

電力系統と周波数制御及び停電

1. 停電は何故発生するか

「需給ひっ迫時、何故、発電所は落ち易くなるのか？」

これを、祭りの重い神輿に例えてみますと、「担いでいる神輿（負荷）が予想以上に重くなった時、必死で担いでいる人（発電機）のうちの一人が耐えきれず倒れ込むと、他の人も耐えきれずに次々に倒れこみ、ついに皆が倒れこんで神輿は放り出される（大停電）」という事になります。

2. 周波数の範囲

1) 電気事業者の周波数範囲は法規によっては規定されていません。電気事業法施行規則 44 条 2 項では供給者の標準周波数としており、資源エネルギー庁電力基盤整備課では「 $\pm 0.2\text{Hz}$ 程度で制御しているようだ」とのことです。

東電も $50\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ で制御していると言っています **(別紙 1、2 参照)**。

2) 電気事業法施行規則 抜粋（平成七年十月十八日通商産業省令第七十七号）

（電圧及び周波数の値）

第四十四条 法第二十六条第一項 の経済産業省令で定める電圧の値は、その電気を供給する場所において次の表の上欄に掲げる標準電圧に応じて、それぞれ同表の下欄に掲げるとおりとする。

標準電圧 維持すべき値

百ボルト 百ボルトの上下六ボルトを超えない値

二百ボルト 二百ボルトの上下二十ボルトを超えない値

2 法第二十六条第一項 の経済産業省令で定める周波数の値は、その者が供給する電気の標準周波数に等しい値とする。

3. 電力会社の周波数制御

1) 電力会社の ELDAC (effective load dispatching automatic controller) システムは、需要の変化に合わせて発電所の出力を自動的に制御し、電力周波数を安定に維持する機能を持っています。

2) ELDAC からの発電指示により、電源の種類と運用 **(別紙 3 参照)** の様に各発電所で発電がおこなわれます。この際、一定電力発電（ベース供給）、ミドル供給、ピーク供給などを各発電所に発電指示することになります。

3) ベース供給は周波数によって出力を変化させないが、ミドル供給、ピーク供給で周波数を維持するために出力を調整する。系統全体の供給予備力は、5%（負荷分3%、発電分2%）程度の周波数調整力が必要なようです。

4) 要するに、一定出力発電と変動出力発電（周波数制御）の組み合わせで周波数制御を行いながら、需要電力に対応した発電を行っています **(別紙 4 参照)**。

4. 電力系統の停電

- 1) 電力系統には、発電設備と負荷設備が接続され、負荷量に応じて周波数、電圧を維持しながら発電量が調整されています。
- 2) 発電量に対し負荷量が多くなりますと、発電機は負荷の求めるトルクに負け、回転数が落ち周波数が低下します。系統周波数の低下が大きくなると、周波数を維持するために負荷の一部を強制的に切り離し、その地域に停電を発生させる必要が出てきます〔別紙5参照〕。
- 3) このように、一部を停電させることにより発電を継続してゆきますが、場合によっては発電を継続できずに、将棋倒しの様に発電機が系統から切り離され、停電が広範囲に及び大停電となることがあります。

5. 発電所と電力系統

1) 発電機の電力系統への接続

まず、発電機の色度を、電力系統と同じ回転速度にして、電圧も電力系統と同じ電圧にして（位相差も少なくして）、連携運転に入ります。具体的には、「発電機（+主変圧器）」と「電力系統」を接続する遮断機を投入します〔別紙6参照〕。この時は、自動モードで系統連係に入ります。無論、手動でも可能ですが、自動の方がスムーズです。

遮断機が投入されますと、発電機と電力系統は同期運転に入ります。

2) 発電機の色出力調整

発電機とタービンは同じ回転数で回転しており、それが系統と接続されている場合に、発電量を増やすには、発電機の電流を増やすこととなります。具体的には、タービン出力を増す操作をしますと、周波数はほとんど変化しませんが出力電流は増加し、発電機出力（kW）は増加します。タービン出力を増そうとすると、タービンに流れる蒸気量が増加し、発電機の色度を増そうとします。しかし、このとき、発電電流が増え、それにより発電機を回す必要トルクが増えて、速度は殆ど増えることはなく、発電機出力（kW）が増加します。この様にして発電機出力は制御されます。電力会社の給電指令所は、各発電所に対して発電電力を指示し、各発電所での負担を決めています。

3) 系統の負荷変動時の動き

系統の負荷が増えてくると、周波数を維持するために発電機は、発電量を増やす必要があります（負荷が減少するときはこの逆です）。

負荷の傾向としては、周波数が下がると負荷が減少します。例えば、ポンプなど回転機は周波数の3乗に比例して負荷が低減します（最近ではインバータが多いので負荷が低減しない傾向にあります）。

また、電圧が低下すると、一般に2乗に比例して負荷は低減します（これもインバータにより、最近では低減しない傾向にあります）。これらから、「周波数と電圧の変化」と「負荷の変化特性カーブ」を電力会社は実運転経験から把握しています。

実運転では、負荷が増えた時は、一旦周波数が低下して負荷が減り、発電量とバランスしようとしてします。しかし、タービン・発電機は周波数を一定に保とうとして、発電量を増加させてゆき、周波数の低下を防ごうとします。周波数変動は最大で、 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内に制御されています（なお、

周波数制御をおこなう発電機は全数ではなく一部です)。

通常、自動周波数コントローラが働いて、タービンのガバナを開いて、周波数を上げてゆき、一定周波数で安定運転をします。実際には、負荷は始終変動していますので、負荷の増減により周波数も若干減増しています。発電電圧については、発電機の界磁制御により電圧の調整が行われます。

4) 系統維持の対策

発電機は定格出力以上の過負荷状態で、時間制限がありますが運転可能です。

しかし、過負荷により、周波数が低下し、タービンが最大出力を出しても周波数が低下し、過負荷状態がさらに続くと、発電機の過電流保護の意味から負荷を減らす必要があります。

それゆえ、各大口利用者に、電話で負荷を減らす様に連絡をします。しかし、それも間に合わなければ、強制的に一部の地域を停電にし(計画停電)、負荷を低減する必要があります。

この様にして、発電機を定格以内の負荷状態にして、運転を継続します。

5) 大停電の発生

しかし、負荷低減対策がうまくゆかず、発電機の過電流継電器が働くなどして発電機が系統から切り離されれば、系統に接続している他の発電機の過負荷はさらに増します。そして、次々に発電機が、過電流、低周波数等で系統から切り離され大停電になります(別紙7、8、9参照)。

以上。

我が国および諸外国の周波数偏差目標

我が国の周波数偏差目標値

北海道	50±0.3Hz以内
東地域	50±0.2Hz以内
中西地域	60±0.2Hz以内

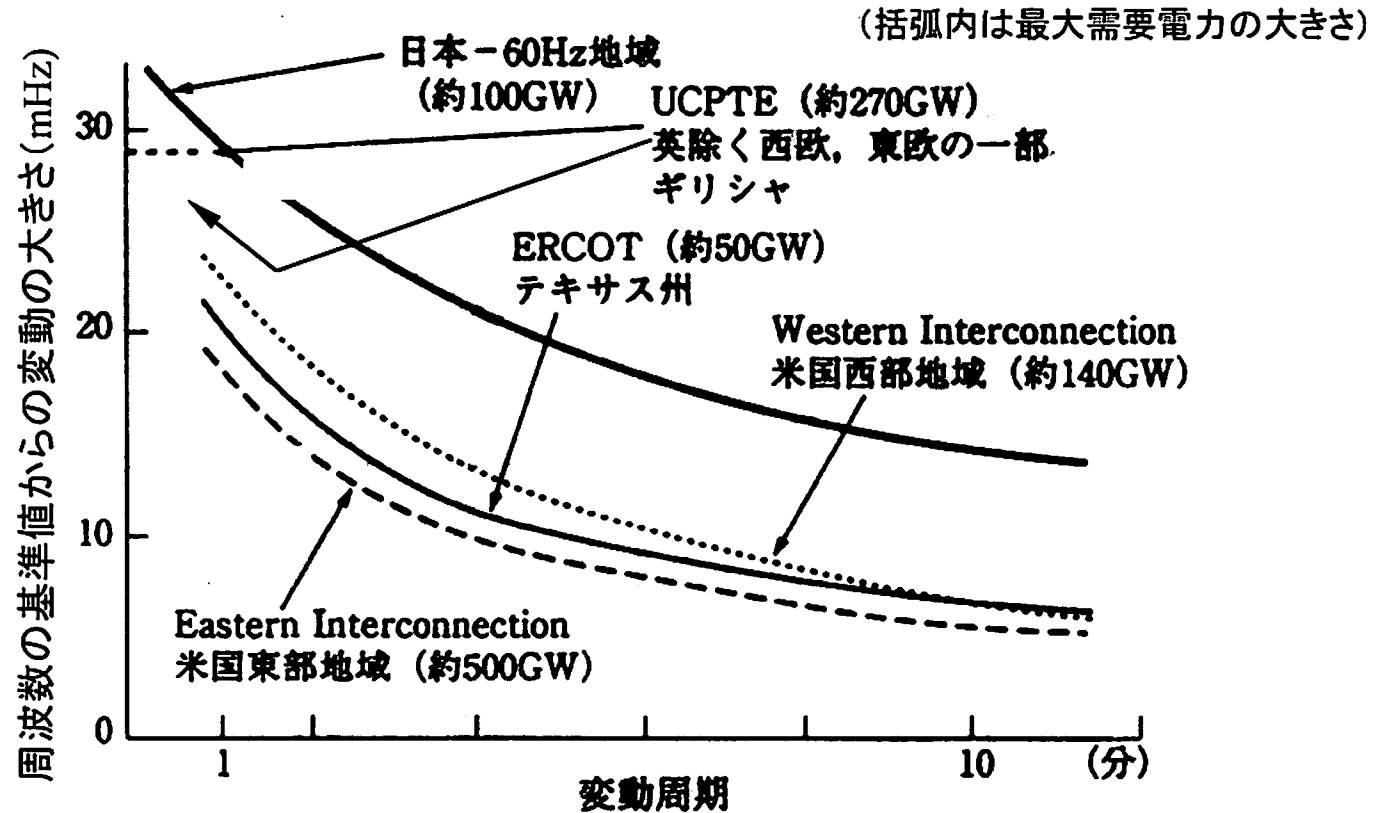
諸外国の周波数偏差目標値

北米 (NERC)	以下の年間標準偏差(一分間平均値)を目標 東部: 0.018Hz以内、西部: 0.0228Hz以内 テキサス(ERCOT): 0.020Hz以内 ケベック: 0.0212Hz以内
欧州 (UCTE)	以下の時間滞在率を目標 50±0.04Hz以内: 90%以上 50±0.06Hz以内: 99%以上

【出典】電気学会技術報告:「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」、平成14年3月

電力系統の大きさ(系統容量)と周波数変動

- 日本は他国との連系がないため、系統容量が小さく周波数は変動しやすい（系統容量が小さいと、周波数が変動しやすくなるため。）
- なお、テキサス州や米国西部地域は日本の規模に近いが、需要変動が日本ほどでないことが影響。

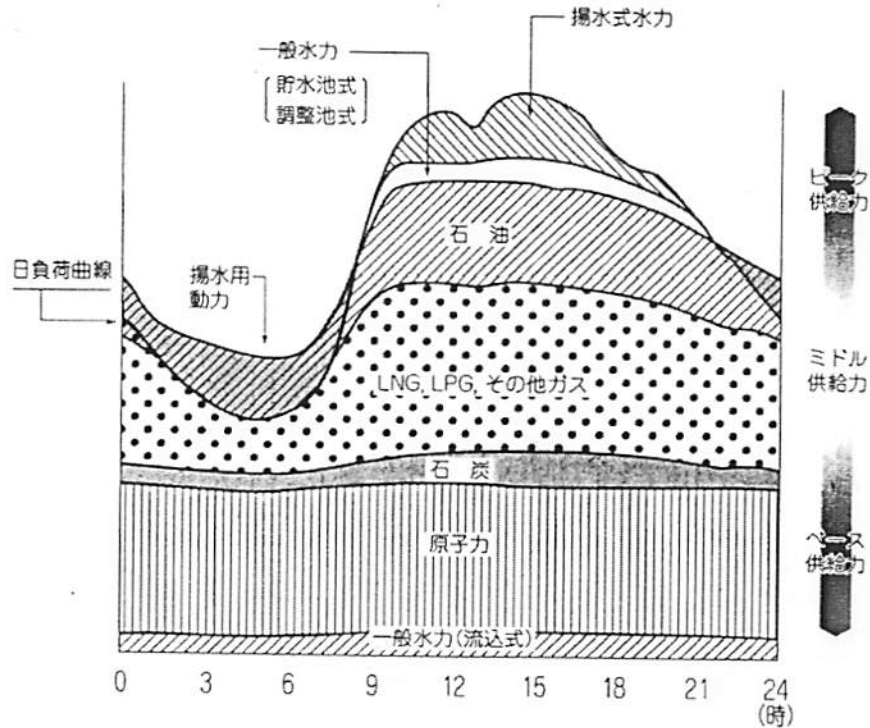


5

別紙2

電源の種類と運用

一日の電気の使われ方と需給運用

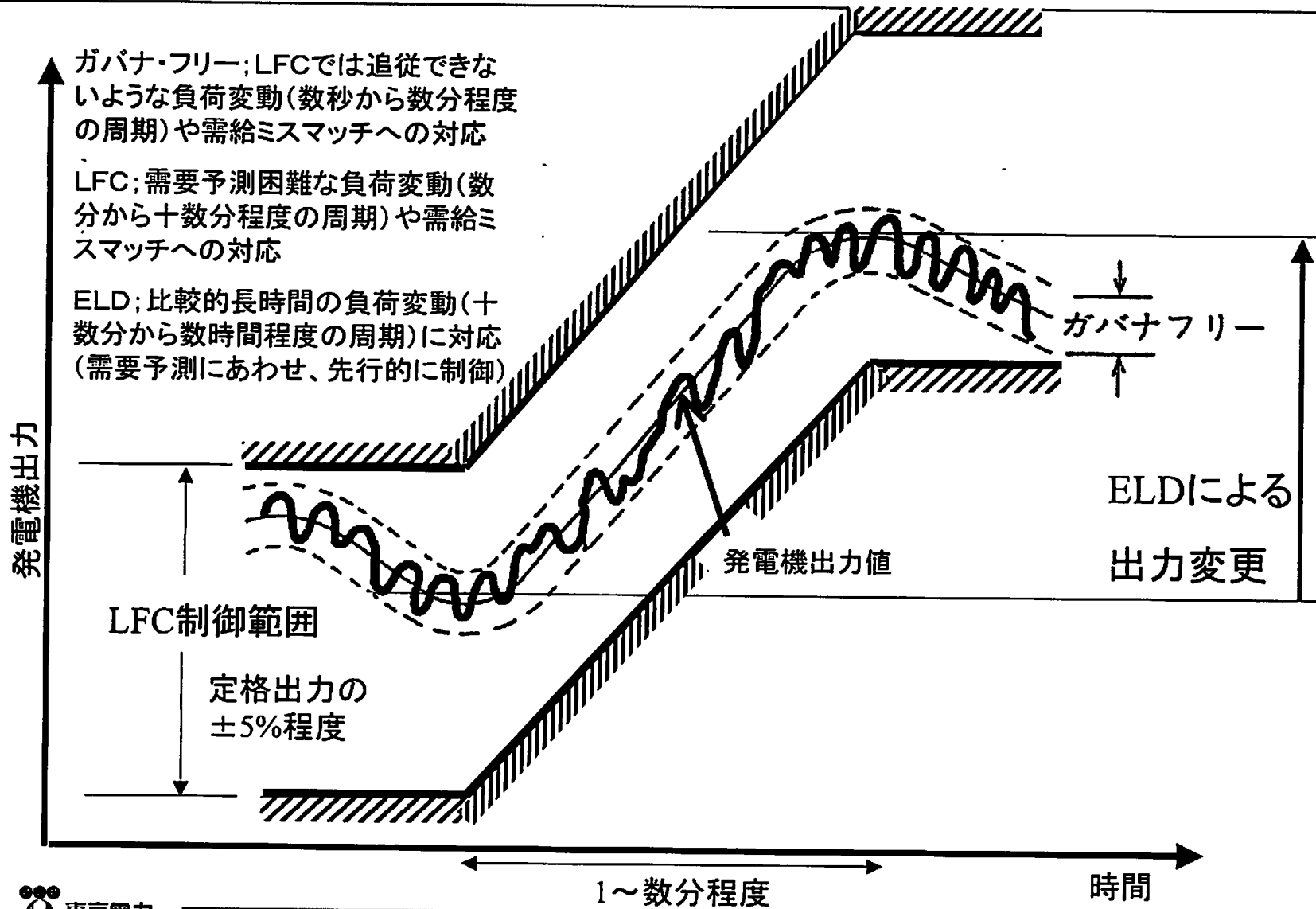


- 揚水式水力: 負荷追従性に優れているため、急峻な需要変動に対応
- 調整池式、貯水池式水力: 出力の調整が可能であるため、ピーク供給力として活用
- 石油火力: 経済性を考慮し、ピーク供給力として活用
- LNG火力: 運用性に優れていることから、ベース・ミドル供給力として活用
- 石炭火力: ベース電源としてフル出力を基本
- 原子力: フル出力運転
- 流込式水力: 河川の自然流量をそのまま利用

6

別紙 3

瞬時瞬時の需給均衡のための火力機制御(例)



7

別紙4

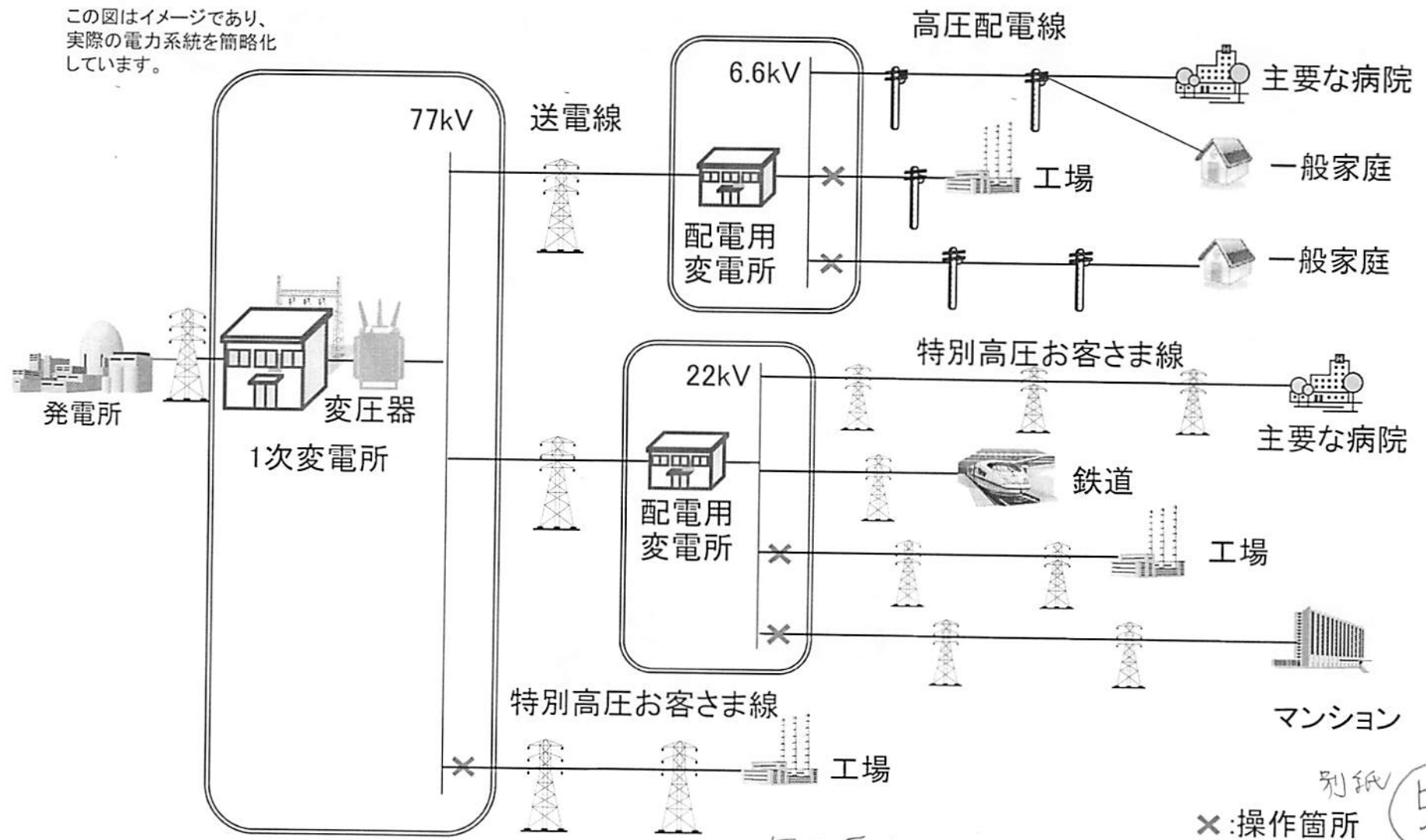
変電所における停電・送電の操作箇所

参考2

高圧配電線(6.6kV)、特別高圧お客さま線(22kV以上)ごとに選定しています。

(イメージ)

この図はイメージであり、
実際の電力系統を簡略化
しています。

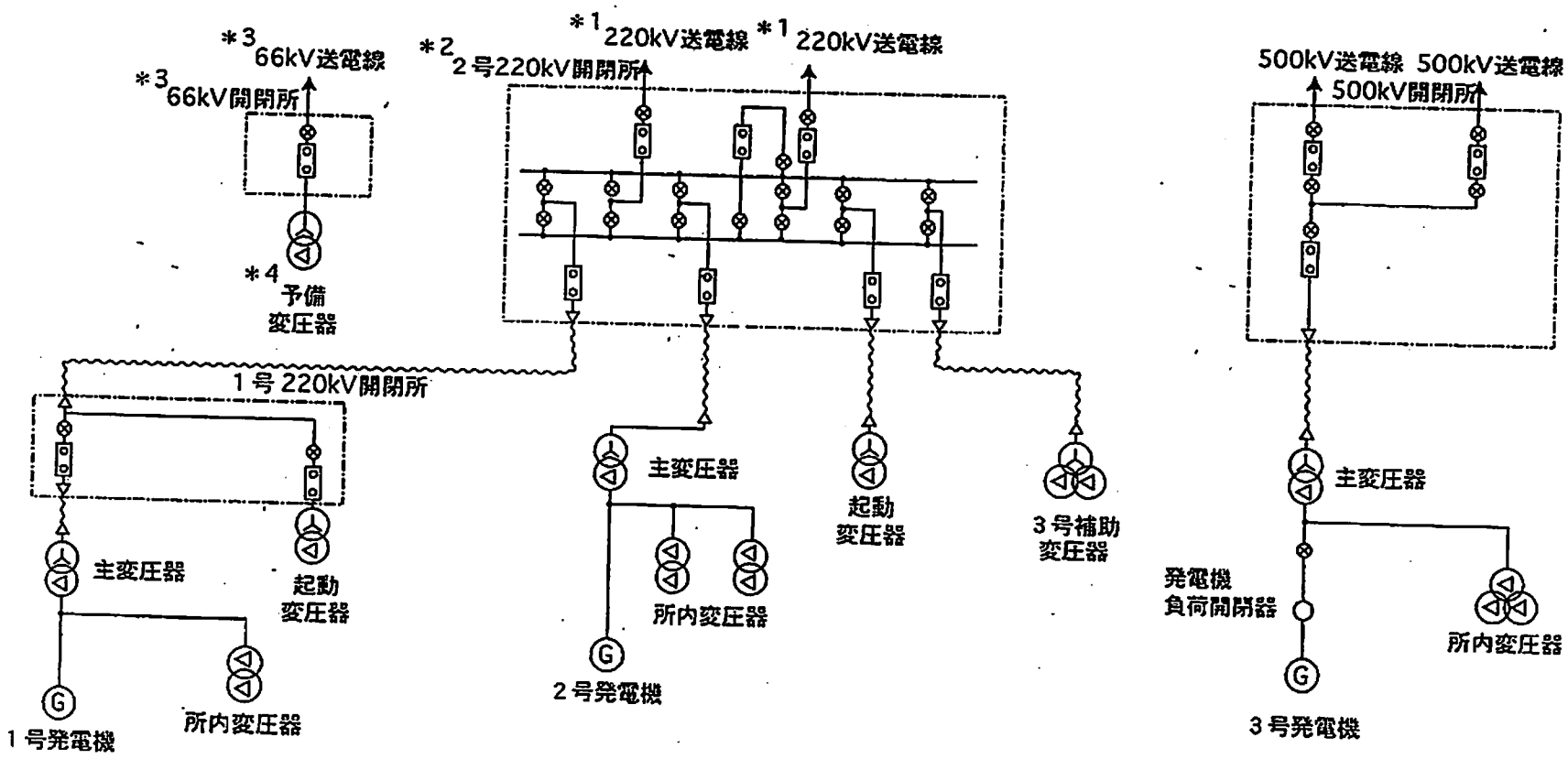


×:操作箇所 (5)

関西電力H.Pより

8

別紙5



- *1: 1号, 2号及び3号炉共用
- *2: 1号, 2号及び3号炉共用, 一部既設
- *3: 1号及び2号炉共用, 既設
- *4: 1号及び2号炉共用

(凡例)

☐ 遮断器

⊗ 断路器

∧ ケーブル

第2図 開閉所単線結線図(島根原発)

原子力安全・保安院資料第108A-7-3号

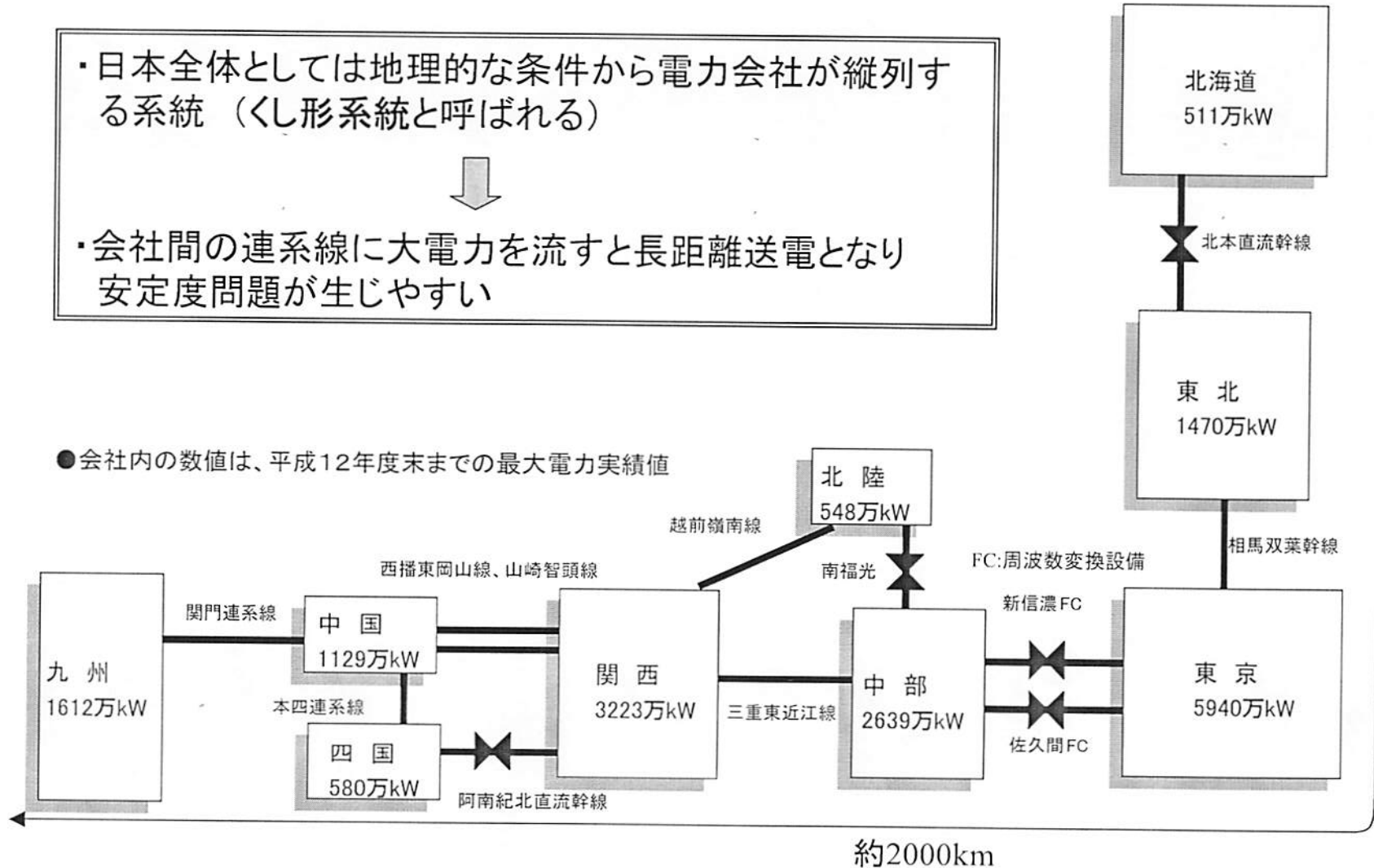
日本の系統連系の特徴

・日本全体としては地理的な条件から電力会社が縦列する系統（くし形系統と呼ばれる）



・会社間の連系線に大電力を流すと長距離送電となり安定度問題が生じやすい

● 会社内の数値は、平成12年度末までの最大電力実績値

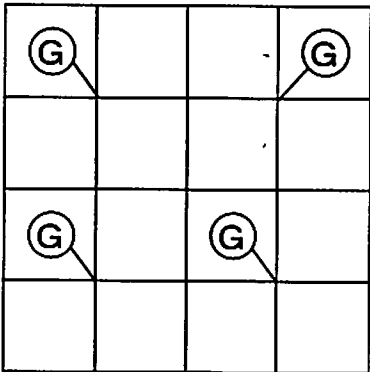
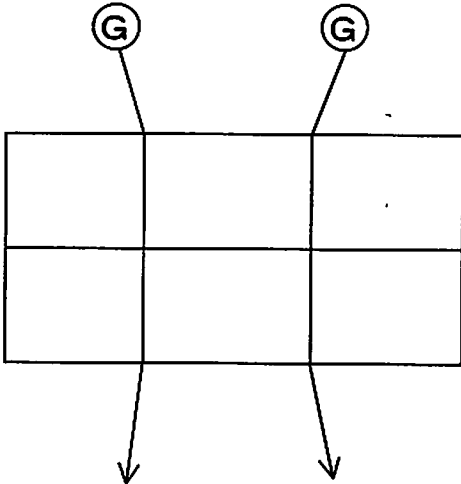
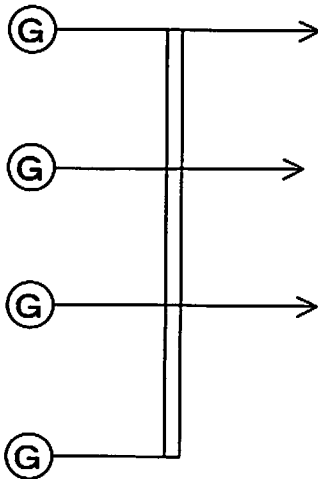


【出典】横山明彦:「電力系統の基本的要件と我が国の電力系統の特徴について」(H14/3/5 第5回電気事業分科会資料)

10

別紙7

基幹系統の形態

呼称	メッシュ形	ループ形	くし形
形態			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ある区間が停止してもバイパス路が多く、ロバスト性高い ・電力潮流の流れが大きくなると予期しない部分で潮流が大きくなる場合がある(ループフロー問題と呼ばれる) ・一旦不具合が発生すると、雪崩現象的に影響が広がる場合がある(カスケードイング) ・事故電流レベル大 	<ul style="list-style-type: none"> ・ある区間が停止しても電力潮流が他の区間でバイパスできる(ロバスト性が高い) ・バイパス数が少ないと潮流が大きくなる傾向。潮流が大きくなりすぎると安定性が低下 ・事故電流レベル中 	<ul style="list-style-type: none"> ・電気の流れが単純で管理しやすい。 ・少しの潮流を上下間で流すと安定性が低下 ・カスケードイングは起こりにくい ・事故電流レベル小

//

別紙 8

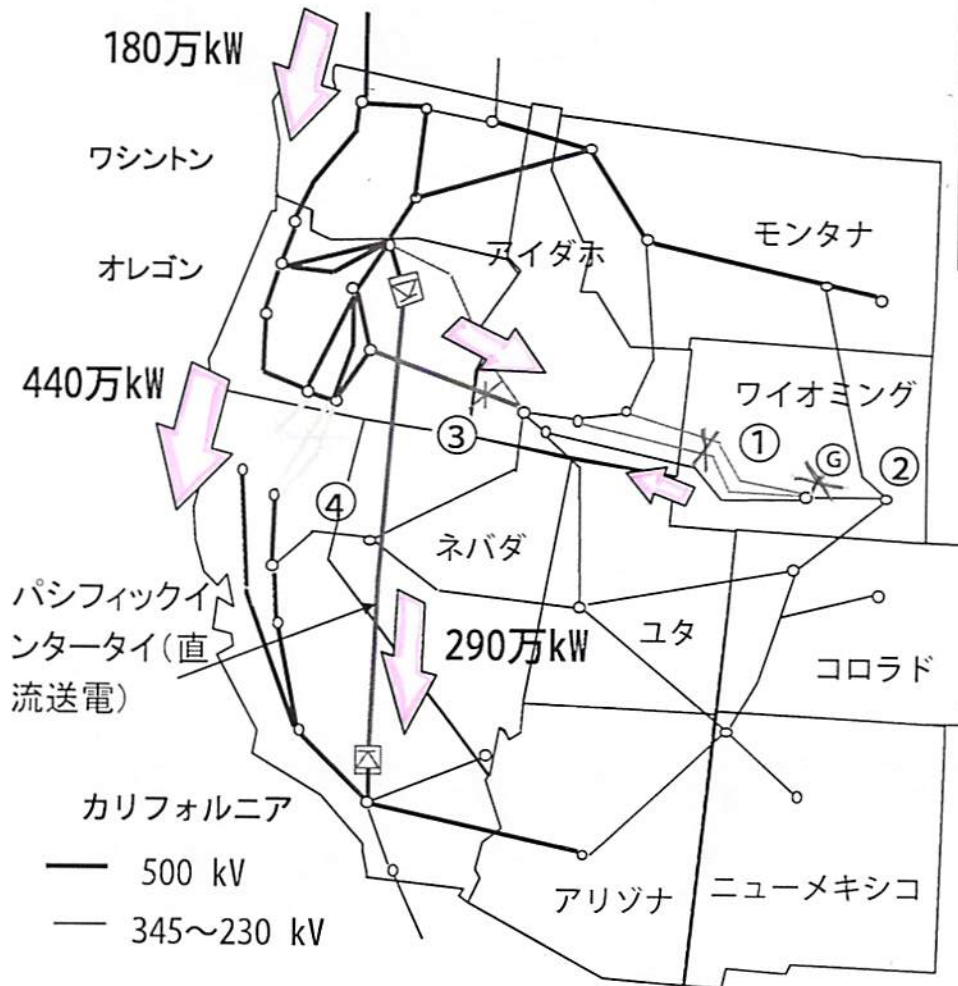
カスケーディングの例

(1996/7/2 米国西部系統停電事故)

発電所の連鎖的離脱

7月2日事故の概要

発生時間：13時24分（現地時間）
 停電戸数：約200万戸
 （約1200万kW）
 停電時間：数分～6時間余り
 気温：西部地域全般に高気温



[事故の経過]

- ① 345kV送電線 2 回線停止 (樹木接触、保護リレー誤動作による)
- ② 保護装置により発電機停止
- ③ 潮流回り込みによるオレゴン南部～アイダホ南部で電圧低下
- ④ 500kVパシフィック・インタータイ分断
- ⑤ 西部系統が5つに分離
- ⑥ 周波数低下による負荷しゃ断

12

別紙9