

「電力系統入門」

電力系統の概要

1. 電力系統の構成と特徴

- (1) 電力系統の構成
- (2) 電力系統の特徴
- (3) 直流と交流
- (4) 可変電圧・可変周波数

2. 電力系統の運用と制御

- (1) 需給運用と制御
- (2) 系統運用と潮流制御
- (3) 系統運用と電圧無効電力制御
- (4) 異常電圧・電流制御

3. ネットワークセキュリティの確保

- (1) 単純故障
- (2) 多重故障
- (3) 同期安定度と電圧安定性

1. 電力システムの構成と特徴

(1) 電力システムの構成

(2) 電力システムの特徴

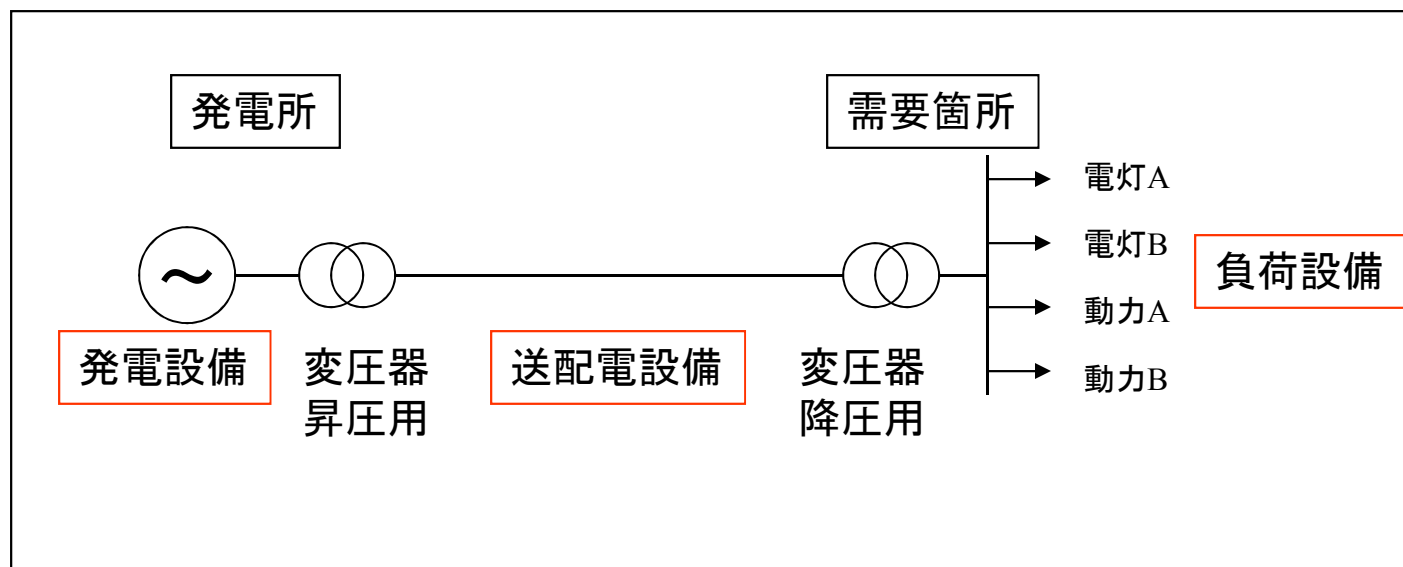
(3) 直流と交流

(4) 可変電圧・可変周波数

(1) 電力系統の構成

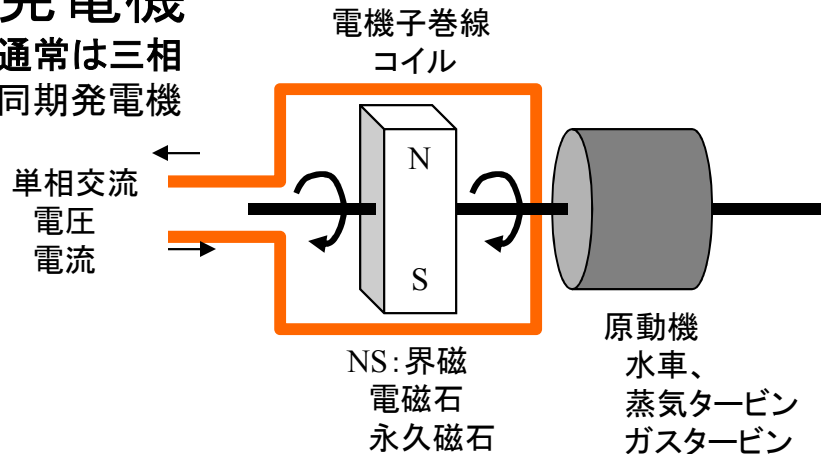
電力系統は、次の地理的に分散する3設備を結合したものの

- (a) 発電設備・・・他エネルギーを電気エネルギーに変換
- (b) 負荷設備・・・電気エネルギーを所要のエネルギーに変換
- (c) 送配電設備・・・発電機と負荷を電氣的に結合し電気エネルギーを輸送



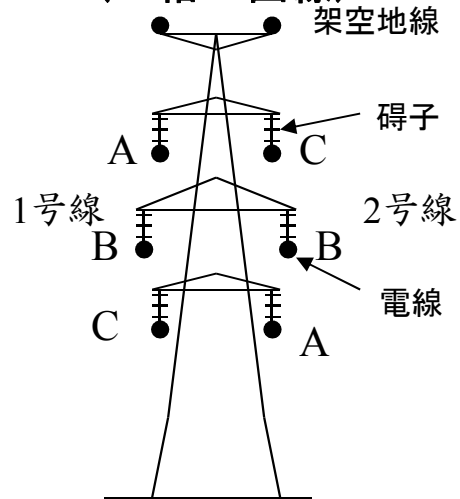
発電機

通常は三相
同期発電機



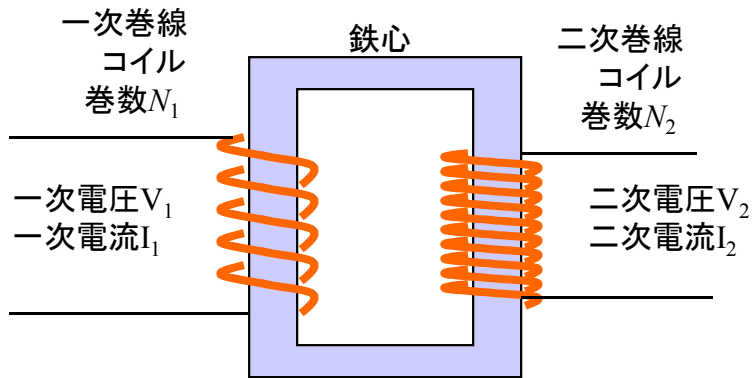
架空送電線

(三相 2 回線)



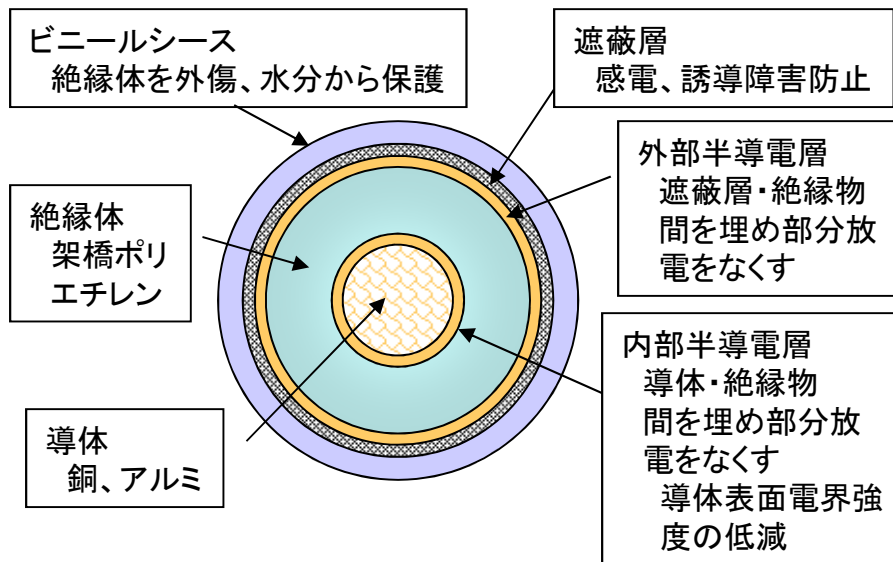
変圧器

通常は三相



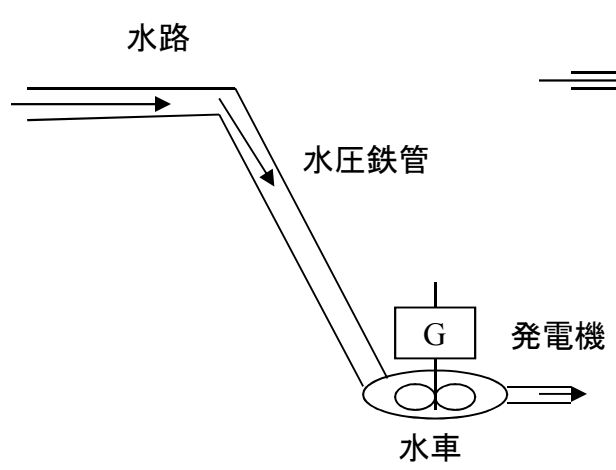
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

地中線(CVケーブル、通常3本を3相で使用)

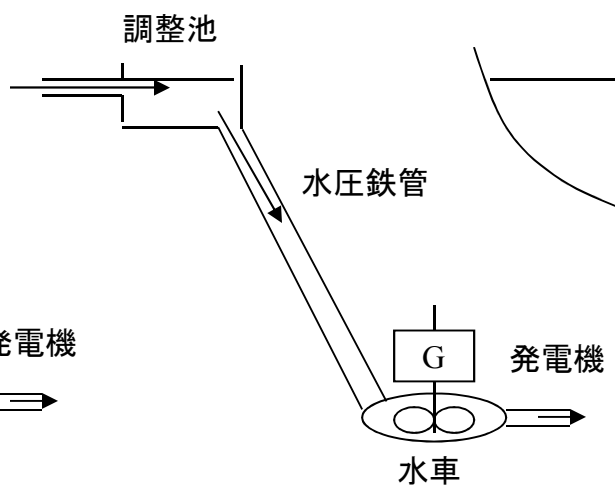


いろいろな水力発電

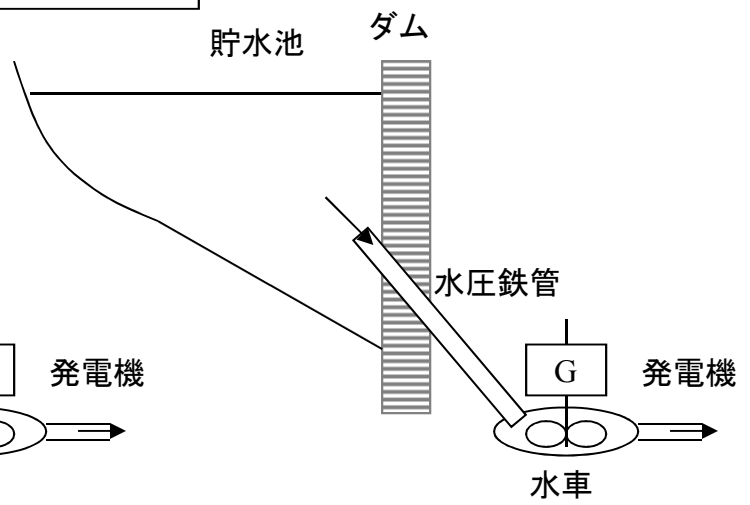
流れ込み式水力



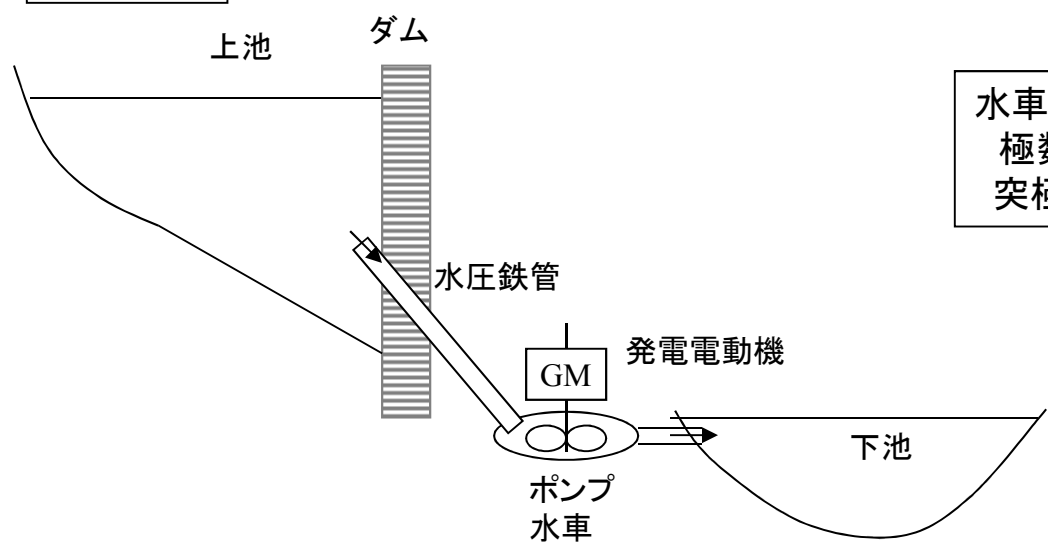
調整池式水力



貯水池式水力



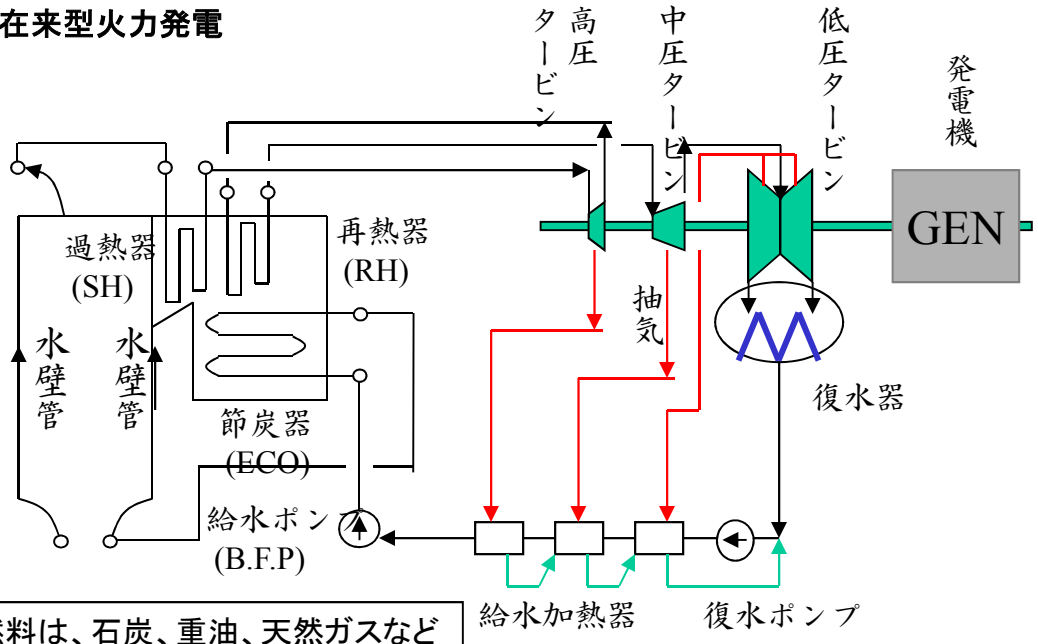
揚水式水力



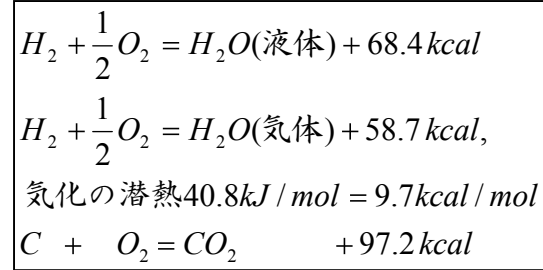
水車発電機
極数は10~20 300~600rpm
突極機

いろいろな火力発電

在来型火力発電



燃料は、石炭、重油、天然ガスなど

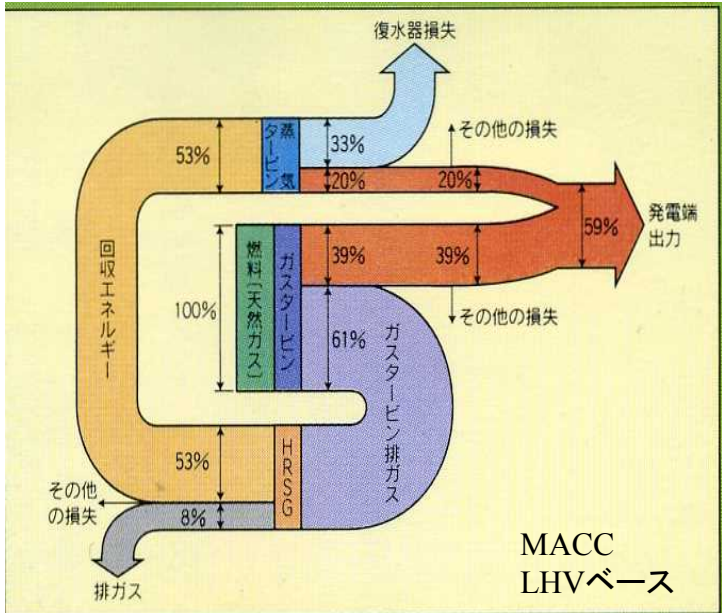


メタンの場合

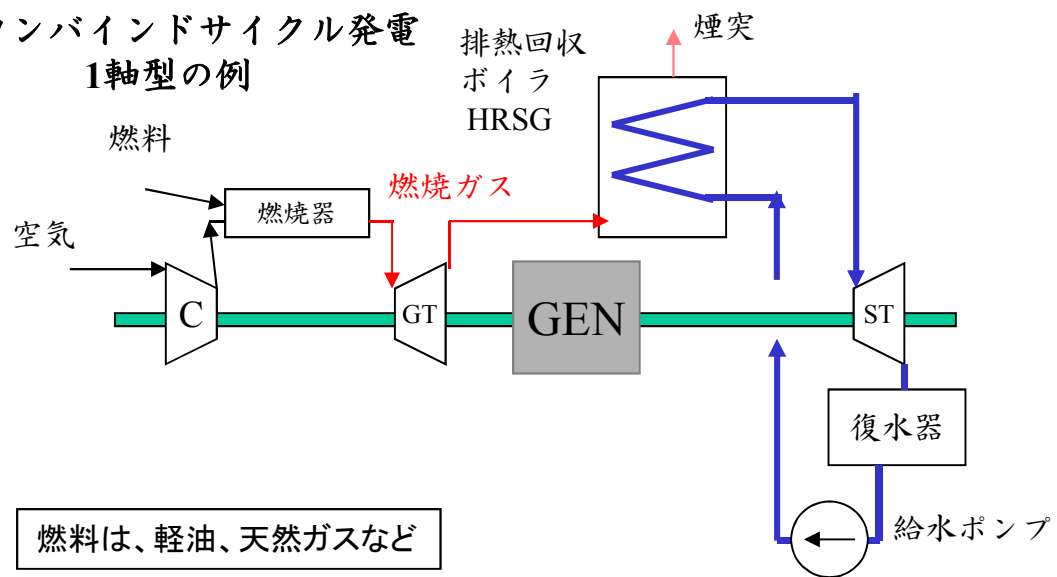
$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O(\text{気体}) + 214.6 \text{ kcal}$$

16g(22.4l)あたり 214.6kcal, CO₂ 44g
 → 13,400kcal/kg, CO₂ 2.75kg

低位発熱量(LHV) 13,400 kcal/kg
 高位発熱量(HHV) 14,612 kcal/kg(1.09倍)



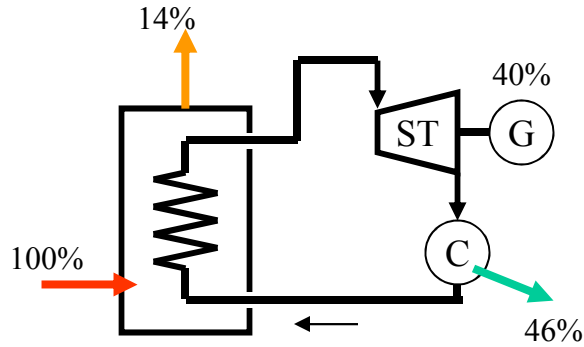
コンバインドサイクル発電 1軸型の例



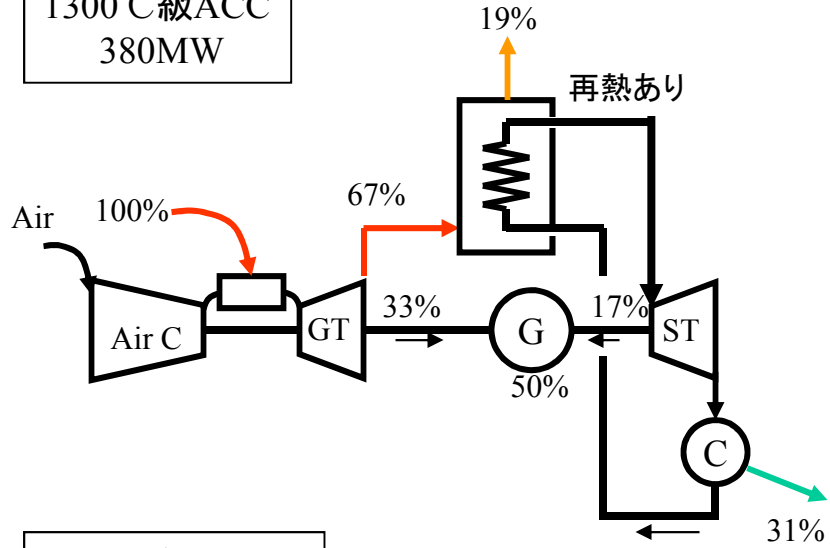
燃料は、軽油、天然ガスなど

概略熱バランス図の例 (HHVベース)

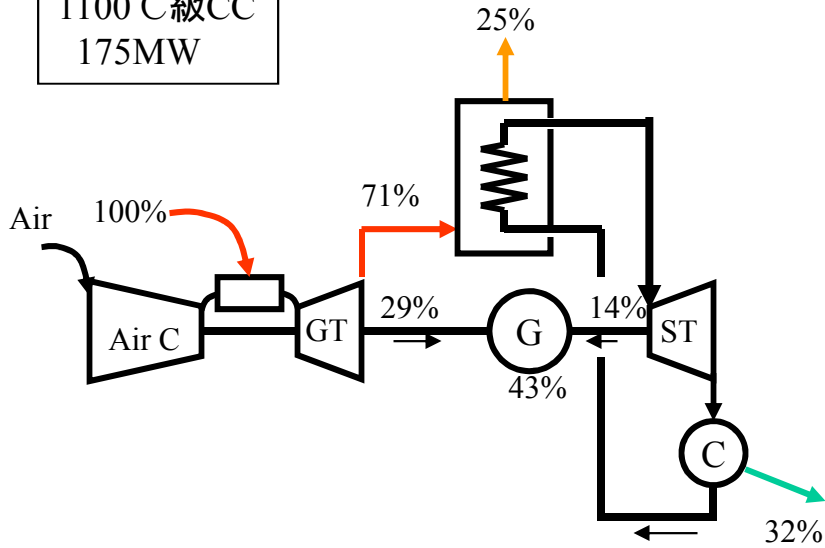
在来型汽力
1000MW



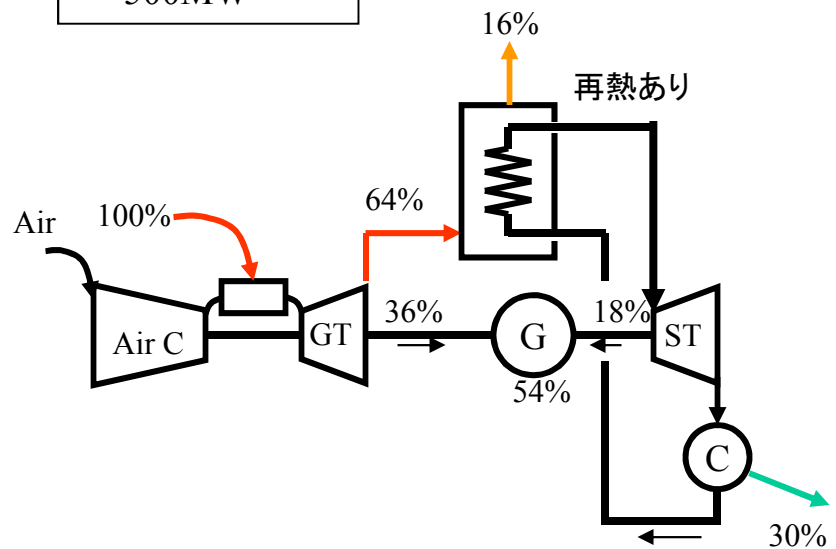
1300°C級ACC
380MW



1100°C級CC
175MW



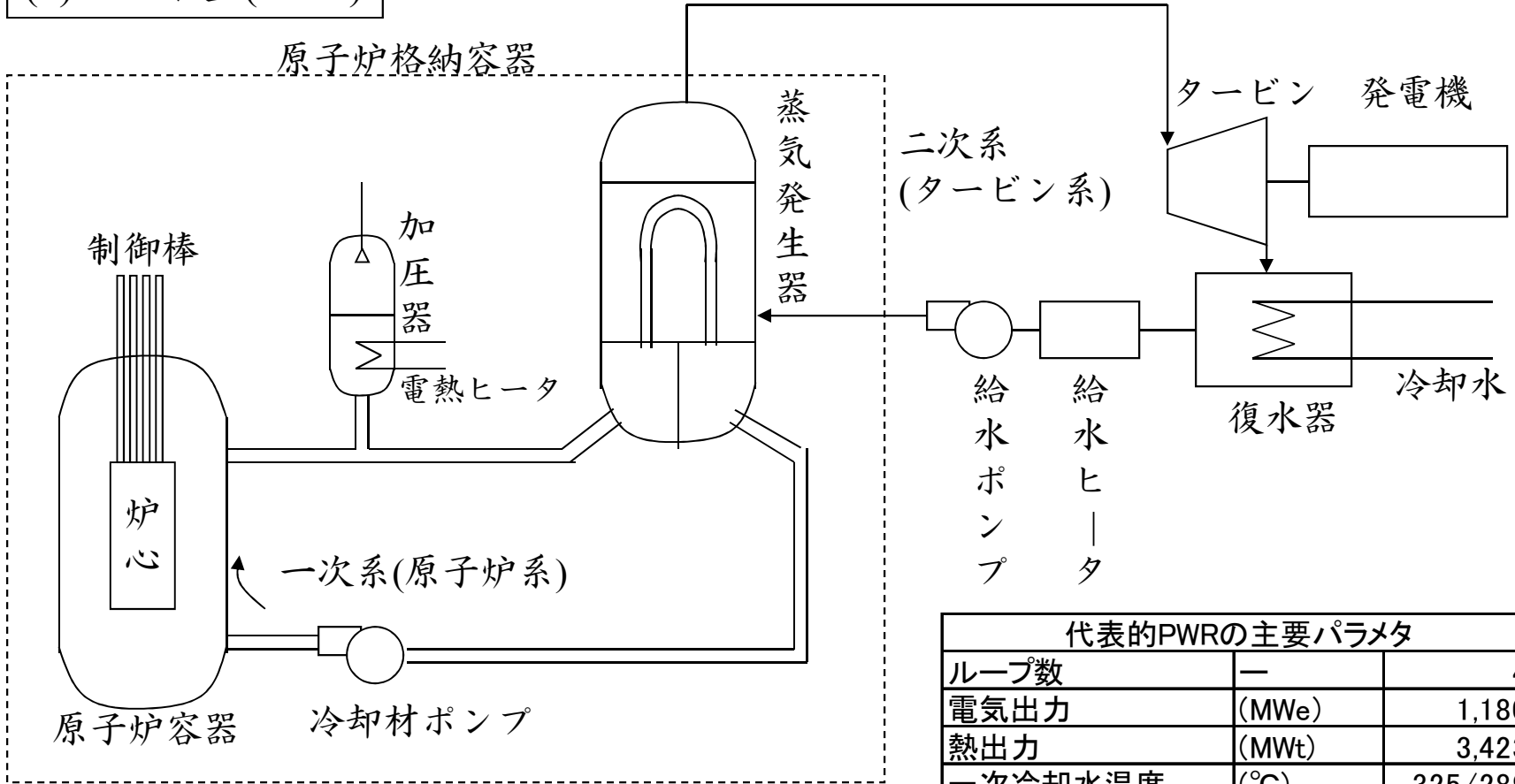
1500°C級MACC
500MW



いろいろな原子力発電

熱中性子炉(軽水炉、重水炉、黒鉛炉。減速材、冷却材別)、高速炉などのうちの軽水炉(軽水減速、軽水冷却)が一般的
 長期的には、軽水炉→高速増殖炉→核融合炉

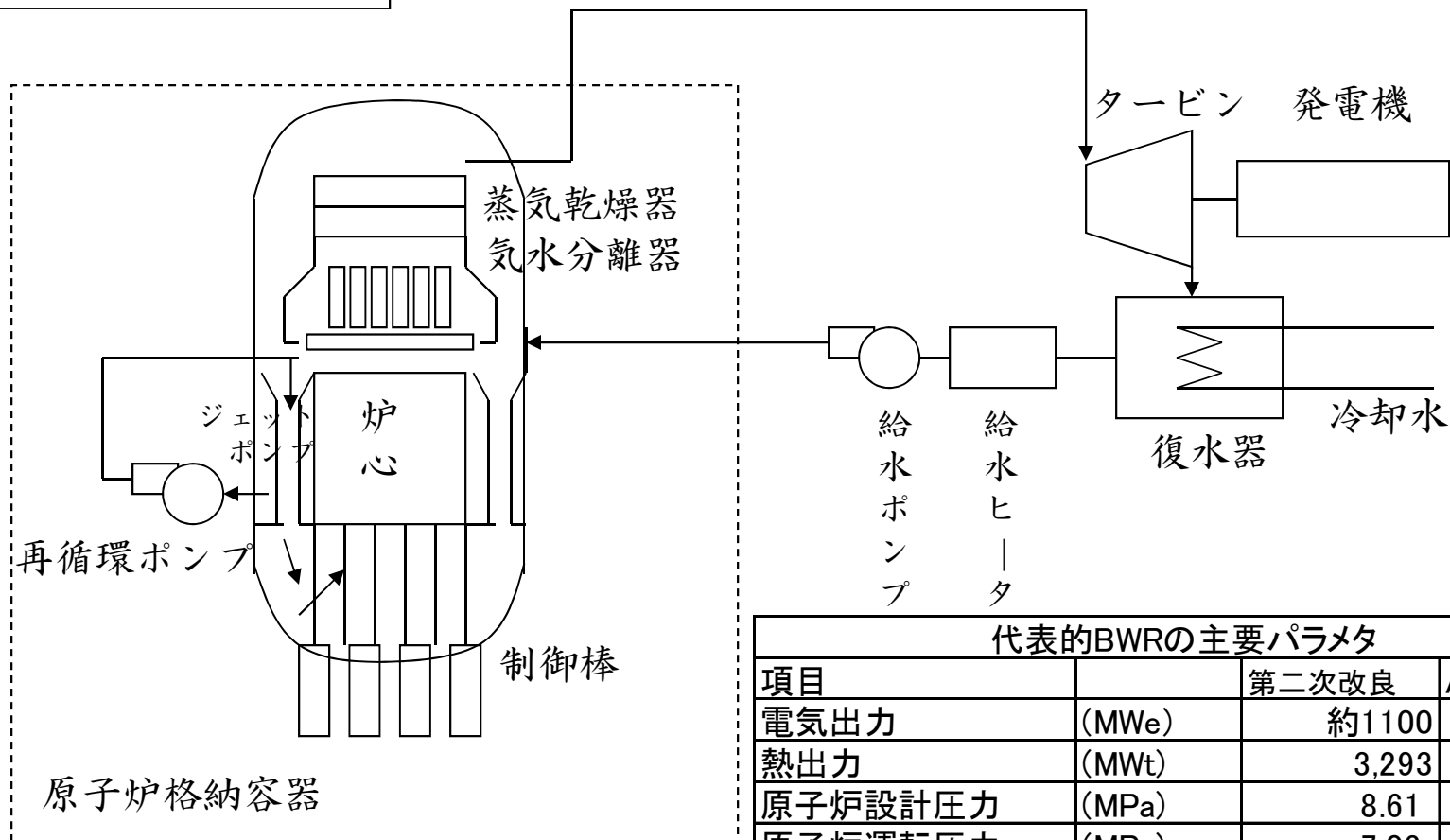
(1)加圧水型(PWR)



原子力発電機
 極数は 4 が多い 1500/1800rpm

ループ数	—	4
電気出力	(MWe)	1,180
熱出力	(MWt)	3,423
一次冷却水温度	(°C)	325/289
一次系圧力(運転中)	(MPa)	15.2
蒸気圧力(入口)	(MPa)	5.6
蒸気温度(入口)	(°C)	270
1kg/cm ² =0.098MPa		

(2)沸騰水型(BWR)



原子炉格納容器

原子力発電機

極数は 4 が多い 1500/1800rpm

代表的BWRの主要パラメタ

項目		第二次改良	ABWR
電気出力	(MWe)	約1100	約1360
熱出力	(MWt)	3,293	3,926
原子炉設計圧力	(MPa)	8.61	8.61
原子炉運転圧力	(MPa)	7.03	7.16
主蒸気圧力(入口)	(MPa)	6.55	6.68
主蒸気温度(入口)	(°C)	282	284
主蒸気流量	(t/h)	6,410	7,640
最終段翼長	(インチ)	41	52
再循環ポンプ		外部	内蔵

発電機の種類・メカニズム・性能評価

1. 発電機の電氣的構造による差
2. 原動機・一次エネルギーの特性による差

1. 発電機の電氣的構造による差

同期発電機	直流界磁、永久磁石	回転数に比例する周波数の交流発電
誘導発電機	巻線型、かご型	並列系統から無効電力を吸収する。回転数は可変
太陽光	光電変換素子	直流発電
燃料電池	水素と酸素の結合	直流発電

2. 原動機・一次エネルギーによる差

	発電機	回転数	発電効率	設備利用率	起動時間	出力調整	最低負荷	経済特性
水力	突極型同期機	低速	90%前後	10~30%	数分	100%/数分	~10%	M, P
	(揚水)	同上		10%以下		同上		P (揚水効率約70%)
火力	円筒型同期機	高速	40%~	50~80%	数時間	~1%/分	~25%	B, M
	(同上一軸型CC)	高速	50~60%	50~70%	1時間程度	~2%/分	~25%	M
原子力	円筒機	高速、	30%強	70%~	1~2日	可	~25%	B
風力	低速回転誘導機、	低速	40~50%**	20~30%	~分	可	--	--
	同期機+周波数変換装置							
太陽光	直流+インバータ		10%強	10%強	~分	不可	--	--
燃料電池	同上		40%強	負荷に依存	タイプによる	可	--	-- 熱水供給可

* 流れ込み式を除く

**風力発電における理想変換効率に関するベッツの限界値=16/25=59.3%

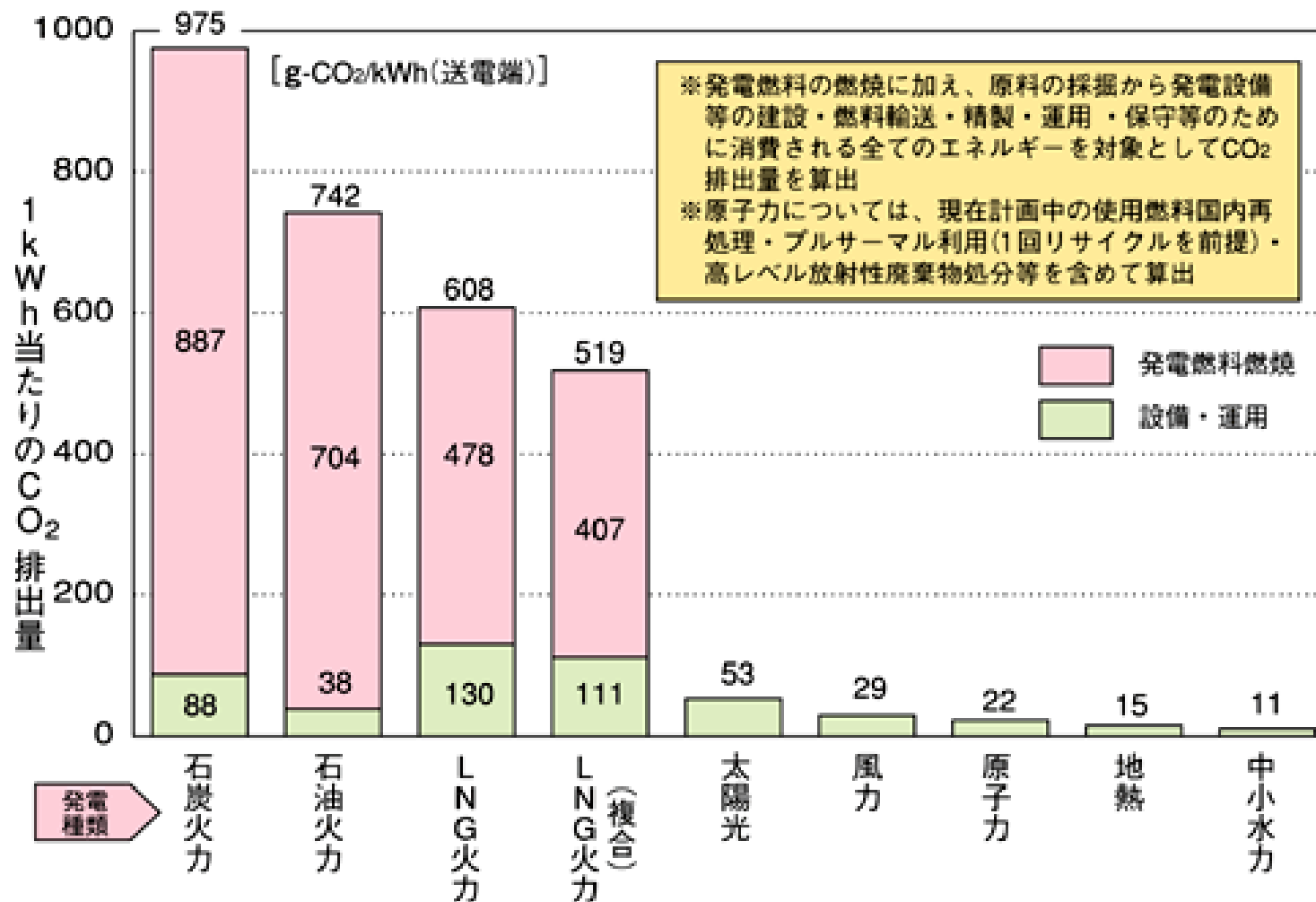
B:ベース、M:ミドル、P:ピーク用

CO₂発生量は次ページ参照

経済特性についてはp.23参照

発電機の種類・メカニズム・性能評価比較続き

各種電源別のCO₂排出量



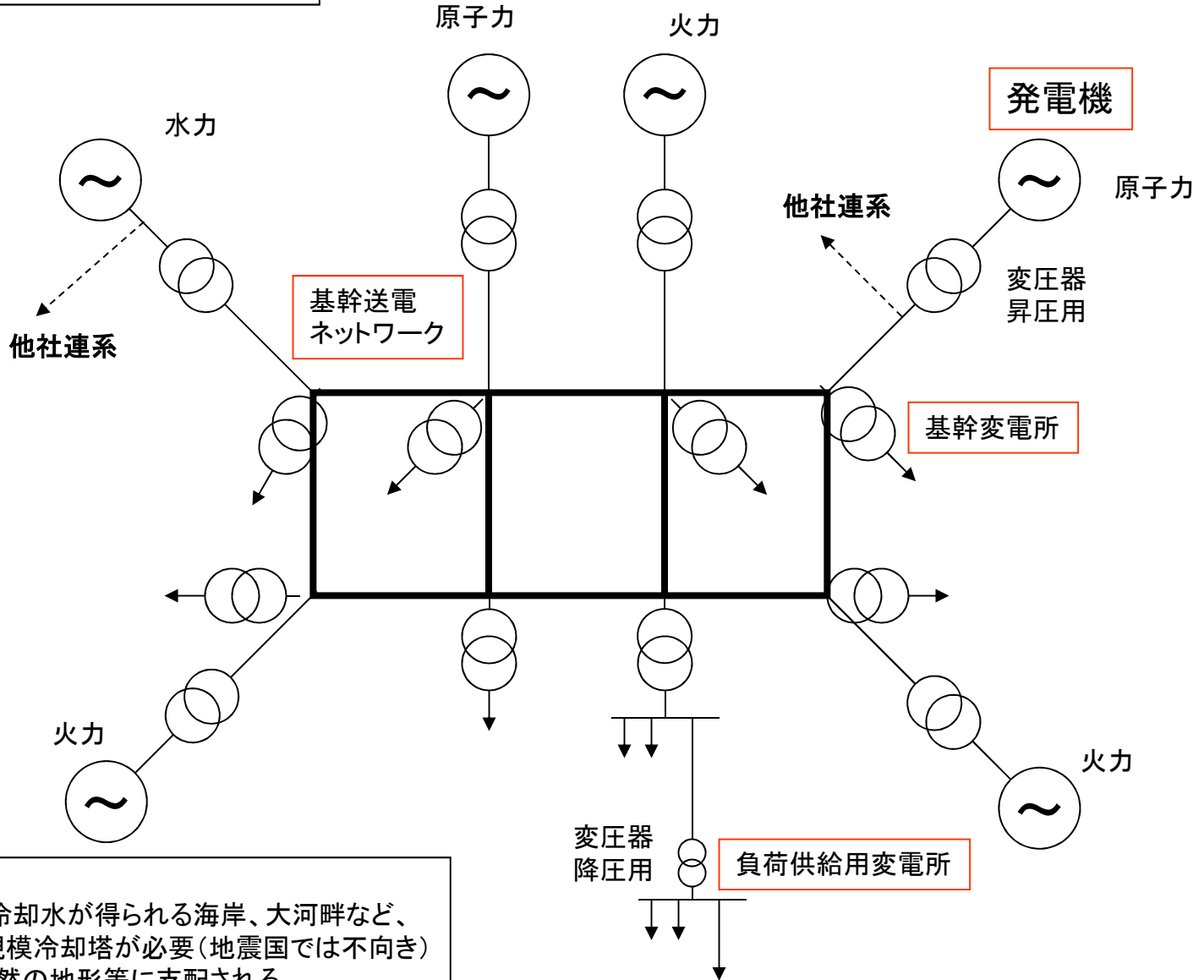
(注) 合計の数値と個々の数値の和は、四捨五入の関係で一致しない場合がある

出典：電力中央研究所報告書

面的な広がりを持つ電力系統

電圧階級例

1000kV
500kV
275kV
154kV
66kV
22kV
6kV
(400/230V)
200/100V



立地点

- ・火力、原子力は冷却水が得られる海岸、大河畔など、内陸では、大規模冷却塔が必要(地震国では不向き)
- ・水力は地点が自然の地形等に支配される。
- ・供給用変電所は需要分布に依存する。

(2) 電力系統の特徴

① 同時性

生産と消費が同時に行われる。流通に要する時間が0である。
時々刻々需給バランスを取る必要がある。

→ 発電 = 消費 + 送電損失

→ 最大需要に見合う設備が必要。利用率が低い。

② 大量貯蔵が困難である。

→ 揚水発電である程度補完 通常、消費地から遠い。

→ 電力貯蔵電池の技術開発、消費地付近に設置可。

その他、慣性効果利用、磁気エネルギー利用など

参考

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{年間利用量}[kWh]}{\text{最大能力}[kW] \times 8760}$$

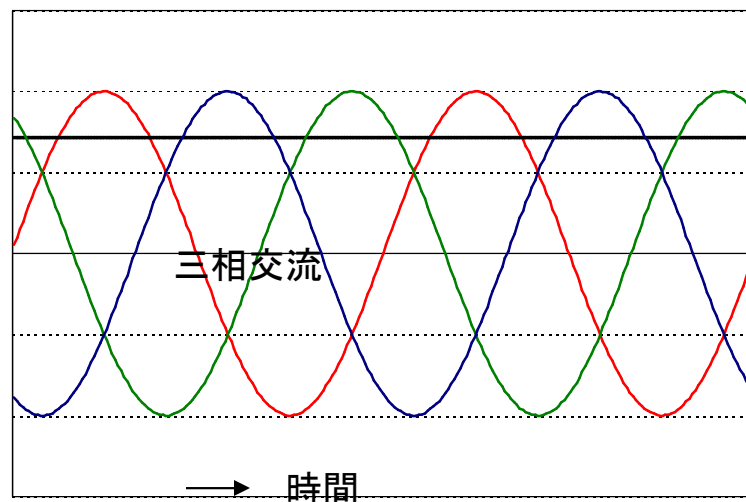
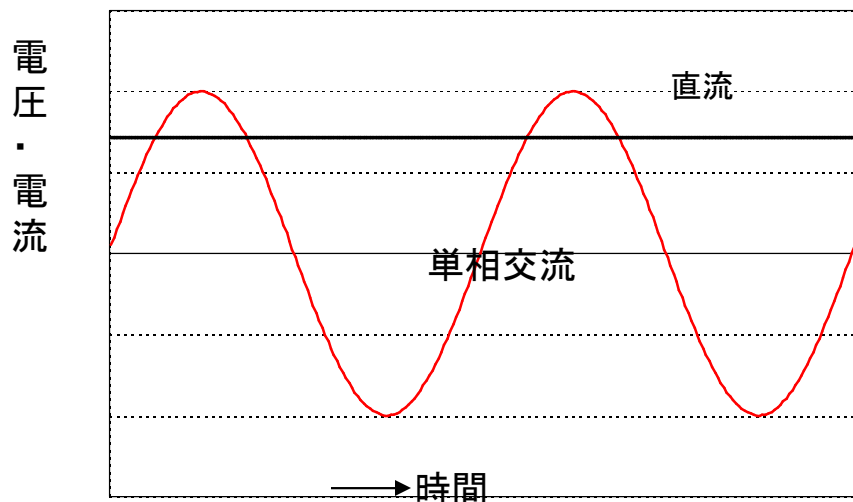
$$8760 = 24 \times 365 [h]$$

$$\text{負荷率} = \frac{\text{年間負荷電力量}[kWh]}{\text{最大負荷}[kW] \times 8760}$$

(3) 直流と交流

交流 変圧器によって電圧を自由に変えることができる。
送電安定度問題がある。通常、電力系統は交流を基本に形成し、部分的な長距離送電、海底送電,他系統との連系などに直流を使っている。
電動機に用いれば円滑な回転磁界を動力に容易に活用できる。

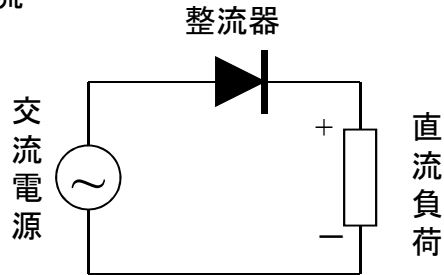
直流 小規模なものを除き、商用規模で電圧を変える装置はない。
送電安定度問題がなく、同一実効電圧に対し交流の70%の絶縁で足り、長距離送電や海底ケーブル送電に適している。
磁気観測等に影響がある。



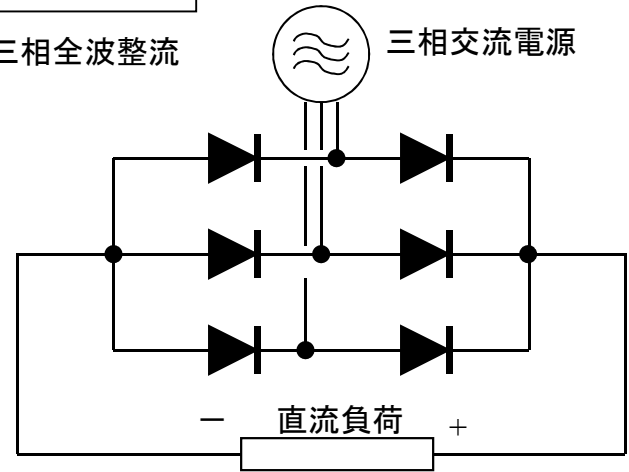
参考 交流、直流間の相互変換

- ・交流を整流すると直流が得られる→コンバータ
- ・直流を逆変換すると交流が得られる→インバータ
- ・両者を結合して周波数変換が可能となる

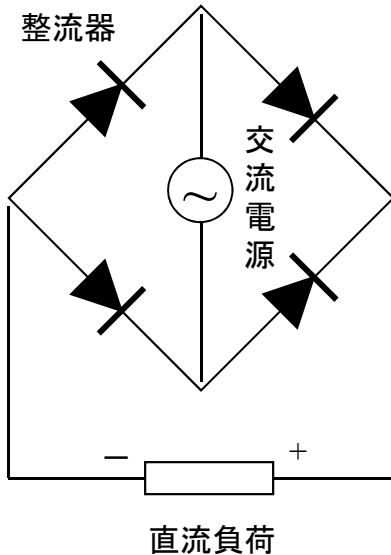
単相半波整流



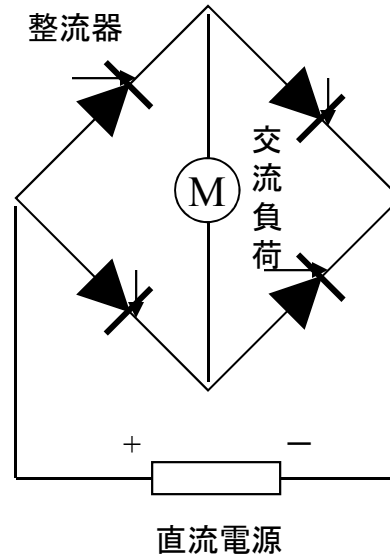
三相全波整流



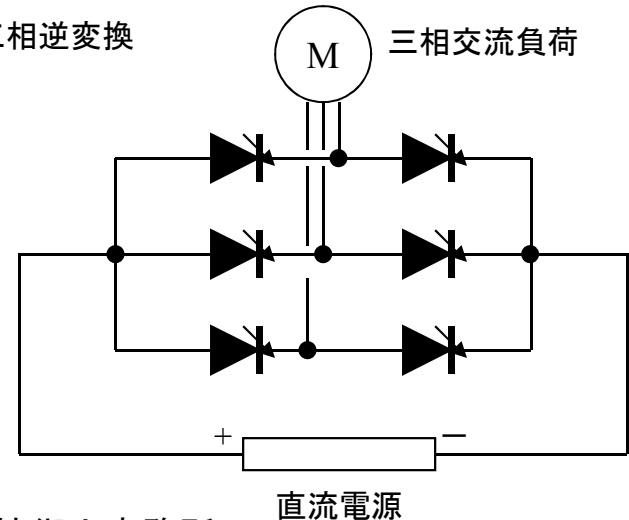
単相全波整流



単相逆変換



三相逆変換

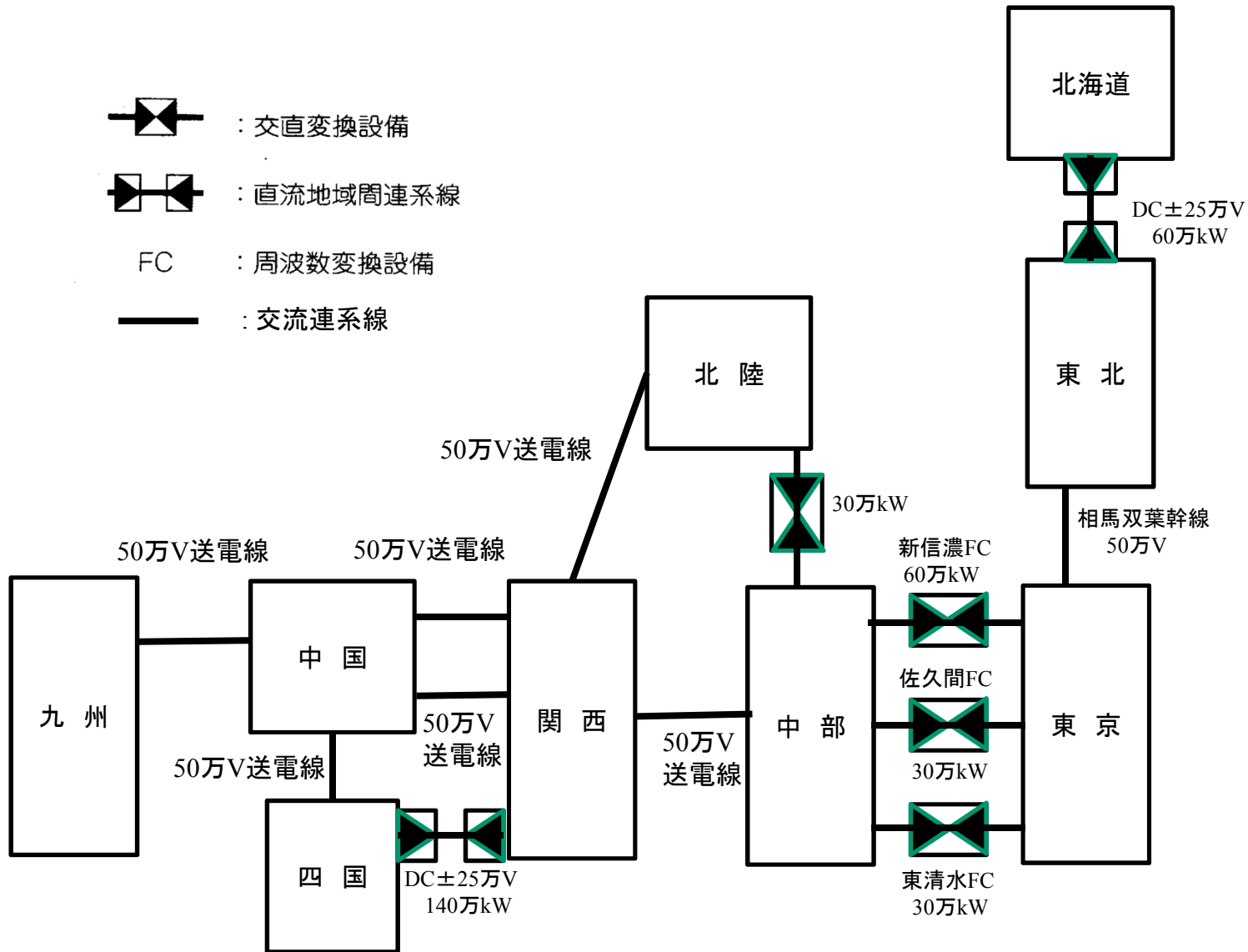


系統連系

系統連系の効果

- ① 需要や、設備故障の不等時性を活用した
 - ・発電予備力節減
- ② 経済性の高い順序に発電する
 - ・設備の経済運用
- ③ 緊急時に応援電力を送電する
 - ・応援電力送電などがある。

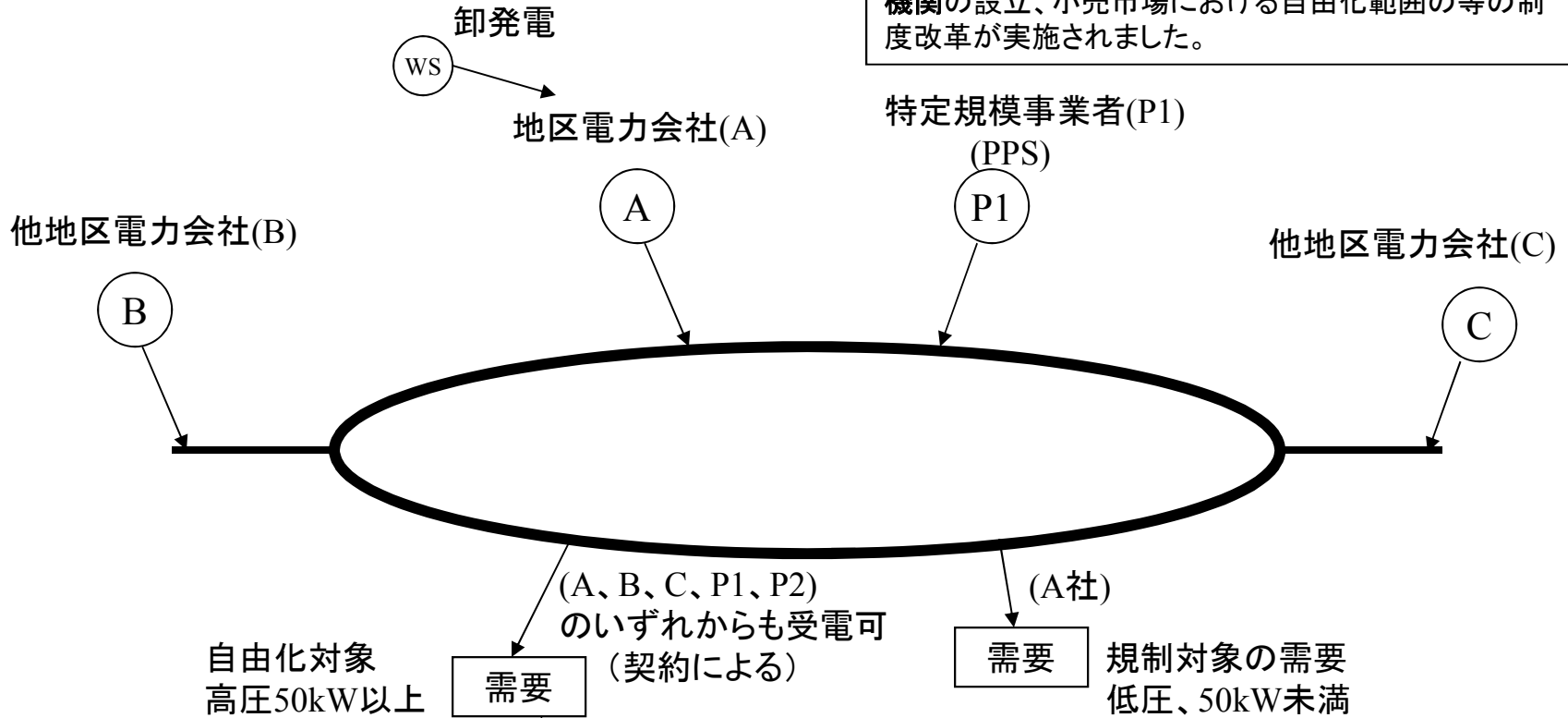
効果と、連系に要するコストとの対比で最適連系量が定まる。



参考、「数表で見る東京電力」

電力自由化の現状

2003年6月に改正電気事業法が公布され、卸売電力市場における取引所の開設、送配電業務に関する中立機関の設立、小売市場における自由化範囲の等の制度改革が実施されました。



送配電部門収支(会計分離)は、託送等の業務により送配電部門に生じた利益が他部門で使われていないことを確認するために、送配電部門の託送料金収益と送配電部門の全費用をもとに算定します

送電・配電等の電力系統にかかわる設備形成、系統アクセス、系統運用等の業務(以下、送配電業務という)に関しては電気事業への新規事業者の参入自由化、小売自由化範囲の拡大に伴い、送配電利用における公平性、透明性のより一層の向上が要求されるようになったため、電力系統に関するさまざまなルールの方策・監視を担う「送配電等業務支援機関」(いわゆる中立機関)を、民間の自主的な取組を前提として創設されました。(有限責任中間法人 電力系統利用協議会資料から)

PPS:Power Producer & Supplier

(4) 可変電圧・可変周波数

周波数変換が容易になったことから、可変電圧・可変周波数供給も考えられるが、多様な需要側条件があるので必要に応じ需要側で行われている。

参考 送配電関連の用語

送電線 発電所と変電所との間、又は、変電所相互間を連絡する電線路。発電所でつくられた電気は、送電効率を高めるために、高電圧の送電線によって、需要家近くの変電所に送られる。いくつかの変電所を経て、徐々に降圧される。

配電線 需要家に最も近い変電所(配電用変電所)から需要家に至るまでの電線路。

電力系統 発電所から送電線、変電所、配電線を経由して、需要家に至るまでの全ての要素が有機的に関係されたものの総称で、電力の発生から消費までを包括するシステム。送電系統と配電系統から構成される。

系統運用 発電所でつくられる電気を需要家まで円滑に輸送するとともに、適正な電圧を維持できるように電力系統を総合的、経済的に運用すること。我が国では、既存電力会社の送配電部門が送配電系統の運用を行い、中立機関が公平性・透明性・中立性の観点から、ルール策定・監視を行うが、EU や米国の一部では、電力会社から分離された送電系統運用者・配電系統運用者やISO・RTO が、送電系統や配電系統の運用を行う。

アンバンドリング 送電系統の運用について、公平性・透明性を確保するために、垂直統合型の既存電力会社の送電部門を分離すること。

分離の方法は、①会計分離、②機能分離、③法的分離、④所有分離の4種類に大別される。

①会計分離は、内部相互補助を禁止するため、発電、送電等の部門毎に貸借対照表、損益計算書等の財務諸表を作成すること。

②機能分離は、情報遮断や人事交流の制限等により、運営面で送電部門の独立性を確保すること。

③法的分離は、送電系統運用部門を、発電その他部門から法的に独立した主体とすること。

④所有分離は、送電線の所有権を含めた送電部門全体を、発電その他部門から法的に独立した主体とすること。①と②は行為規制、③と④は構造規制と呼ばれる。

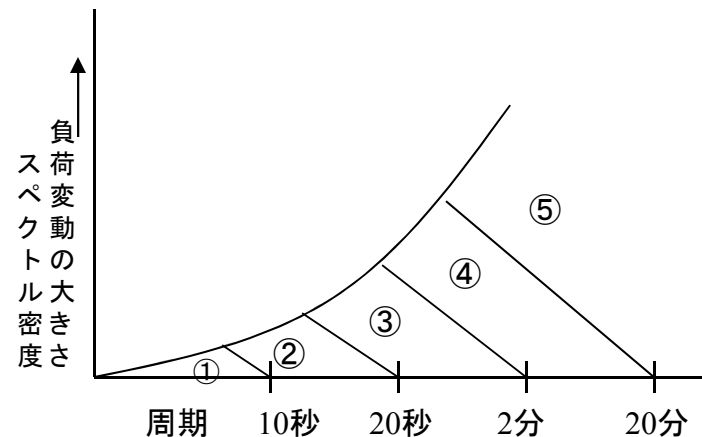
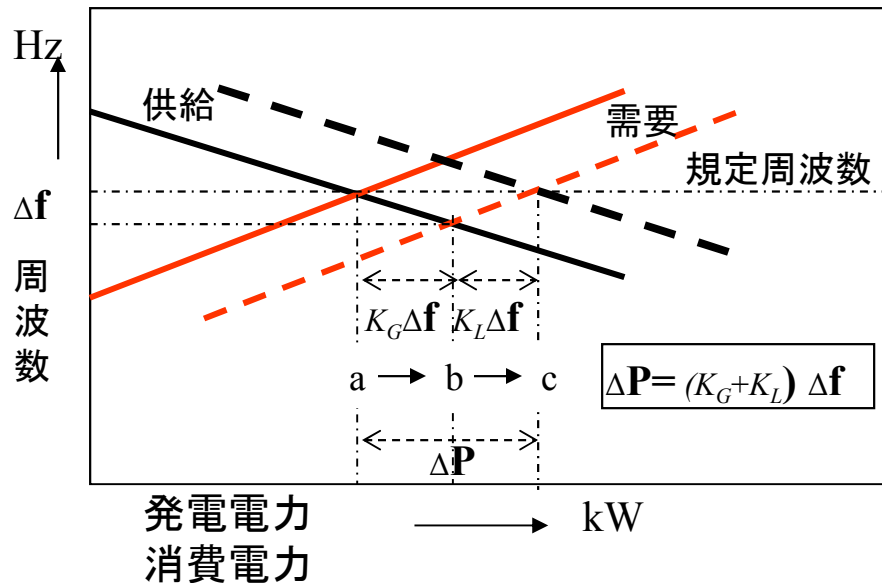
国立国会図書館 ISSUE BRIEF 調査と情報595号「電力自由化の成果と課題 欧米と日本の比較」から。

2. 電力系統の運用と制御

- (1) 需給運用と制御
- (2) 系統運用と潮流制御
- (3) 系統運用と電圧無効電力制御
- (4) 異常電圧・電流制御

(1) 需給運用と制御

時々刻々需給バランスを取らないと周波数が変動する。
 供給(発電) > 需要(消費)・・・周波数が上昇→供給を減らす
 供給(発電) < 需要(消費)・・・周波数が低下→供給を増やす

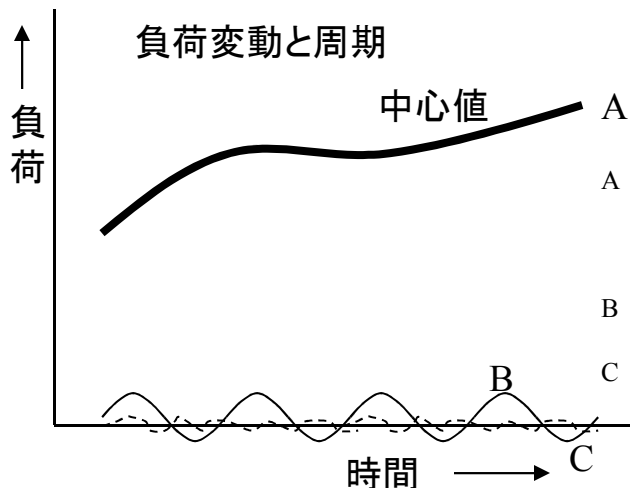


周波数を監視し、一定値に保つように発電力を調整すれば、時々刻々の需給バランスが取れる。負荷変動の周期と大きさにより

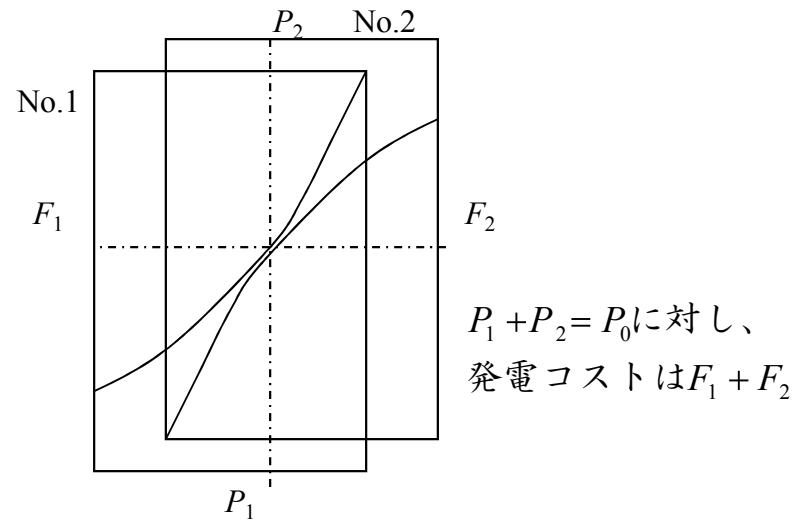
- ① 10秒以下の負荷変動は系統自体の自己制御性により自然に補正される
- ② 10～20秒の変動は 即応性高い火力機GF governor free ガバナーフリー運転による調整
- ③ 20秒～2分程度は 水力など多数のガバナーフリー運転機による調整
- ④ LFC load frequency control 負荷周波数制御 AFC
- ⑤ ELD economic load dispatching 経済負荷配分制御

他社連系では周波数と連系線潮流が一定になるよう制御すれば、各社別需給が均衡。

大電力でのFFC(周波数一定制御)と他電力でのTBC(Tie Line Bias Control)の組合せが一般的



- A 中心値であるが前日予想による長期傾向分はELDにより調整する。予想との差が大のとき給電指令。
- B 中心値に対し20分程度以下で変動する分は、LFC
- C 2分以下の短周期変動はGF



ELD economic load dispatching

$F_k(P_k)$ を No. k 発電機の発電コストと F_k と出力 P_k との関係とする。

問題は、 $\sum_k P_k = \text{一定値 } P_0$ の条件のもとで、総コスト $\sum_k F_k$ を最小にする P_k を求めること。

解法 ラグランジュの未定係数法

$$G = \sum_k F_k + \lambda \left(P_0 - \sum_k P_k \right) \text{ を極小化する。}$$

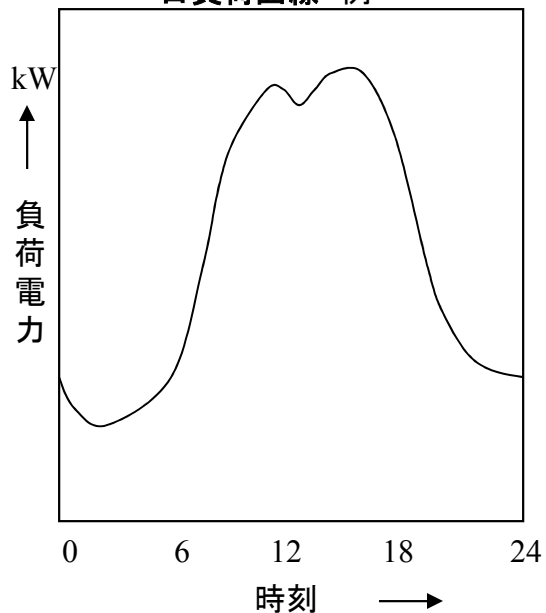
$$\frac{\partial G}{\partial P_k} = \frac{\partial F_k}{\partial P_k} - \lambda, = 0, \quad k = 1, 2, 3 \dots N$$

$$\frac{\partial G}{\partial \lambda} = P_0 - \sum_k P_k = 0$$

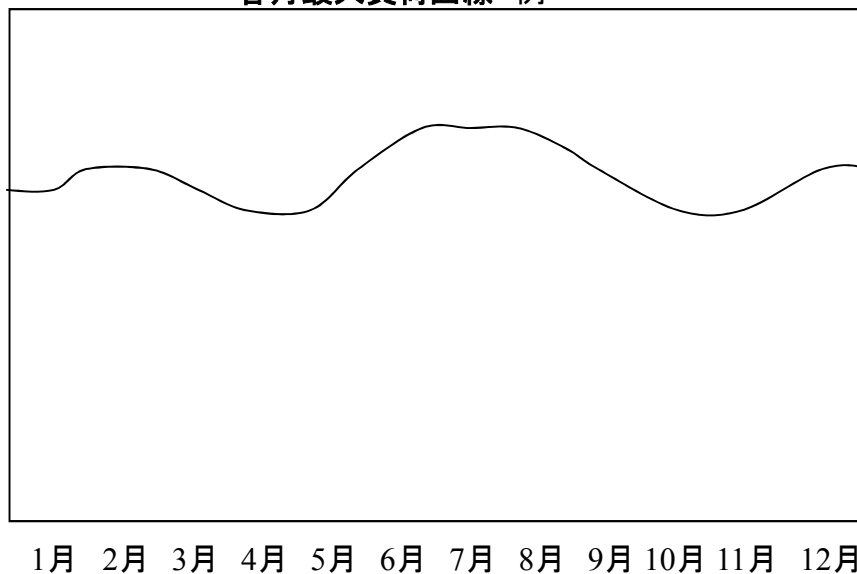
$$\therefore \frac{\partial F_1}{\partial P_1} = \frac{\partial F_2}{\partial P_2} = \frac{\partial F_3}{\partial P_3} = \dots = \frac{\partial F_N}{\partial P_N} = \lambda, \text{ すなわち、増分コストが一定になるように負荷配分すればよい。}$$

実際には送電損失も考慮にいった式を用いる。

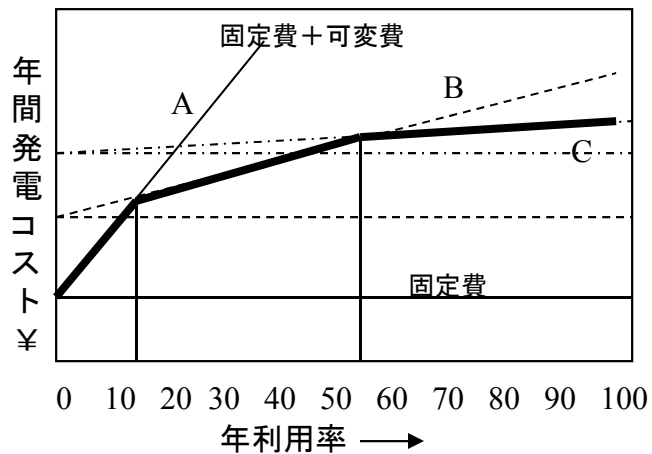
日負荷曲線 例



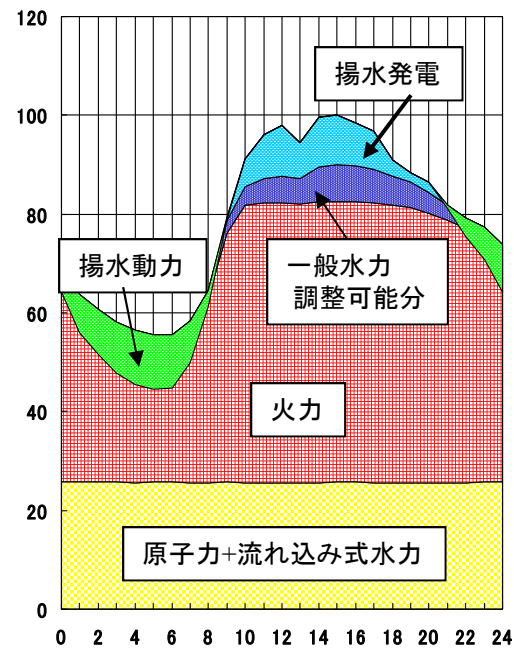
各月最大負荷曲線 例



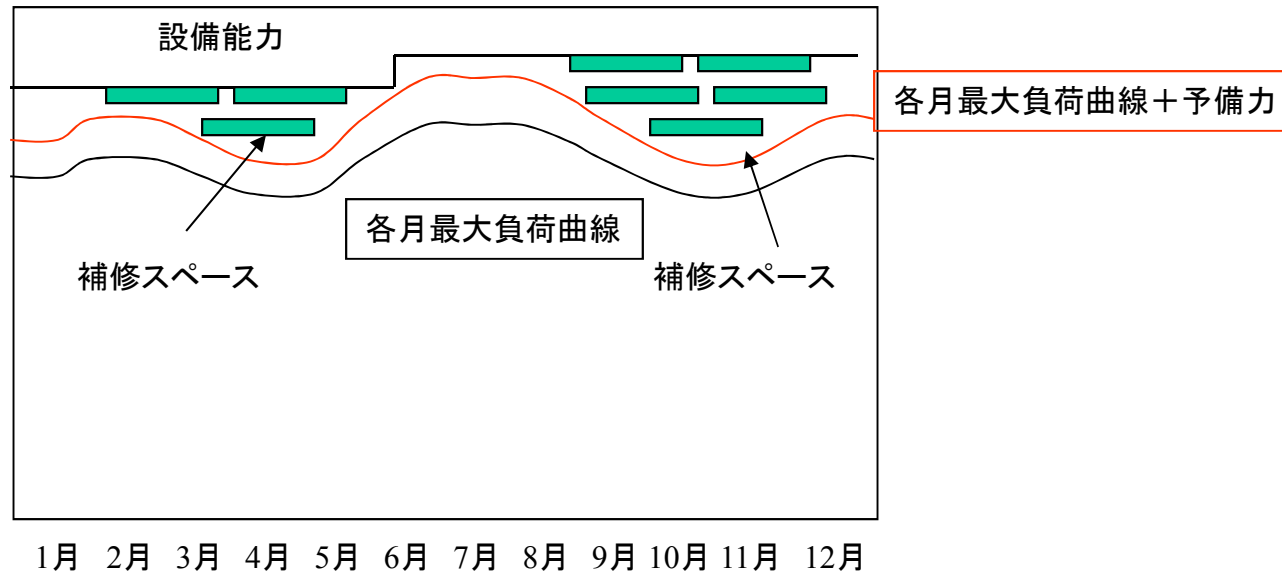
発電種類別最適利用率範囲



- A: ピーク電源
揚水発電、ガスタービン、
老朽火力、調整式水力など
- B: ミドル電源 新鋭火力など
- C: ベース電源
原子力発電、石炭火力
流れ込み式水力など



各月最大負荷曲線に補修計画を当てはめ 例



(2) 系統運用と潮流制御

a. 個別設備容量に対する潮流超過防止

発電機、送配電線、変圧器はそれぞれ個別の電流限界を持つ

b. 回り込み潮流による容量超過防止

他の設備の異常時などに、健全な設備に過剰な電流が流れる

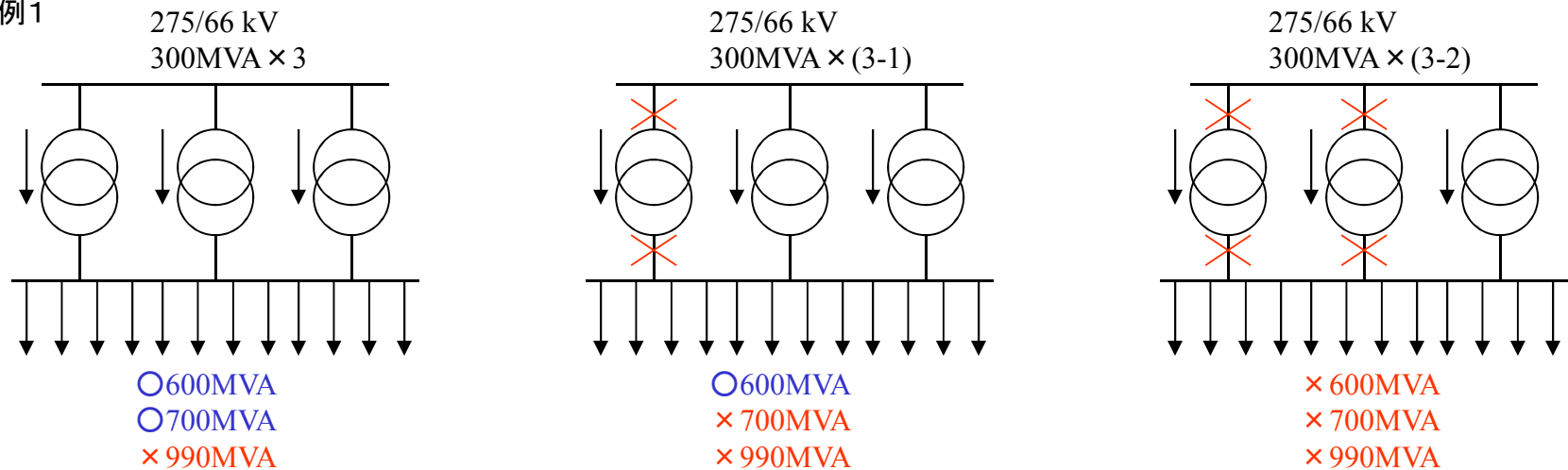
c. 事故時等の短時間過負荷防止

通常の負荷電流では容量以内だが、異常時の過渡的な大電流

(ex. 数万A, 1秒)で、設備が破壊されないようにする必要がある(導体選定)。

潮流制御の手段 系統切り替え、位相調整装置、直流連系装置、 Z の変更

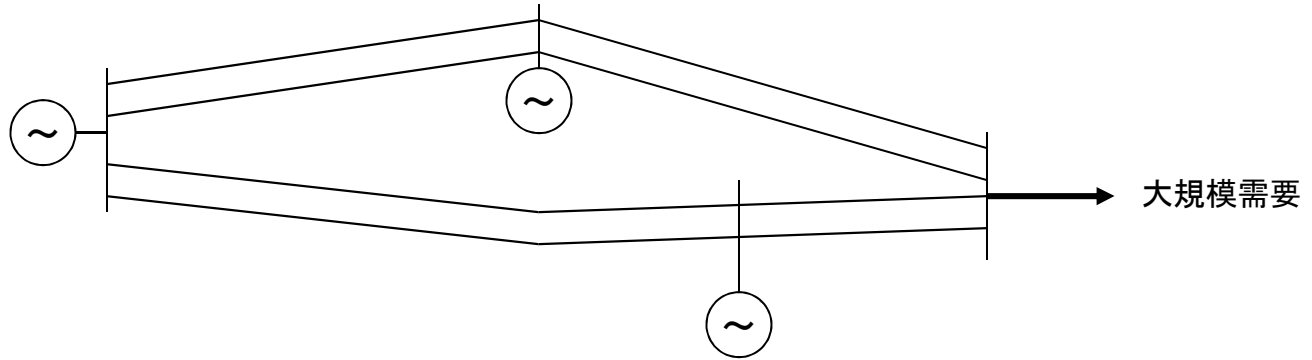
例1



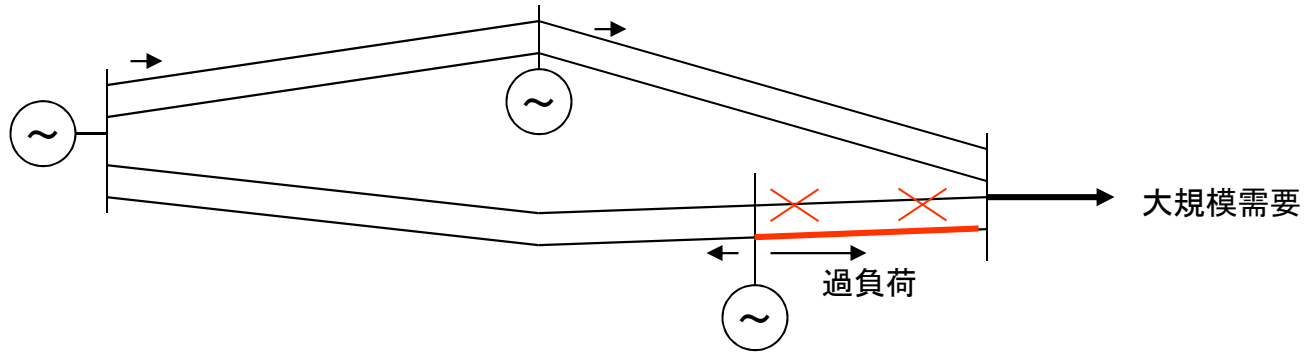
常時、負荷の監視を行い、容量超過の場合は、負荷の一部または全部を遮断するなどの処置をとる。
通常の信頼度基準(ex. N-1 ルール)では、過負荷が生じないように予想最大負荷の値を抑制する。過剰分を他設備から供給。

例2 ループ状送電系統の電力潮流は、ほぼインピーダンスに反比例して流れる。

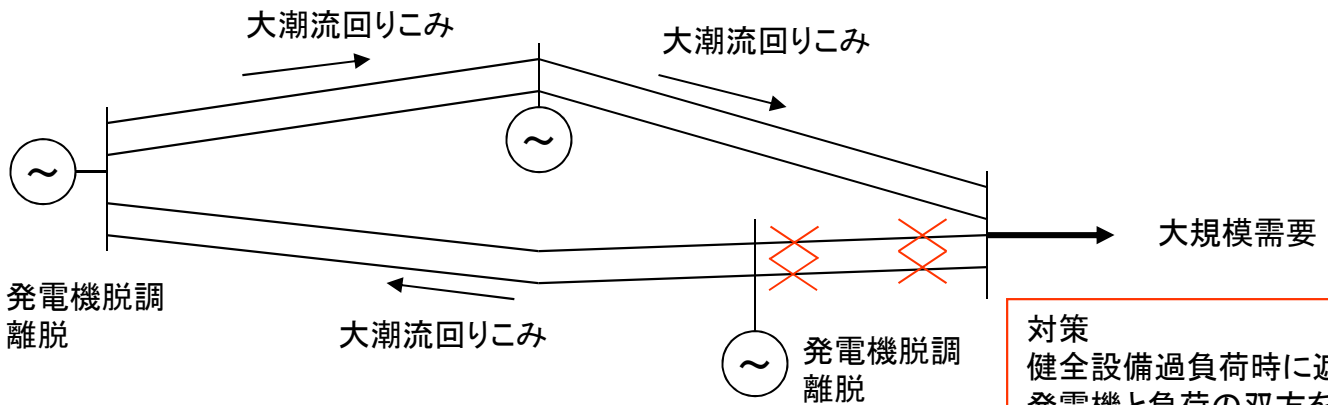
事前



事故



健全回線
過負荷遮断
あるいは
不安定化
→全系停電へ



対策
健全設備過負荷時に遮断せず、
発電機と負荷の双方を一部遮断

(3) 系統運用と電圧無効電力制御

無効電力とは 交流送電に付随するもので、本来送電したい電力(有効電力という)を送るとき、これに随伴して送受電端間を往復する電力(Reactive Power)で電圧維持に必要な電力である。

電力の需給バランスが崩れると周波数が変化するが、無効電力のバランスが崩れると電圧が変化する。無効電力が不足すると電圧が下がり、過剰になると電圧が上がる。

無効電力の

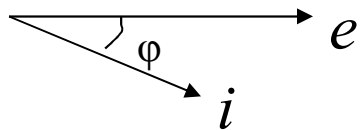
発生源は、線路の静電容量、コンデンサ、同期調相機、同期発電機など
消費者は、線路のリアクタンス、リアクトル、負荷、(同期調相機、同期発電機)、
誘導発電機など

無効電力のバランスを取るには、消費に見合う発生をできるだけ、近くで行う。
(無効電力の送電損失はきわめて大きい) $X \gg R$, $I^2X \gg I^2R$

電圧だけを調整するには、変圧器のタップ(巻数比)で行うことがもできるが無効電力のバランスを取った上でタップ調整するのが基本である。

通常、変電所の送り出し電圧の時間帯別目標値を定めて制御している。

正弦波交流の平均電力の計算



図のように、電流位相が電圧より ϕ だけ遅れている場合を考えます。

$$e = E_m \sin \omega t, i = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

$$p = ei = E_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \phi)$$

$$p = -\frac{E_m I_m}{2} \{ \cos(2\omega t - \phi) - \cos \phi \}$$

加法定理から、

$$= \frac{E_m I_m}{2} \{ \cos \phi - \cos(2\omega t - \phi) \}$$

$$= \frac{E_m I_m}{2} \{ \cos \phi - \cos 2\omega t \cos \phi - \sin 2\omega t \sin \phi \}$$

$$= \frac{E_m I_m}{2} \{ \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) - \sin \phi \sin 2\omega t \} \dots \dots (1)$$

$$\text{平均電力 } P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{周期}$$

$$\int_0^T \cos 2\omega t dt = \frac{1}{2} [\sin 2\omega t]_0^T = 0,$$

$$\int_0^T \sin 2\omega t dt = \frac{1}{2} [-\cos 2\omega t]_0^T = 0,$$

$$\therefore P = \frac{E_m I_m}{2} \cos \phi = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos \phi = E_e I_e \cos \phi \dots (2)$$

添字 m : 最大値、 e : 実効値

有効電力と無効電力

瞬時値を表す(1)式を再掲し、電圧、電流を実効値で表すと、

$$p = \frac{E_e I_e}{2} \{ \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) - \sin \phi \sin 2\omega t \}$$

$$= E_e I_e \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) + E_e I_e \sin \phi (-\sin 2\omega t)$$

$$= P(1 - \cos 2\omega t) + Q(-\sin 2\omega t) \dots \dots (3)$$

$$P = E_e I_e \cos \phi (\text{有効電力}), Q = E_e I_e \sin \phi (\text{無効電力})$$

$E_e = 4, I_e = 3, \phi = \frac{\pi}{6}$ のときの、

電圧、電流の瞬時値 および

$$p_a = P(1 - \cos 2\omega t) \dots \dots (4)$$

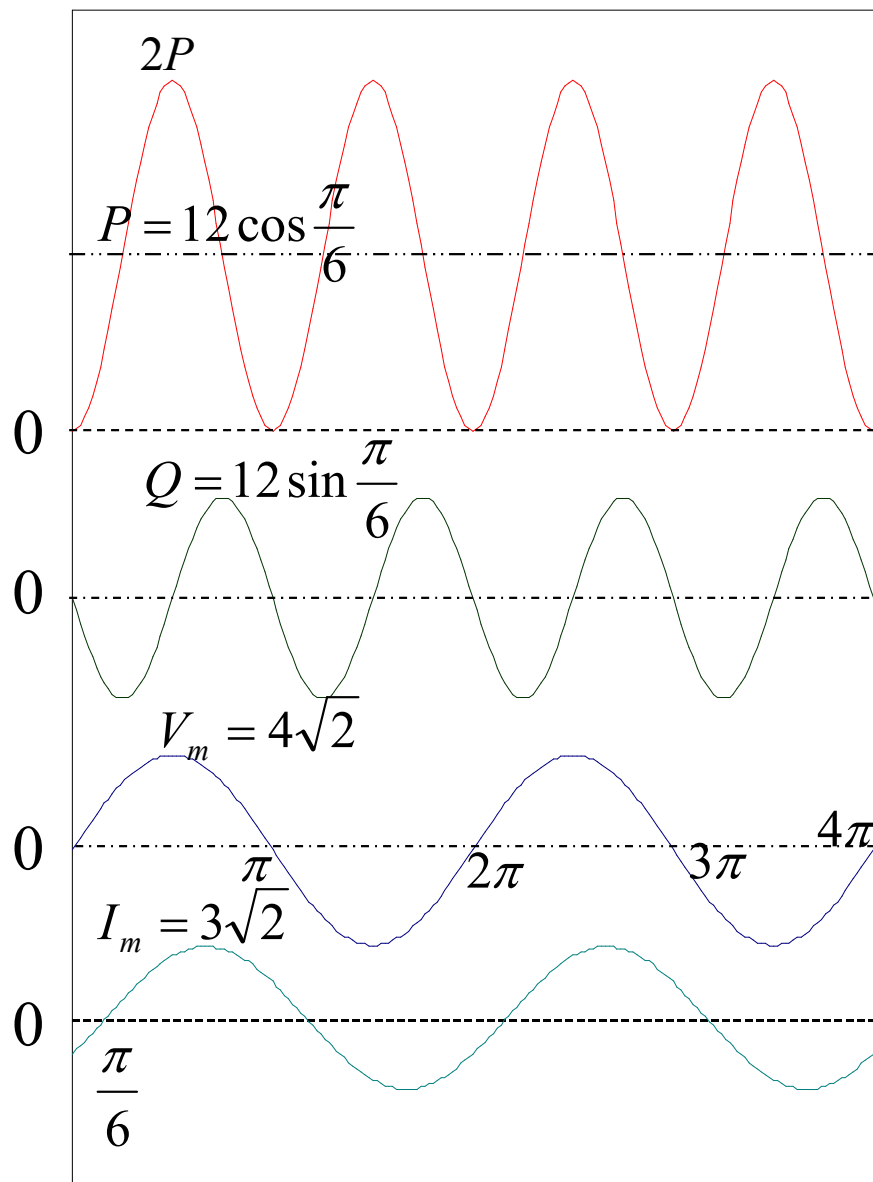
$$p_r = Q(-\sin 2\omega t) \dots \dots (5)$$

の値を計算した結果のグラフを次ページに示します。

p_a は、最小値が 0, 最大値が $2P$, 平均値が P
 p_r は、最小値が $-Q$, 最大値が Q 平均値が 0
 で、いずれも電圧の周波数の2倍の周波数の正弦波であることが分かります。

特に、 p_r (無効電力分) は、電源との間を往復する電力であること、 $\sin \phi = 0$ の時には現れないことが分かります。

次元は、いずれも電圧と電流の積として得られていますので電力の次元になります。



$$p_a = 12 \cos \frac{\pi}{6} (1 - \cos 2\omega t)$$

$$= P(1 - \cos 2\omega t)$$

有効電力の瞬時値

電源側から負荷に向かう電力で、電圧の倍周波の正弦波で増減する。振幅はP, 平均値はP

$$p_r = 12 \sin \frac{\pi}{6} (-\sin 2\omega t)$$

$$= Q(-\sin 2\omega t)$$

無効電力の瞬時値

+は電源側から負荷に、-は負荷側から電源に向かう電力で、振幅はQ, 平均は0
電圧の倍周波の正弦波

$$v = 4\sqrt{2} \sin \omega t$$

電圧の瞬時値

$$i = 3\sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right)$$

電流の瞬時値

(4) 異常電圧・電流制御

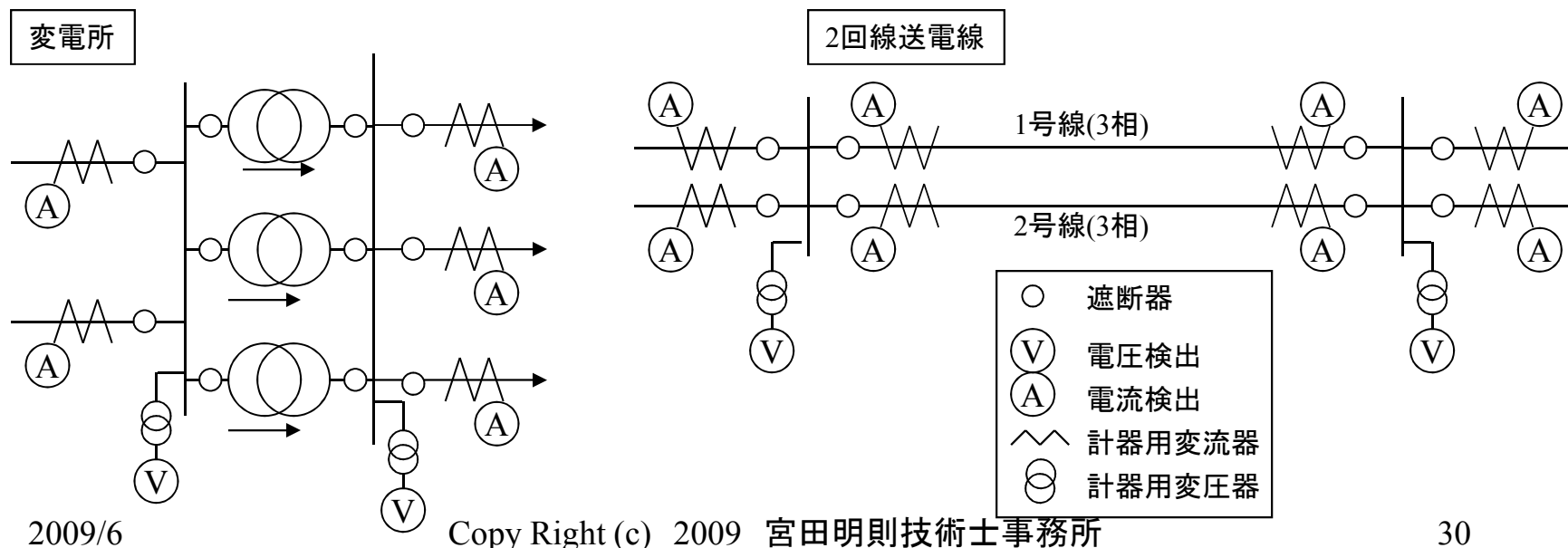
過電圧、不足電圧

過電圧は設備の寿命を消耗し、設備を破壊することもあるので、リレーで検出したら、状況に応じて、警報発出、切り離し等の処置を行うシステムとする。

不足電圧は、電源側回路の短絡などの異常の可能性があり、警報、切り離し等の処置を行うシステムとする。

過電流

過電流は受電側回路での短絡等の異常を示すので、リレーで検出したら、状況に応じて、警報発出、切り離し等の処置を行うシステムとする。



3. ネットワークセキュリティの確保

(1) 単純故障

(2) 多重故障

(3) 同期安定度と電圧安定性

(1) 単純故障 N - 1 ルール

- ・障害の影響の大きい上位系統では、単一設備事故で供給停止を生じないように計画健全設備の過負荷容量活用を許容。例 変圧器110%、送電線90°C→100°C
事故設備はリレー(保護継電器)により検出し、遮断器により速やかに切り離す。
- ・影響範囲の小さい配電系統事故では一時的な供給支障を許容するが、早期復旧できる構成とする。
高圧系統は自動切換え。配電自動化システム→リレー、自動化システムが動作。
末端系統は復旧まで停止。現地作業による仮供給を含めた供給回復

(2) 多重故障

- ・上位系統では、全系停電への移行を阻止する構成とする。
電源制限、負荷一部遮断など→系統リレー、転送遮断など
- ・配電系統事故では早期復旧に努める。

(3) 同期安定度と電圧安定性

同期安定度

主として系統事故によって、送電電力が急変した時、送電側発電機は軽負荷となり加速し、受電側発電機は重負荷となり減速する。事故が継続すれば、同期機間に脱調が生じる。→放置すれば全系停電、系統崩壊に至る。

対策 計画段階での検討により、送電線強化等の方策実施。

運用段階では事前検討により潮流減少策等を行う。脱調リレーによる系統分離措置

電圧安定性

主として送配電設備の重負荷化により、電圧調整装置が機能せず受電側電圧維持ができなくなることがある。

対策 計画段階での検討により、送電線強化、無効電力供給強化等の方策実施。

運用段階では事前検討により潮流減少策等を行う。リレーによる負荷遮断。

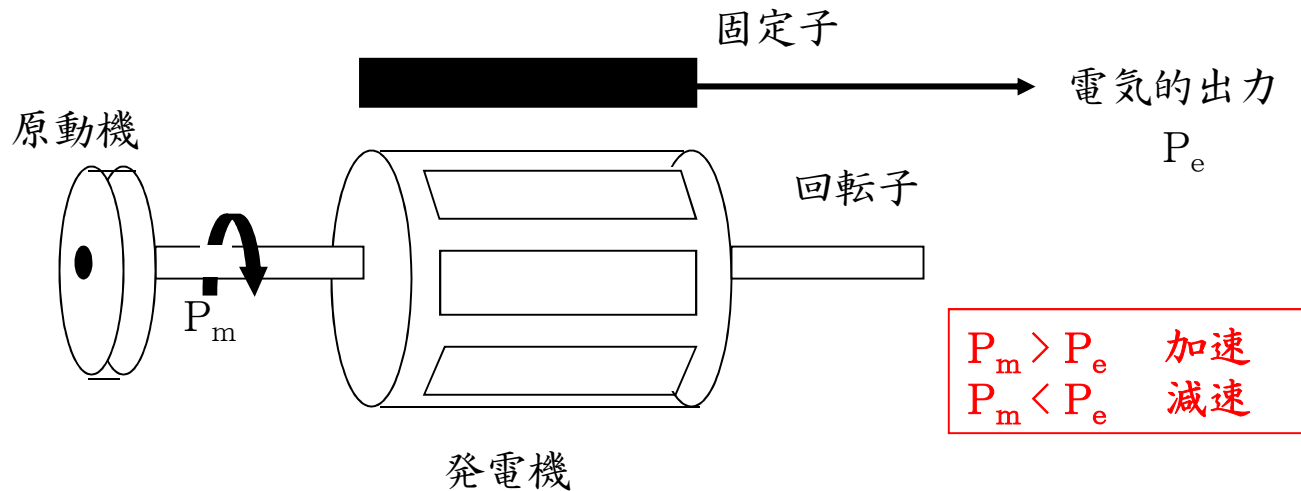
- ・ 同期(送電)安定度(脱調が起きるかどうかが)
 - 定態安定度(静的)
 - ・ 系統に微小擾乱を与えた時の安定度
 - 過渡安定度(1～2秒間の現象)
 - ・ 過渡リアクタンスの背後電圧一定時の安定度
 - 動態安定度(10秒以上)
 - ・ あらゆる制御装置が動作する時の安定度
- ・ 電圧安定性(電圧崩壊が起きるかどうかが)
 - 静的検討
 - 動的検討

- 同期安定度、送電安定度 同期機の機械的入力と電氣的出力の不均衡による動揺が起きたとき、脱調することがある。脱調するとき「不安定」、脱調しないとき「安定」という。

事故等の影響により加速、減速が生じ脱調が起きやすくなる。動揺してもいずれ安定化するとき安定、脱調してしまうとき不安定という。

簡略運動方程式 $J \cdot d^2\theta / dt^2 = T_m - T_e$ J : 慣性定数、両辺に角加速度 ω_m をかけて、
 $M d^2\theta / dt^2 = P_m - P_e$ 通常、 P_m は応答が遅く、 P_e は事故などの電気現象で瞬時に変化するので過渡的に入出力差が生じこれがロータを加速、減速する。

詳細には、 $M d^2\theta / dt^2 + D d\theta / dt + K\theta = P_m - P_e$ 慣性定数+制動項+同期化力



・電圧安定性

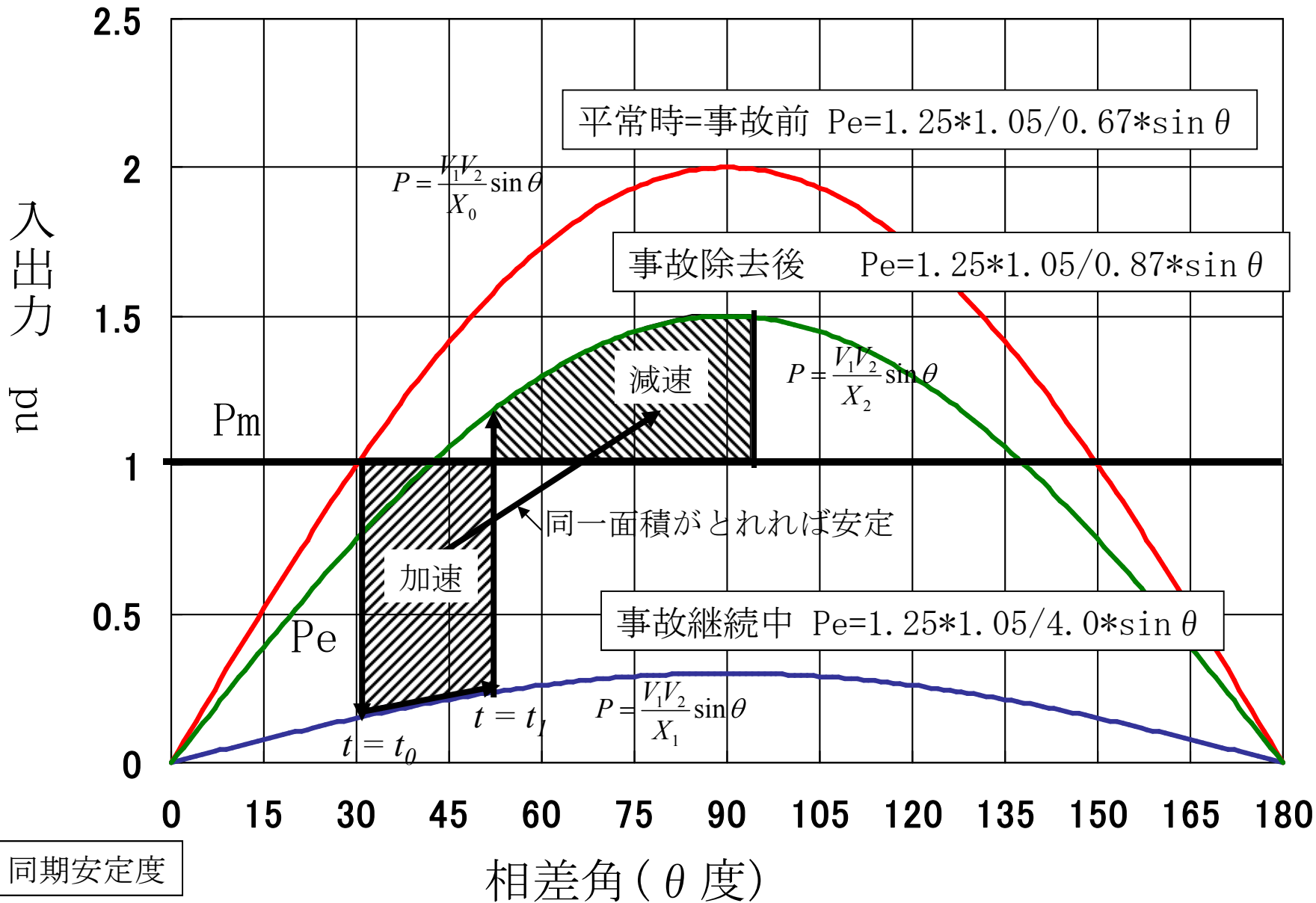
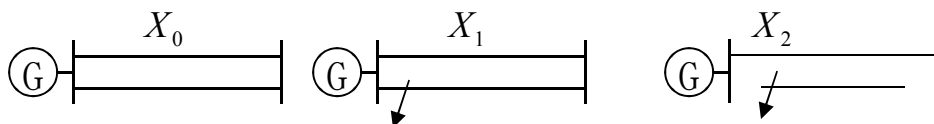
-負荷の増加で無効電力のバランスが崩れ、電圧が崩壊することがある。

対策→リアクタンスの減少 並列回路増加

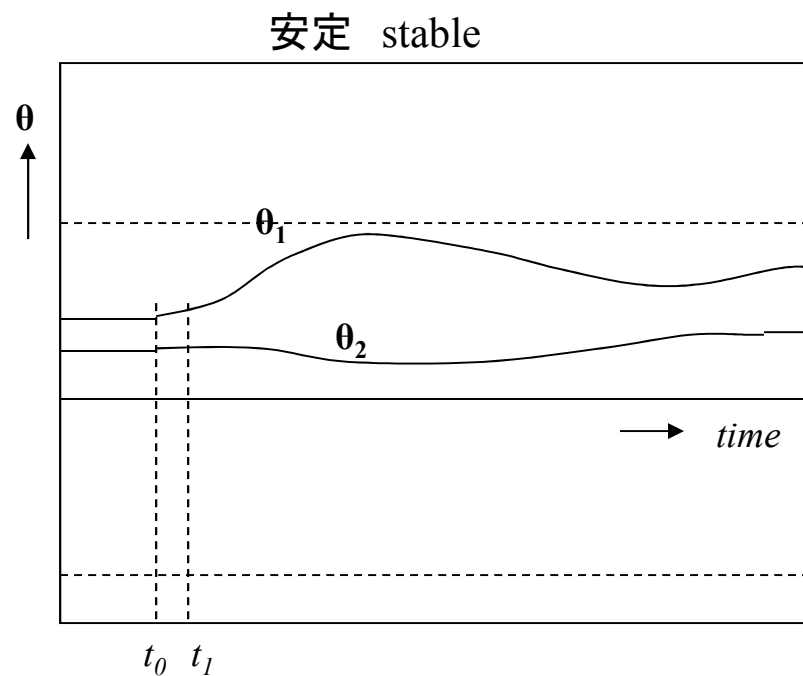
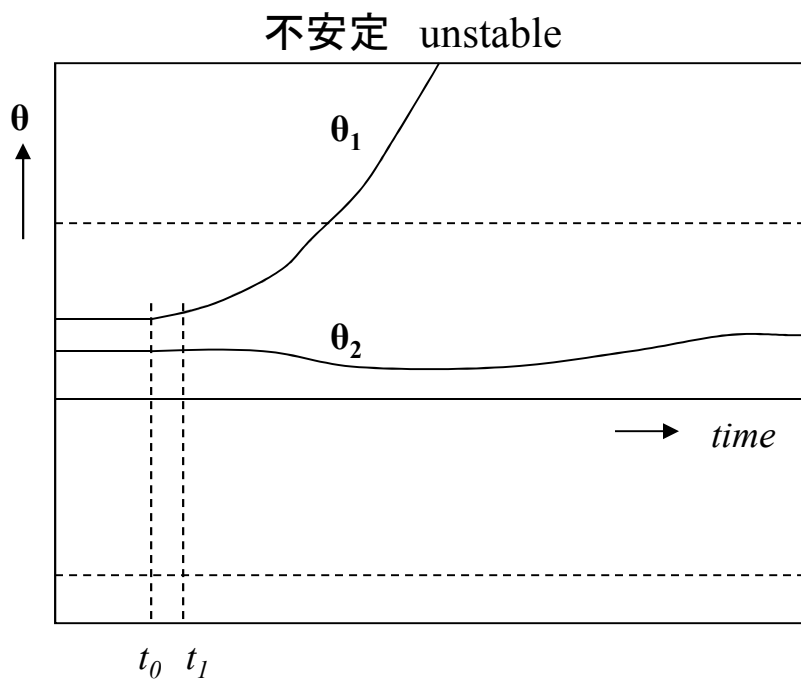
→無効電力供給源の増加 SC, 同期調相機, SVC, SVG

→電圧・無効電力制御装置の高速化、高度化など

2回線送電線の1回線事故の例
通常、 $X_0 < X_2 < X_1$ である。



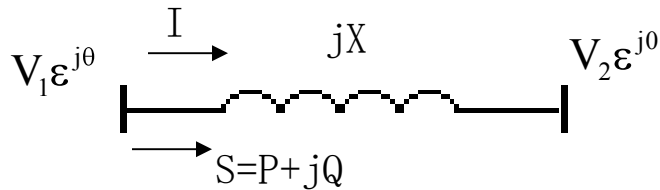
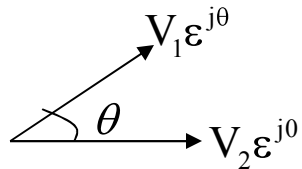
相差角動揺曲線の例 Swing curves



t_0 : 事故発生時刻

t_1 : 事故除去時刻

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \text{ の導出}$$



V_2 を基準ベクトルとし、送電系統の基準容量ベースのリアクタンスを X とすれば、

$$I = \frac{V_1 \varepsilon^{j\theta} - V_2}{jX},$$

$$S = P + jQ = V_1 I^* = V_1 \varepsilon^{j\theta} \times \frac{(V_1 \varepsilon^{-j\theta} - V_2)}{-jX} = j \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \varepsilon^{j\theta}}{X}$$

$$= \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta + j \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \theta}{X}$$

$$\therefore P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \approx \frac{V_1 V_2}{X} \theta$$

V_1, V_2 はほぼ定格電圧で運転されるから一定と見

なせば $\left(100\% = 1.0 \text{ per unit} = 1.0 \left[\frac{\% \text{値}}{100} \right] \right)$,

$XP \approx \theta$ となる。

安定度向上方策

安定度を向上させるには、

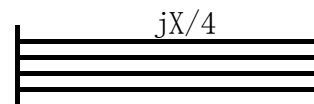
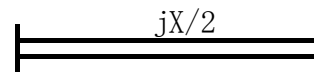
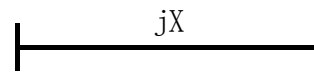
1. 送受電端間の相差角 θ を小さくする。
2. 加速エネルギー $P_m - P_e$ を小さくする。
3. 慣性定数 $I \rightarrow M$ を大きくする。
4. 事故除去後の送電電力を大きくする。
制動効果を付加する。

などの方策がある。

1. 送受電端間の操作角 θ を小さくする方策

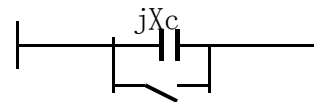
① 並列回路を増やす

1回線 \rightarrow 2回線 \rightarrow 4回線



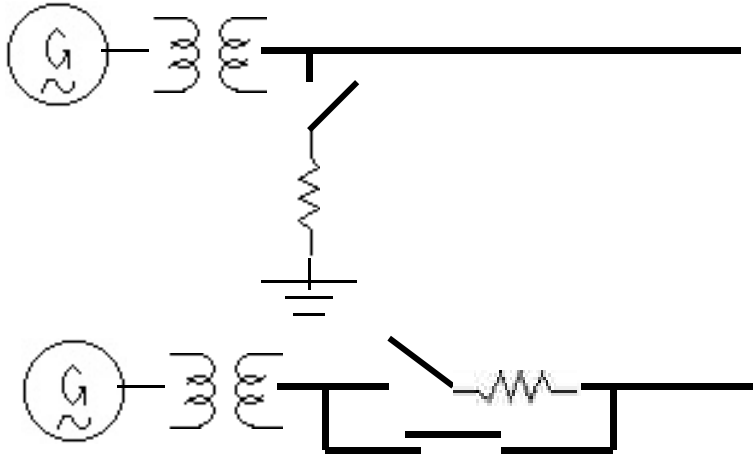
② 直列コンデンサを挿入する

$$j(X - X_c)$$



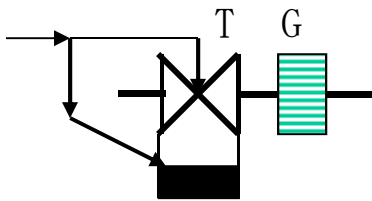
2. 加速エネルギー $P_m - P_e$ を小さくする方策

① P_e を大きくするため発電機側に 抵抗を挿入 する。



② P_m を急速に下げる

→タービンバイパス制御

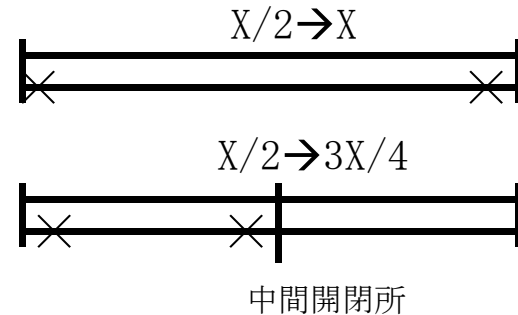


3. 慣性定数 $J \rightarrow M$ を大きくする。

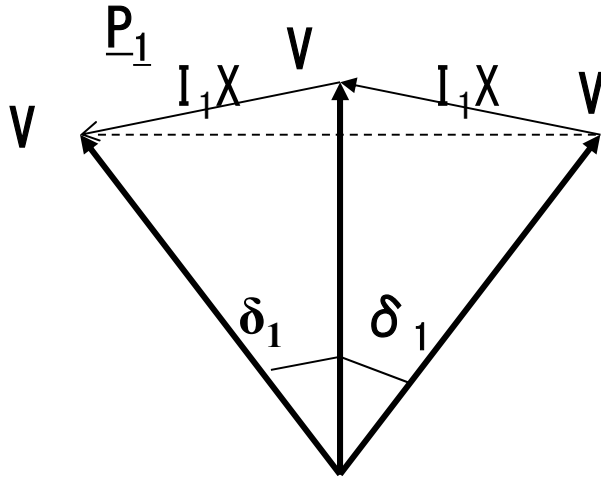
- ① フライホイール付加する。
- ② J 、 M を大きく設計する。

4. 事故除去後の送電電力を大きくする。

- ① PSSの設置(制動効果:長周期動揺対応)
加速エネルギーが増加しようとするときに励磁が強まり電圧が上がり、送電量 P_e が増加するように制御する
(PSS:Power System Stabilizer)
- ② 高速励磁装置
- ③ 電圧維持装置の設置
SVCなど
- ④ 急速位相制御の導入
- ⑤ 中間点の電圧維持(次ページ)
- ⑥ 中間開閉所の設置

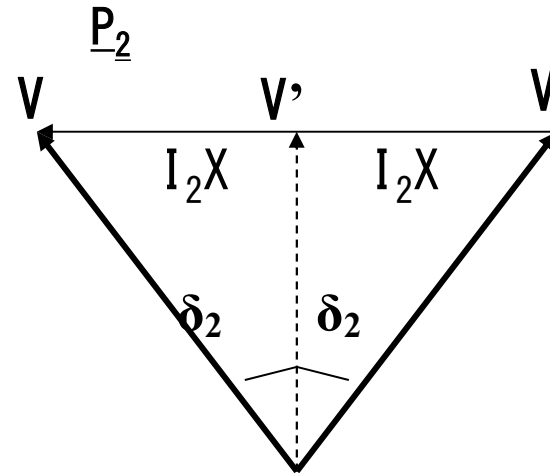


中間点の電圧維持、相差角の縮小(中間機効果)



$$P_1 = (V^2/X) * \sin \delta_1$$

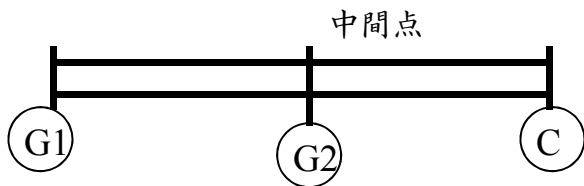
($\cos \delta_2 < 1$ であるから,
 $\delta_1 = \delta_2$ なら $P_1 > P_2$,
 $P_1 = P_2$ なら $\delta_1 < \delta_2$.)



$$P_2 = (VV'/X) * \sin \delta_2$$

$$= (V^2/2X) * \sin 2\delta_2$$

$$= (V^2/X) * \sin \delta_2 * \cos \delta_2$$



参考 電圧安定性

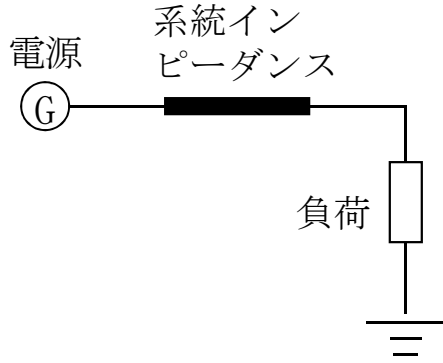


図 1

左図の系統で負荷を増加させると電圧と負荷との関係は右図のようにノーズ (横向きのVカーブ) 状となるノーズの先端より大きな電力は送れない。タップ切換え装置など電圧制御系はこの曲線の上側の垂下特性を前提に作られているためノーズ先端より下では電圧は急速に低下し、送電不能となる

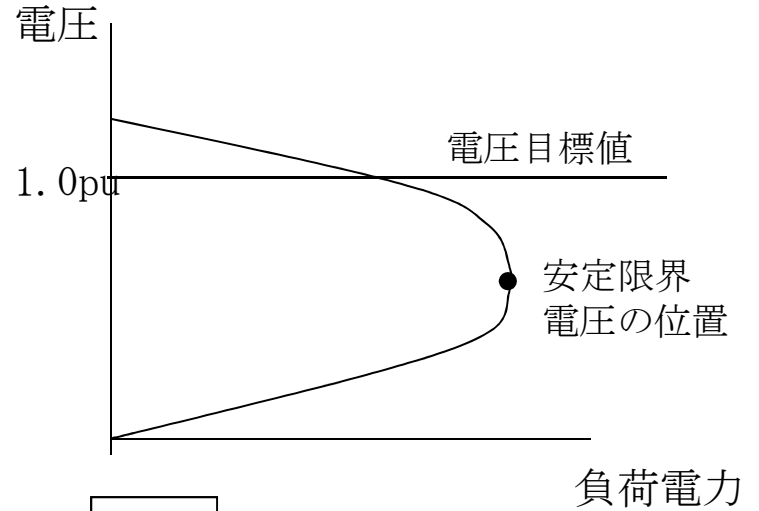


図 2

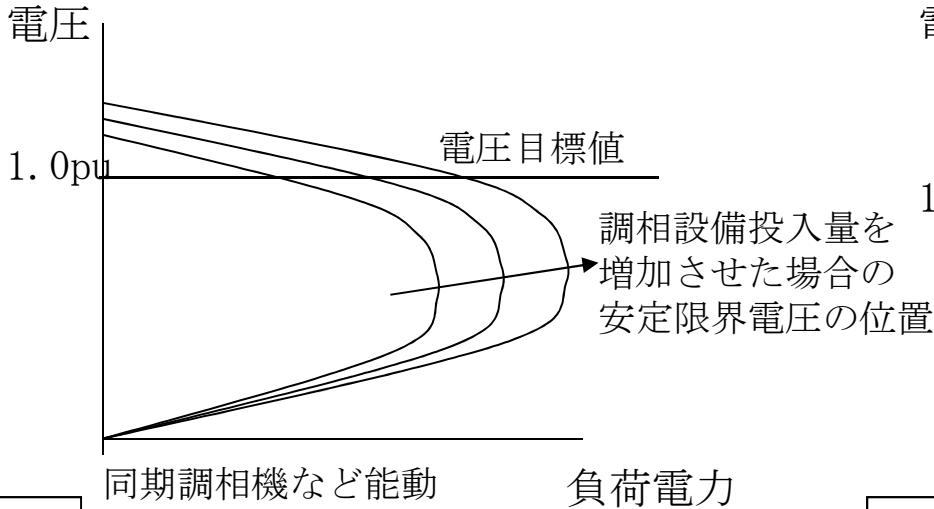


図 3

同期調相機など能動素子の場合にはノーズ先端の上昇が緩慢

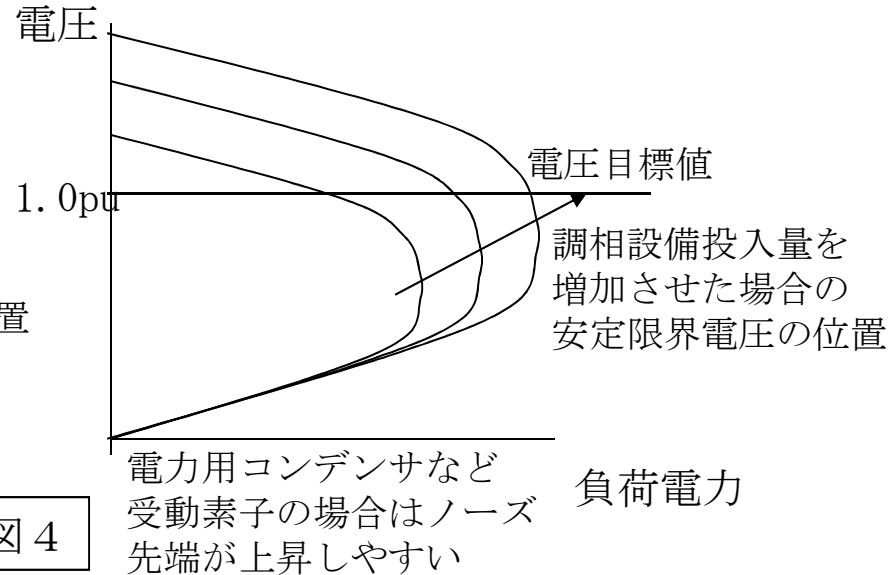
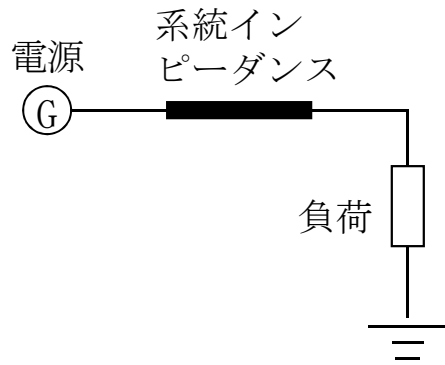


図 4

電力用コンデンサなど受動素子の場合にはノーズ先端が上昇しやすい

参考 電圧安定性向上方策



左図の系統で

(1) 系統インピーダンスを減らす

そのためには、同期安定度向上方策と同様
並列回路の増加、直列コンデンサ設置などを行う。

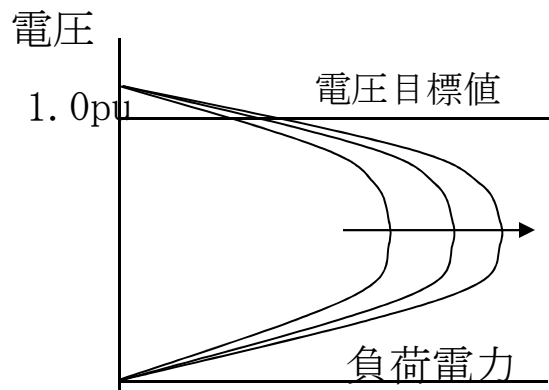
(2) 無効電力供給設備の増設

前頁の図3、図4のようにノーズ先端が右に移動する。ただし図4のように安定限界電圧が上昇するのは避ける。

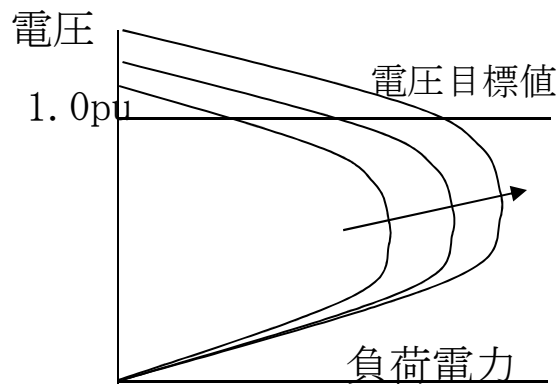
→同期調相機設置や上記(1)の系統インピーダンス減少対策を実施

(3) 電圧無効電力の制御方式の改善

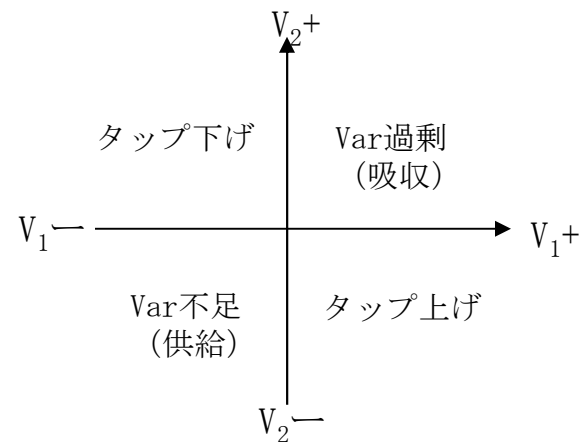
無効電力バランスを修正するのか、タップ位置の修正をするのかを適正に判断して制御する。調相設備全量投入後はタップをロックするなど負荷や系統状況に応じた補正が可能になるようにする。



(1) 系統インピーダンス減少の効果



(2) 無効電力供給設備増加の効果



(3) 制御装置イメージ
 V_1 一次電圧、 V_2 二次電圧