GFおよびLFC運用の現状について

2020年9月29日

一般送配電事業者(10社)

はじめに

- 第18回本小委員会(8/7)で、広域機関より一次調整力~二次調整力②に係る論点整理と今後の検討の進め方が示された。
- 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 調達している発電機の「ガバナフリー(GF: Governor-Free)機能」 および「負荷周波数制御(LFC: Load Frequency Control)機能」に 相当する。
- 今回、広域機関事務局より、一次調整力~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、現状のGFおよびLFC機能ならびにそれ ぞれに求める技術的要件に関する説明を要請された。
- GFおよびLFC機能は、周波数調整において重要な役割を果たす機能であり、 調整力の供出事業者にもご理解いただけるよう取りまとめた。

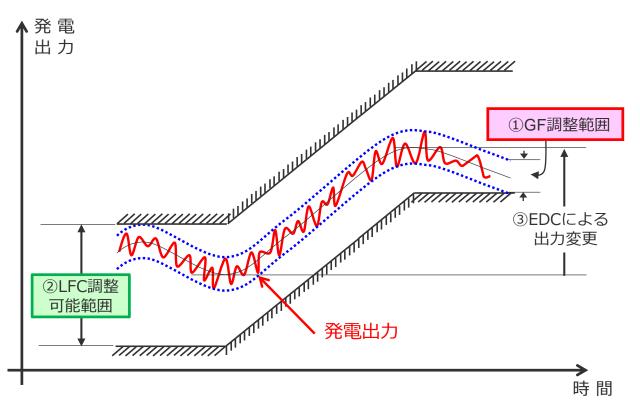
目次

- 1. GFおよびLFC機能の概要
- 2. GF運転の現状
 - ①GFの機能・仕様
 - ②GF運転の管理
 - ③GF能力の試験例
- 3. LFC運転の現状
 - ①LFCの機能・仕様
 - ②LFC運転の管理
 - ③LFC応動能力の試験例
- 4. まとめ(現状のGFおよびLFC機能に求めている要件)

GFおよびLFC機能の概要

1 GFおよびLFC機能の概要

- GF機能は、発電機の回転速度(周波数)を一定に保つよう、同期発電機の調速機(ガバナ)が<u>系統周波数の変化に追従して、発電出力を増減</u>することをいう。
- LFC機能は、<u>系統周波数を一定</u>に保つよう、中央給電指令所で周波数および連系線潮流の偏差から、偏差を解消する発電出力を計算し制御することをいう。

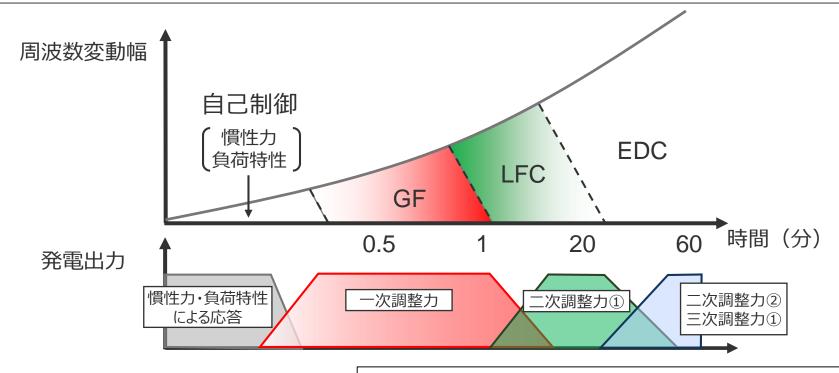


- ① **GF**: LFCでは追従できないような負荷変動 (数秒から数分程度の周期) や需給ミスマッチ へ対応するため、発電機の調速機により発電 出力を調整。
- ②LFC:需要予測が困難な負荷変動(数分から十数分程度の周期)や需給ミスマッチへ対応するため、中央給電指令所で変動量を計算し、これに追従するよう発電出力を制御。
- ③ **EDC**: 比較的長時間の負荷変動(十数分から数時間程度の周期)に対応するため、中央 給電指令所で、需要予測に合わせ先行的に 発電出力を制御。

電気学会技術報告 第1100号を元に作成

1 GFおよびLFC機能の概要(需給調整機能の関係)

- 電力系統の運用においては、接続する設備の周波数調整機能を活用しながら、基準周波数を維持。
- 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、周波数変化率(RoCoF: Rate of Change of Frequency)を抑制するとともに、周波数低下最大偏差を縮小。
- GFは、数秒から数分程度の周期の負荷変動に対し、<u>自端</u>で周波数(回転数)の変化を検出し、**発電出力を** 増減(一次調整力に相当)。
- LFCは、数分から十数分程度の周期の負荷変動に対し、中央給電指令所から発電出力を制御 (二次調整力① に相当) 。



1 GFおよびLFC機能の概要(需給調整市場の商品要件との関係)

■ 一次調整力および二次調整力①は、現状の調整力公募で「電源 I -a」として調達している発電機の「ガバナフリー(GF)機能」および「負荷周波数制御(LFC)機能」に相当

(参考) 需給調整市場における商品の要件

第18回 需給調整市場検討小委員会(2020.8.7)資料4より抜粋

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②	
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)	
指令·制御	 オフライン (自端制御) 	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:オンライン	
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	1-(自端制御)	① 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	

「GF機能」に相当

- ①系統周波数偏差の検出とGF調定率に基づく自端制御
- ②周波数変動に即応し、10秒以内で規定値に到達
- ③ 周波数変動補償機能

「LFC機能」に相当

- ①短い指令間隔のLFC信号による遠隔制御
- ②連続的な需給変動に対して連続的に出力

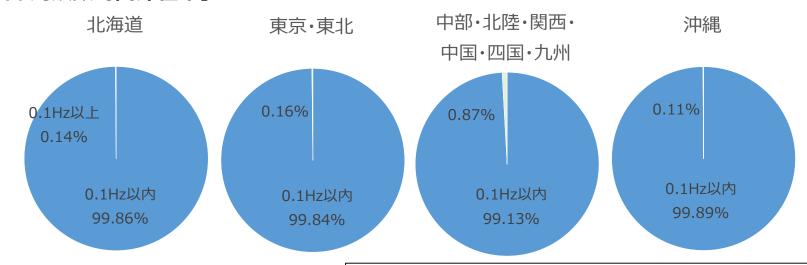
1 GFおよびLFC機能の概要(周波数調整目標と変動実績)

- 各一般送配電事業者は、GFやLFC機能をもった発電機を適切に確保および制御し、周波数を調整。
- 平常時の周波数調整目標範囲は、±0.2Hzおよび±0.3Hzであり、標準周波数±0.1Hz以内の時間滞在率実績は概ね99%以上。

【各エリアの周波数調整目標値】

	北海道	東北·東京	中部·北陸·関西· 中国·四国·九州	沖縄	
標準周波数	50	Hz	60Hz		
調整目標範囲	±0.3Hz	±0.	2Hz	±0.3Hz	

【2018年度の周波数時間滞在率】



広域機関 電気の質に関する報告書 -2018年度実績-(2019年12月)より抜粋

GF運転の現状

2-1 GFの機能・仕様 (系統連系技術要件)

- GF機能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連系技術要件で、新設またはリプレース される10万kW以上(沖縄エリアは3.5万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。
- その他の発電機種別(水力、原子力等)は、統一した仕様の設定が困難と考えられるため、個別協議。

【系統連系技術要件(中部の例)】

		10万キロワット以上				
	発電機定格出力	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、 発電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 基準周波数±0.2Hzを超えた場合、系統周波数変動に より、ガバナで調整した発電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。

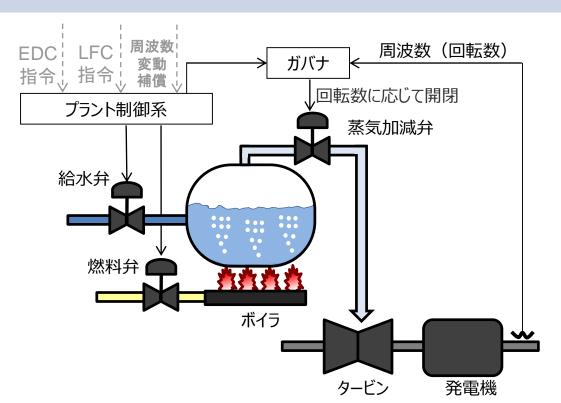
注:火力発電設備の調整機能・仕様は、既存設備の調整機能および 発電事業者への負担を考慮し設定

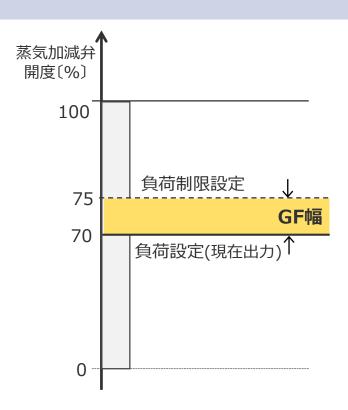
2-1 **GFの機能・仕様**(GF幅(汽カプラントの例))

- GF運転は、発電機の回転速度の変化に対し、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、負荷設定から負荷制限までの余裕を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、ボイラ保有蒸気量で対応できる範囲の間、発電出力が増加される(LFCと異なる)。

現状の運用で求めていること

• 発電出力の調整範囲となるGF幅が一定以上確保されていること。



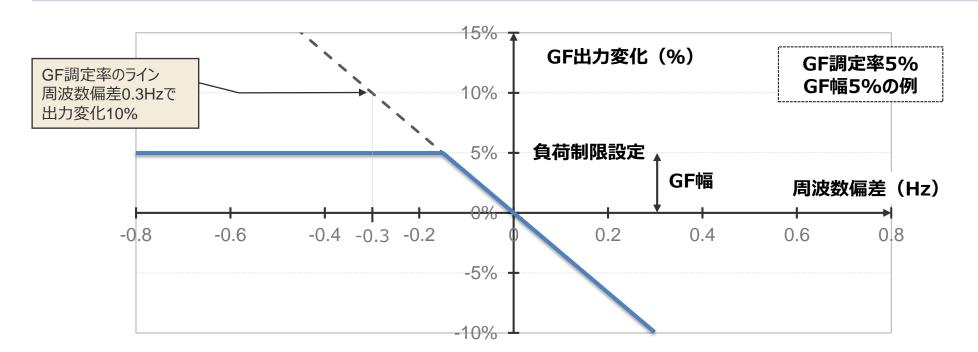


2-1 GFの機能・仕様 (GF調定率による制御)

- 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を増減させるものであり、 周波数偏差に対し、GF調定率に応じて出力が増減する。
- ■「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%まで変化する※という意味であり、調定率が小さいほど周波数偏差に敏感に応動する。
- 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。

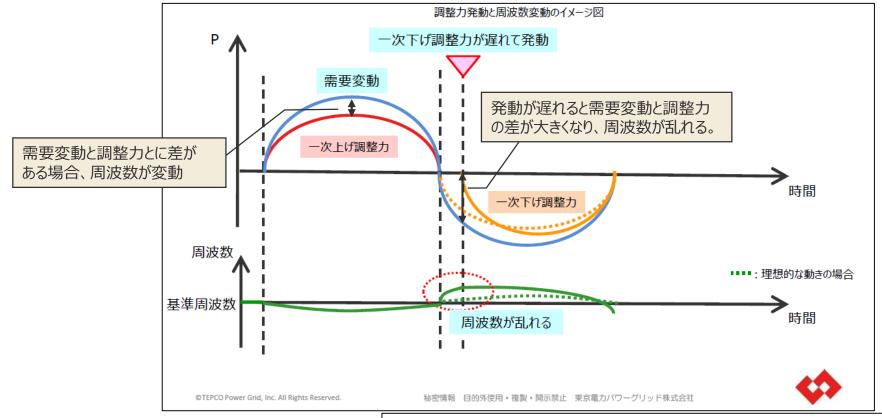


2-1 GFの機能・仕様 (周波数変動に対する即時応答)

- 周波数変動を検出し、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。したがって、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(1秒など)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



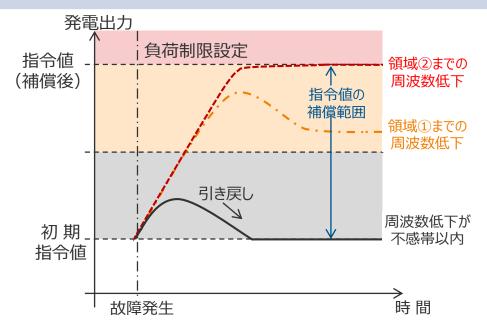
第3回 調整力の細分化及び広域調達の技術的検討に関する作業会(2017.5.23)資料4より抜粋

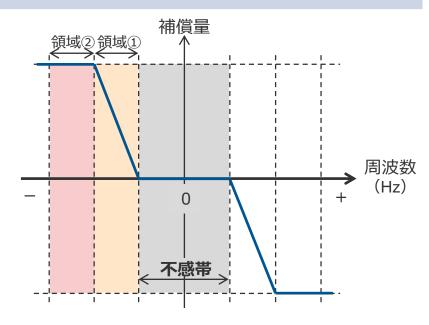
2-1 GFの機能・仕様 (周波数変動補償機能)

- 周波数変動補償機能は、発電機故障に伴い周波数が低下した場合など、周波数低下量を抑制させるために、 発電機の指令値に対して、必要な出力増加分(補償量)を加算するもの。
 - ▶ 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、周波数が継続して低下する異常時には、引き戻しが生じないよう発電機の指令値に対し、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

• 10万kW以上 (沖縄エリアは3.5万kW以上) の火力発電機などには、周波数が低下する異常時に、GF運転により一旦 増加した発電出力を、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。





電気学会技術報告第1386号「電力需給・周波数シミュレーションの標準解析モデル」(2016年12月)汽力プラントモデル定数を引用

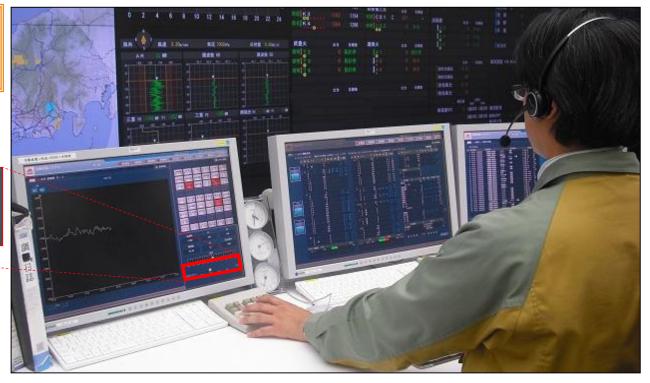
2-2 GF運転の管理

- 実需給では、中給(自動給電)システムにおいて発電機の運転態勢および出力状態から、リアルタイムでエリア全体のGF量を計算し、エリア需要に対し常に3%程度確保していることを確認。
- 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も3%以上となるように運転計画を作成。
- 常に確保容量が3%程度に滞在するわけではなく、運転する発電機の総定格容量(運転態勢)に比べ、 エリア需要が相対的に小さい夜間等は、GF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)

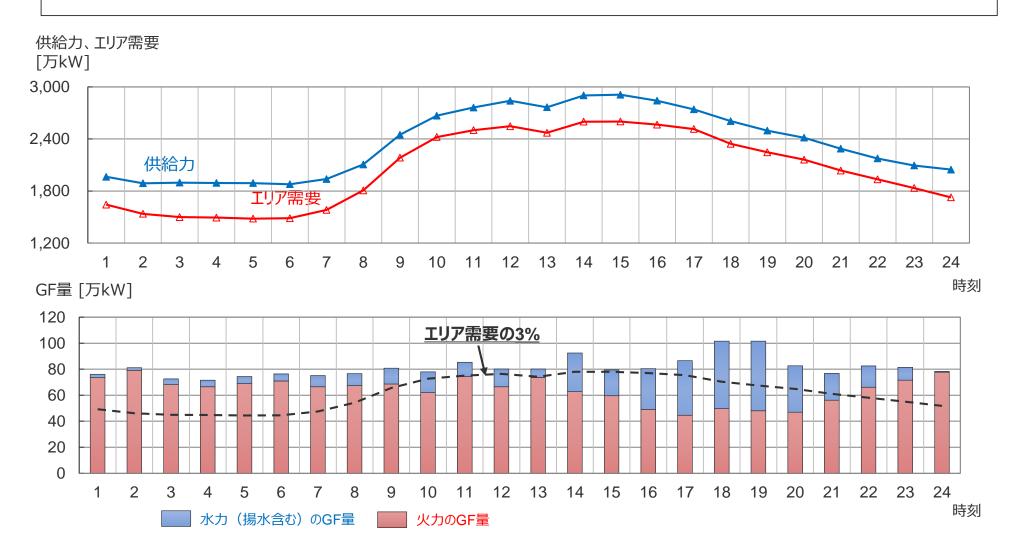


中央給電指令所の運転員は、自動給電システムのガバナフリーインジケータを参考にガバナフリー容量の確保状況を確認。

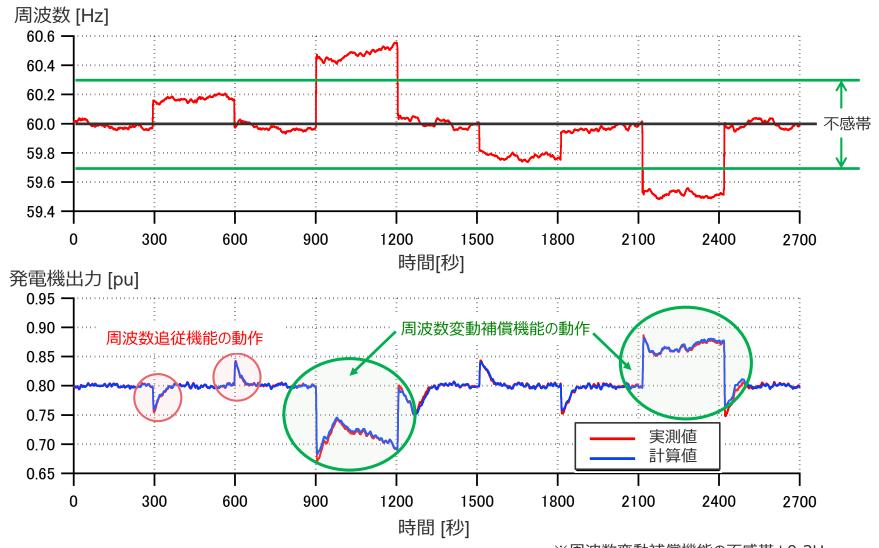


2-2 GF運転の管理 (GF量の確保実績 (中部の例))

- 発電機の並列台数が減る時間帯においても、常にGF3%以上を確保できるよう計画し、運転している。
- また、火力発電機の余力が減少する時間帯(16~20時)は、揚水発電機などによりGF量を確保することで3%以上を確保している。



2-3 GF能力の試験例 (周波数追従および変動補償機能)

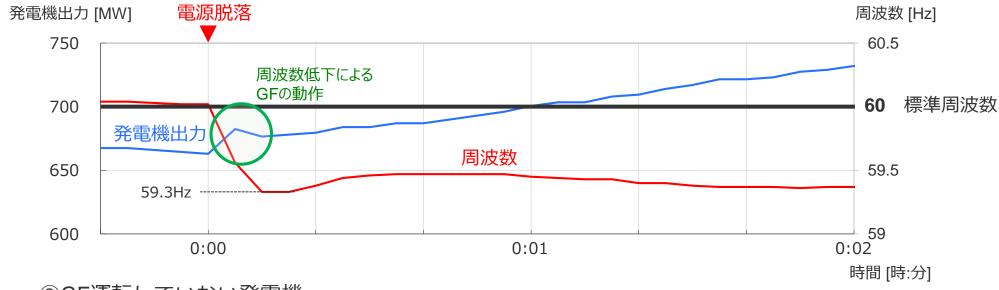


※周波数変動補償機能の不感帯±0.3Hz

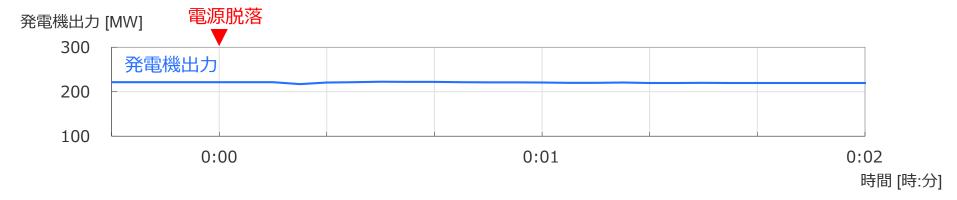
【参考】 大規模電源脱落直後のGFの応動実績

■ 大規模電源脱落に伴う周波数低下時等に、GFが応動しているか確認。

①GF運転している発電機



②GF運転していない発電機



LFC運転の現状

3-1 LFCの機能・仕様 (系統連系技術要件)

- 周波数を適正に維持するには、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。
- 具体的には、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、中給が予め認識することが 必要。
- 一般送配電事業者が定める系統連系技術件は、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、「LFC幅」「LFC変化速度」「EDC+LFC変化速度」の確保を求めている。

【系統連系技術要件(中部の例)】

		10万キロワット以上					
	発電機定格出力	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				
	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)				
機能・仕様等	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				

3-1 LFCの機能・仕様 (LFCの概要)

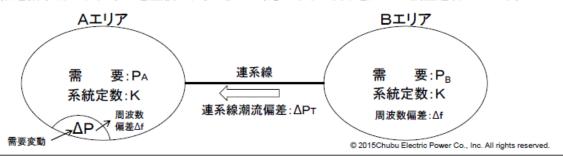
- LFC (負荷周波数制御) は、数分から十数分程度までの短時間の変動を対象とした制御であり、各エリア中給で必要な調整量(地域要求量:AR = Area Requirement)を計算し、LFC調整対象発電機に出力の上げ・下げ信号(LFC指令)を送信する。
- 周波数維持の根幹をなす制御であり、LFC調整対象発電機には確実かつ即応性のある応動が求められる。
 - 17 【参考】地域要求量(AR: Area Requirement)について



- 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。
- 〇 需要変動(\triangle P)と、エリア需要(P_A)と周波数偏差(\triangle f)の積は、次式のとおり比例関係にある。 \triangle P = K• P_A • \triangle f (K:系統定数)
- 〇 下図において、Aエリアで需要変動(Δ P)が生じ、周波数偏差(Δ f)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(Δ A)と呼んでいる。
- 〇 連系系統において、Aエリア内の需要変動(Δ P)により、周波数偏差(Δ f)および連系線潮流偏差(Δ P $_{T}$)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。

$$AR = -K \cdot P_{\Delta} \cdot \Delta f + \Delta P_{T} (= \Delta P)$$

○ 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。



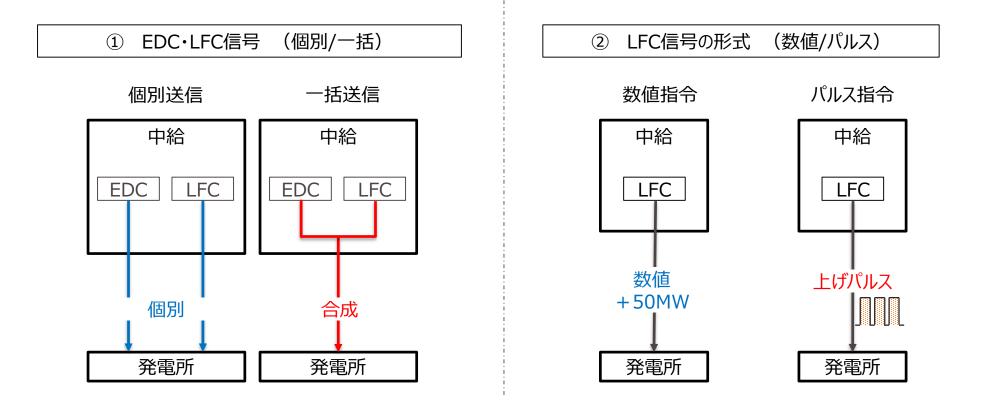
3-1 LFCの機能・仕様 (制御方式)

- エリアごとの発電機の構成や特性、系統状況に合わせ、各エリアで中給(自動給電)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指令の送信方法には差異がある。
- 調整力供出において、当面は各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運転の制御方式の違い】



3-1 LFCの機能・仕様 (各社中給システム仕様)

- LFC指令の送信方法として、EDCとLFC信号を個別に送信するエリア(個別)と、EDCとLFC信号を合わせて 送信するエリア(一括)が存在。
- また、信号形式として、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)	数值	数值	ハ°ルス^{※3}	/\°	数值	パルス ^{※5}	数值	数值	数值	数值
(参考)	EDC信号の形式 (数値/パルス)	数值	数值	数値	/\°ル አ ^{፠4}	数值	数値	数値	数值	数値	数值
	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

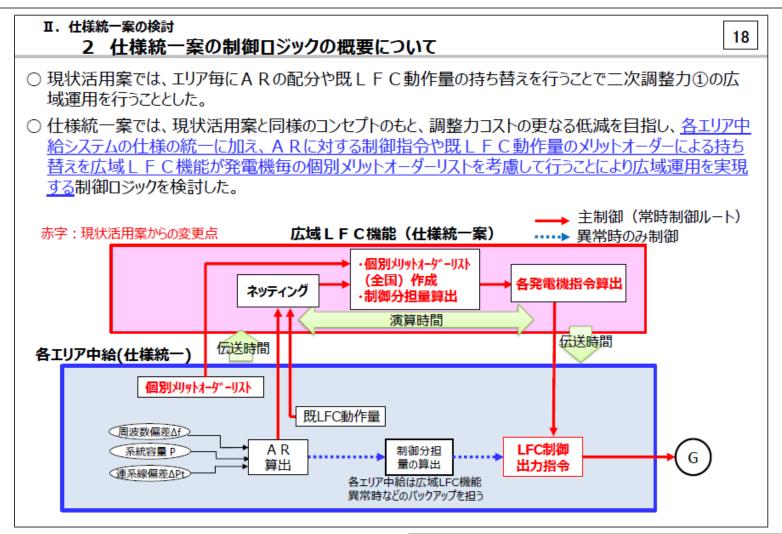
※4:一部水力に数値指令あり

※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

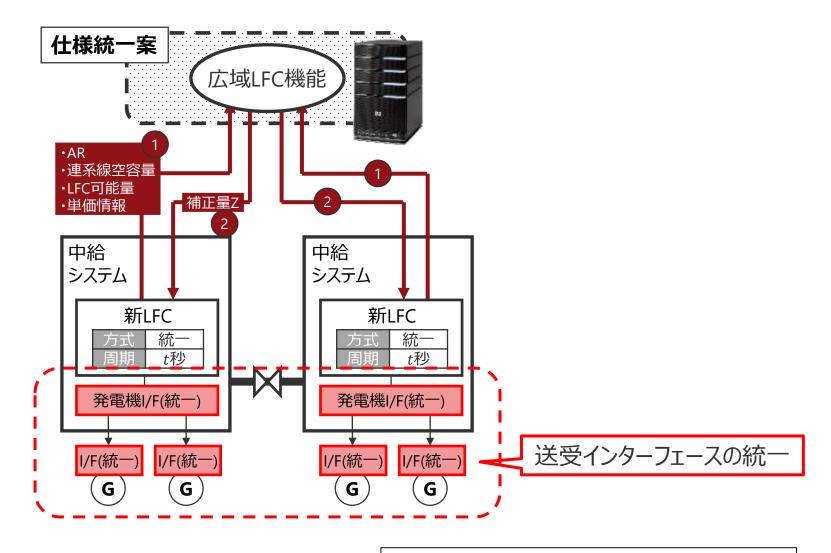
【参考】将来のLFCの制御方式(仕様統一案の検討)

■ 全国どのエリアも同じ制御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ため、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。



【参考】将来のLFCの制御方式(仕様統一案の検討)

■ 需給調整に参加するリソースに対するLFC指令の**送受インターフェースの統一**方法についても検討中。



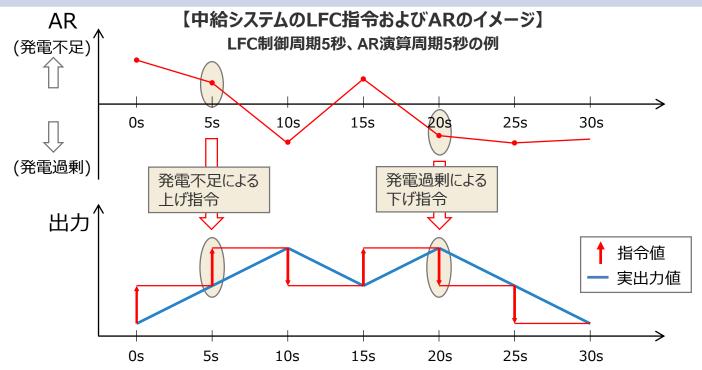
第18回 需給調整市場検討小委員会(2020.8.7)資料5より作成

3-1 LFCの機能・仕様 (応動時間と指令間隔の関係)

- 中給(自動給電)システム(TBCの場合)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LFC対象発電機に、各中給システムより、0.5秒~数十秒の周期で、LFC指令信号を発信。
- 周波数および連系線潮流は絶えず変動しており、LFC指令信号は短周期で上げ下げ指令を繰り返し行う。
- 中給(自動給電)システムは各発電機の仕様(出力変化速度等)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出力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LFC指令に応じて連続的に出力すること。
- 発電機は、変化速度などの性能を各中給システムと共有の上で、中給システムのLFC指令に応動すること。 ※今後、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、規定出力までの中間点等に関する規律が必要。

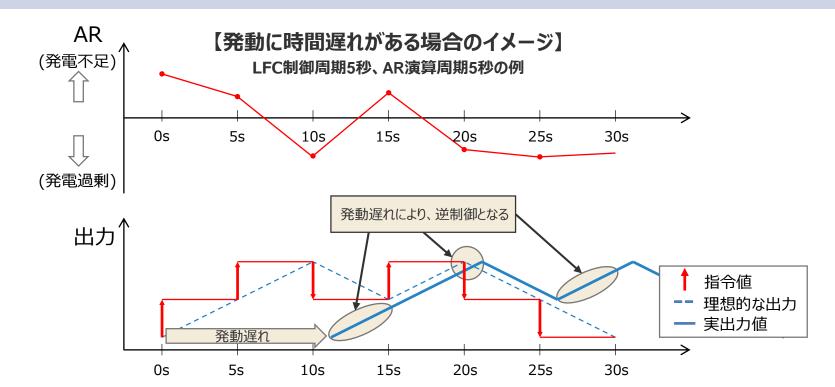


3-1 LFCの機能・仕様 (指令に対する即応性)

- LFC (TBCの場合) は、周波数と連系線潮流の偏差をARという形で検出し、そのAR分を解消させるための制御である。
- 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LFC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、不要に周波数の乱れる虞がある)

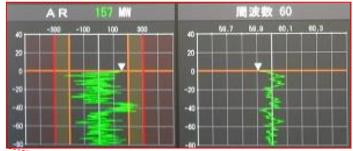
現状の運用で求めていること

• 調整力の発動に時間遅れがある場合、逆制御となり、周波数が乱れる虞があるため、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。



3-2 LFC運転の管理 (運転管理)

- 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LFC調整可能量の確保状況を示す。
- エリア需要や発電機の運転状況は常に変化するため、運転員は先を見据えて運転中火力発電機の調整可能量確保や揚水機の並列による調整可能量確保などを行う。
- 残余需要の変化量やFC融通段差が大きい場合などは、LFC調整可能量を多めに確保する場合がある。

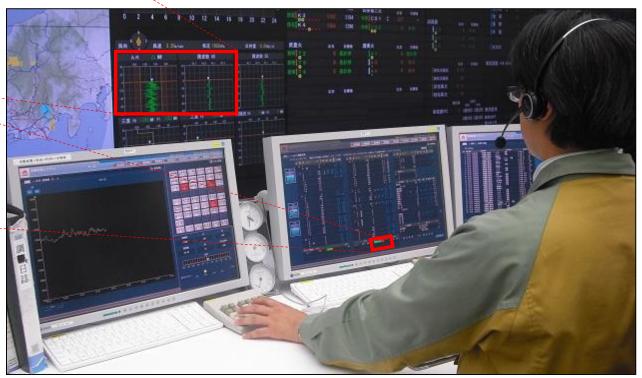


運転員は、ARおよび基準周波数と 現在周波数の差などを監視し、発電機出力を調整。



運転員は、自動給電システムの上げ・下げ 余力のインジケータをもとにLFC調整可能量 の確保状況を確認。

ADC: Automatic Dispatching Control 中央給電指令所からの出力制御信号に追従し、自動的に発電機出力を変動させる機能

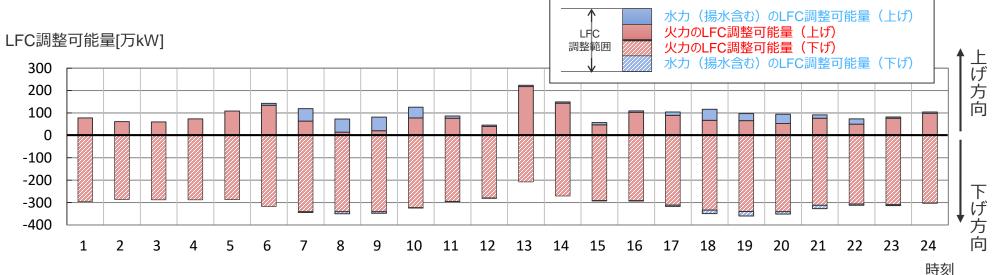


3-2 LFC運転の管理(LFC調整可能量の確保実績(中部の例))

■ 各発電機の発電出力変化速度や出力変化調整幅、起動に要する時間等を考慮しつつ、火力発電機や揚水発電機のLFC調整可能量を確保している。

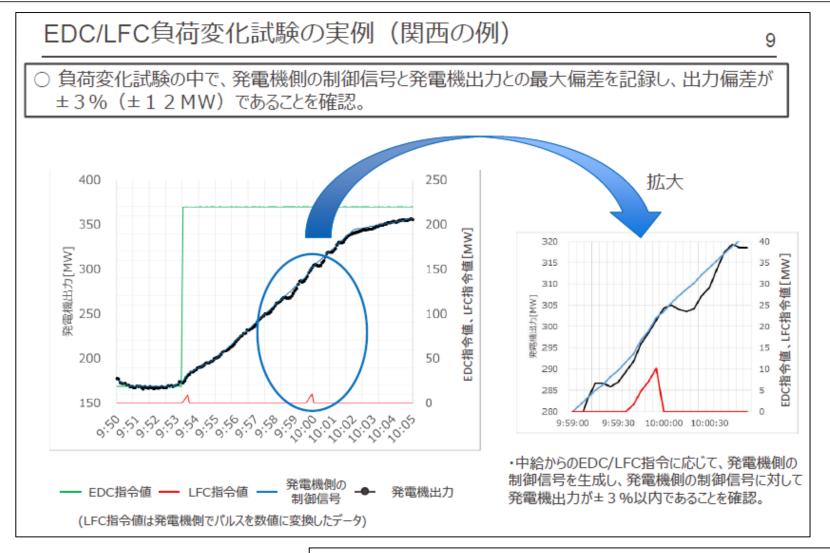
供給力、エリア需要 [万kW]





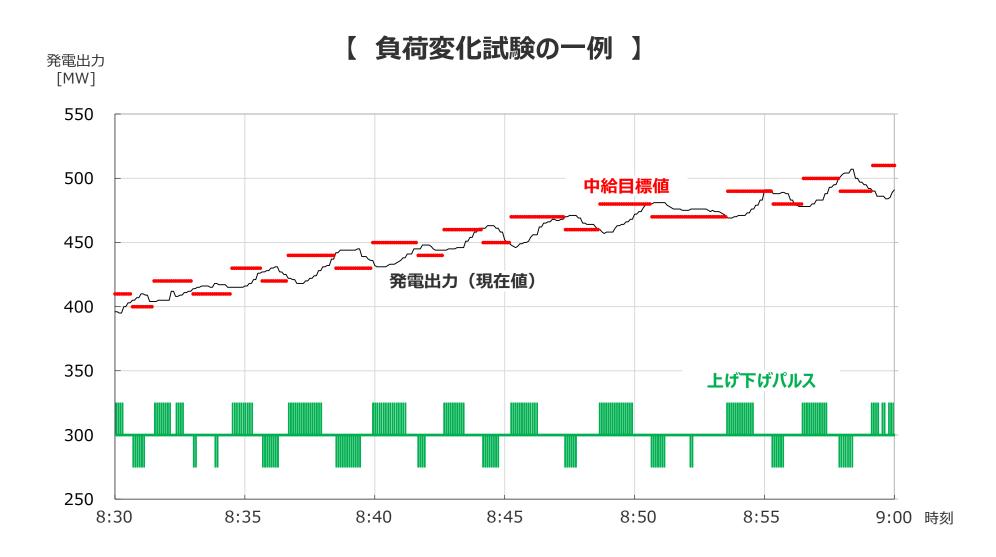
3-3 LFC応動能力の試験例 (関西の例)

■ 中給がLFC運転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。



3-3 LFC応動能力の試験例 (中部の例)

- 中給目標値と現在出力値とを比較し、上げ・下げパルスを一定時間送信。
- 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。



4 まとめ (現状のGF運転およびLFC運転に求めている要件)

■ 今後の一次調整力、二次調整力①の商品要件の詳細検討に向け、GFおよびLFCに求める機能・仕様の現状を整理。

【GF機能】

- ▶ 発電出力の調整範囲となるGF幅が一定以上確保されていること。
- ➤ 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。
- ▶ 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。
- ▶ 10万kW以上 (沖縄エリアは3.5万kW以上) の火力発電機などには、周波数が低下する異常時に、 GF運転により一旦増加した発電出力を、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。

【LFC機能】

- ▶ LFC対象発電機は、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。
- ▶ 並列中のLFC対象発電機は、連続的なLFC指令に対し連続的に出力すること。
- ▶ 発電機は、変化速度などの性能を各中給システムと共有の上で、中給システムのLFC指令に応動すること。
- ▶ 調整力の発動に時間遅れがある場合、逆制御となり、周波数が乱れる虞があるため、指令に対し 即応できること。
- 商品設計に向けて、現状を踏まえた数値設定など具体的要件の詳細検討が必要。
 - ▶ 周波数品質維持のための規定出力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(偏差)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)