

現状のGFおよびLFCの運用について

2020年9月14日

一般送配電事業者（10社）

- 前回（8/7）の需給調整市場検討小委員会では、広域機関より一次調整力～二次調整力②に係る課題の論点と今後の検討の進め方が示された。
- これら商品のうち、一次調整力および二次調整力①は、現在の調整力公募で電源 I -aとして確保している調整力における「発電機のカバナーフリー（GF）運転」、「LFC制御」にそれぞれ相当するものである。
- 今回、広域機関事務局より一次調整力から二次調整力②の商品設計に向けた検討の進め方が示されるとともに、一般送配電事業者に対して、現状のGF・LFCの運用および技術的要件の設定状況の説明を求められた。
- GF・LFC制御は、周波数調整において重要な役割を果たすものであり、調整力供出事業者の皆さまにも実情をご理解頂けるように現状運用を取りまとめたため、報告する。

1. 市場における商品と現状のGFおよびLFCの関係
2. 現状のGFの運用
 - ① GF運転の概要
 - ② GF運転するための機能
 - ③ GF能力の確認
3. 現状のLFCの運用
 - ① LFCの概要
 - ② LFC制御における仕様
 - ③ LFC応動能力の確認
4. まとめ（現状のGF運転およびLFC制御に求めている要件）

市場における商品と現状のGFおよびLFCの関係

1 市場における商品と現状のGFおよびLFCの関係

5

- 一次調整力および二次調整力①は、現在の調整力公募で電源 I -aとして確保している調整力における「発電機のカバナーフリー（GF）運転」、「LFC制御」にそれぞれ相当する。

(参考) 需給調整市場における商品の要件

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)
指令・制御	① オフライン (自端制御)	① オンライン (LFC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン
監視	オンライン (一部オフラインも可※2)	オンライン	オンライン	オンライン	専用線：オンライン 簡易指令システム：オフライン
回線	専用線※1 (監視がオフラインの場合は不要)	専用線※1	専用線※1	専用線 または 簡易指令システム	専用線 または 簡易指令システム
応動時間	② 10秒以内	② 5分以内	5分以内	15分以内※3	45分以内
継続時間	③ 5分以上※3	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	－ (自端制御)	③ 0.5～数十秒※4	数秒～数分※4	専用線：数秒～数分 簡易指令システム：5分※6	30分
監視間隔	1～数秒※2	1～5秒程度※4	1～5秒程度※4	専用線：1～5秒程度 簡易指令システム：1分	1～30分※5

- ①系統周波数偏差検出、GF調定率に基づく制御
②周波数変動に対する即時応答
③周波数変動補償機能

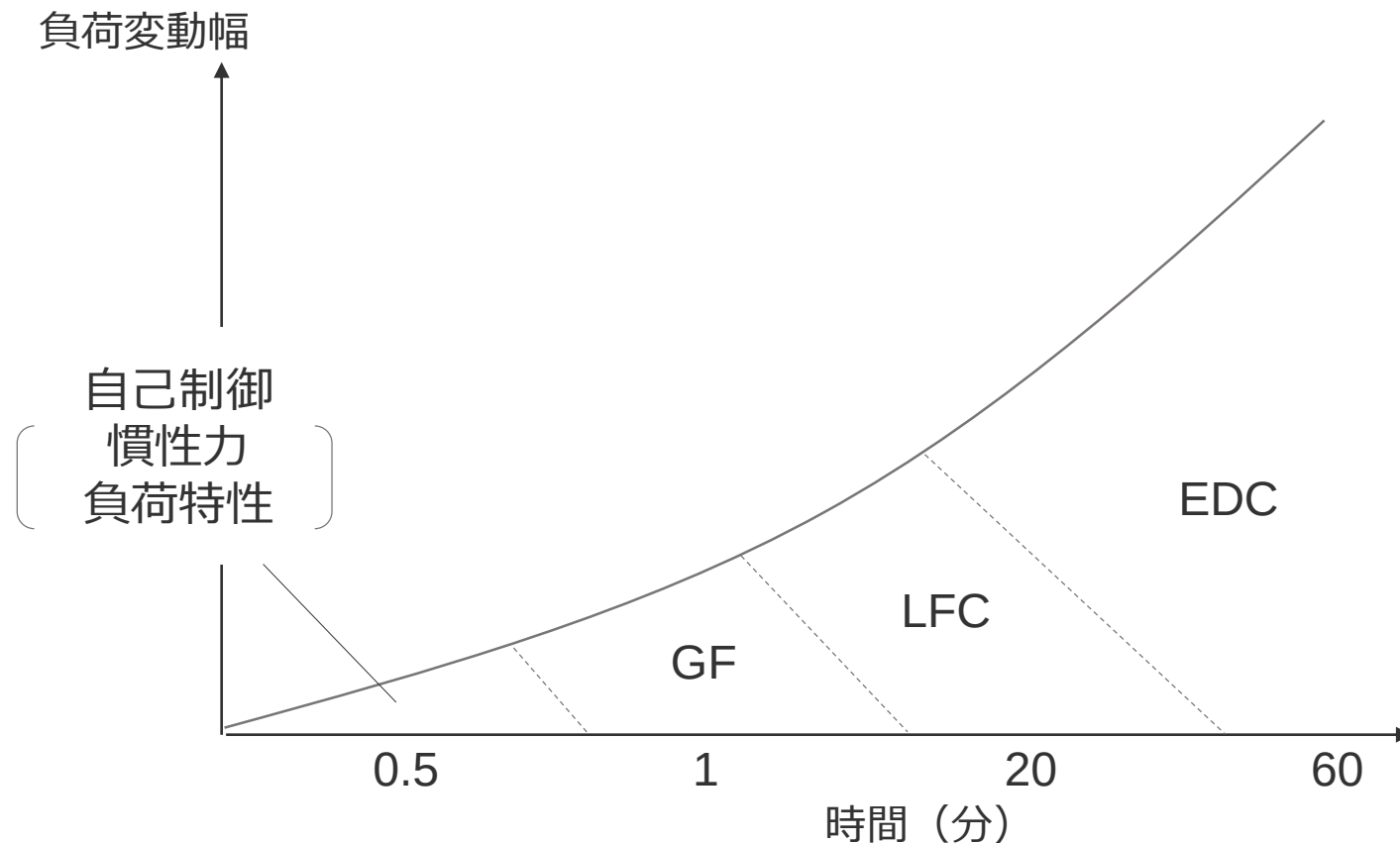
- ①LFC指令に対する応動
②連続的な出力変化
③指令に対する即応性

現状のGFの運用

2-1 GF運転の概要（GF運転の位置付け）

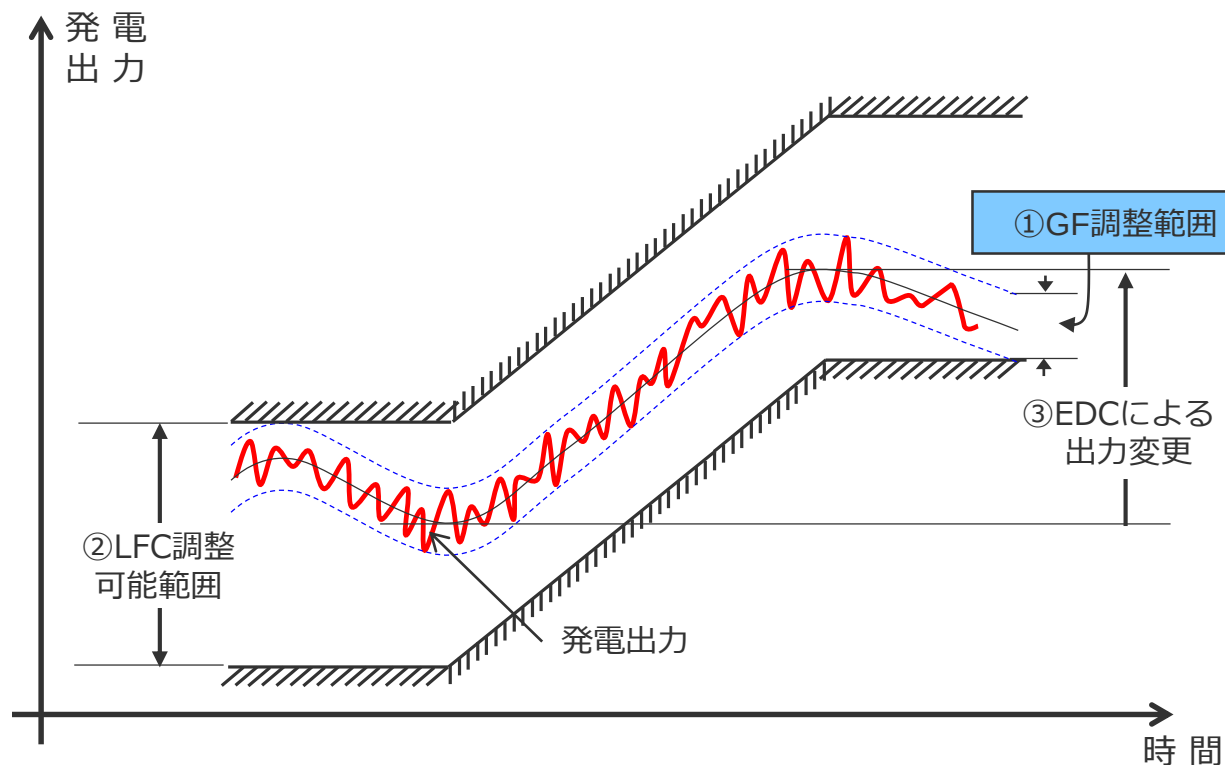
7

- 電力系統においては、接続する設備の周波数維持能力（変動抑制能力）を活用しながら基準周波数に維持している。
- まず、極めて短周期の負荷変動には、同期発電機等が持つ慣性力が働き、周波数変動スピードを抑制する。
- その後、一次調整力に相当するGFが、周波数の変化を検出し、発電機の出力を制御する。（現状のGF機能を持つ発電機は基本的に同期発電機であり、自身も慣性力を持つ。）



2-1 GF運転の概要（GF運転とは）

- GF運転とは、発電機の回転速度を一定に保つように、発電機の調速機（ガバナ）によって、系統周波数の変化に追従して発電出力を増減することをいう。
- ガバナは負荷変動や電源脱落時等の系統周波数低下に対して、調定率（周波数低下に対する出力増加率）に応じて、即時に応動を開始し発電出力を増減でき、需給調整においてGF運転は、数秒から数分の負荷変動に対して追従する役割を担っている。



①**GF**：LFCでは追従できないような負荷変動（数秒から数分程度の周期）や需給ミスマッチに対応するため、発電機の調速機により発電出力を調整。

②**LFC**：需要予測が困難な負荷変動（数分から十数分程度の周期）や需給ミスマッチに対応するため、中央給電指令所でこの変動量を計算し、これに追従するよう発電出力を調整。

③**EDC**：比較的長時間の負荷変動（十数分から数時間程度の周期）に対応するため、中央給電指令所で、需要予測に合わせ先行的に発電出力を調整。

2-1 GF運転の概要（GF運転の管理）

- 実需給では、中給システムにおいて発電機の運転状態からリアルタイムにエリア全体で必要なGF量を計算しており、エリア需要に対して3%程度確保していることを確認している。
- システム画面に表示されるインジケータはリアルタイムでの確保容量を示すが、エリア需要や発電機の運転状況で常に変化するため、運転員は最も確保量が少なくなる時間帯で3%以上となるように運転計画する。
- このため、常に確保容量が3%程度に滞在するわけではなく、運転する発電機に比べてエリア需要が相対的に小さい夜間は、確保容量が大きくなる傾向にある。

中央給電指令所におけるガバナフリー量の確保状況の監視（中部エリアの場合）



中央給電指令所の運転員は、自動給電システムのガバナフリーインジケータを参考にガバナフリー容量の確保状況を確認。



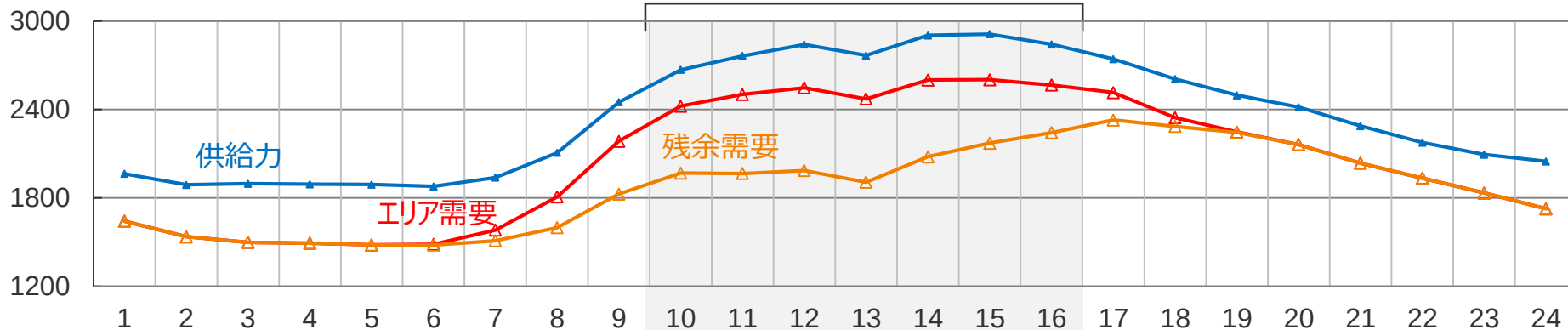
2-1 GF運転の概要（GF容量の確保実績（中部エリアの例））

10

- 2019年度の夏季最大需要発生日（8月2日）におけるGF量の確保状況は下図のとおり。発電機の並列台数が減る昼間帯（10～15時）においてもGFを3%確保できるように運転する。
- また、コンバインド機の余力が減少する残余需要ピーク（16～20時）では揚水発電機によりGF量を確保することで3%以上を維持している。

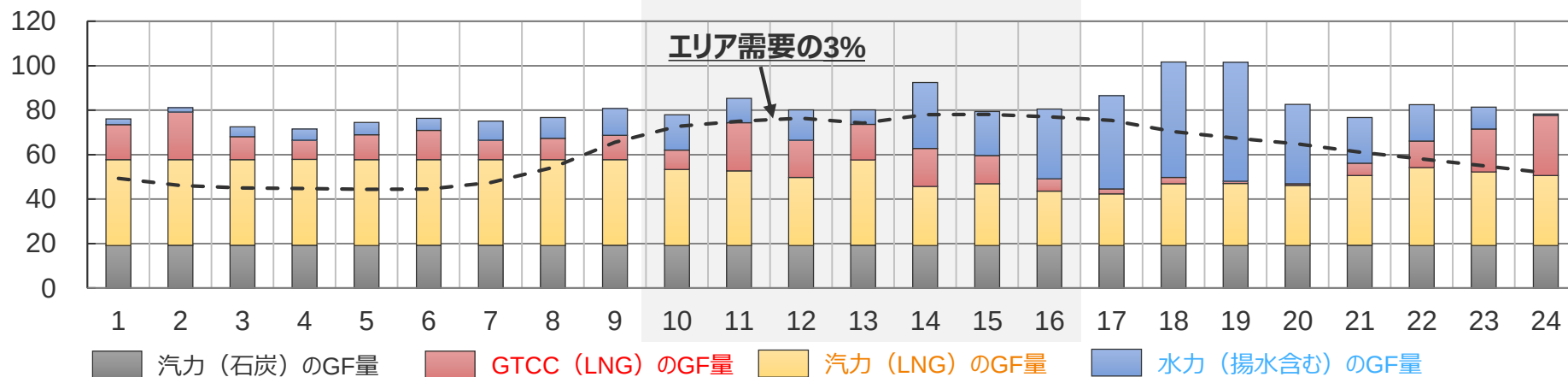
供給力、エリア需要、
残余需要 [万kW]

太陽光発電出力の大きい時間帯やピーク
需要帯においても3%確保できるように計画



GF量 [万kW]

エリア需要の3%



2-2 GF運転するための機能（系統連系技術要件）

11

- GFに係る技術要件として、各一般送配電事業者が定める系統技術要件では、新設またはリプレイスされる10万kW以上の火力発電機（一部混焼バイオマス発電機を含む）を対象に、以下の要件を定めている。

【系統連系技術要件（中部の例）】

	発電機定格出力	10万キロワット以上	
		GTおよびGTCC	その他の火力発電設備および混焼バイオマス発電設備 ^{※6}
機能・仕様等	GF調定率	5 パーセント以下	5 パーセント以下
	GF幅 ^{※1}	5 パーセント以上 (定格出力基準)	3 パーセント以上 (定格出力基準)
	LFC幅	± 5 パーセント以上 (定格出力基準)	± 5 パーセント以上 (定格出力基準)
	LFC変化速度 ^{※2}	5 パーセント/分以上 (定格出力基準)	1 パーセント/分以上 (定格出力基準)
	EDC変化速度 ^{※2}	5 パーセント/分以上 (定格出力基準)	1 パーセント/分以上 (定格出力基準)
	EDC+LFC変化速度	10パーセント/分以上 (定格出力基準)	1 パーセント/分以上 (定格出力基準)
	最低出力 ^{※3※4} (定格出力基準)	50パーセント以下 DSS 機能具備 ^{※5}	30パーセント以下

○ ガバナフリー運転機能

タービンの調速機（ガバナ）を系統周波数の変動に応じて発電機出力を変化させるように運転（ガバナフリー運転）する機能を具備すること。

○ 周波数変動補償機能

標準周波数±0.2Hzを超えた場合、系統の周波数変動により、ガバナで調整した出力を発電所の自動出力制御装置が、出力指令値に引き戻すことがないように、ガバナによる出力変動相当を出力指令値に加算する機能を具備すること。

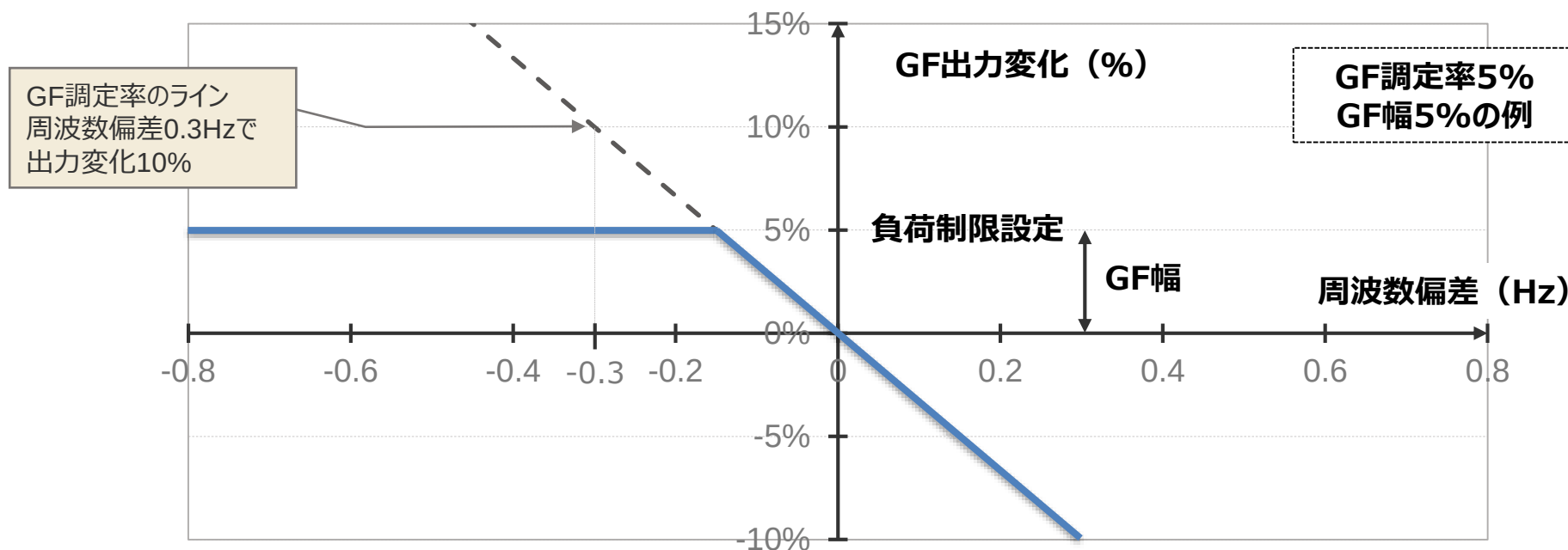
2-2 GF運転するための機能（GF調定率による制御）

12

- GFは中給からの指令に応動するものではなく、周波数偏差に対し発電機自ら出力増加・減少させるものであり、GF調定率は、周波数変動に応じて、発電機がどの程度GF応動するか、という率を示したもの。
 - 「GF調定率 = 5%」とは、5%の周波数変動（60Hz系では3Hzの変動）が生じたとき、発電機の定格出力の100%が変化する※、という意味であり、調定率が小さいほど周波数に敏感に応動する。
 - 実際は、負荷制限設定で決まる「GF幅」が動作できる上限であり、GF調定率5%、GF幅5%の発電機は下図のように応動する。
- ※0.3Hzで10%変化と同義

現状の運用で求めていること

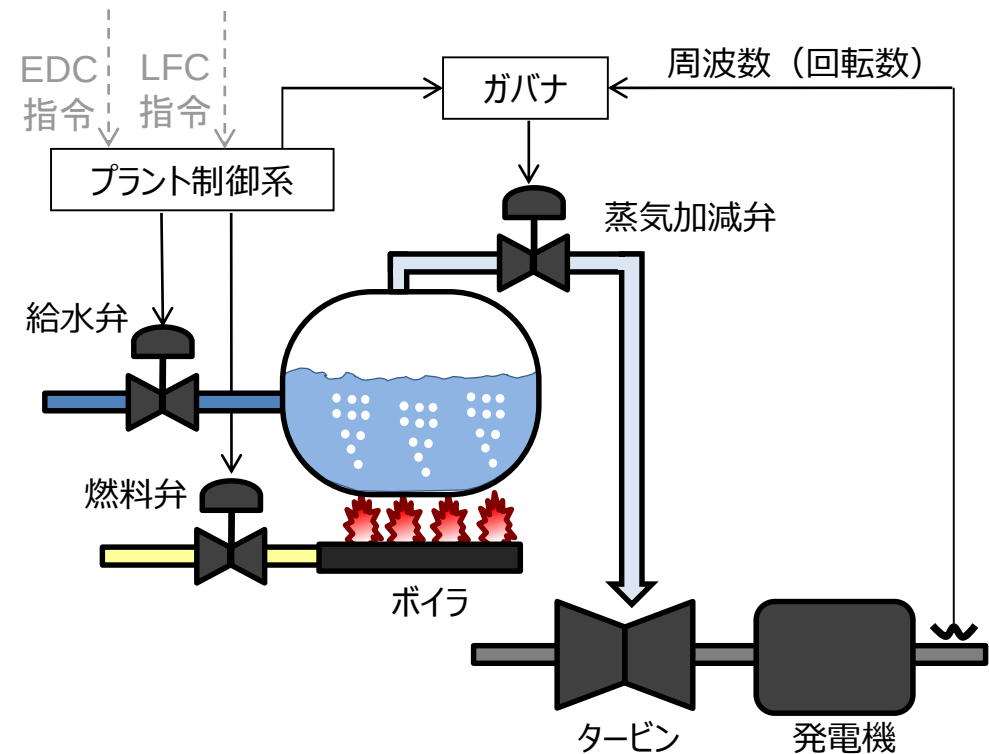
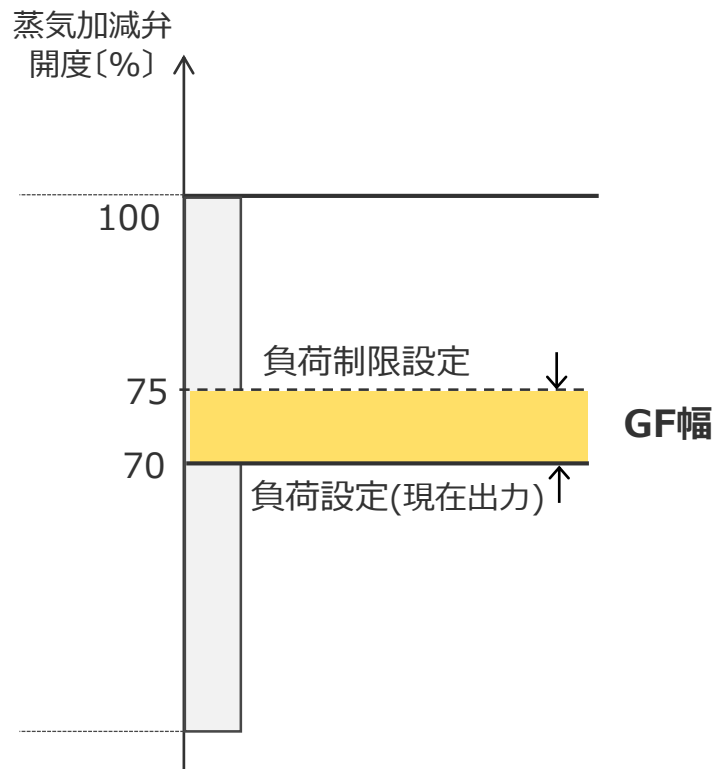
- ・ GF運転する発電機の自端で系統周波数偏差を検出すること。
- ・ 並列中発電機は、自端で検出した周波数偏差に対し、GF調定率に応じて出力増加・減少すること。



2-2 GF運転するための機能（GF幅（汽力プラントの例））

13

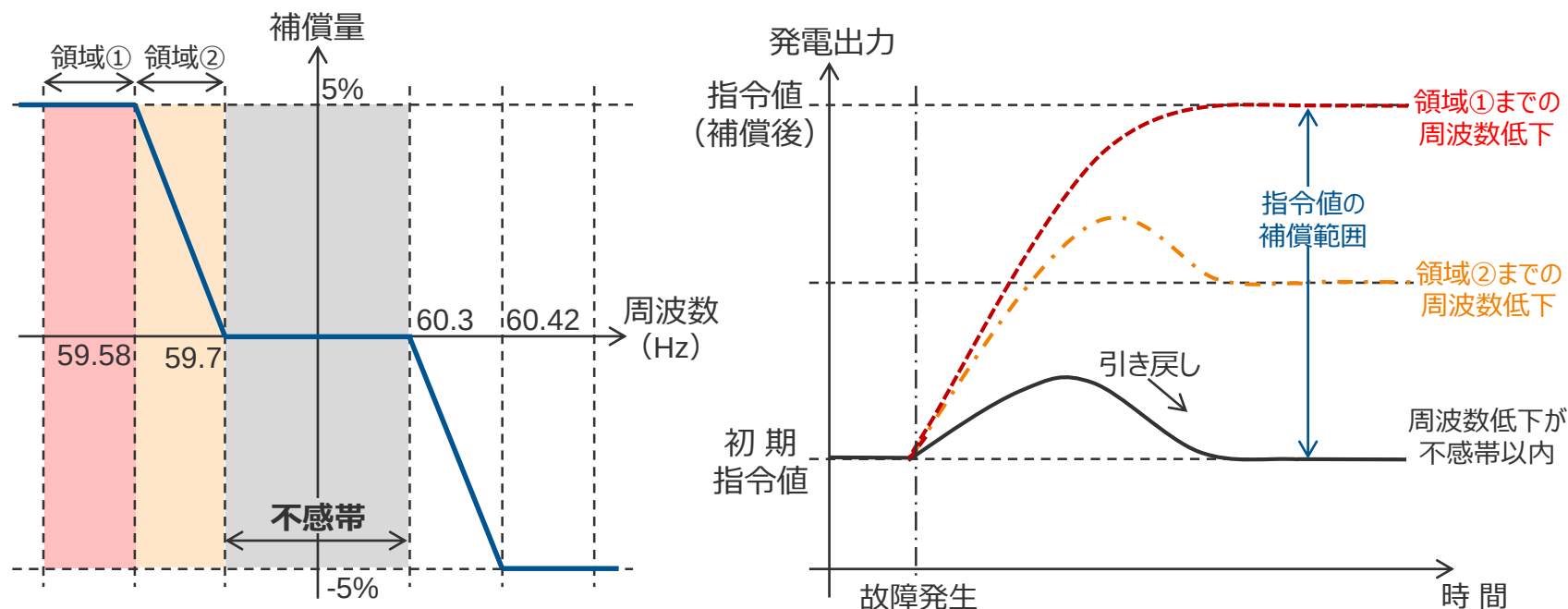
- GF運転は、発電機の回転速度の変化に対して、GF調定率に従って発電出力を変化させる。
- 一般に周波数（回転数）低下時の出力増加の上限として負荷制限（ロードリミット）が設定され、負荷設定からロードリミットまでの余裕をGF幅という。
- 汽力プラントの場合、ガバナは回転数偏差とGF調定率に従って蒸気加減弁を自動で開閉し、GF幅の範囲内で、発電出力が調整される。



- 周波数変動補償機能は、発電機の故障などに伴い周波数が低下した場合に、発電機の指令値に対して、周波数を回復させるために必要な出力増加分を加算するものである。
- 平常時の周波数変動では、ガバナが動作したあと一定程度の時間が経過すると、周波数の変動とは関係なく、もとの出力指令値に引き戻す仕組みとなっている。
- 他方、周波数が低下する異常時には、引き戻しが生じないように指令値に対して自動で補償量を加算することで、発電機のガバナ動作が継続し、周波数の低下を抑制することができる。

現状の運用で求めていること

- ・ 周波数が継続して低下する異常時に、ガバナが動作した後においても、発電出力をもとの出力指令値に引き戻すことがないよう「周波数変動補償機能」を具備すること。



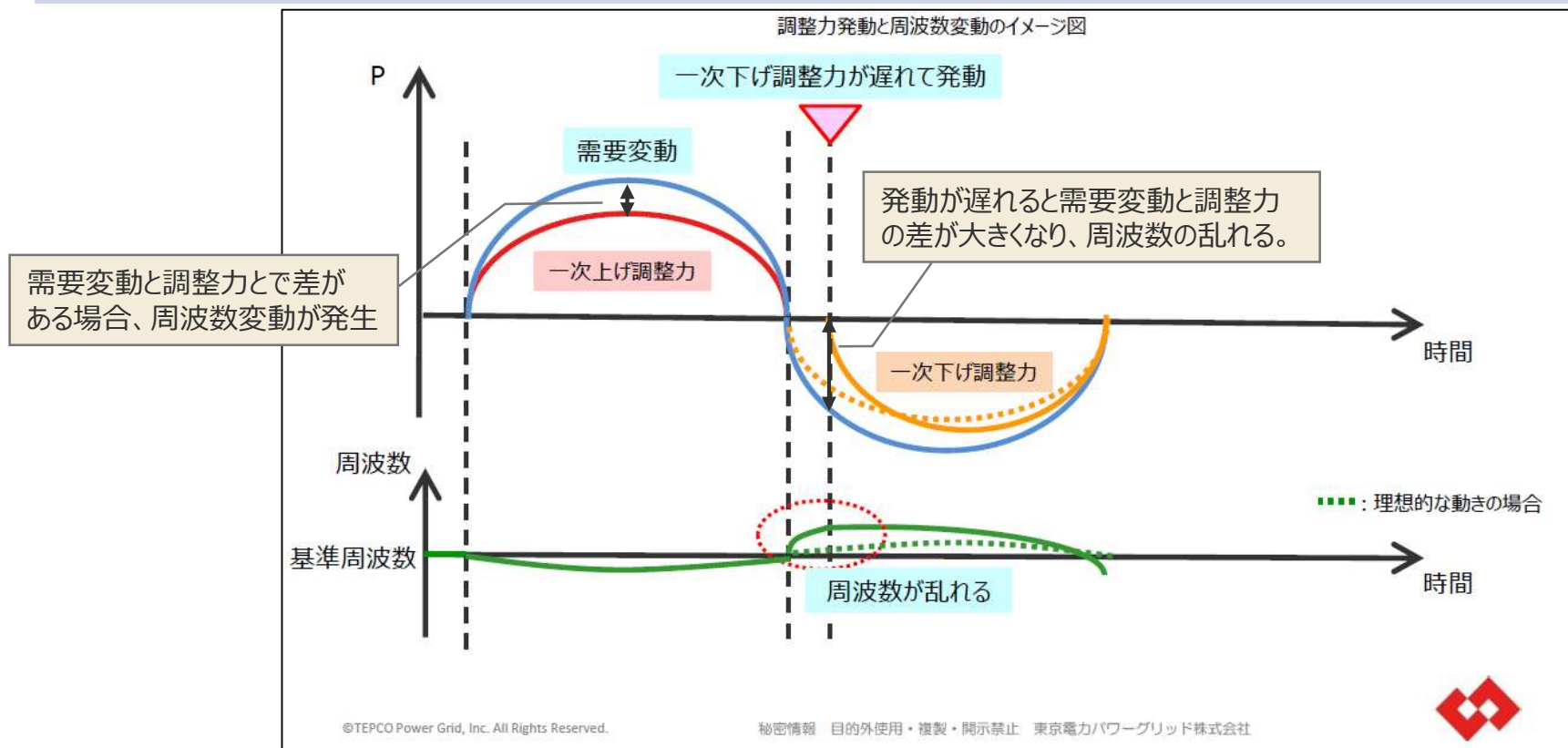
2-2 GF運転するための機能（周波数変動に対する即時応答）

15

- 周波数の変化を検出し、GFが応動するまでに周波数検出時や周波数変動補償時等に遅れが発生する。
- 周波数変動は瞬時瞬時の需要変動によって生じるものであり、GFが適切なタイミングで応動しないと周波数が乱れる。よって、GFには即応性が求められる。

現状の運用で求めていること

- 不要に周波数が乱れないよう、周波数偏差を検出後、速やかに出力変化を開始させること。
→ 周波数品質維持のための調整力の発動時間遅れに関する規律が必要

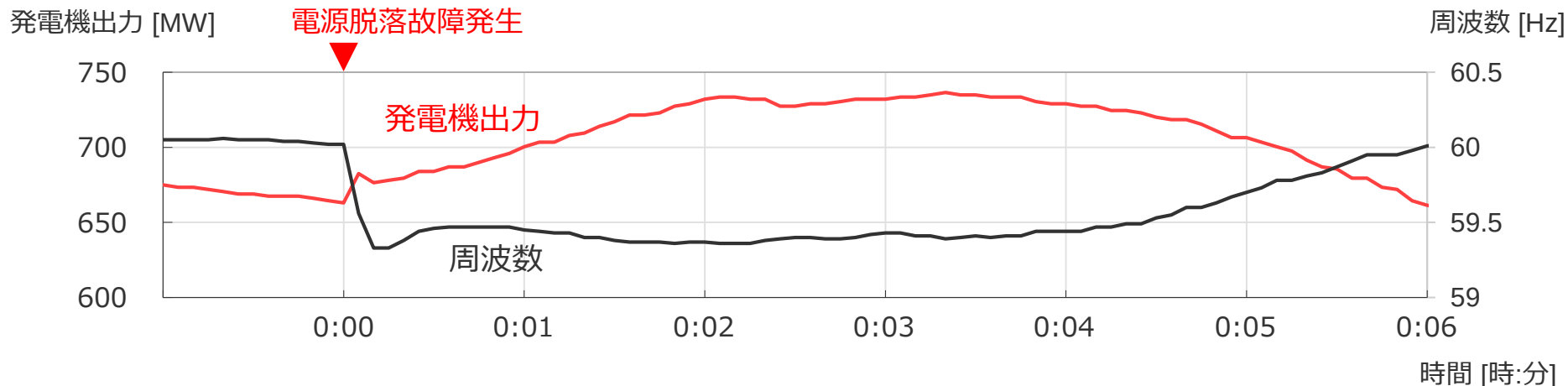


2-3 GF能力の確認方法（周波数逸脱時の応動確認）

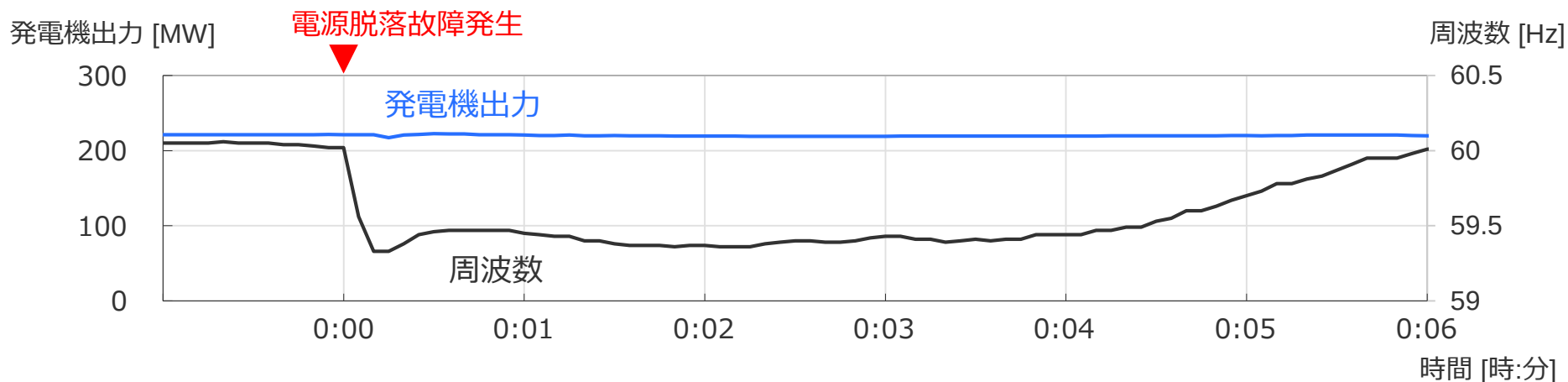
16

○ 大規模電源脱落に伴う周波数逸脱時等、GFが実際に応動しているかを確認している。

①GF機能をもつ発電機

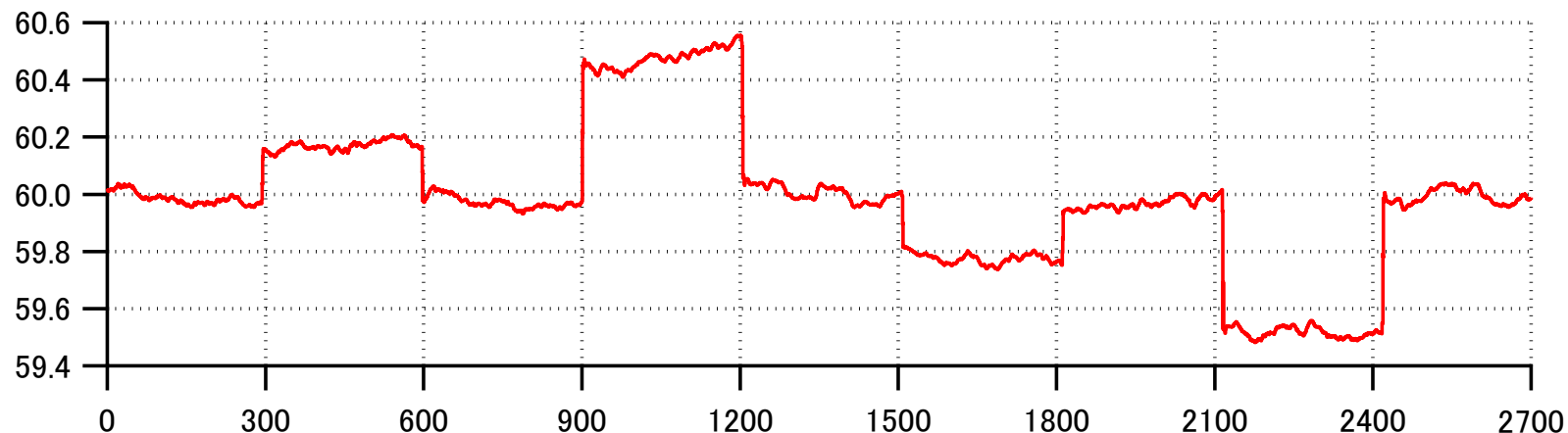


②GF機能をもたない発電機（参考）

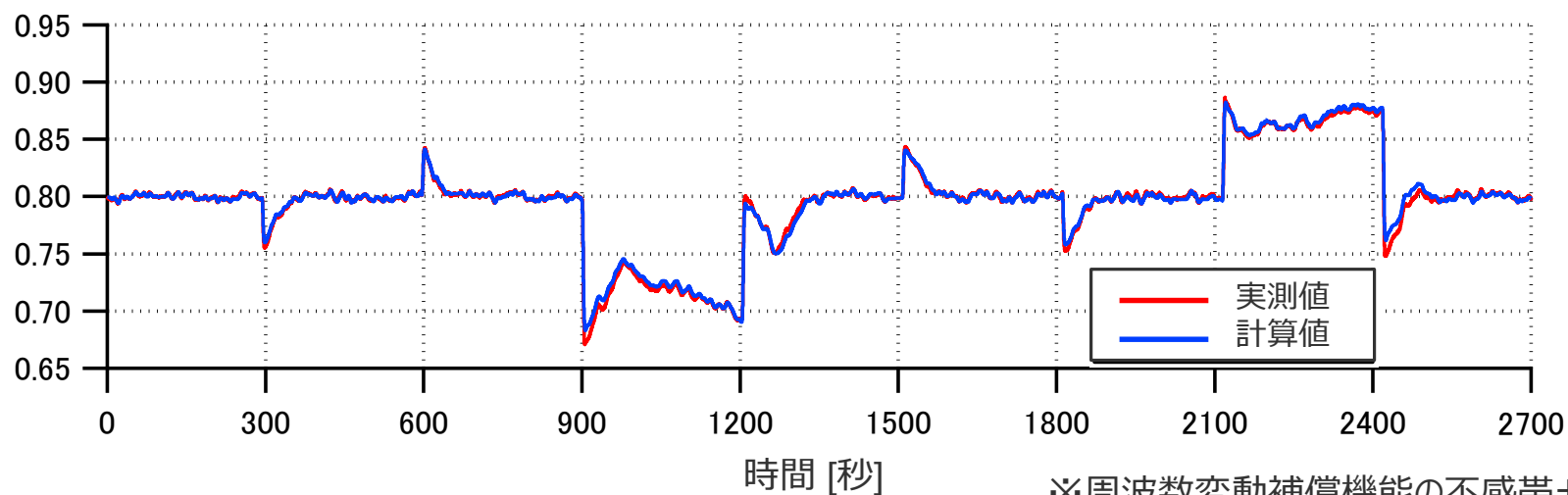


○ 過去、発電機の新設時等に周波数変動模擬試験を実施したときの例を以下に示す。

周波数 [Hz]



発電機出力 [pu]



※周波数変動補償機能の不感帯 $\pm 0.3\text{Hz}$

現状のLFCの運用

- LFC（負荷周波数制御）は、数分から十数分程度までの短時間の変動を対象とした制御であり、各エリア中給で必要な調整量（地域要求量：AR = Area Requirement）を計算し、調整対象の各発電機に出力の上げ・下げ信号（LFC指令）を送信するもの。
- 周波数維持の根幹をなす制御であり、確実かつ即応性のある応動が求められる。

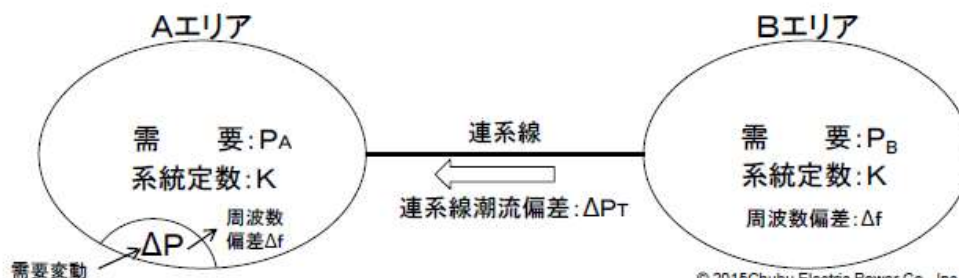
17 【参考】地域要求量（AR：Area Requirement）について



- 60Hz地域では、エリア内で需給変動が生じた場合、変動が生じたエリア内の発電機出力を調整し、基準周波数を維持している。
- 需要変動(ΔP)と、エリア需要(P_A)と周波数偏差(Δf)の積は、次式のとおりに比例関係にある。

$$\Delta P = -K \cdot P_A \cdot \Delta f \quad (K: \text{系統定数})$$
- 下図において、Aエリアで需要変動(ΔP)が生じ、周波数偏差(Δf)が生じた場合、需給の均衡状態へ戻すために必要な調整量を、地域要求量(AR)と呼んでいる。
- 連系系統において、Aエリア内の需要変動(ΔP)により、周波数偏差(Δf)および連系線潮流偏差(ΔP_T)が生じた場合の、Aエリアにて必要な調整量(AR)は、周波数偏差および連系線潮流偏差を「零」に戻すために必要な量の合計となる。

$$AR = -K \cdot P_A \cdot \Delta f + \Delta P_T \quad (= \Delta P)$$
- 中央給電指令所は、常時ARを監視し、その値が「零」になるよう発電出力の調整を行っている。



© 2015 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

3-2 LFC制御における仕様（系統連系技術要件）

20

- 周波数を適正に維持する上で、調整力を供出する発電機が中給のLFC指令に適切に応動することが極めて重要である。
- 具体的には、調整力を提供する発電機がLFC指令に応じる幅を持つこと、一定以上の変化速度があり、中給がそれを認識することが必要。
- そこで一般送配電事業者が定める系統連系技術件では、新設またはリプレースされる10万kW以上の火力発電機（一部混焼バイオマス発電機を含む）に対して、LFC幅、LFC変化速度、EDC+LFC変化速度を一定以上確保することを求めている。

【系統連系技術要件（中部の例）】

	発電機定格出力	10万キロワット以上	
		GTおよびGTCC	その他の火力発電設備および混焼バイオマス発電設備 ^{※6}
機能・仕様等	GF調定率	5パーセント以下	5パーセント以下
	GF幅 ^{※1}	5パーセント以上 (定格出力基準)	3パーセント以上 (定格出力基準)
	LFC幅	±5パーセント以上 (定格出力基準)	±5パーセント以上 (定格出力基準)
	LFC変化速度 ^{※2}	5パーセント/分以上 (定格出力基準)	1パーセント/分以上 (定格出力基準)
	EDC変化速度 ^{※2}	5パーセント/分以上 (定格出力基準)	1パーセント/分以上 (定格出力基準)
	EDC+LFC変化速度	10パーセント/分以上 (定格出力基準)	1パーセント/分以上 (定格出力基準)
	最低出力 ^{※3※4} (定格出力基準)	50パーセント以下 DSS 機能具備 ^{※5}	30パーセント以下

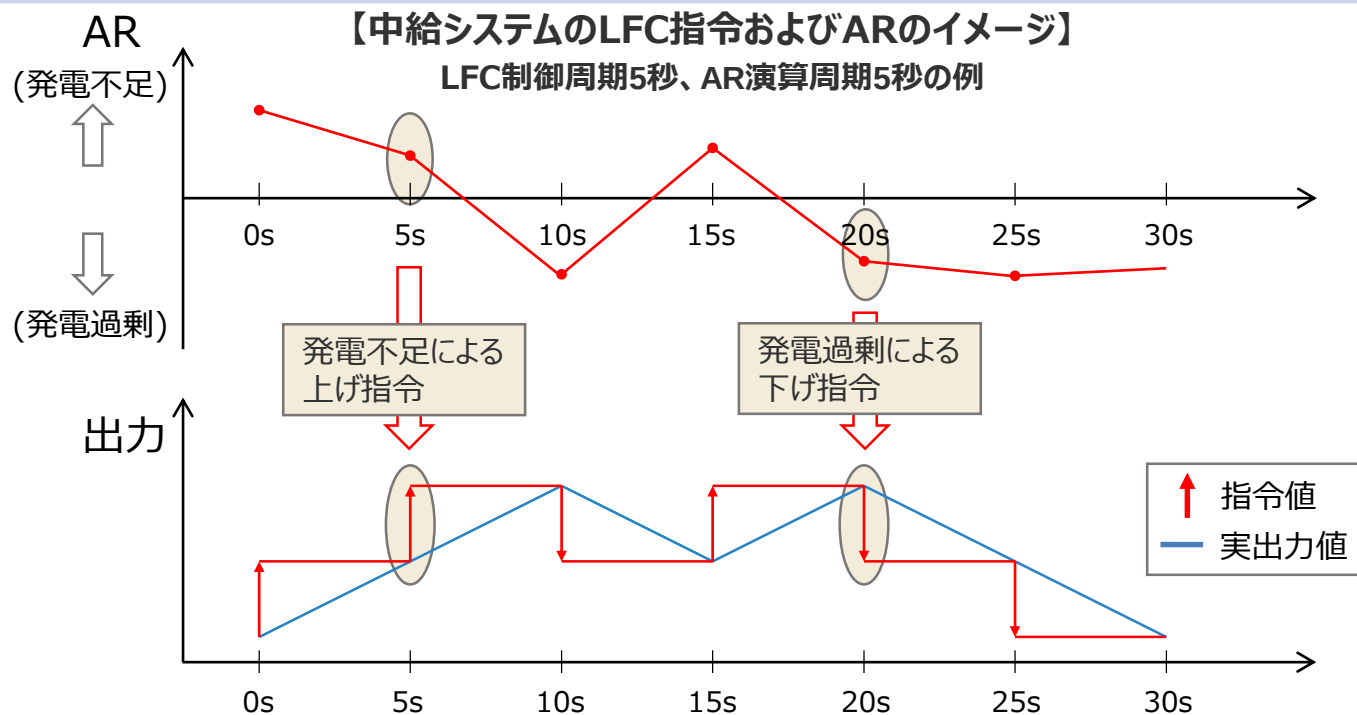
3-2 LFC制御における仕様（応動時間と指令間隔の関係）

21

- 中給システムは周波数および連系線潮流を計測し、偏差が発生した場合は、並列中の発電機を対象に、各社中給システムより、0.5秒～数十秒の周期で、LFC指令信号を発信する。
- 周波数および連系線潮流は絶えず変動しており、LFC指令信号を短い周期で上げ下げ指令を繰り返し行う。
- 中給は各発電機の変化速度を認識しており、LFC指令を受けた発電機は、中給と共有した変化速度で指令に応動している。

現状の運用で求めていること

- ・ 並列中のLFC対象発電機は、連続的な需給変動に対して連続的に出力すること。
- ・ 発電機は、その変化速度などの性能を各社中給と共有の上で、中給システムによるLFC指令に応動すること。
→ 今後のDR等の新たなリソースの増加を見据え、周波数品質維持のための中間点に関する規律が必要。



3-2 LFC制御における仕様（LFCの制御方式）

22

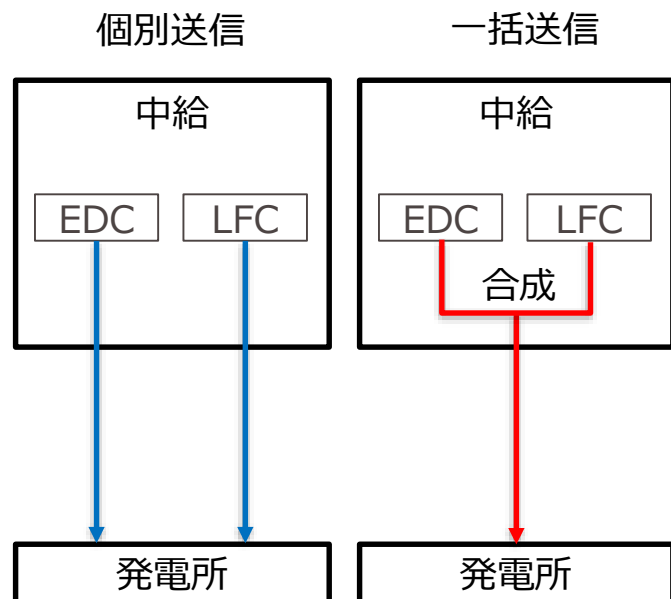
- 発電機構成や特性、系統状況に合わせ、各エリアで中給システムを構築してきた経緯があり、現時点の各エリアのLFC指令値の送信方法には差異があり、調整力供出においては当面、各社中給システムの仕様に応じた制御を実施する必要がある。

現状の運用で求めていること

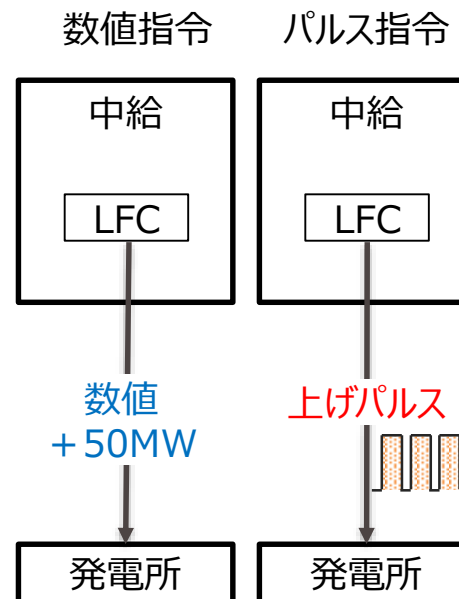
- ・ LFC対象発電機は、各社中給システム仕様（個別／一括、数値／パルス）に基づき応動すること。

【LFC制御方式の違い】

① EDC・LFC信号 (個別/一括)



② LFC信号の形式 (数値/パルス)



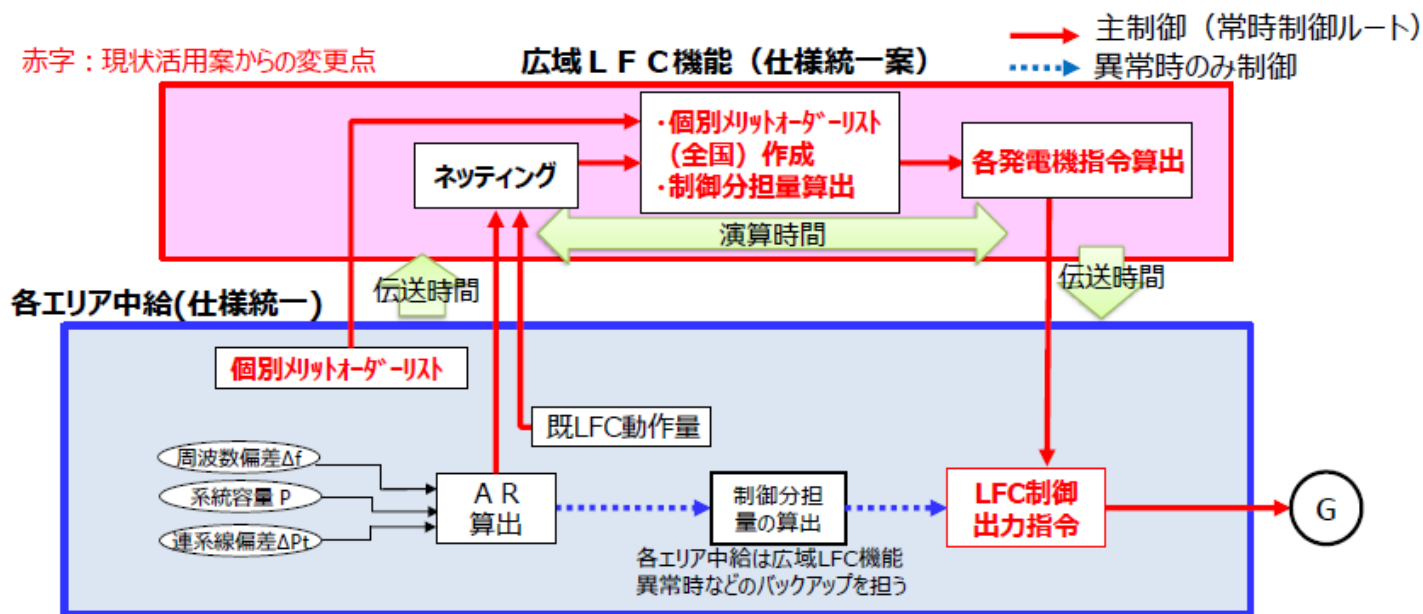
- 現状、LFC制御方式はエリアごとに差異があるが、全国どのエリアでも同じ方式で接続可能となれば、調整力供出事業者の参加機会の拡大にもつながることから、中給システムの制御信号の内容（数値指令、EDC・LFC個別指令）、制御周期、通信方式、伝送方法の統一を検討中。（仕様統一案）

Ⅱ. 仕様統一案の検討

18

2 仕様統一案の制御ロジックの概要について

- 現状活用案では、エリア毎にARの配分や既LFC動作量の持ち替えを行うことで二次調整力①の広域運用を行うこととした。
- 仕様統一案では、現状活用案と同様のコンセプトのもと、調整力コストの更なる低減を目指し、各エリア中給システムの仕様の統一に加え、ARに対する制御指令や既LFC動作量のメ리트オーダーによる持ち替えを広域LFC機能が発電機毎の個別メ리트オーダーリストを考慮して行うことにより広域運用を実現する制御ロジックを検討した。



3-2 LFC制御における仕様（仕様統一案の検討）

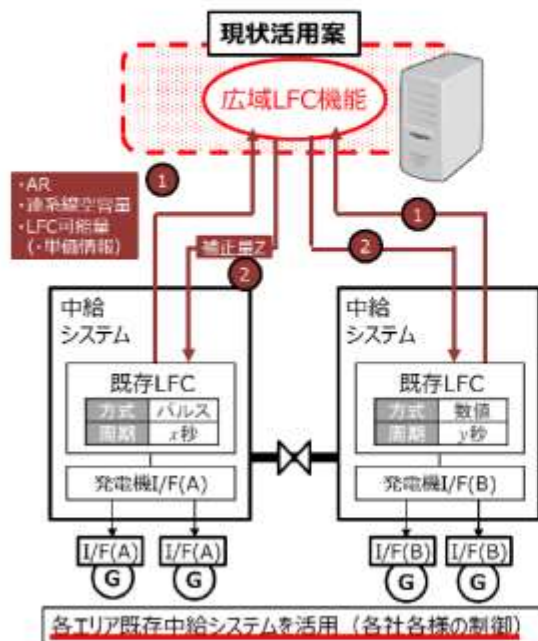
24

- 仕様統一案の検討においては、需給調整に参加するリソースに対する指令インターフェースの統一方法についても検討中。

（参考）現状活用案と仕様統一案の概略について

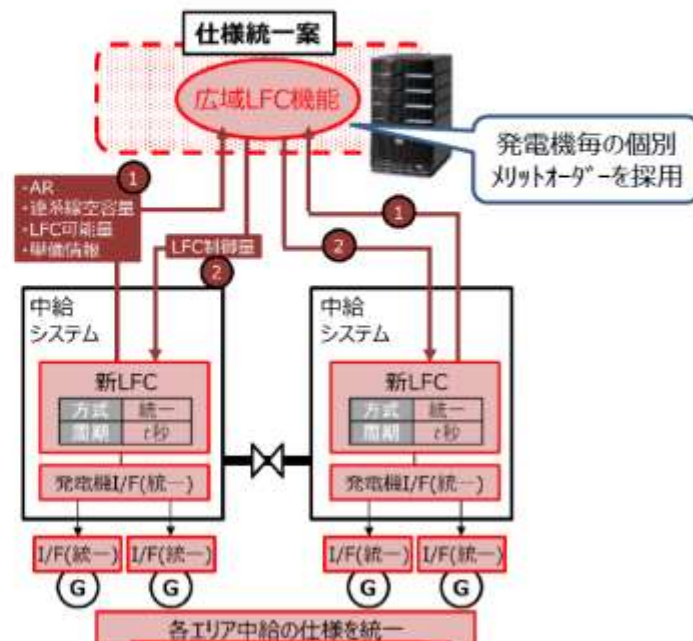
22

- 現状活用案は、現状の各社中給システムと発電機インターフェイスを活用することを前提に、広域運用を実現する案。



赤字：新規開発、赤網掛け：仕様統一化

- 仕様統一案は、各社中給システムの抜本改修を前提に、制御方式・制御周期等を統一した上で、発電機毎の個別メリットオーダーに基づく広域運用を実現する案。



【参考】LFCの制御方式（各社中給システムの制御仕様）

- LFC指令値の送信方法として、EDCとLFC信号をそれぞれ個別に送信するエリア（個別）と、EDCとLFC信号を合わせて一括で送信するエリア（一括）が存在。
- また、信号形式についても、数値を送信するエリアと、パルスを送信するエリアが存在。

	北海道	東北	東京	中部	北陸	関西	中国	四国	九州	沖縄
①EDC・LFC信号 (個別/一括)	一括※1	個別※2	個別	一括	一括	個別	一括	一括	一括	個別
②LFC信号の形式 (数値/パルス)	数値	数値	パルス※3	パルス※4	数値	パルス※5	数値	数値	数値	数値
(参考) EDC信号の形式 (数値/パルス)	数値	数値	数値	パルス※4	数値	数値	数値	数値	数値	数値
LFC制御周期	3s	5s	1s	10s※6	30s	0.5s※7	10s	20s※8	5s	2s
(参考) AR演算周期	3s	5s	1s	5s	2s	0.5s	2s	2s	5s	2s
EDC演算周期	3m	3m	5m※9	5m	5m	3m	5m	5m	5m	1m

※1：火力発電所にはEDCのみの指令値も送信

※3：LFC幅よりも大きな数値を送信することで、パルス制御を実現

※5：10秒継続又は積分量超過にて制御出力

※7：ARが一定条件となった場合に制御

※9：5分周期の演算結果を、1分周期に発電機指令値を分けて送信

※2：一部、一括で指令している発電所あり

※4：一部水力に数値指令あり

※6：ARが、ある閾値以上になると5秒

※8：指定により、5秒に切り替え

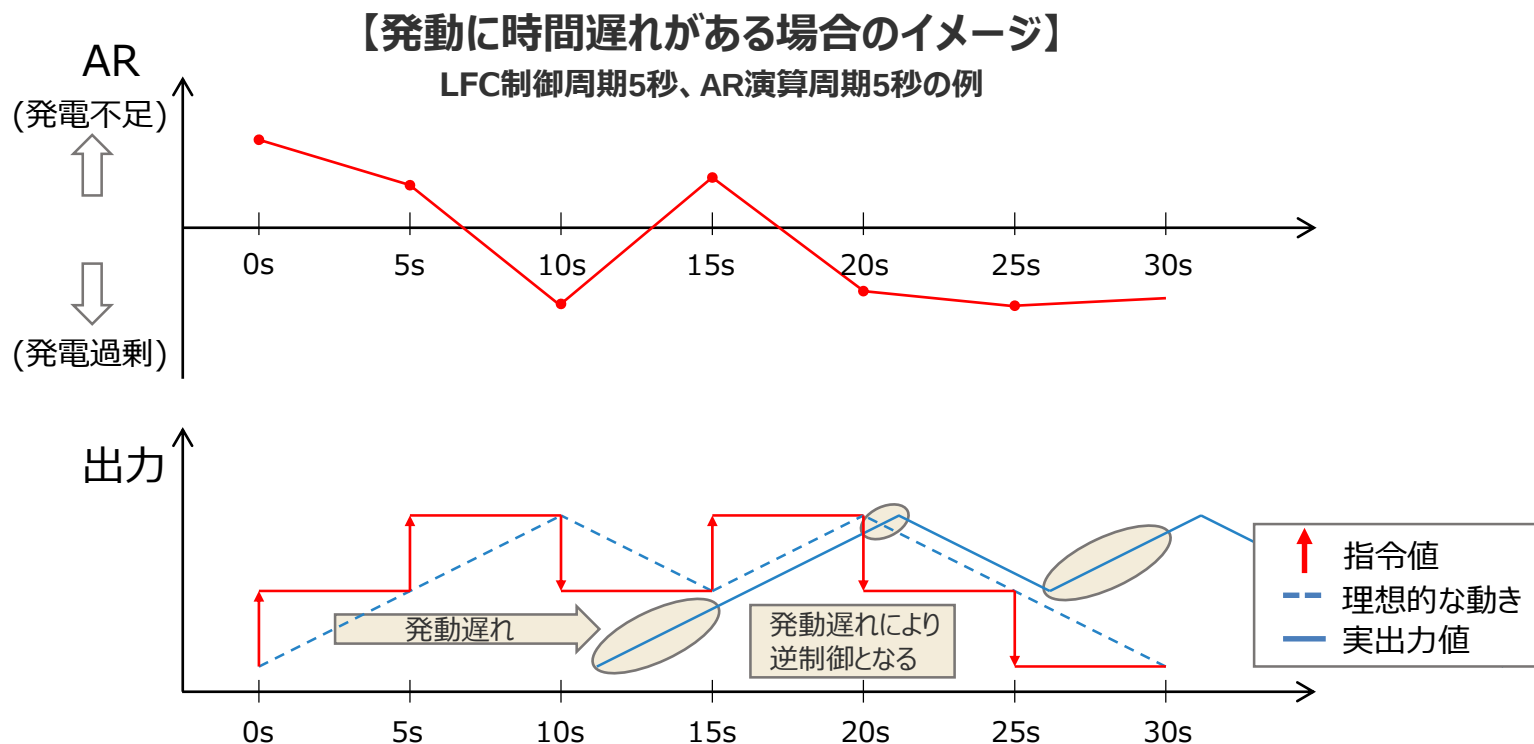
3-2 LFC制御における仕様（指令に対する即応性）

26

- LFCは、中給で周波数の変化と連系線潮流の変化をARという形で検出し、そのAR分を増発する制御。
- 主として数秒程度以下の短周期での制御となり、周波数維持のためには、中給からの指令を受けた後に即応することが重要。（発動に時間遅れがある場合、逆制御となり、不要に周波数が乱れるおそれがある）

現状の運用で求めていること

- 調整力の発動に時間遅れがある場合、逆制御となり、周波数が乱れるおそれがあるため、指令に対し即応できること。
→ 周波数品質維持のための調整力の発動時間遅れ等に関する規律が必要。



3-3 LFC応動能力の確認

27

- 各社中給がLFC制御する発電機の性能は、発電機の新設時にEDC/LFC指令に基づく負荷変化試験を行う等、負荷変化速度が契約保証値（仕様）を満足していることを確認している。
- 以下は関西の発電機新設時における試験の例。

現在活用している調整力（既存電源）の事前審査
（関西の既設発電機の新設時の試験の例）

7

- 既設発電機は、新設の際、メーカーから事業者引き渡されるまでに、事業者側で仕様設計した内容（仕様書）が満足されているかどうか事業者とメーカーで性能保証運転を行っている。（東京、中部も同様）
- 試運転（性能保証運転）において、負荷運転中にEDC/LFC負荷変化試験、周波数応答試験を行うことで、調整力としての性能を確認している。
- 事前に調整力として必要な情報と試験時の出力応動結果が合っていることを確認。（事前審査に相当）

事業者が仕様設計したもの（仕様書に記載）を性能保証運転で確認

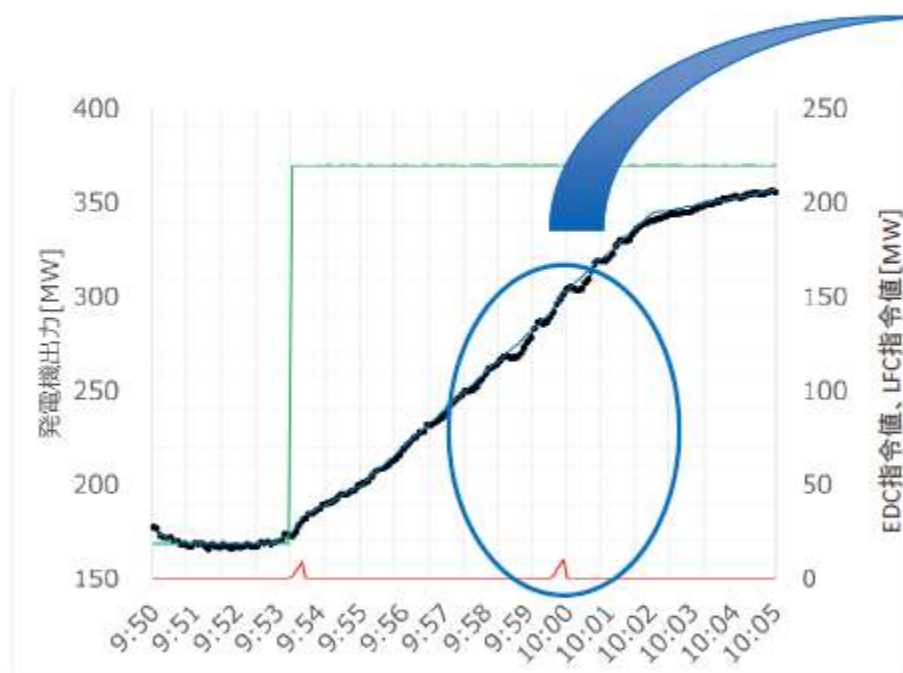


性能保証運転の内容	号機定格出力	<EDC/LFC負荷変化試験> EDCならびにLFC指令値に対する負荷変化追従性に問題なく、契約保証値（仕様）を満足している事を確認する。 （合否判定基準：保証値±3%以内）
	号機効率	
	連続運転可能最低出力	
	負荷変化速度	
	起動時間	<周波数応答試験> 負荷運転中のユニットにおいて、模擬周波数変動信号を入力し、応答量の計測、及びプラント運転が運転継続可能であることを確認する （合否判定基準：保証値以上）
	連続運転可能範囲 （電圧、力率、周波数、低周波数）	
	定格出力時における所内比率	
	ばい煙排出濃度	
	機器の騒音値	

EDC/LFC負荷変化試験の実例（関西の例）

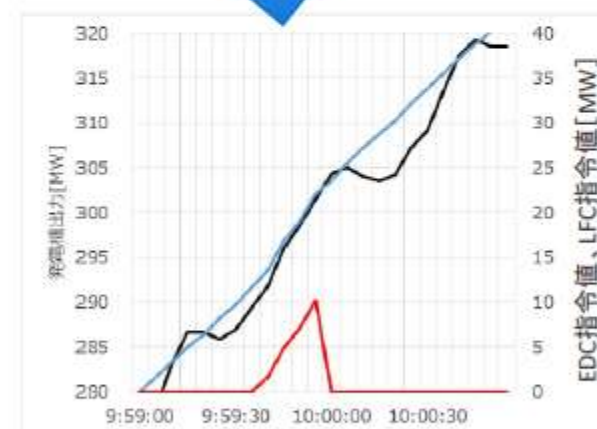
9

- 負荷変化試験の中で、発電機側の制御信号と発電機出力との最大偏差を記録し、出力偏差が $\pm 3\%$ （ $\pm 12\text{ MW}$ ）であることを確認。



— EDC指令値 — LFC指令値 — 発電機側の制御信号 ● 発電機出力
(LFC指令値は発電機側でパルスを数値に変換したデータ)

拡大



・中給からのEDC/LFC指令に応じて、発電機側の制御信号を生成し、発電機側の制御信号に対して発電機出力が $\pm 3\%$ 以内であることを確認。

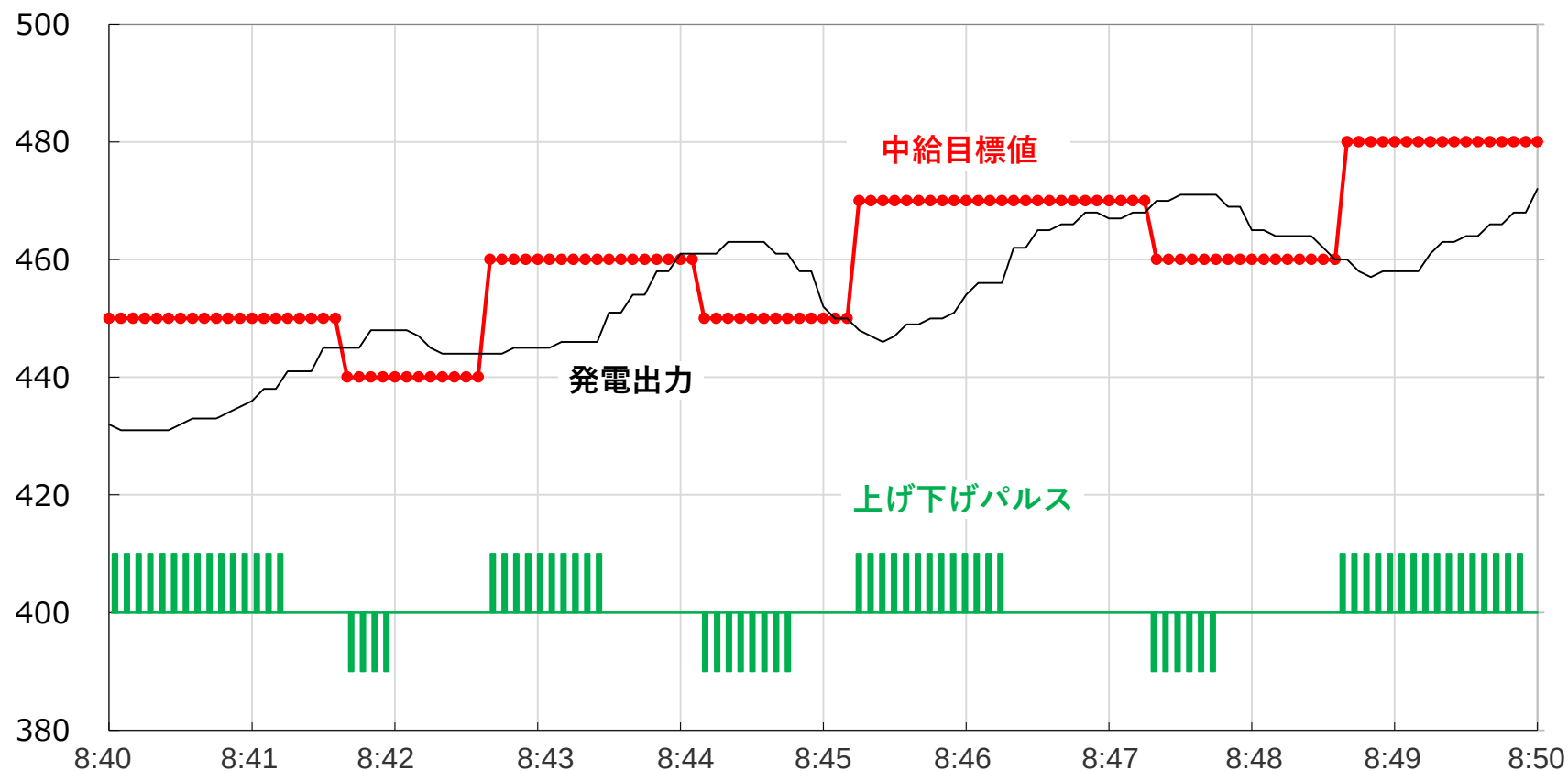
3-3 LFC応動能力の確認（負荷変化試験（中部の例））

29

○ 中部の場合、中給目標値と現在出力値とを比較し、上げ・下げパルスを送信しており、発電機が受信したパルスに基づき応動していることを確認。

【 負荷変化試験の一例 】

発電出力
[万kW]



- 一次調整力および二次調整力①の商品要件を具体的に決定していくにあたり、現状のGFおよびLFCの運用について整理した。

【GF】

- ✓ GF運転する発電機の自端で系統周波数偏差を検出すること。
- ✓ 並列中発電機は、自端で検出した周波数偏差に対し、GF調定率に応じて出力増加・減少すること。
- ✓ 周波数が継続して低下する異常時に、ガバナが動作した後においても、発電出力をもとの出力指令値に引き戻すことがないよう「周波数変動補償機能」を具備すること。
- ✓ 不要に周波数が乱れるおそれがあるため、周波数偏差を検出後、速やかに出力変化を開始させること。

【LFC】

- ✓ 並列中のLFC対象発電機は、連続的な需給変動に対して連続的に出力すること。
- ✓ 発電機は、その変化速度などの性能を各社中給と共有の上で、中給システムによるLFC指令に応動すること。
- ✓ LFC対象発電機は、各社中給システム仕様（個別／一括、数値／パルス）に基づき応動すること。
- ✓ 調整力の発動に時間遅れがある場合、逆制御となり、周波数が乱れるおそれがあるため、指令に対し即応できること。

- 当該商品の設計に向けては、現状の運用を踏まえて、数値設定等、具体的な要件の検討が必要。
 - ✓ 周波数品質維持のための中間点や調整力の発動時間遅れ等に関する規律設定の要否
 - ✓ 周波数計に関する要件
 - ✓ オフライン発電機の応動確認方法（応動実績の連携方法等）