03/03/06　第2回成果報告会

電力自由化における系統制御に関する研究

先端電力工学 (東北電力) 寄附講座
M2　黒沢　信人

背景と目的

電力自由化の進展

↓

アンシラリーサービスの制御のあり方の検討が重要

- 周波数制御　　予備力
- 電圧･無効電力制御　　調相容量配置

↓

制御系を含めた潮流計算が必要

↓ 実際の系統では制約条件が多い

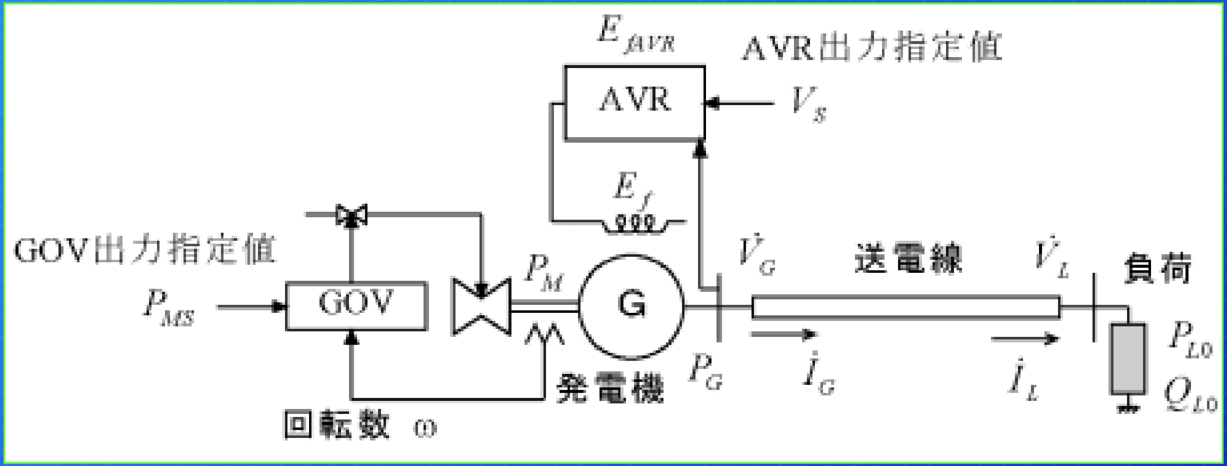
制約下での最適な制御条件を求める手法の開発

制御系・負荷特性を含めた潮流計算

電力系統の系統制御について検討

電中研報告　「発電機特性と負荷特性を考慮した汐流計算」

以降「N潮流計算法」と呼ぶ



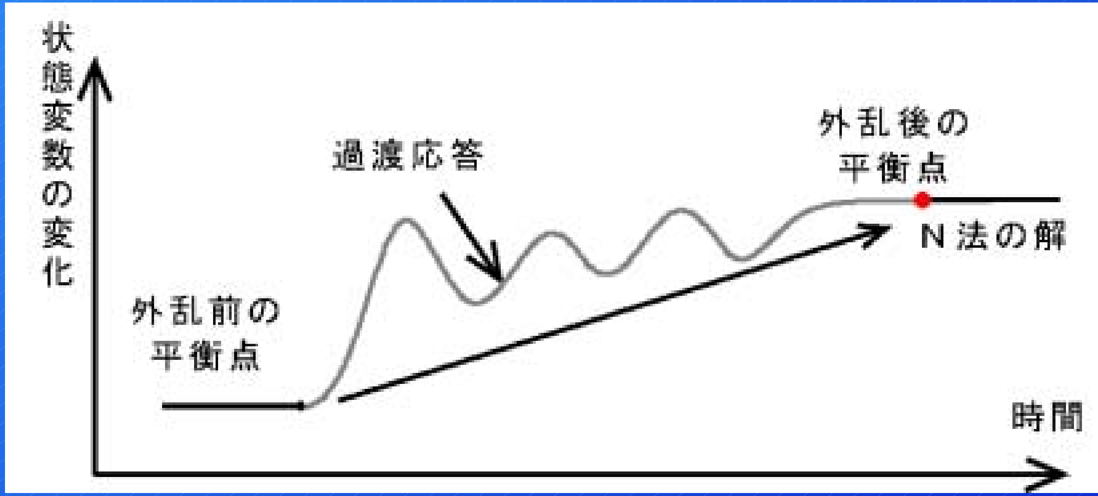
発電機制御系と負荷特性が含まれた潮流計算法

系統の実運用状態に即した潮流断面が得られる

N潮流計算法の特長

系統周波数が変数

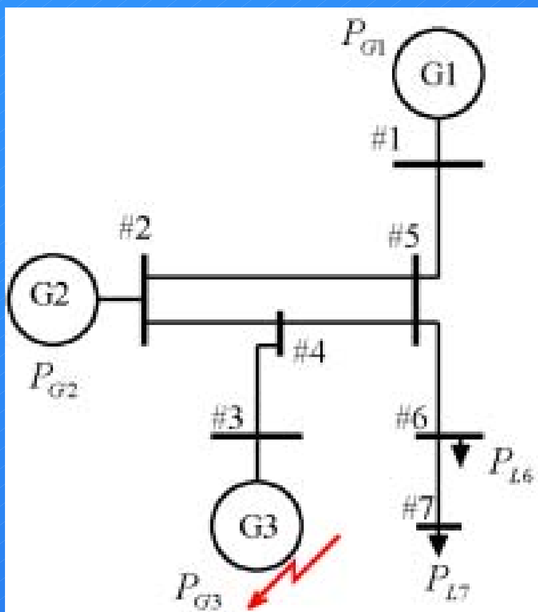
従来スラック母線が吸収していた有効電力
ミスマッチ分を、周波数変化として吸収する



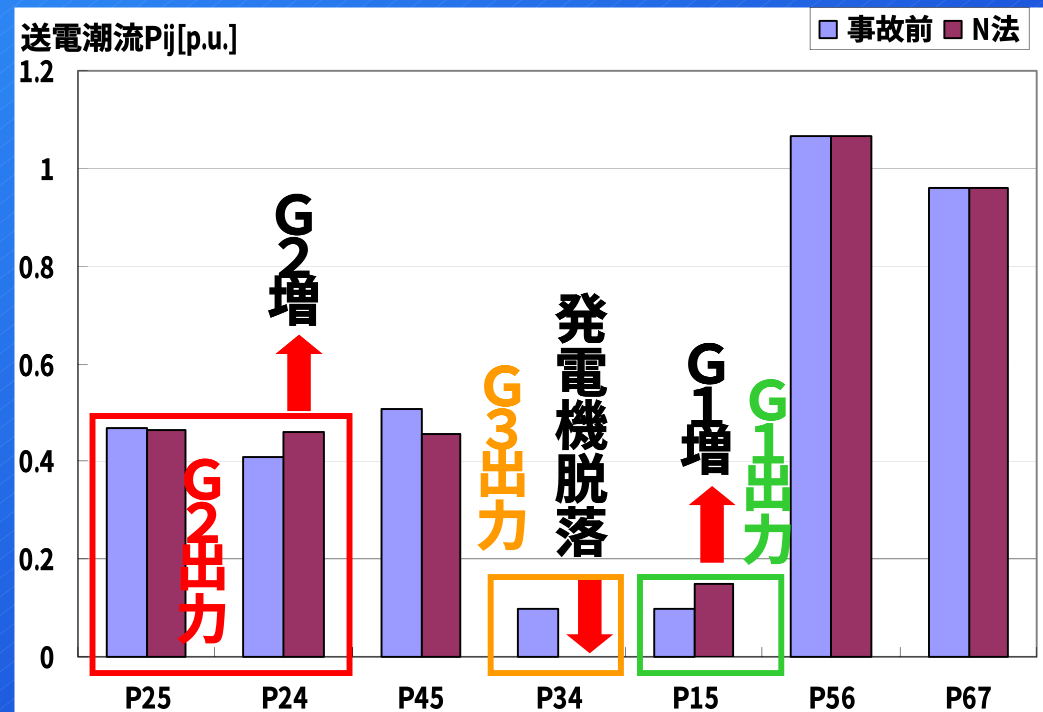
外乱等を与えた際の平衡点を
過渡応答を無視して瞬時に計算できる

N潮流計算法の計算例

発電機3(0.1[p.u.])が脱落した場合　　事故前の潮流



発電機脱落



周波数　1.0000[p.u.] → **0.9981[p.u.]**

周波数の変化を含めて、事故時の
潮流状態を求めることができる

最適潮流計算の必要性

N法では事故時の潮流状態を求めることが可能

実際の系統では
制約条件が多い

制約条件を満たす事故潮流状態を求めるには
試行錯誤が必要

想定される事故に対して制約の範囲で

適切に制御できる運転点を定める手法が必要

N潮流計算法を最適潮流計算にして検討

最適潮流計算 (OPF)

電力系統における多様な条件を考慮し、ある問題設定に対して最適な電力の流れを実現する電力系統をセッティングする手法

等式制約 (潮流方程式) $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$

不等式制約 (変数の領域制限) $\mathbf{g}_{\min} \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{g}_{\max}$

制約を考慮

目的関数の最小化

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min$$

$$f_{COST}(\mathbf{x}) = \sum \left(\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2\right)$$

$$f_{LOSS}(\mathbf{x}) = \sum \left|P_{ij} + P_{ji}\right|$$

Lagrangeの未定乗数法によるLagrange関数の最小化

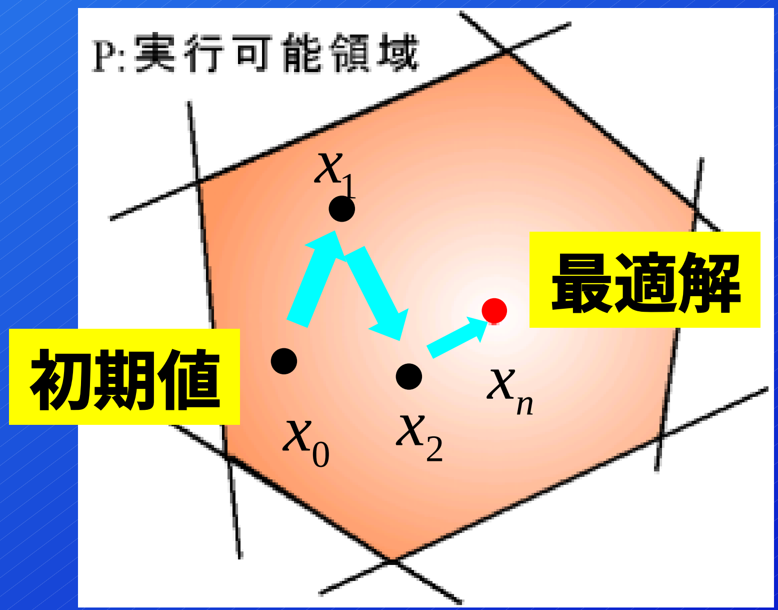
OPFの解法

内点法を利用

OPFの解法

変数	解法	
有効電力	線形計画法	
	2次計画法	
電圧など	非線形計画法	逐次線形計画法
		縮約勾配法
		準ニュートン法
		ニュートン法
		主双対内点法

大規模な非線形最適化問題で、
現時点で最も効率的に解ける手法



実行可能領域の内点の点列を
最適解に収束させる

開発したOPF (N-OPF) の概要1

目的関数	燃料費総和の最小化
変数	発電機母線電圧 負荷母線電圧 系統周波数 GOV出力指定値 AVR出力指定値
不等式制約条件	上記変数の上下限制約 送電線潮流上下限制約

新たに変数に設定

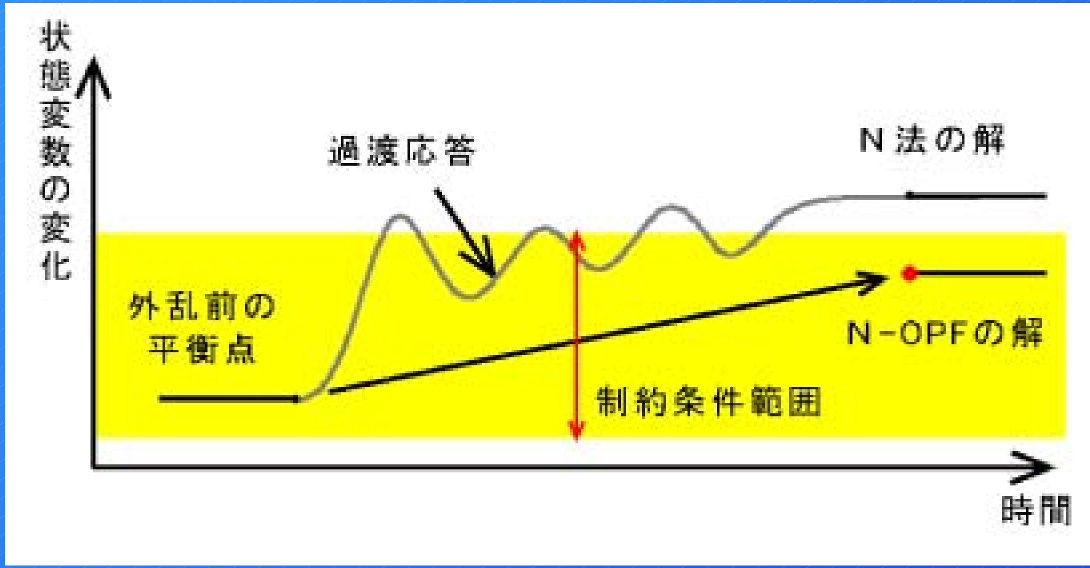
発電機制御系の最適な運転点の検討

GOV出力指定値の範囲を、事故前の値より±5~15%程度の範囲だけに限定

予備力

想定事故に対して必要な予備力計算が可能

N-OPFの概要2



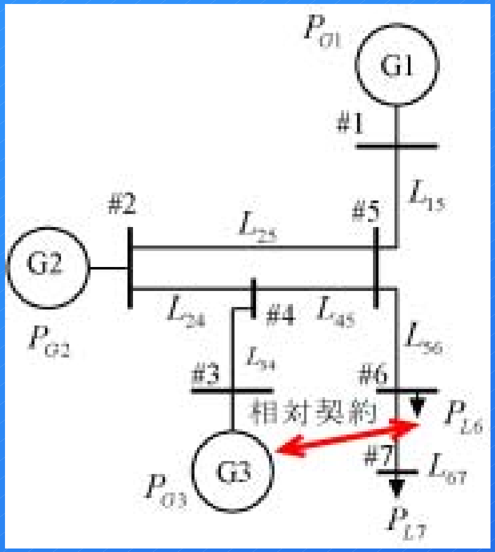
N法では外乱後の
解が得られる

解には制約の範囲がある

運転点を最適に変更

事故時においても制約条件を満たす最適な潮流状態が得られる

シミュレーション方法



- 7母線3発電機2負荷モデル
- 発電機3（PPS）と負荷6が相対契約
- 発電機3は一定出力
- G1：燃料費高　G2：燃料費低
- 周波数制約

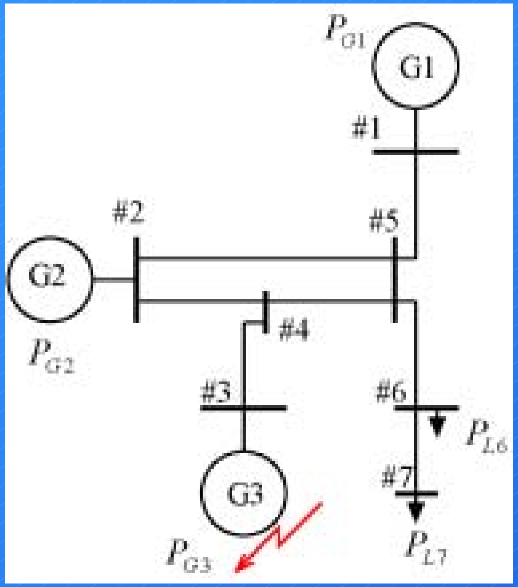
  1.0±0.002[p.u.]　(50.0±0.1[Hz])

事故前：燃料費最小の潮流分布（ELD計算）

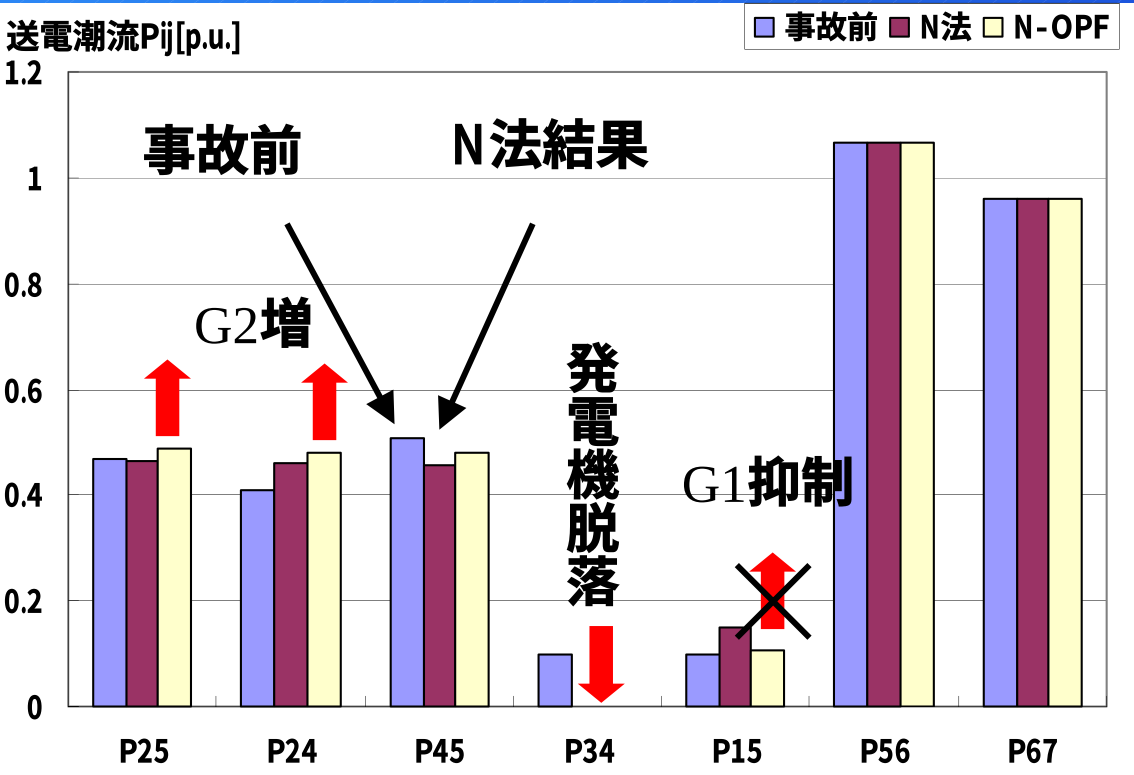
N法での事故後の潮流 （事故前の運転点を維持）	比較 ⇔	N-OPFでの事故後の潮流 （最適な運転点を変更）

発電機脱落事故時1

発電機脱落時の潮流変化



発電機3の脱落



周波数 1.0000[p.u.]

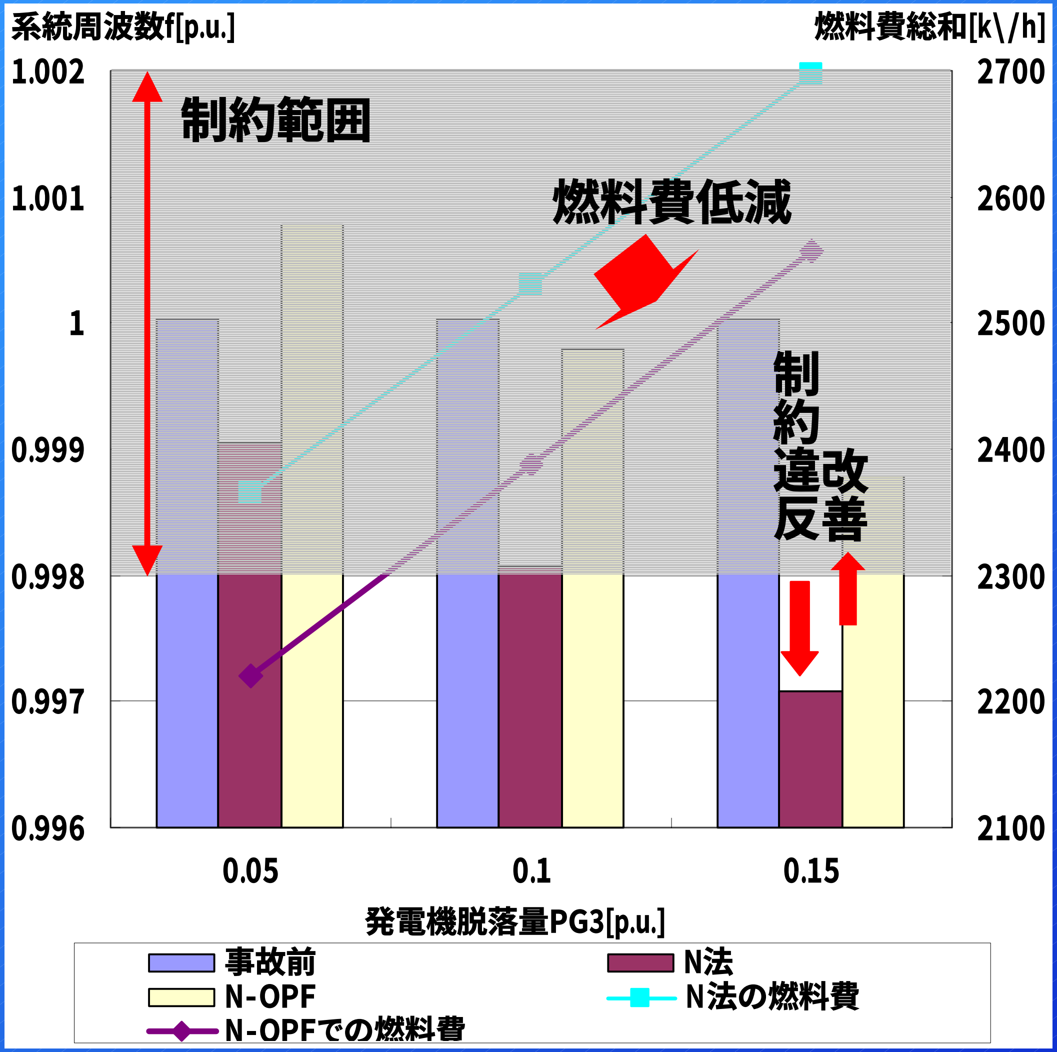
N法 0.9981[p.u.]

N-OPF **0.9998[p.u.]**

事故時に燃料費の安いG2の発電力を増加させて、G1の出力を抑えている

発電機脱落事故時2

発電機脱落量と周波数の関係

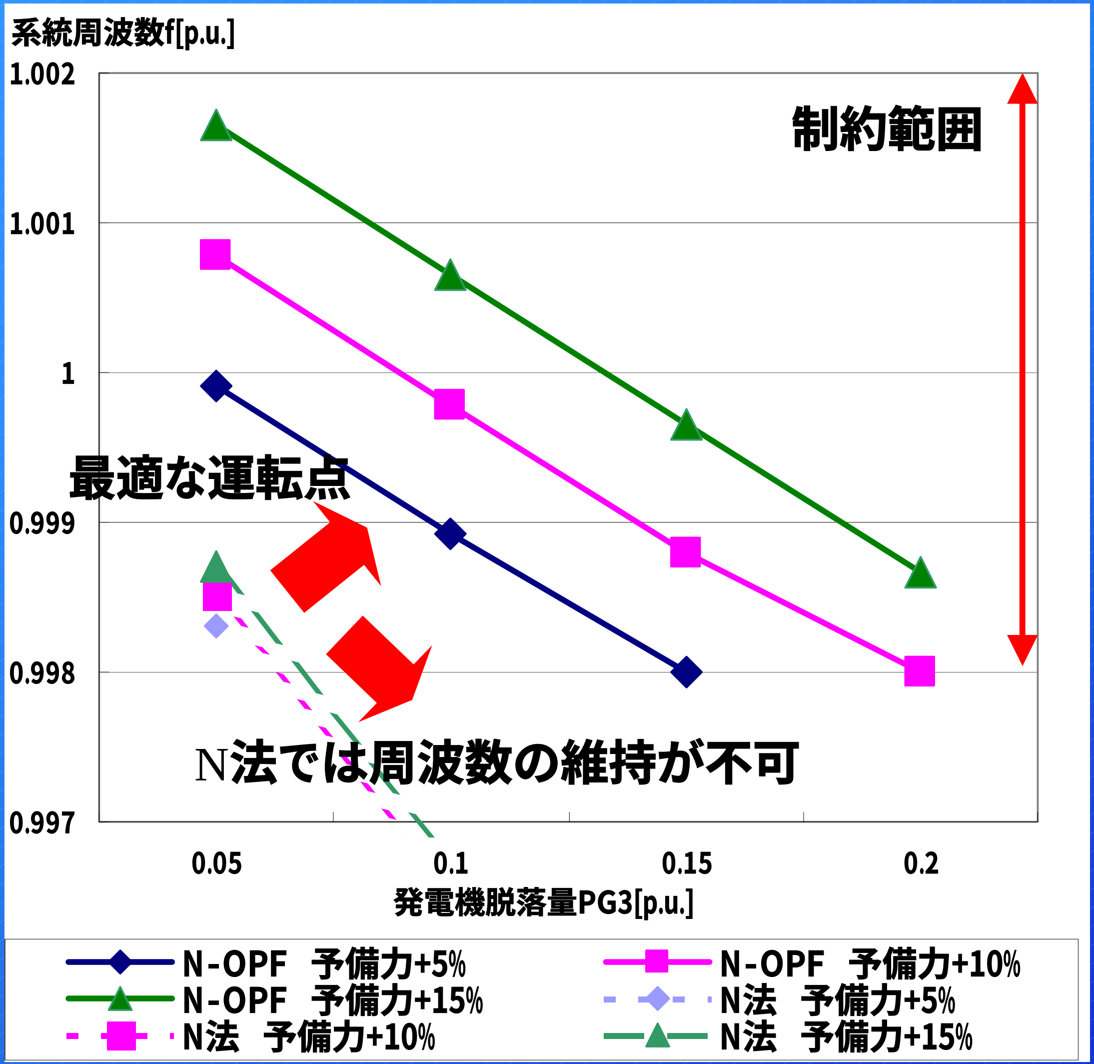


脱落量が多くなるにしたがって、現運転点での周波数維持が難しくなる

N-OPFの運転点変更により制約範囲内かつ燃料費が安く計算される

発電機脱落事故時3

予備力と周波数変化の関係

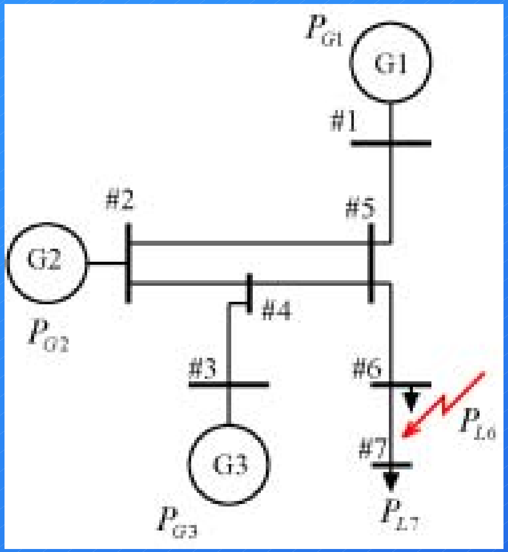


N-OPFではある適切な運転点で脱落事故後も周波数を維持できる

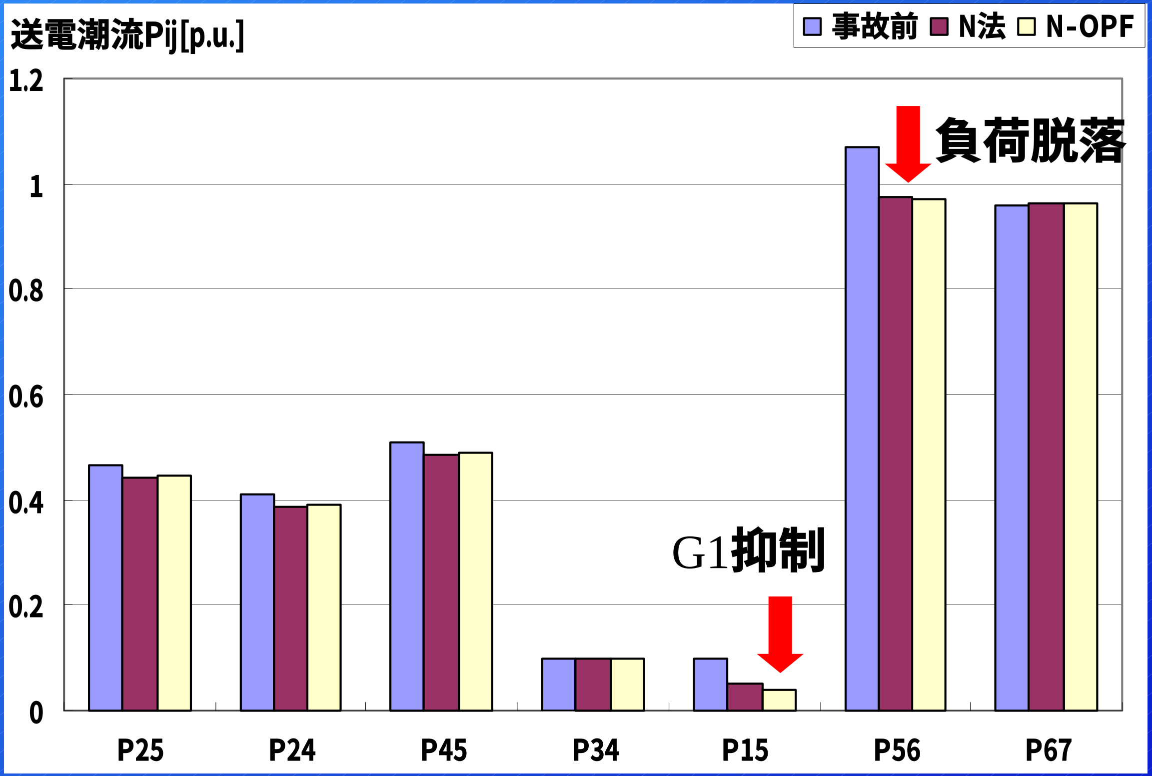
N-OPFでは現有予備力における最適な運転点を求めることが可能

負荷脱落事故時1

負荷脱落時の潮流変化



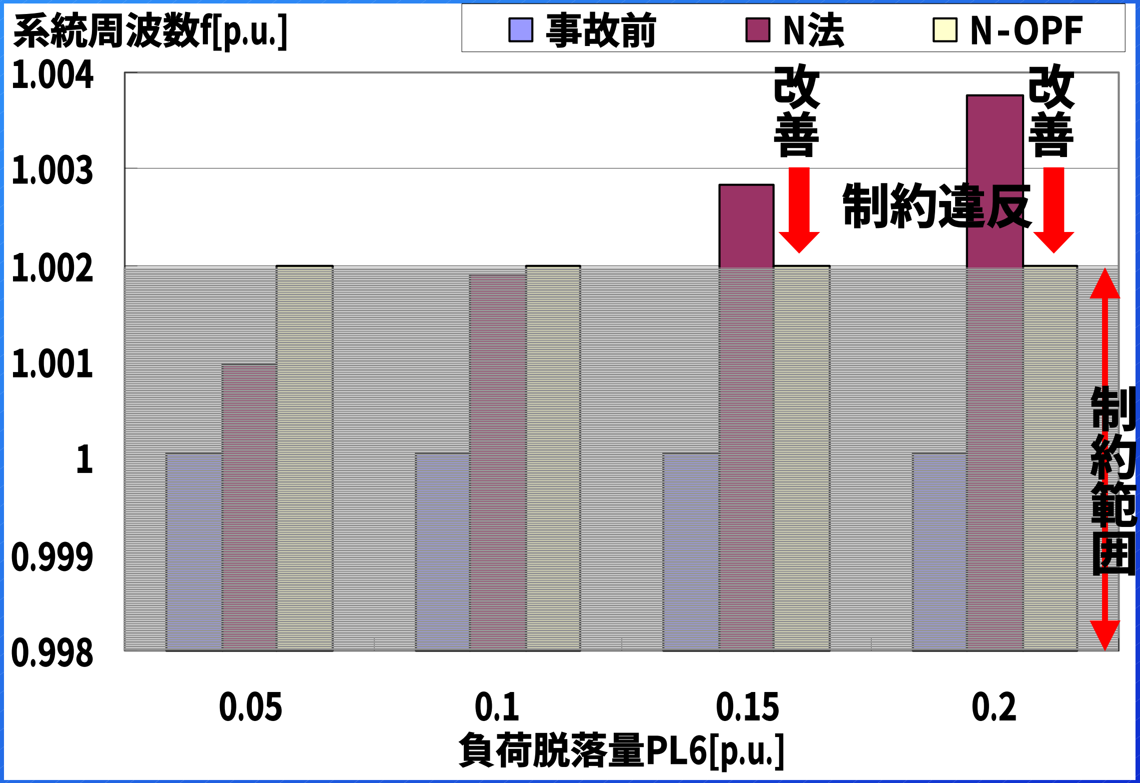
負荷6の脱落



電力が余ってしまうため、発電機1の出力を下げ、燃料費を低減させている

負荷脱落事故時2

負荷脱落量と周波数の関係



負荷脱落の場合にも周波数制約を遵守する運転点が求められる

まとめ

新しい最適潮流計算 (N-OPF) を開発した

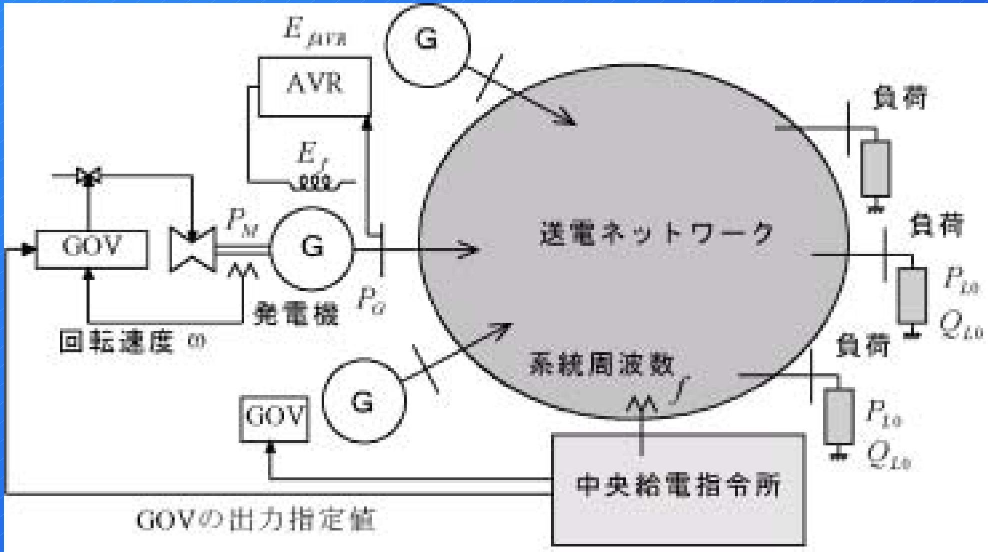
- 発電機特性と負荷特性を考慮
- 制約条件：電圧、系統周波数、潮流
  GOV･AVR出力指定値

↓

制約下において、制御系の最適な運転点の計算が可能となった

電力系統の制御

電力を安定に供給するために目的に応じた制御システムがある



電力系統の制御 (本研究の範囲)

1. **周波数制御**　GOV・LFC
2. **電圧制御**　AVR・**調相設備・変圧器タップ切換**

従来法との比較

N潮流計算法と従来の潮流計算法の比較

	N潮流計算法	従来の潮流計算法
指定値	GOV･AVRの出力指定値 負荷の有効電力･無効電力	PV指定 PQ指定
ミスマッチ量	＜発電機ノード＞ 有効電力･界磁電圧 ＜負荷ノード＞ 負荷電流	有効電力 無効電力
変数	母線電圧 系統周波数	母線電圧
特長	GOV･AVR･負荷特性が考慮 周波数が変数 スラック母線が不要	スラック母線が必要

系統の実運用状態に、より即した潮流断面を得ることができる

OPFの定式化

目的関数を最小化 ⇒ Lagrangeの未定乗数法による Lagrange関数の最小化

Lagrange関数

$$L(\mathbf{p}) = f(\mathbf{x}) - {}^t\boldsymbol{\lambda}\mathbf{h}(\mathbf{x}) - {}^t\mathbf{z}\left[\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \mathbf{g}_{\min}\right] - {}^t\mathbf{w}\left[\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \mathbf{g}_{\max}\right] - {}^t\tilde{\mathbf{z}}\mathbf{l} - {}^t\tilde{\mathbf{w}}\mathbf{u}$$

Kuhn-Tuckerの最適条件

$$f(\mathbf{x}) \to \min \quad \Longrightarrow \quad \frac{\partial L(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{0}$$

この最適化問題を、**内点法**を利用して解く

N-OPFの定式化

N潮流計算法 ⇒ 最適潮流計算にする (N-OPF)

N潮流計算法の等式制約

発電機特性

$$P_G = V_{GR} I_{GR} + V_{GI} I_{GI}$$

$$E_f = \frac{\cos\delta \cdot V_{GR} + \sin\delta \cdot V_{GI}}{f} + x_d \left(\sin\delta \cdot I_{GR} - \cos\delta \cdot I_{GI}\right)$$

発電機制御系特性

$$P_M = -G\left(f - f_S\right) + P_{MS}$$

$$E_{fAVR} = E_S - A_V\left(\left|\dot{V}_G\right| - V_S\right)$$

送電線電流

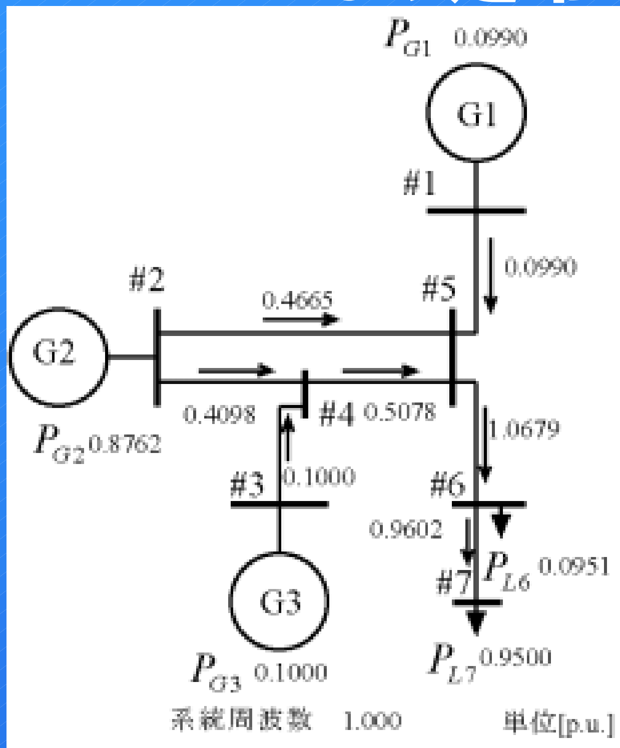
$$\dot{I}_L = I_{LR} + jI_{LI} = \dot{Y}_{LG}\dot{V}_G + \dot{Y}_{LL}\dot{V}_L$$

負荷電流

$$\dot{I}_L'^{*} = I'_{LR} - jI'_{LI} = \frac{P_L}{\dot{V}_L} + j\frac{Q_L}{\dot{V}_L}$$

定常時の燃料費最小潮流

N-OPFにより定常時の燃料費最小時の潮流を

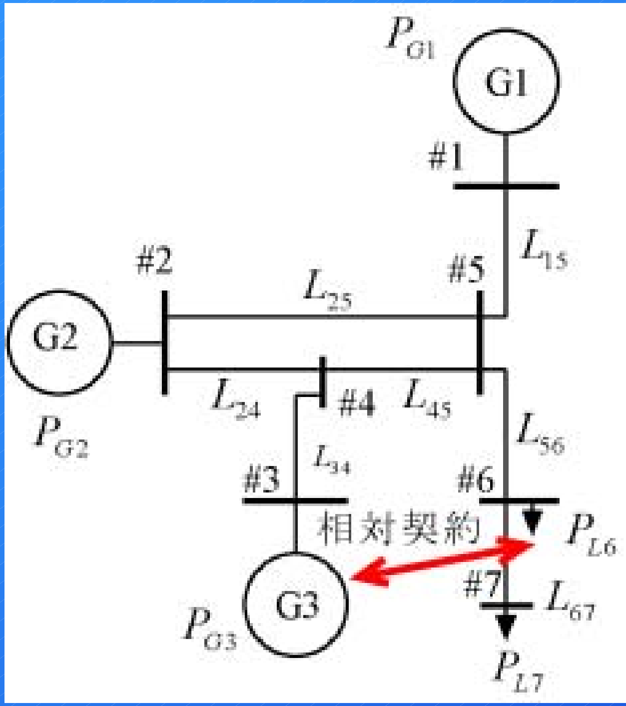


	燃料費総和[k¥/h]
最適化前	2392.9
最適化後	2196.6

N潮流計算法のみの場合より燃料費が低廉な運転点が求められた

この潮流状態を事故前の潮流状態とする

シミュレーション系統と条件

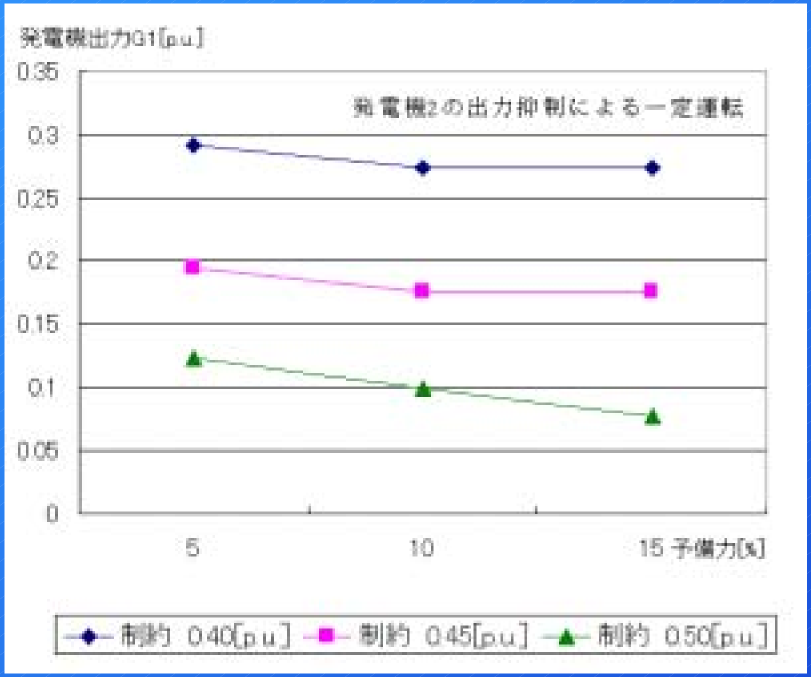


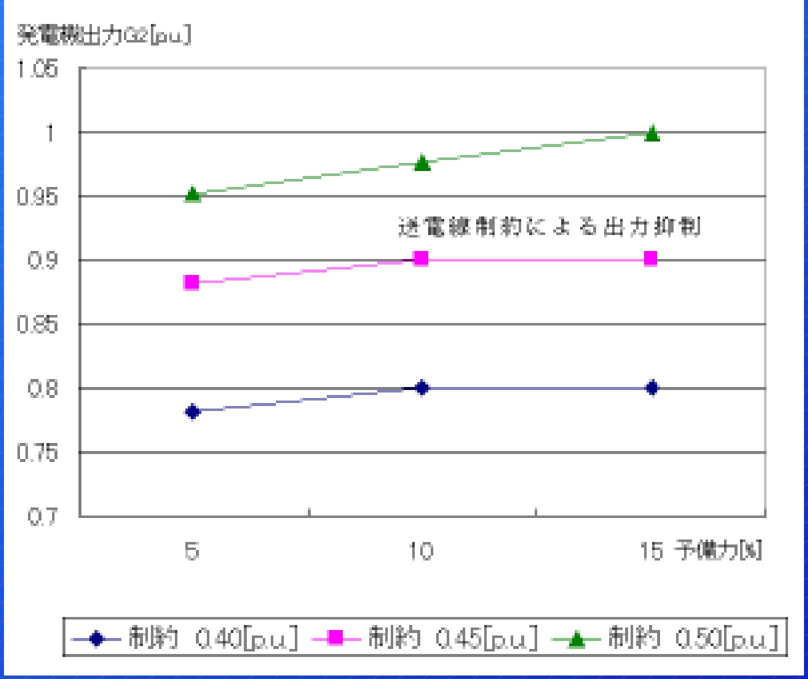
- 7母線3発電機2負荷モデル
- 増分燃料費：発電機1→高い
  発電機2→低い
- 系統周波数制約
  1.0±0.002[p.u.]
  (50±0.1[Hz])
- 発電機3 (PPS) と負荷6が相対契約
- 発電機3は一定出力

発電機脱落事故時3

予備力と送電線制約と発電機出力の関係

L25,L24,L45の送電線制約を変化

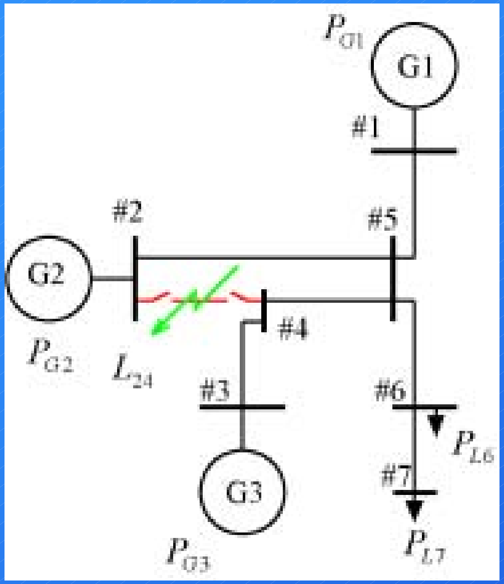




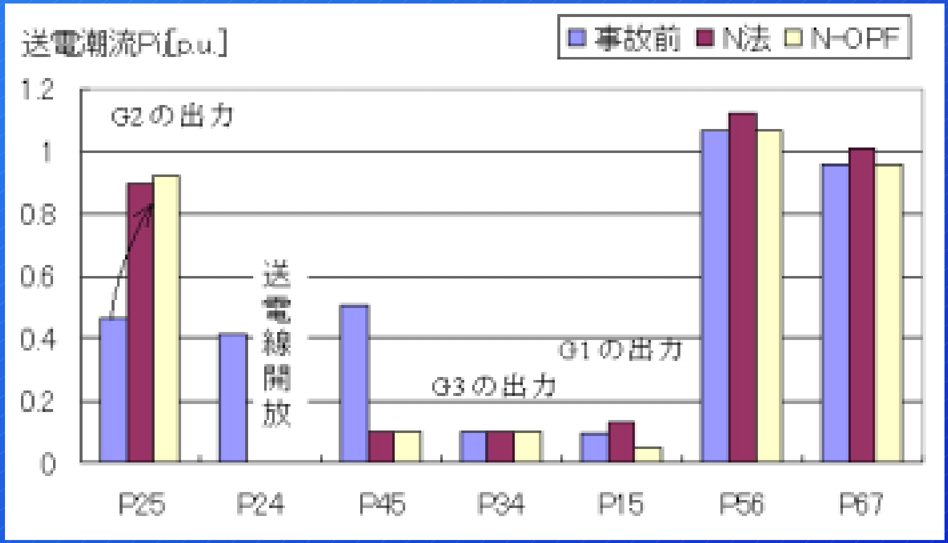
予備力を増加させてもG2の出力が送電線制約に抵触するため、燃料費の高い発電機1が出力される

送電線開放時1

送電線開放時の潮流の変化



送電線24の開放

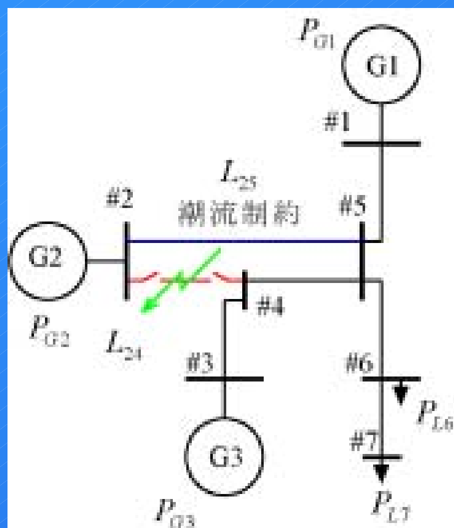


送電線開放時には、L24に流れていた電力がL25に流れ込む

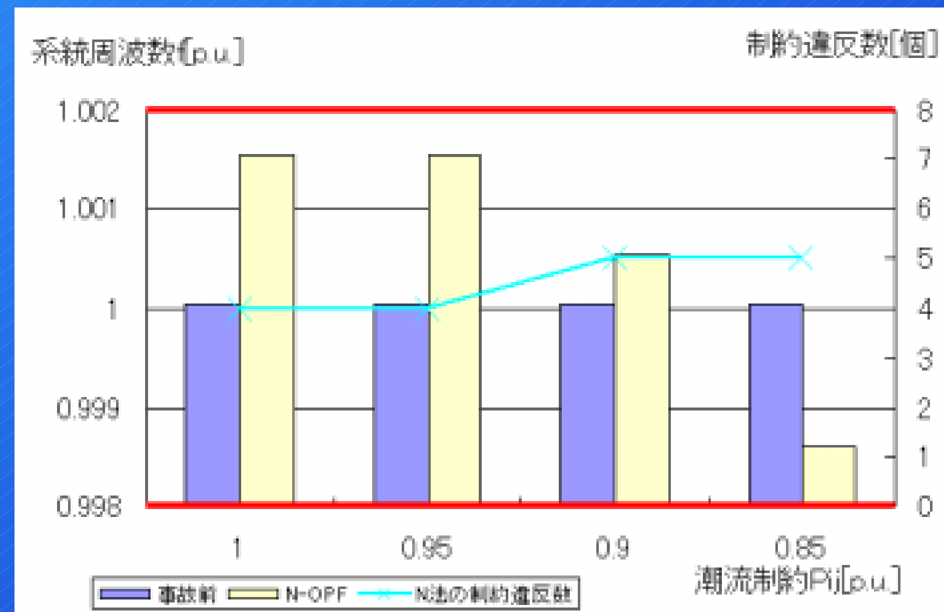
L24で流れていた潮流がなくなったため、L45はG3の出力のみ潮流になる

送電線開放時2

潮流制約と周波数の変化



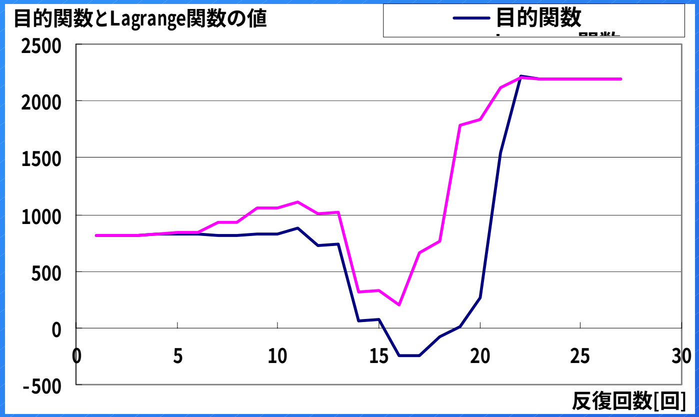
送電線25の潮流制約変化

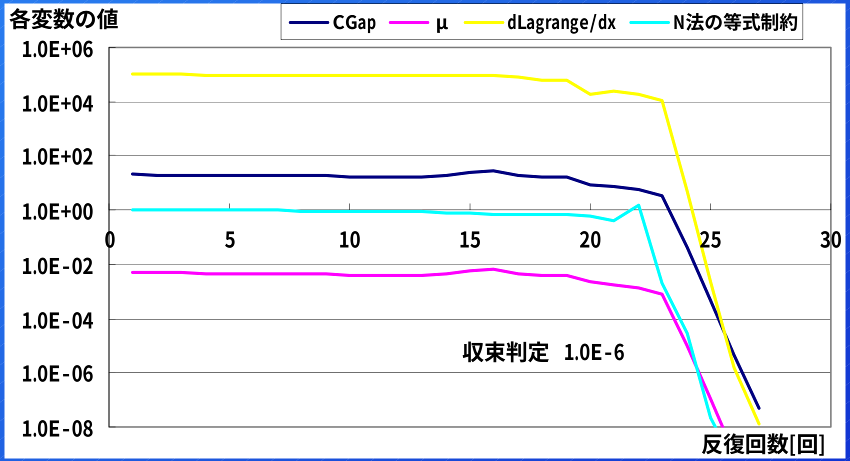


L25の制約を厳しくしていくと、電力が送電しにくくなるので、周波数が低下していく

N潮流計算法では、制約違反が増加していくが、N-OPFでは、制約違反なしの最適な制御状態で運転している

N-OPFの収束性


目的関数とLagrange関数の値
目的関数
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
0
5
10
15
20
25
30
反復回数[回]


各変数の値
CGap
μ
dLagrange/dx
N法の等式制約
1.0E+06
1.0E+04
1.0E+02
1.0E+00
1.0E-02
1.0E-04
1.0E-06
1.0E-08
0
5
10
15
20
25
30
収束判定 1.0E-6
反復回数[回]

まとめ

- 系統事故時の電圧･周波数･潮流･予備力制約を考慮しながら目的関数を最小化する最適潮流計算 (N-OPF) を開発した
- このN-OPFを用いることにより、不安定な電源が増加する懸念がある電力自由化において、制約条件を遵守しつつ、現有予備力における適切な運転点を求めることが可能になった

開発したOPF (N-OPF) の概要1

目的関数	燃料費総和の最小化
変数	発電機母線電圧 負荷母線電圧 系統周波数 GOV出力指定値 AVR出力指定値
不等式制約条件	上記変数の上下限制約 送電線潮流上下限制約

新たに変数に設定

GOV出力指定値の範囲を、事故前の値より±5~15%程度の範囲だけに限定

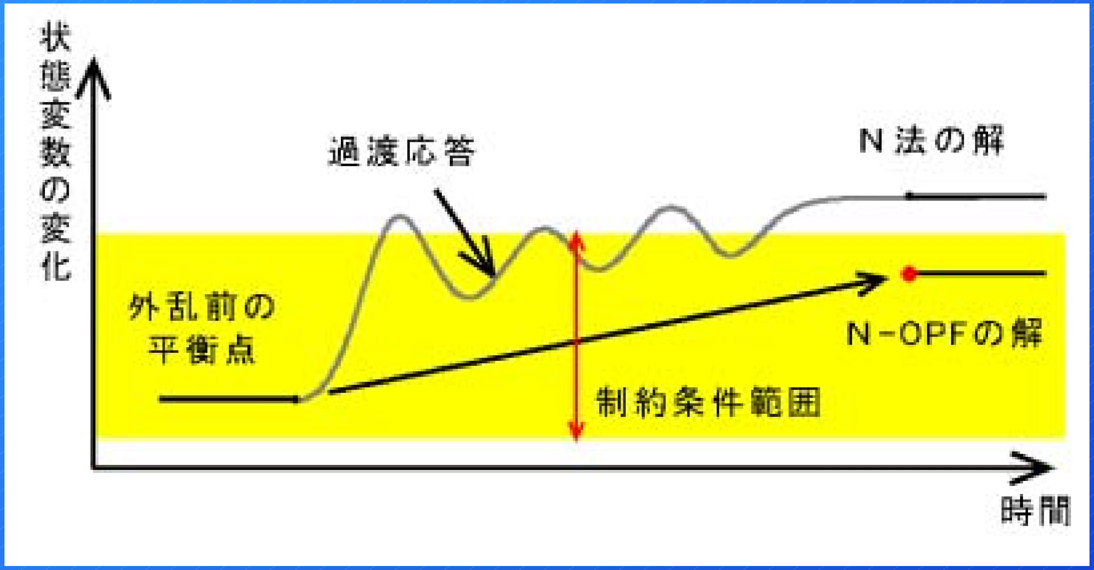
↓

これを予備力とする

N-OPFの概要2

GOV・AVRの出力指定値を変数

発電機制御系の最適な運転点の検討



運転点を最適に変更

事故時においても制約条件を満たす最適な潮流状態が得られる

想定事故に対して必要な予備力計算が可能

最適潮流計算 (OPF)

電力系統における多様な条件を考慮し、ある問題設定に対して最適な電力の流れを実現する電力系統をセッティングする手法

目的関数の最小化

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min$$

$$f_{COST}(\mathbf{x}) = \sum \left(\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 \right)$$

$$f_{LOSS}(\mathbf{x}) = \sum \left| P_{ij} + P_{ji} \right|$$

Lagrangeの未定乗数法によるLagrange関数の最小化

目的関数が最適化されるときの変数xの条件

等式制約 (潮流方程式)

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

不等式制約 (変数の領域制限)

$$\mathbf{g}_{\min} \le \mathbf{g}(\mathbf{x}) \le \mathbf{g}_{\max}$$

開発したOPF（N-OPF）の概要1

目的関数	燃料費総和の最小化
変数	発電機母線電圧 負荷母線電圧 系統周波数 GOV出力指定値 AVR出力指定値
不等式制約条件	上記変数の上下限制約 送電線潮流上下限制約

新たに変数に設定

GOV･AVR出力指定値を変数

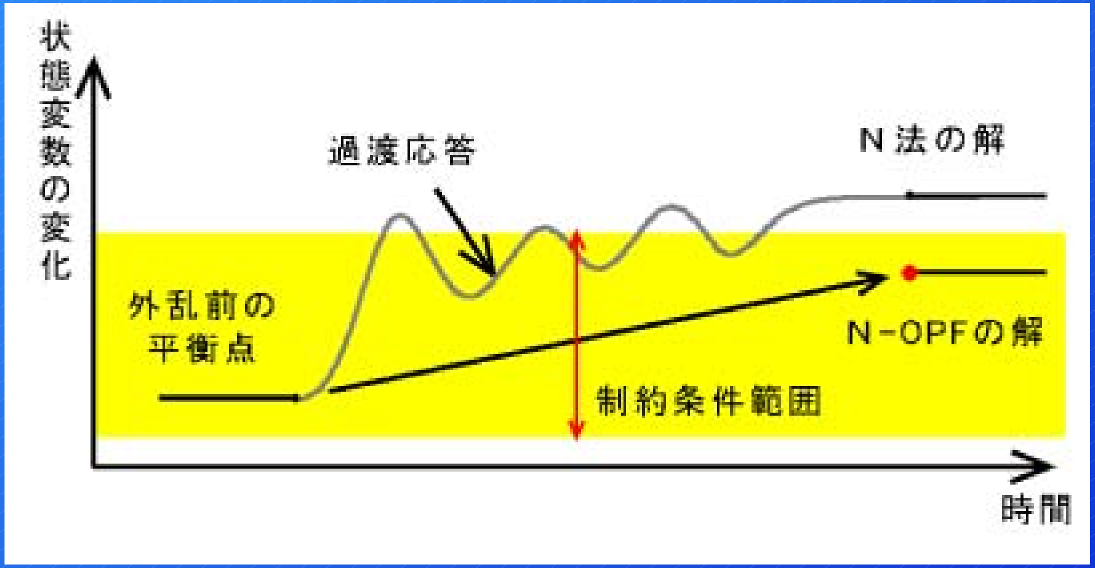
発電機制御系の最適な運転点の検討

N-OPFの概要2

GOV出力指定値の範囲を、事故前の値より±5~15%程度の範囲だけに限定

予備力

想定事故に対して必要な予備力計算が可能



運転点を最適に変更

事故時においても制約条件を満たす最適な潮流状態が得られる