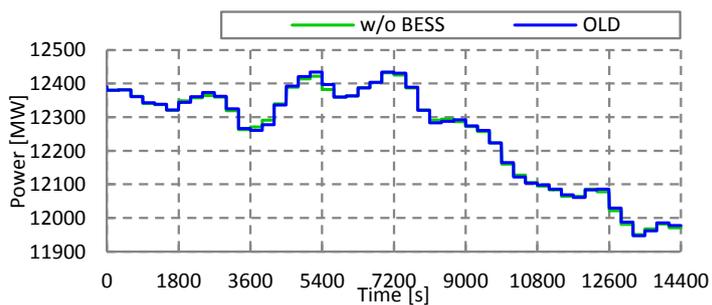
(a) 周波数偏差



(b) 蓄電池の充放電指令

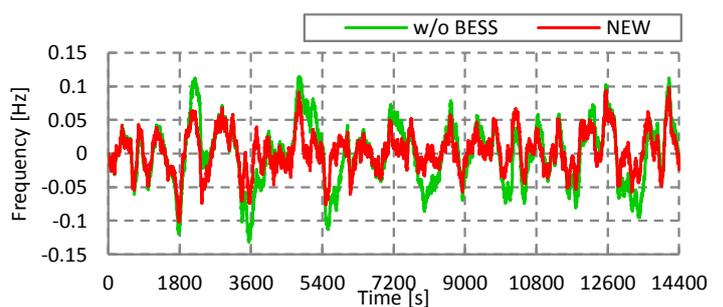


(c) LFC 指令

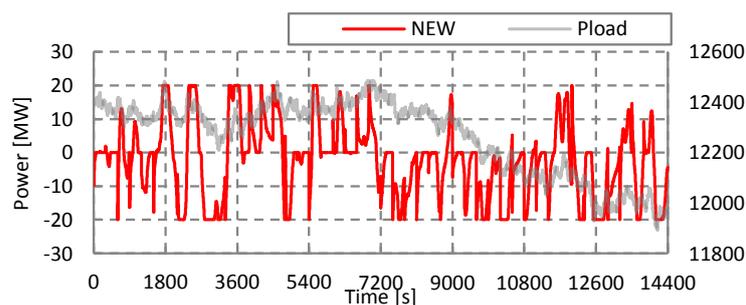


(d) EDC 指令

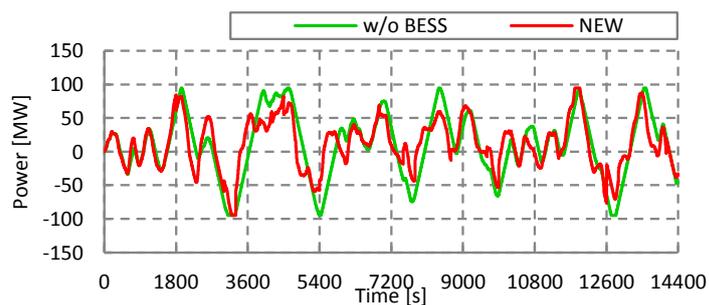
図 5-9. 従来型バッテリーアシスト型 LFC のシミュレーション結果



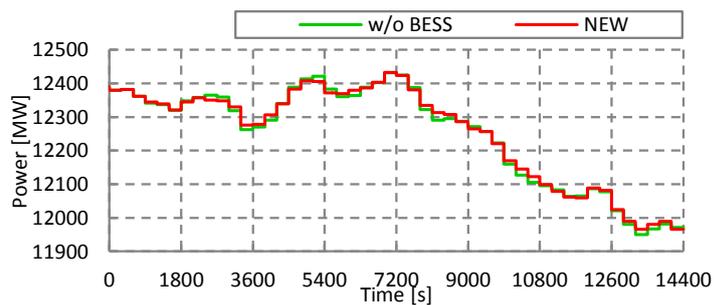
(a) 周波数偏差



(b) 蓄電池の充放電指令



(c) LFC 指令



(d) EDC 指令

図 5-10. 従来型バッテリーアシスト型 LFC のシミュレーション結果

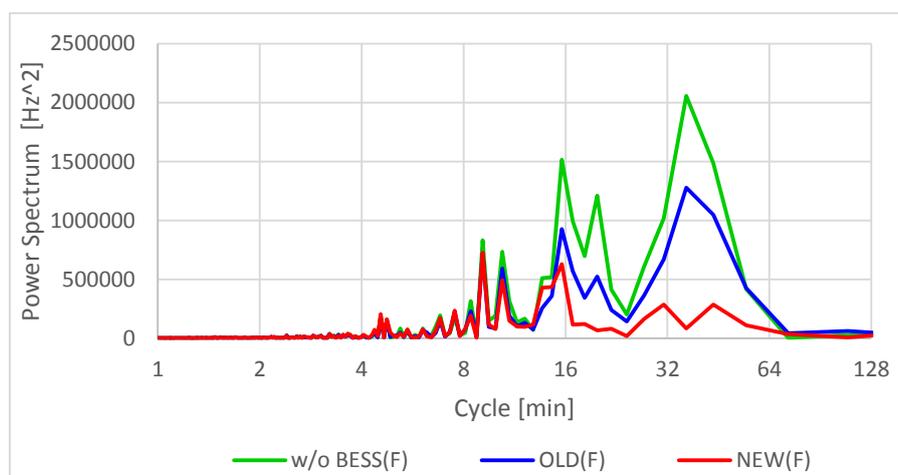


図 5—11. 周波数変動のパワースペクトル

5.4 あとがき

本章では、これまで提案してきたバッテリーアシスト型 LFC を、EDC にも貢献しうる蓄電池制御手法へと拡張した。

拡張バッテリーアシスト型 LFC の有効性を評価するために、EDC モデルを導入したシミュレーションモデルを構築し、時間領域シミュレーションを実施した。その結果、拡張を行うことで、EDC 領域の周波数変動抑制が可能となることが明らかとなった。またこのとき、元々有していた LFC 領域の周波数変動抑制能力は低下しておらず、バッテリーアシスト型 LFC の拡張性の高さも示された。また、蓄電池が EDC 領域の需要変動を一部吸収することで、LFC 電源の負担が軽減され、LFC の制御余裕が増加することも分かった。

拡張手法は、LFC と EDC 両方の対象となる電源が存在する場合に有効性を示すため、LFC 電源と EDC 電源が完全に別れている場合は、拡張前と性能は変わらない。言い換えれば、本章における検討結果は、LFC と EDC を同じ電源で行うことで、周波数安定性を大きく向上できる可能性あることを示しているとも言える。

第 6 章 結論

近年急速に導入が進んでいる自然変動電源は、エネルギー問題、地球環境問題の解決に貢献する一方で、出力の不確実性が電力系統の周波数変動を増大させ、電力品質の劣化を招くことが懸念されている。本論文では、蓄電池を用いて自然変動電源の出力変動の影響を緩和し、周波数安定性の劣化を防ぐ方策について論じている。

電力系統の周波数は、時々刻々と変化する需要に火力電源や水力電源などの既存電源の出力を追従させる事によって基準値の近傍に維持される。自然変動電源の出力変動は、既存電源が追従しなくてはならない正味の需要の変動を増大させるため、既存電源にはより高い出力調整能力が求められる。しかしながら、実際の電源運用では、機器保護の観点から、出力は一定の変化速度を超えないように制限されるため、自然変動電源の導入量が著しく増加すれば、電源出力が負荷に追従できなくなってしまう、周波数変動の増大を招くことになる。この指令値追従能力の不足を補償する有効な手段の一つが、高速に電力の吸収、放出が可能な蓄電池の活用である。従来では、電源への出力指令値から、短周期変動成分をフィルタによって抽出し、それを蓄電池に配分することで全体としての指令値追従性を高める手法が主として提案されてきた。これは、出力変化速度制限や、電源自体の出力応答特性が一次遅れ要素に近い特性を持つと考えられ、短周期変動成分に電源が応答できないという想定に基づいている。しかしながら、出力変化速度制限に関しては、非線形な要素であり特定の周波数特性を有せず、第 2 章で述べたように、負荷の変動特性によっては長周期変動成分もこの制約を超過する場合がある。したがって、フィルタのような線形要素を用いて変化速度制限の影響を補償することは困難である。

本論文では、特に負担が増大すると考えられる数分から十数分の周期を持つ負荷変動成分を吸収する LFC に、蓄電池を貢献させることを目的として、出力変化速度制限を超過する LFC 指令値成分を蓄電池に配分することで電源の指令値追従能力の不足分を補償するバッテリーアシスト型 LFC を提案した。本手法では、蓄電池が出力変化速度制限の影響を打ち消すように動作するため、LFC に本来の性能を発揮させることができ、周波数安定性の向上が期待できる。また、本手法では電源がまず優先的に動作し、電源が追従できない指令値成分が発生する場合に蓄電池が動作する。そのため、充放電頻度を抑え、充放電ロスを最小化することができる。第 3 章ではこれらの提案手法の特性を時間領域シミュレーションによって確認し、提案法が周波数安定化とロス低減を両立する効率性の高い手法である事を示した。

また、提案法は構造の簡素さにも特徴がある。従来手法では、指令値の周期成分分解のためにフィルタを追加する必要があるが、提案法では元々制御系に含まれている出力変化速度制限をフィルタ代わりに使用するため、追加の要素は必要ない。その為、パラメータチューニングも必要ない。第 4 章では、従来法に含まれるフィルタで生じる位相遅れが電源の指令値追従性を悪化させており、それが原因となって周波数安定化に要する蓄電池容量が増大していることを明らかにし、設備投資の面でも提案法が有用である事を示している。

また、本論文では蓄電池の多目的活用についても触れている。上述したように、出力変化速度制限はその非線形な特性により、指令値の長周期成分を制限する場合もある。その為、より長周期の変動成分を吸収する EDC の性能にも悪影響を及ぼしている可能性がある。そこで第 5 章では、LFC 指令値だけでなく、EDC 指令値の挙動も考慮した上で電源が追従できない成分を抽出し、蓄電池に配分するように提案手法の拡張を行った。有効性確認のシミュレーションの結果よ

り、制限超過成分には長周期成分も含まれており、機能の拡張を行うことで周波数の長周期変動成分を抑制可能であることを明らかにした。またこのとき、元々提案法が有していた LFC 領域の周波数変動抑制効果が失われることはなく、バッテリーアシスト型 LFC の拡張性の高さを明らかにすることができた。

本論文の電力システム工学に対する貢献の一つは、蓄電池の制御手法の違いが、周波数変動抑制能力や充放電損失量、所要容量に大きく影響することを明らかにしている点である。これは、蓄電池の制御手法を慎重に選択することの重要性を示唆すると同時に、適切な制御手法を採用することで電力系統への自然変動電源の導入可能量を増大させ得ることを示す重要な成果である。

本論文で提案したバッテリーアシスト型 LFC は、周波数安定化方策として高い有効性を持っているが、改善すべき点も残されている。1 点は、提案法では追加要素が必要ない代わりに制御パラメータも存在せず、性能のチューニングができない点である。自然変動電源が大量に導入されれば、変化速度制限の影響を取り除き LFC 本来の性能を回復しただけでは周波数安定化ができない場合も考えられる。その際には、蓄電池の貢献度を上げることが望ましいが、提案手法ではそのような機能がないため、安定化能力向上のためには改善が必要である。2 点目としては、電源の出力応答特性が考慮されていない点である。電源の指令値追従能力は、変化速度制限と電源自身の出力応答特性によって決まるため、後者についても今後補償を考える必要がある。

また、本論文では自然変動電源の導入が周波数安定性に与える影響の緩和について考えたが、冒頭で述べたように、自然変動電源の導入は他の安定性へも悪影響を及ぼしうる。例えば、PV やインバータ連系される WP は、同期発電機と異なり系統安定化に貢献するような慣性を有しないため、導入量が増大して同期発電機の連系量が減少すると、同期発電機の同期運転維持能力が低下し、落雷や

断線などの系統事故に対して停電するリスクが高まるという問題がある。自然変動電の大量導入には、以上で示したように解決すべき課題が多く残されている。しかし、持続可能かつ地球環境に優しいエネルギーシステムの実現のためには自然エネルギーを利用した電源の導入は必須であり、今後も解決に向けて努力していくことが重要であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東北大学大学院工学研究科 斎藤 浩海 教授には常日頃から丁寧な御指導、ご鞭撻を賜りました。心から感謝申し上げます。また、ゼミ等において有益な御意見、ご討論をいただきました同 飯岡 大輔 准教授に深く感謝いたします。

東北大学大学院工学研究科 吉澤 誠 教授、同 津田 理 教授には、お忙しい中本論文の副査を務めていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

博士課程に在籍し、研究生活を送るにあたり、諸先輩をはじめとする研究室所属学生の皆様には多くの御協力、御意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

最後になりますが、博士課程を修了するまでの長きに渡り私の身勝手を許し、精神的、経済的に私を支えて下さった両親を始めとする家族に、深く感謝致します。本当に有難う御座いました。

表 A1. 汽力プラントモデルのパラメータ

Turbine-Governor ^[46]		
Governor Gain	K_G	0.25 [puMW/Hz]
Speed Relay Time Constant	T_1	0.20 [sec]
CV Time Constant	T_2	0.25 [sec]
CV Rate Upper limit	$1/T_3$	0.20 [1/sec]
HP Turbine Time Constant	T_4	0.25 [sec]
LP Turbine Time Constant	T_5	9.00 [sec]
CV Rate Lower Limit	$1/T_6$	-1000 [1/sec]
Load Limiter Time Constant	T_7	25.0 [sec]
HPT Generation Rate	K	0.3
CV Upper Limit	CVU	1.05 [pu]
CV Lower Limit	CVL	0.0 [pu]
Plant Control ^[54]		
Output Upper Limit	$MWBU$	1.05 [pu]
Output Lower Limit	$MWBL$	0.0 [pu]
Governor Margin	PLM	0.05 [pu]
PI Gain	K_a	0.4
Integral Time	T_a	25 [sec]

表 A2. プラント別パラメータ

Plant		G1	G2
Fuel		Oil / LNG	Coal
Boiler		Once-Through	
Steam Generation Lag	T_8	120	240
Boiler Dynamics	T_9	20	20
Pressure Control Lag	T_{10}	90	150

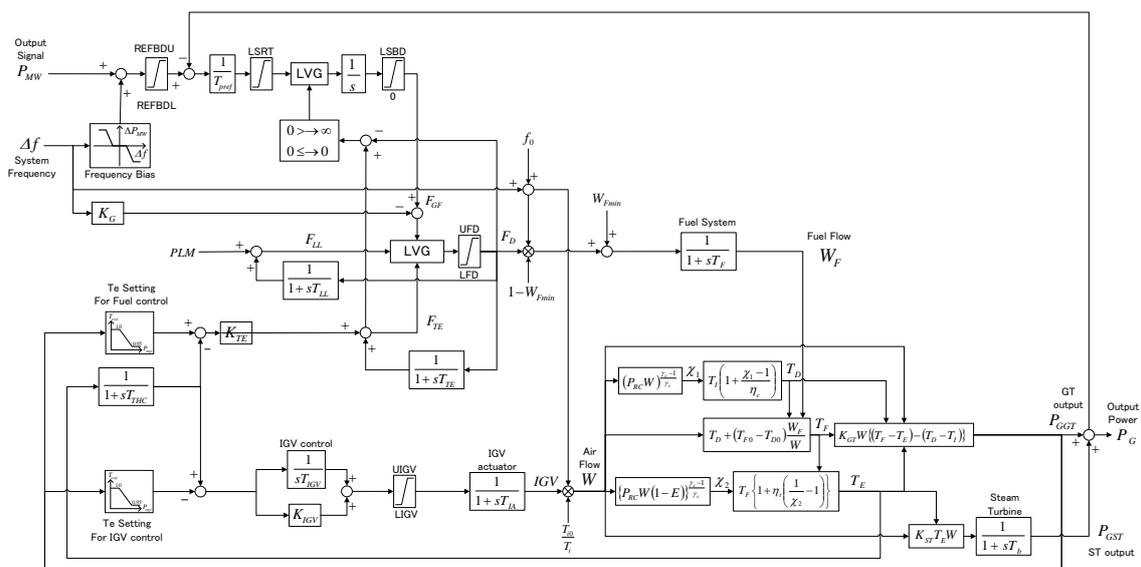
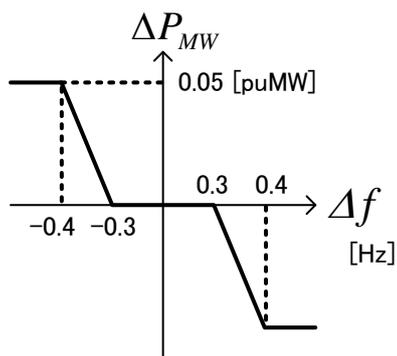
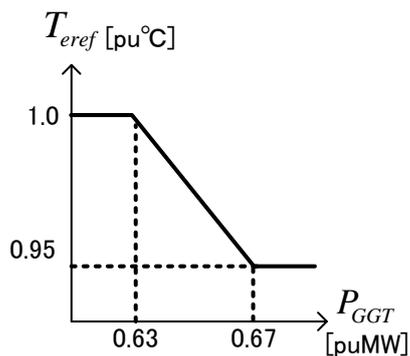


図 A3. コンバインドサイクルプラントモデル



(a) 周波数バイアス



(b) 主蒸気圧力設定

図 A4. コンバインドサイクルプラントモデルにおける
周波数バイアスおよび主蒸気圧設定

表 A2. コンバインドサイクルプラントモデルのパラメータ

Governor Gain	K_G	0.25 [puMW/Hz]
Load Setting Time Constant	T_L	3.00 [sec]
Load Setting Upper Limit	U_{65M}	1.05 [puMW]
Load Setting Lower Limit	L_{65M}	0.00 [puMW]
Governor Margin	PLM	0.05 [puMW]
Load Limit Time Constant	T_{LL}	12.0 [sec]
Exhaust Gas Temperature Time Constant	T_{TE}	5.00 [sec]
Exhaust Gas Temperature Deviation Gain	K_{TE}	3.50 [puMW/pu°C]
Exhaust Gas Temperature Control Bias	B_{TE}	0.04 [pu]
Radiation Shield Gain1	K_{RS1}	0.50
Radiation Shield Gain2	K_{RS2}	0.50
Radiation Shield Time Constant	T_{RS}	1.00 [sec]
Thermocouple Time Constant	T_{THC}	1.00 [sec]
Fuel Valve Time Constant	T_V	0.20 [sec]
Fuel System Time Constant	T_{WF}	1.00 [sec]
Fuel Control Upper Limit	UFD	1.05 [pu]
Fuel Control Lower Limit	LFD	-0.10 [pu]
Exhaust Gas Temperature Offset	T_{OFF}	278 [K]
IGV Control Gain	K_{IGV}	2.00
IGV Opening Upper Limit	U_{IGV}	1.00 [pu]
IGV Opening Lower Limit	L_{IGV}	0.70 [pu]
Air Temperature	T_i	278 [K]
Gas Turbine Inlet Temperature	T_{f0}	1678 [K]
Combustor Inlet Temperature	T_{d0}	696 [K]
Exhaust Gas Temperature	T_{e0}	888 [K]
Ratio of Specific Heat of Compression	k_c	1.40
Specific Heat Ratio of Combustor and Gas Turbine	k_t	1.33
Pressure Ratio of Combustor	P_{RC}	20.0
Pressure Loss	E	0.10 [pu]
Combustor Efficiency	η_c	90.0 [%]
Gas Turbine Efficiency	η_e	91.7 [%]
Combustor Time Constant	T_c	0.20 [sec]
Exhaust Heat Recovery Boiler Time Constant	T_b	300.0 [sec]
Output Coefficient of Gas Turbine	K_{GT}	0.001820 [pu/K]
Output Coefficient of Steam Turbine	K_{ST}	0.000375 [pu/K]

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁：「エネルギー白書 2016」， 2016.5
[Online] <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/>
- [2] NEDO：「日本における風力発電導入量の推移」
[Online] <http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html>
- [3] 資源エネルギー庁：「固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト」
[Online] http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html
- [4] 資源エネルギー庁：「長期エネルギー需給見通し 関連資料」， 2015.7
[Online]
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_02.pdf
- [5] 資源エネルギー庁：「電気料金の水準」， 2015.11
[Online]
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/kihonseisaku/pdf/002_04_02.pdf
- [6] 経済産業省：「電力システムに関する改革方針」
[Online] <http://www.meti.go.jp/press/2013/04/20130402001/20130402001-2.pdf>
- [7] 経済産業省：「電力システムに関する改革方針(参考資料)」
[Online]
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/system_reform002/pdf/20130515-2-3.pdf
- [8] 電力広域的運営推進機関， ホームページ
[Online] <https://www.occto.or.jp/koiki/koiki/index.html>

-
- [9] 電力広域的運営推進機関：「需給状況改善のための指示の実施について」，
2015.9.26
[Online]
https://www.occto.or.jp/oshirase/hoka/files/150926_jyukyushiji.pdf
- [10] 電力広域的運営推進機関：「需給状況改善のための指示の実施について」，
2016.9.8
[Online]
https://www.occto.or.jp/oshirase/hoka/files/160908_jyukyukaizenshiji.pdf
- [11] 電力システム改革専門委員会：「電力システム改革専門委員会報告書」，
2013.2
[Online]
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/system_reform001/pdf/20130515-1-1.pdf
- [12] 資源エネルギー庁：「小売全面自由化に関する進捗状況」
[Online]
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/kihonseisaku/pdf/008_03_00.pdf
- [13] 電気学会：「電気工学ハンドブック(第7版)」，pp. 1168-1169，オーム社，
2013.9
- [14] Tomas Ackermann, “Wind Power on Power Systems Second Edition,” A John Wiley & Sons, Ltd., pp.73-103, 2012
- [15] Mehdi Garmroodi, David J. Hill, Gregor Verbič, Jin Ma, “Impact of Tie-Line Power on Inter-Area Modes With Increased Penetration of Wind Power,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 31, NO. 4,

JULY 2016

- [16] 電気学会：「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」，電気学会技術報告, No.869 (2002)
- [17] 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 電力システム改革小委員会：「改革後の需給調整の仕組みについて」，2014.10
[Online]http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/kihonseisaku/denryoku_system/seido_sekkei_wg/pdf/03_04_03.pdf
- [18] 浅野浩志：「間接負荷制御試験における価格効果の持続性の分析」，電力中央研究所報告，No. Y99004, 1999
- [19] 南條俊也，斎藤浩海：「電力品質情報に対する需要応答が電圧変動抑制効果に及ぼす影響」，PE-14-086, PSE-14-086, 2014
- [20] 益田泰輔，清水浩一郎，横山明彦：「大量の再生可能エネルギー電源が導入された電力系統における多数台ヒートポンプ給湯器と電気自動車を利用した負荷周波数制御」，電気学会論文誌 B, Vol.132, No.1, pp.23-33, 2012
- [21] 佐藤崇広，斎藤浩海，岡本淳，柴幸秀，谷藤浩二：「異なる応答特性の複数台 GeoHP 制御による周波数変動抑制の向上」，平成 26 年電気学会全国大会, No.6-182
- [22] Yingjie Tan, Kashem M. Muttaqi, "Multilevel Energy Storage Based Frequency Regulation in Remote Area Power Supply Systems," 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Wollongong, 2016
- [23] Jason MacDowell ; Sudipta Dutta ; Matt Richwine ; Sebastian Achilles ; Nick Miller , "Serving the Future: Advanced Wind Generation Technology Supports Ancillary Services," IEEE Power and

Energy Magazine Vol. 13, Issue 6, pp.20-30, 2015

- [24] 村上明子, 横山明彦, 多田泰之:「大容量風力発電が導入された電力系統における周波数制御のための蓄電池容量評価に関する基礎的検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 126, No. 2, pp.236-242, 2006
- [25] 由本勝久, 七原俊也, 奥水源太郎:「風力発電出力平滑化用蓄電池の充電レベルの制御法-残存容量フィードバック制御に関する考察-」, 電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 5, pp. 605-613, 2009
- [26] 橋本竜弥, 川俣智幸, 島田和義:「東北電力(株)西仙台変電所大型蓄電池システムの運転開始」, 東芝レビュー, Vol. 70, No. 9, pp.45-48, 2015
- [27] 北海道電力:「南早来変電所大型蓄電システム実証事業について」, 2016.7
[Online]
http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/large_accumulator/pdf/demo_poject.pdf
- [28] 九州電力:「大容量蓄電システム需給バランス改善実証事業の実施について」, 2015.4
[Online]
<http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0045/7546/jjfl44mkihg33pk879.pdf>
- [29] 経済産業省:「蓄電池戦略」, 2012.7
[Online]
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/028/pdf/28sankou2-2.pdf
- [30] Hiroyuki Amano, Yuji Ohshiro, Tomonori Kawakami, Toshio Inoue, “Utilization of Battery Energy Storage System for Load Frequency Control toward Large-Scale Renewable Energy Penetration”, 2013 3rd

- IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, pp.1-7, 2013
- [31] Tomohiro Adachi, Akihiko Yokoyama, “System Frequency Control by LFC Signal Equipartition Method Based on Slow Smart Charging of Electric Vehicle”, in Proc. PowerTech2015, Eindhoven, 2015
- [32] 阿部公哉：「電力系統の安定化を目的とした蓄電池制御技術(その 1：受需給制御)」，平成 28 年電気学会全国大会，6-S8-4, 2016
- [33] 新田目倅造：「電力系統技術計算の応用」，電気書院，1981
- [34] 鈴木守：「電力系統の需給運用計画」，計測と制御，Vol. 30, No.7, pp. 557-564, 1991
- [35] 火力原子力発電技術協会：「”再生可能エネルギー時代の火力発電”新たな役割と価値」，2014
- [36] 井上俊雄：「電力系統の周波数制御から見た火力機出力応動特性」，電気学会論文誌 B，Vol. 124, No. 3, 343-346, 2004
- [37] 天野博之，西田圭吾，大城裕二，川上智徳，井上俊雄：「PV 大量導入が LFC へ与える影響に関するシミュレーション検討—長周期の予測誤差の考慮と適切な AR 低減方策の検討—」，電力中央研究所報告，R11010，2012
- [38] 電気学会：「電力系統の負荷周波数制御」，電気学会技術報告 第 40 号，1976
- [39] 日野幹雄：「スペクトル解析ハンドブック」，朝倉書店，2004
- [40] 日野幹雄：「スペクトル解析」，朝倉書店，1977
- [41] 資源エネルギー庁：「蓄電池技術の現状と取組みについて」，2009
[Online]<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90225a05j.pdf>

- [42] Akie Uehara, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, " Frequency Control by Coordination Control of WTG and Battery using Load Estimation," in Proc. IEEE Power Electronics and Drive Systems(PEDS) 2009, 2009
- [43] 関根泰次：「電力系統工学」，電気書院，1976
- [44] 資源エネルギー庁：「風力発電の導入状況について」，2016
[Online]
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/pdf/009_04_00.pdf
- [45] 東北電力：「風力発電連系可能量の算定プロセス」，2011
[Online]
https://www.tohoku-epco.co.jp/oshirase/newene/04/pdf/h25_01.pdf
- [46] 電気学会：「電力系統の標準モデル」，電気学会技術報告，No.754，1999
- [47] 徳光啓太，天野博之：「需給制御シミュレーション用火力プラントモデルの開発」，電力中央研究所報告 R14018，2016
- [48] 新エネルギー・産業技術総合開発機構/電力中央研究所：「風力発電電力系統安定化等調査」，NEDO-NP-0012，2001
- [49] 阿部健一、吉澤誠：「システム制御工学」、朝倉書店(2007)
- [50] 平井一正、池田雅夫：「非線形制御システムの解析」、オーム社（1986）
- [51] P. Naslin, " The Dynamics of Linear and Non-Linear Systems", Gordon and Breach Science Publishers (1965)
- [52] 電気学会:「電力系統標準モデルの拡充システムモデル」
[Online]http://www2.iee.or.jp/ver2/pes/23-st_model/index030.html
- [53] 東北電力ホームページ：「でんき予報」
[Online] <http://setsuden.tohoku-epco.co.jp/graph.html>

- [54] 谷口治人：「電力系統の緊急制御に関する研究」，電力中央研究所報告，No. T31, 1993
- [55] Kundur P,” Power system stability and control,” New York(NY), McGraw-Hill, 1994.

発表論文

学術雑誌

- [1] Dai Orihara, Hiroumi Saitoh, "Load Dispatching Control of Multiple-Parallel-Converters Rectifier to Maximize Conversion Efficiency," *Journal of Electrical Engineering & Technology (JEET)*, Vol. 9, No. 3, pp.1132-1136, 2014
- [2] 織原大, 斎藤浩海: 「風力発電連系系統における電源出力変化速度に適応的なバッテリーアシスト型負荷周波数制御」, *電気学会論文誌 B*, Vol. 136, No. 5, pp.515-523, 2016
- [3] Dai Orihara, Hiroumi Saitoh, "Improvement of Frequency Stability by using Battery to Compensate Rate Shortage of LFC Reserve," *Journal of International Council on Electrical Engineering (JICEE)*, Vol. 6, No. 1, pp.146-152, 2016

国際会議

- [4] Dai Orihara, Hiroumi Saitoh, "Improvement of Frequency Stability by Using Battery to Compensate Rate Shortage of LFC Reserve," in *Proc. ICEE 2015*, ICEE15A-448, Hong-Kong, 2015.7
- [5] Dai Orihara, Hiroumi Saitoh, "Evaluation of Battery Capacity required for Assist of Balancing Control," in *Proc. ICEE 2016*, No. 90332, Okinawa, Japan, 2016.7
- [6] Tianfang Xu, Dai Orihara, Hiroumi Saitoh, "Reinforcement Learning Based Heat Pump Controller for Load Frequency Control in Power System," in *Proc. ICEE 2016*, No. 90268, Okinawa, Japan, 2016.7
- [7] Dai Orihara, Hiroumi Saitoh, "Saving of Secondary Reserves by Battery-Assisted Load Frequency Control," in *Proc. IEEE PES POWERCON 2016*, No. 312, Wollongong, Australia, 2016.9

国内発表論文

- [8] 織原大, 斎藤浩海: 「電力自由化に伴う分散需給制御の導入が周波数安定性に与える影響」, H26 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-14-137, PSE-14-137, 2014.9
- [9] 織原大, 斎藤浩海: 「電力自由化環境下における需給制御への電力貯蔵装置の活用による周波数安定性の向上」, H27 電力系統技術研究会, PSE-15-005, 2015.1
- [10] 織原大, 斎藤浩海: 「LFC 調整容量の変化速度不足を補償する蓄電池制御による周波数安定性の向上」, H27 電気学会全国大会, No.6-166, 2015.3
- [11] 織原大, 斎藤浩海: 「電源出力変化速度の低下時に負荷周波数制御に貢献する蓄電池制御」, H27 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-15-117, PSE-15-139, 2015.9
- [12] 田口公陽, 織原大, 斎藤浩海: 「周波数変動抑制を目的とした電力系統の運転状態に適した負荷制御」, H27 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-15-079, PSE-15-101, 2015.9
- [13] 織原大, 斎藤浩海: 「LFC の積分制御特性を考慮した所要調整容量の推定」, H28 電気学会全国大会, 6-143, 2016.3
- [14] 織原大, 斎藤浩海: 「バッテリーアシスト型負荷周波数制御の導入による需給調整用予備力の削減効果」, H28 電気学会 B 部門大会, No. 153, 2016.9
- [15] 木村昇太, 織原大, 斎藤浩海: 「周波数変動抑制を目的とした多数台蓄電池制御における容量劣化度均一化手法」, H28 電気学会 B 部門大会, P66, 2016.9
- [16] 岩館康熙, 織原大, 斎藤浩海: 「系統過渡安定性を向上させるウインドファームと既存電源の出力配分決定法」, H28 電気学会 B 部門大会, P69, 2016.9

-
- [17] 徐天放, 織原大, 斎藤浩海: 「周波数変動抑制を目的とした空調負荷制御への強化学習法の応用」, H28 電気学会 B 部門大会, 158, 2016.9
- [18] 織原大, 斎藤浩海: 「バッテリーアシスト型負荷周波数制御と EDC の協調運用に関する基礎検討」, H28 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-16-047,PSE-16-067, 2016.9
- [19] 徐天放, 織原大, 斎藤浩海: 「LFC を支援する強化学習ベース負荷制御の性能と負荷変動特性の関係」, H28 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-16-124, PSE-16-144, 2016.9
- [20] 星野慎太郎, 斎藤浩海, 飯岡大輔, 織原大, 田村淳二, 渡辺雅浩: 「PMSG 風力発電システムの変換器制御が系統安定度に及ぼす影響」, H28 電気学会 B 部門大会, PE-16-107, PSE-16-127, 2016.9
- [21] 中山顕寛, 織原大, 飯岡大輔, 斎藤浩海: 「過渡安定性向上のための慣性可変 VSG の接続点と容量の検討」, H28 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-16-088, PSE-16-108, 2016.9